

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS FABRICADAS
COM AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO RCD MELHORADOS COM UM ADITIVO
POLIMÉRICO**

LUIS ANGEL MORENO ANSELM

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D.

**CO-ORIENTADOR: HUGO ALEXANDER RONDON QUINTANA,
Ph.D.**

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD- 199/2024

BRASÍLIA/DF: junho/ 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS FABRICADAS
COM AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO RCD MELHORADOS COM UM ADITIVO
POLIMÉRICO**

LUIS ANGEL MORENO ANSELM

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

APROVADA POR:

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, Ph.D. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**HUGO ALEXANDER RONDON QUINTANA, Ph.D. (Universidad Distrital Francisco
Jose de Caldas)
(CO-ORIENTADOR)**

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, Ph.D. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, DSc. (UFCG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**WASHINGTON PERES NÚÑEZ, DSc. (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 24 DE JUNHO DE 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

ANSELMÍ, LUIS ANGEL MORENO

Comportamento de misturas asfálticas fabricadas com agregados de resíduos de construção e demolição RCD melhorados com um aditivo polimérico. [Distrito Federal] 2024.

XX, 294 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2024)

Tese de Doutorado-Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Resíduos de Construção e Demolição 2. Misturas Asfálticas

3. Polímero TERRAFIX 4. Misturas Asfálticas

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORENO, L.A (2024). Comportamento de misturas asfálticas fabricadas com agregados de resíduos de construção e demolição RCD melhorados com um aditivo polimérico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 294 p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DO AUTOR: Luis Angel Moreno Anselmi

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Comportamento de misturas asfálticas fabricadas com agregados de resíduos de construção e demolição RCD melhorados com um aditivo polimérico.

GRAU/ANO: Doutor/2024.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Luis Angel Moreno Anselmi
(e-mail: Luis.moremp@unimilitar.edu.co)
CLN 413, Bloco C, Apto. 102, Asa Norte.
Brasília, Brasil.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília por me proporcionar a oportunidade de realizar este doutorado e por todo o apoio prestado ao longo do processo. Um agradecimento especial ao CNPq pelo financiamento através da bolsa de estudos e ao COLFUTURO pela bolsa concedida, que foram essenciais para viabilizar este projeto. Também sou imensamente grato à Universidad Militar Nueva Granada pela oportunidade de estudo concedida através da comissão de estudos.

Quero expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Marcio Muniz de Farias, e ao meu coorientador e amigo, Hugo Alexander Rondon Quintana, pela orientação, suporte e inspiração ao longo de toda a jornada acadêmica.

Agradeço calorosamente ao grupo de cubanos, especialmente aos professores Carlos Recarey Morfa e Manuel Alejandro Castro, pela colaboração valiosa na modelação, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Meus agradecimentos se estendem aos técnicos envolvidos na realização dos ensaios, em especial a Sanderson de Souza Vieira, Everton Antonio Pereira e Amanda Assunção Rosa, cujo trabalho dedicado foi fundamental para os resultados alcançados.

Quero estender meu reconhecimento aos meus colegas Luis Alonso Gonzalez, Michael Andrey Vargas, Letícia Nunes Lopes, Marcone de Oliveira Junior e Debora Louyse Alpes, por serem amigos incríveis dentro e fora da universidade, e por compartilharem comigo momentos inesquecíveis ao longo dessa jornada acadêmica.

Expresso minha gratidão às empresas Fornecedora de Areias Bela Vista e Pedreira Contagem, bem como à empresa Waterflows, em especial ao diretor Newton Flavio Vasconcelos, pela contribuição e apoio significativos fornecidos durante a pesquisa.

Meus agradecimentos também vão para os colegas da Universidad Militar Nueva Granada e para todos os professores da Universidade de Brasília que contribuíram para a minha formação acadêmica.

Quero expressar meu mais profundo agradecimento à minha mãe, Ana Mariela Anselmi, e à minha irmã Ana Milena, que sempre estiveram ao meu lado com seu apoio incondicional. Agradeço também aos meus tios, Arnulfo Hely Rubio e Consuelo Anselmi, por suas orações e colaboração constante. Além disso, estendo minha gratidão aos meus sogros, Jesús Amado Celis e Gloria Rocío, por estarem sempre presentes quando mais precisei. Seu amor e dedicação foram fundamentais em minha vida e em cada um das minhas conquistas. Em especial, quero lembrar meu tio Marco Tulio Moreno, que não teve a oportunidade de me ver doutor, mas cujo apoio e carinho sempre me impulsionaram a seguir em frente.

Por fim, um agradecimento especial à minha esposa Andrea Juliet, que foi minha parceira incansável ao longo de toda essa jornada, e aos meus filhos, Gio André e Luis Angel, cujo amor e apoio foram a minha motivação constante. Agradeço a Deus e a todas as outras pessoas que estiveram ao meu lado, me apoiaram e me inspiraram ao longo deste caminho.

Muito obrigado!

DEDICATÓRIA

A Deus, a minha esposa Andrea Juliet
e nossos filhos, Luis Angel
e Gio André

RESUMO

Em resposta aos desafios apresentados pelo aumento contínuo na geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) em contextos urbanos em expansão, este estudo propõe uma abordagem técnica inovadora para a reutilização desses materiais. O objetivo é explorar o potencial dos RCD como agregados alternativos em misturas asfálticas, uma área que vem ganhando atenção crescente no campo da engenharia civil. A pesquisa se concentrou em duas granulometrias específicas de RCD, permitindo uma análise comparativa detalhada sobre como diferentes tamanhos de agregados influenciam o comportamento e as propriedades das misturas asfálticas. A caracterização morfológica dos RCD foi um aspecto chave e inovador do estudo, realizada com tecnologia de escaneamento 3D e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Esta análise revelou variações significativas de volume e área de superfície das partículas ao longo dos processos de lavagem e peneiramento. Através do MEV e da Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS), observou-se a presença de materiais aderidos, fissuras e fraturas causadas pela trituração, enquanto a Difração de Raios-X (DRX) determinou a composição mineralógica, destacando elementos típicos de materiais de construção, como oxigênio, silício e cálcio. Esses resultados fornecem insights valiosos sobre a textura e forma dos resíduos, influenciando diretamente o desempenho das misturas asfálticas. Um ponto inovador da pesquisa foi a aplicação do aditivo polimérico aos RCD por um processo de absorção, que visou melhorar características cruciais como impermeabilização e aderência, tornando-os mais compatíveis para uso em misturas asfálticas. Os testes laboratoriais focaram na avaliação do desempenho mecânico das misturas asfálticas com RCD tratados, determinando parâmetros como estabilidade, resistência ao desgaste, dano por umidade, fadiga, módulo de resiliência e resistência à tração. Os resultados indicaram que as misturas asfálticas com RCD tratados apresentaram desempenho promissor, sugerindo que essa abordagem pode oferecer uma alternativa viável aos agregados convencionais. Este estudo contribui significativamente para a engenharia civil, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações práticas. A reutilização de RCD em misturas asfálticas não apenas apresenta uma solução técnica para o manejo desses resíduos, mas também pode levar a avanços significativos em termos de eficiência de recursos e inovação em materiais de construção. A caracterização detalhada da morfologia dos RCD e o uso de aditivos poliméricos destacam o potencial para melhorar a sustentabilidade e a durabilidade das infraestruturas rodoviárias.

ABSTRACT

In response to the challenges posed by the continuous increase in Construction and Demolition Waste (CDW) generation in expanding urban contexts, this study proposes an innovative technical approach for the reuse of these materials. The aim is to explore the potential of CDW as alternative aggregates in asphalt mixtures, an area that has been gaining increasing attention in the field of civil engineering. The research focused on two specific gradations of CDW, allowing for a detailed comparative analysis of how different aggregate sizes influence the behavior and properties of asphalt mixtures. A key and innovative aspect of the study was the morphological characterization of the CDW, performed using 3D scanning technology and Scanning Electron Microscopy (SEM). This analysis revealed significant variations in the volume and surface area of particles throughout the washing and screening processes. Through SEM and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), the presence of adhered materials, cracks, and fractures caused by crushing was observed, while X-Ray Diffraction (XRD) determined the mineralogical composition, highlighting typical construction material elements such as oxygen, silicon, and calcium. These results provide valuable insights into the texture and shape of the waste, directly influencing the performance of the asphalt mixtures. An innovative point of the research was the application of a polymeric additive to the CDW through an absorption process, aimed at improving crucial characteristics such as waterproofing and adhesion, making them more compatible for use in asphalt mixtures. Laboratory tests focused on evaluating the mechanical performance of the asphalt mixtures with treated CDW, determining parameters such as stability, wear resistance, moisture damage, fatigue, resilient modulus, and tensile strength. The results indicated that the asphalt mixtures with treated CDW exhibited promising performance, suggesting that this approach could offer a viable alternative to conventional aggregates. This study significantly contributes to civil engineering by providing a solid foundation for future research and practical applications. The reuse of CDW in asphalt mixtures not only presents a technical solution for managing these wastes but also can lead to significant advances in terms of resource efficiency and innovation in construction materials. The detailed characterization of the CDW morphology and the use of polymeric additives highlight the potential to improve the sustainability and durability of road infrastructures.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	21
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	26
1.3.	OBJETIVOS	29
	1.3.1. OBJETIVO GERAL	29
	1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
1.4.	ESCOPO DA TESE	30
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1.	HISTÓRIA DA RECICLAGEM DE RCD	32
2.2.	COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	
(RCD)	34	
2.3.	ESTUDOS REALIZADOS COM RCD	39
	2.3.1. MISTURAS ASFALTICAS	41
	2.3.2. ENSAIOS E RESULTADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS	44
	2.3.3. TIPO DE TRATAMENTOS.....	55
	2.3.4. Conclusão.....	57
	2.3.5. Lacunas Identificadas.....	58
2.4.	POLÍMEROS	59
2.5.	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA VIA DIGITALIZAÇÃO 3D	61
3.	METODOLOGIA	64
3.1.	ABORDAGEM EXPERIMENTAL	65
	3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MINERAL	66
	3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE	76
	3.1.3. POLÍMERO TERRAFIX.....	77
	3.1.4. DOSAGEM E ESTABILIDADE MARSHALL.....	80

3.1.5.	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ...	85
4.	RESULTADOS E ANÁLISE	93
4.1.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE.....	93
4.2.	AGREGADOS	94
4.2.1.	ANÁLISE GRAVIMÉTRICA	94
4.2.2.	ANÁLISE GRANULOMETRIA	96
4.2.3.	AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO E DENSIDADE DE AGREGADO GRAÚDO	114
4.2.4.	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO	117
4.2.5.	ANÁLISE QUÍMICA	125
4.2.6.	MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS	138
4.2.7.	DOSAGEM	146
4.2.8.	ENSAIOS MECÂNICOS	155
5.	CONCLUSÕES	193
6.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	198
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	200
	APÊNDICES.....	230
	APÊNDICES A: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	230
	APÊNDICES B: ENSAIOS MARSHALL	238
	APÊNDICES C: COMPARAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE AS AMOSTRAS	254
	APÊNDICES D: CATALOGO DE PARTÍCULAS.....	264

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Textura das partículas: a) Natural e b) RCD.....	23
Figura 1-2 Dano na interface entre asfalto e agregado (Guo, 2016).....	27
Figura 2-1 RCD removido pelo SLU nos anos de 2017 a 2020 (SLU, 2020).	34
Figura 2-2 Usina fixa de reciclagem de RCD com dois estágios de britagem: BBW Recycling Mittelbe/Magdeburg -Alemanha (Ângulo <i>et al.</i> , 2009).	39
Figura 2-3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de ACR, (Centeno <i>et al.</i> , 2014).....	40
Figura 2-4 TERREFIX 14.....	61
Figura 2-5 Método de geração 3D. (a) seção transversal (x, y); (b) seção transversal (y, z); (c) seção transversal (x, z); (d) sólidos S1 a S4 obtidos na revolução das metades das seções transversais; (e) sólidos S1' a S4' obtidos por alongamento horizontal de S1 a S4 ; (f) sólido final (Valera et al., 2022).	62
Figura 2-6 Imagens do escaneamento. (a) EinScan; (b) Imagem da amostra.....	62
Figura 3-1 Planejamento da pesquisa.	65
Figura 3-2 Composição gravimétrica da Faixa C DNTI e RCD.....	67
Figura 3-3 Composição gravimétrica da Faixa MDC – 25 INVIAS e RCD.	68
Figura 3-4 a) RCD areia Bela Vista e b) classificação por tamanhos.....	69
Figura 3-5 Porcentagem de substituição na granulometria.....	70
Figura 3-6 Partículas de RCD preparadas para análise química em MEV: a) sem lavar, b) lavadas, c) com aditivo, e d) com aditivo e serpentinito.....	75
Figura 3-7 Processo de incorporação do aditivo polimérico.	80
Figura 3-8 Denominação de misturas com compactação Marshall	83
Figura 3-9 Denominação de misturas com compactação Giratória	84
Figura 3-10 Amostra com gesso	89
Figura 3-11 Montagem fadiga	90
Figura 4-1 Viscosidade em função da temperatura.....	94

Figura 4-2 Materiais presentes no RCD.....	95
Figura 4-3 Composição gravimétrica da amostra de RCD.	96
Figura 4-4 Composição gravimétrica da amostra de RCD sem lavar.....	98
Figura 4-5 Composição gravimétrica da amostra de RCD Lavada.	100
Figura 4-6 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 19 mm sem lavar	102
Figura 4-7 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 12,5 mm sem lavar	103
Figura 4-8 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 9,5 mm sem lavar	103
Figura 4-9 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 19 mm lavada	108
Figura 4-10 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 12,5 mm lavada	109
Figura 4-11 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 9,5 mm lavada	110
Figura 4-12 Tempo de adsorção do aditivo no RCD	114
Figura 4-13 Abrasão Los Angeles	117
Figura 4-14 Resistência mecânica 10% finos	121
Figura 4-15 Ensaio de aderência. a) RCD; b) RCD com aditivo polimérico	125
Figura 4-16 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)	126
Figura 4-17 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS), a) cores de acordo ao elemento, b) ponto 1 de RCD, c) ponto 2 de RCD, d) ponto 3 de RCD e e) ponto 4 de RCD	128
Figura 4-18 Difratometria de Raios-X a) partícula 3/4” e b) partícula 1/2”	131
Figura 4-19 Partícula de RCD sem lavagem; a) microscópio ótico e b) microscópio eletrônico de varredura	131
Figura 4-20- Partículas de argila aderidas nas superfícies dos RCD a) e EDS b) Espectros de raio X	133
Figura 4-21 Partículas de RCD 3/4”, lavada com trincas a) x100 b) x500.....	134
Figura 4-22 Partículas de RCD de 3/8” com trinca transversal	135
Figura 4-23 Partícula de RCD com aditivo.....	136
Figura 4-24 Partícula de RCD com aditivo com trinca sem aditivo	137
Figura 4-25 Partícula de RCD com aditivo e partícula ligada de argamassa pelo aditivo.....	138

Figura 4-26 Partícula escaneada em cada momento do processamento, alinhada no espaço.	141
Figura 4-27 Variações na superfície da partícula entre processos.	141
Figura 4-28 Partícula escaneada em cada momento do processamento, alinhada no espaço	142
Figura 4-29 Variações na superfície da partícula entre processos	142
Figura 4-30 Perda média de espessura do processo de lavagem	143
Figura 4-31 Ganho de espessura pelo aditivo	144
Figura 4-32 Perda média de espessura como resultado do peneiramento com e sem aditivo	145
Figura 4-33 Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall Vv e RBV	149
Figura 4-34 Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a misturas DNTI	151
Figura 4-35 Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a misturas INVIAS sem Aditivo	152
Figura 4-36 Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a misturas INVIAS com Aditivo	154
Figura 4-37 Resultados de Estabilidade Marshall e Estabilidade/fluência de acordo ao tipo de mistura baixo compactação Marshall	157
Figura 4-38 Resultados de Estabilidade Marshall e Estabilidade/fluência de acordo ao tipo de mistura baixo compactação Giratória	162
Figura 4-39 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação Marshall	167
Figura 4-40 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação giratório	171
Figura 4-41 Resultados de MR compactação Marshall e compactação Giratória	175
Figura 4-42 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall	179
Figura 4-43 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall norma DNIT	181
Figura 4-44 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall Norma INVIAS	182
Figura 4-45 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória	184

Figura 4-46 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória Norma DNIT	186
Figura 4-47 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória Norma INVIAS	186
Figura 4-48 Curvas de fadiga para compactação Marshall DNIT	188
Figura 4-49 Curvas de fadiga para compactação Marshall INVIAS	189
Figura 4-50 Curvas de fadiga para compactação giratório DNIT.....	191
Figura 4-51 Curvas de fadiga para compactação giratório INVIAS.....	192

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Propriedades físicas do RCD	38
Tabela 3-1 Distribuição granulométrica da mistura da faixa C do DNIT e faixa MDC-25 INVIAS.....	66
Tabela 3-2- Porcentagem substituição.....	71
Tabela 3-3 Matriz experimental de granulometria.....	71
Tabela 3-4 Matriz experimental dos ensaios de densidade e absorção.....	72
Tabela 3-5 Matriz experimental de Ensaios de caracterização.....	73
Tabela 3-6 Matriz experimental da caracterização do ligante	76
Tabela 3-7 Porcentagem de RCD em cada mistura asfáltica.....	82
Tabela 3-8-Número de ensaios conduzidos para cada propriedade da mistura asfáltica.....	86
Tabela 4-1 Resultados da caracterização do ligante.....	93
Tabela 4-2 Composição gravimétrica dos RCD (%).	95
Tabela 4-3 Granulometria do material RCD sem lavar	97
Tabela 4-4 Granulometria do material RCD lavada	99
Tabela 4-5 ANOVA para massa retida por tempo do RCD sem lavar.....	101
Tabela 4-6 Método: 95.0 porcentagem LSD para massa retida sem lavar	104
Tabela 4-7 Diferencias estatisticamente significativas do RCD sem lavar	105
Tabela 4-8 ANOVA para massa retida por tempo do RCD lavada.....	107
Tabela 4-9 Método: 95.0 porcentagem LSD para massa retida lavada	111
Tabela 4-10 Diferencias estatisticamente significativas do RCD Lavada	112
Tabela 4-11 Resultados de massa aparente, porosidade e Absorção	116
Tabela 4-12 Abrasão Los Angeles	118
Tabela 4-13 Diferencias estatisticamente significativas do RCD Abrasão Los Angeles	118
Tabela 4-14 Resultados da classificação da forma do RCD	120
Tabela 4-15 Resistência mecânica 10% finos.....	121

Tabela 4-16 Diferencias estatisticamente significativas do RCD 10% finos	122
Tabela 4-17- Composição Química dos Agregados	127
Tabela 4-18 Composição Química dos Agregados de acordo ao ponto do RCD.....	129
Tabela 4-19 formato de catálogo de partículas	138
Tabela 4-20 Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall, teor de ligante, Vv e RBV.....	147
Tabela 4-21 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall Vv e RBV	150
Tabela 4-22 Número de giros no (CG) para o teor de ligante e Vv.....	154
Tabela 4-23 Resultados de Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Marshall	155
Tabela 4-24 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Marshall.....	160
Tabela 4-25 Resultados de Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória	161
Tabela 4-26 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória.....	163
Tabela 4-27 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória.....	165
Tabela 4-28 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação Marshall	165
Tabela 4-29 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Marshall	168
Tabela 4-30 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação giratória	169
Tabela 4-31 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Giratório.....	171
Tabela 4-32 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Marshall e compactação giratório	173
Tabela 4-33 Resultados de MR compactação Marshall e compactação Giratória.....	174

Tabela 4-34 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados MR da compactação Marshall e Giratório.....	176
Tabela 4-35 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall.....	177
Tabela 4-36 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados do creep estática compactação Marshall	179
Tabela 4-37 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória.....	183
Tabela 4-38 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados do creep estática compactação Marshall	184
Tabela 4-39 Parâmetros das curvas de fadiga compactação Marshall.....	187
Tabela 4-40 Parâmetros das curvas de fadiga compactação giratório	189

LISTA DE NOMENCLATURAS, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	agregados grossos
AM	agregados miúdos
ANOVA	Análise de Variância
ARC	Agregado de resíduos de concreto
ARL	agregados reciclados leves
ARM	agregados reciclados mistos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Asf
CMC	carboximetilcelulose
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CRM	ligante modificado com borracha
CTR	Controle de Transporte de Resíduos
$D(t)$	função hereditária <i>creep compliance</i>
D12	DNIT 1/2 polegada
D38	DNIT 3/8 polegada
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DPD	Dinâmica de Partículas Dissipativas
DRX	Difratometria de raios-X
DSR	reômetro de cisalhamento dinâmico
E/F	Razão entre Estabilidade e Fluência Marshall
E-RCC	sistema eletrônico de resíduos da construção civil e volumosos
FN	<i>flow number</i>
FRX	Fluorescência de raios-X
G^*	módulo complexo de cisalhamento
Gmb	Massa Específica Aparente da Mistura Compactada

Gmm	Densidade Máxima Medida
HMA	Hot Mix Asphalt
I12	INVIAS 1/2 polegada
I34	INVIAS 3/4 polegada
I38	INVIAS 3/8 polegada
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura Rodoviária da Universidade de Brasília
INVIAS	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
MBF	adsorção de azul de metileno
MCD	Mistura de Controle - Compactação Marshall
MD	Medidor de deslocamento
MDC-25	mistura quente densa 25
MEV	Microscopia Electrónica de Varredura
<i>N</i>	<i>número de ciclos</i>
NBR	Norma Brasileira
NCMA	<i>National Concrete Mansory Association</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PET	Poliéster
PLA	ácido Polilático
PVC	Policloreto de vinila
<i>RBV</i>	<i>Relação betume/vazios</i>
RCD	Resíduos de construção e demolição civil
RCD-R	Resíduos de construção e demolição civil reciclados
RRT	Razão de Resistência à Tração
RT	Resistência à Tração Indireta
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SLU	Serviço de Limpeza Urbana
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UnB	Universidade de Brasília
UniCEUB	Centro Universitário de Brasília
VAM	Vazios do Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

XRF	Fluorescência de Raios X
φ	ângulo de fase
ρ_d	Massa específica dos grãos sólidos
$\rho_{d \text{ max}}$	Massa específica aparente seca máxima
$\rho_{d \text{ min}}$	Massa específica aparente seca mínima

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Considerando o contexto atual, a rápida expansão do setor de construção civil e o desenvolvimento de novos projetos de infraestrutura são reflexos diretos e mensuráveis do aumento da população em nível mundial (Farraji *et al.*, 2016; Yazdani *et al.*, 2021). Esse avanço progressivo vem sendo marcado por evoluções significativas na esfera tecnológica aplicada ao campo construtivo, abrangendo desde a modernização de maquinário e equipamentos até a adoção de métodos construtivos inovadores e a implementação de softwares especializados na gestão de projetos (Guo & Guo, 2011; Saa Zamorano, 2021). Um dos reflexos mais impactantes desse processo é o escalonamento na geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), cuja origem se encontra primordialmente nos processos de demolição (Raman & Ramasamy, 2020).

Em nível global, são geradas anualmente mais de 10 bilhões de toneladas de RCD (Pickin *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2020). Países como China e Estados Unidos lideram a lista de maiores produtores com 2.300 e 500 milhões de toneladas anuais, respectivamente (Menegaki & Damigos, 2018; Wu *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2017). A preocupação reside no fato de que cerca de 35% desses resíduos terminam em aterros sem receber tratamento algum (Menegaki & Damigos, 2018).

O volume crescente de RCD tem estimulado um aumento nas pesquisas acadêmicas orientadas à sua reutilização, como pode ser visto em bases de dados acadêmicas como ASCE, ScienceDirect, Web of Science e Scopus. Entre 2012 e 2022, o número de artigos publicados sobre este tema multiplicou por dez. A maioria dessas pesquisas tem se concentrado na gestão sustentável de RCD, destacando os benefícios ambientais e econômicos que sua reutilização pode trazer (Gedik, 2020). No entanto, também têm sido exploradas abordagens para melhorar as propriedades físicas e mecânicas desses resíduos, uma vez que costumam apresentar limitações em comparação com materiais convencionais (Gedik, 2020; Raman & Ramasamy, 2020; Ryu, 2002; Xuan *et al.*, 2016).

A integração dos RCD em novos ciclos produtivos tem sido alvo de intensiva investigação, com múltiplos estudos enfatizando sua aplicabilidade no desenvolvimento de concretos com características modificadas (Ahmoghadam *et al.*, 2020; Kirthika *et al.*, 2020) na composição

de misturas asfálticas com vistas à economia de recursos naturais e redução do impacto ambiental (Al-Bayati & Tighe, 2019; Arbabpour Bidgoli *et al.*, 2019; Kareem *et al.*, 2019a, Kareem *et al.*, 2020), bem como na sua função como substitutos de agregados granulares em camadas de base e sub-base, fundamentais na construção de infraestruturas viárias (Ali & Abd Ali, 2020; Mohammadinia *et al.*, 2019). Estas investigações têm como pano de fundo a crescente necessidade de adotar práticas mais sustentáveis no setor da construção civil, o que inclui o reaproveitamento de materiais e a minimização da exploração de recursos virgens.

Entretanto, para que os RCD possam efetivamente substituir materiais convencionais, é imperativo reconhecer a variabilidade de suas propriedades intrínsecas. Os estudos têm mostrado que, na ausência de tratamentos específicos que visam a melhoria de suas características, os RCD tendem a apresentar desempenho inferior quando comparados a materiais tradicionalmente utilizados na construção (Gómez-Meijide *et al.*, 2015, 2016; Pérez *et al.*, 2012; Raman & Ramasamy, 2020; Ryu, 2002; Xuan *et al.*, 2016; Beja *et al.*, 2020; Agrela *et al.*, 2012; Strieder *et al.*, 2023). As limitações podem ser atribuídas à heterogeneidade dos resíduos, que inclui variações na composição química e na granulometria, bem como à presença de contaminantes que podem comprometer a qualidade do produto.

A questão central, portanto, não reside apenas na viabilidade técnica da reutilização dos RCD, mas também na necessidade de estabelecer processos que assegurem a uniformidade e a adequação dos resíduos tratados para as aplicações pretendidas. A implementação de protocolos de tratamento eficazes é essencial para a otimização das propriedades dos RCD, tornando-os comparáveis, se não superiores, aos materiais virgens em determinadas aplicações. Isto não só ampliaria o leque de uso dos RCD em contextos diversos da construção civil, como também promoveria uma economia circular mais robusta e um menor impacto ambiental, em consonância com os preceitos de desenvolvimento sustentável que norteiam a indústria contemporânea.

Os processos de revalorização de RCD estão focados na desvinculação da camada de argamassa aderida às partículas de agregado, um passo crucial para restaurar, ao menos em parte, a sua condição estrutural original. Estas técnicas envolvem uma série de métodos que se estendem por intervenções químicas e físico-mecânicas, configurando um amplo espectro de abordagens para o tratamento dos RCD (Gedik, 2020; Raman & Ramasamy, 2020; Wu *et al.*, 2020; Upshaw & Cai, 2020; Bianchini *et al.*, 2020; Reda *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2018). No

âmbito químico, são empregados reagentes como o ácido acético ($C_2H_4O_2$), o ácido clorídrico (HCl) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4), selecionados estrategicamente para solubilizar componentes cimentícios e, por conseguinte, facilitar a separação da argamassa dos agregados.

Complementarmente, as operações mecânicas recorrem à abrasão e à aplicação de variações térmicas como meios de induzir o colapso da matriz de cimento, promovendo a liberação dos agregados (Al-Bayati *et al.*, 2016(a); Al-Bayati *et al.*, 2016(b); Saravanakumar *et al.*, 2016; Purushothaman *et al.*, 2015; Tan *et al.*, 2022; Ossa *et al.*, 2016; Dilbas *et al.*, 2020; Pandurangan *et al.*, 2016).

É imperativo destacar que a inércia na implementação de tratamentos adequados acarreta a degradação progressiva das propriedades dos RCD durante as fases de manuseio, peneiramento, mistura e compactação. A textura intrinsecamente áspera e porosa dos RCD, evidenciada por meio de análises comparativas, tais como as observadas entre a Figura 1-1a (material granular convencional) e a Figura 1-1b (RCD), implica em incremento no consumo de água ou asfalto para a confecção de concretos e misturas betuminosas, respectivamente. Essa característica afeta adversamente a integridade das misturas, resultando em um aumento dos vazios intersticiais e, por conseguinte, em uma redução da área de adesão efetiva entre o ligante e os agregados. Também aumenta o consumo de asfalto e, conseqüentemente, o custo da mistura.

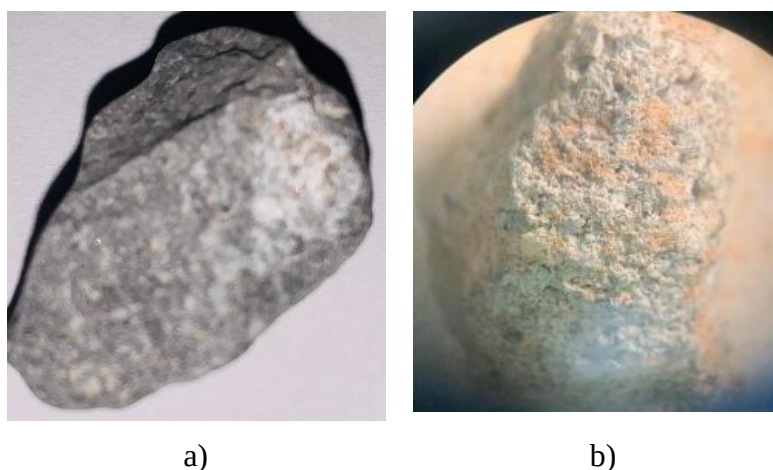


Figura 1-1 Textura das partículas: a) Natural e b) RCD

Considerando os fundamentos expostos, identifica-se como fundamental a ampliação da pesquisa em torno dos RCD para alcançar uma administração ambientalmente sustentável e

melhorias em suas aplicações técnicas. Uma área promissora de estudo é a integração de polímero, especificamente o aditivo polimérico (TERRAFIX 14), que se destaca no mercado devido à sua baixa viscosidade, uma característica crucial que facilita sua absorção pelos RCD. Esta propriedade é particularmente benéfica quando o polímero é diluído em água, pois permite uma distribuição homogênea e eficiente do polímero no interior do material. Essa integração eficaz do aditivo polimérico com o RCD não só melhora a impermeabilização, mas também aumenta significativamente a aderência dentro do material.

Esta técnica inovadora foi analisada detalhadamente nesta pesquisa pelo seu potencial em reformular a composição de misturas asfálticas. A adoção deste polímero nos RCD instaurou novos paradigmas no processamento destes materiais, facilitando não somente a sua reciclagem e reutilização, mas também elevando características cruciais como resistência e aderência em aplicações asfálticas. Estas melhorias são estratégicas para o avanço de infraestruturas mais robustas e alinhadas com a perspectiva de sustentabilidade ambiental.

Nesta pesquisa, foram exploradas duas faixas granulométricas diferentes para a fabricação de misturas asfálticas. Primeiramente, utilizou-se a faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (Brasil), com partículas de 12,5 mm e 9,5 mm, visando entender o desempenho de misturas asfálticas com tamanhos médios de agregados. Em seguida, abordou-se a mistura quente densa 25 (pela sua sigla em espanhol, MDC-25) da normativa Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (pela sua sigla em espanhol, INVIAS) (Colômbia), que inclui agregados de maiores dimensões, como 19,1 mm, além dos tamanhos menores, para avaliar o comportamento de misturas com granulometria maior. Esse estudo comparativo teve como objetivo otimizar as propriedades das misturas asfálticas para diferentes aplicações em construção civil e infraestrutura.

Para alcançar esses objetivos, o trabalho experimental foi meticulosamente planejado e conduzido em diversas etapas. Inicialmente, os RCD foram caracterizados morfológicamente utilizando escaneamento 3D, MEV e EDS. A análise morfológica revelou que os RCD possuem uma estrutura heterogênea com microfraturas e argamassa aderida. A criação de um catálogo morfológico inovador permitiu uma compreensão detalhada das características físicas dos RCD e sua variação em diferentes processos como o lavado e o peneiramento, identificando variações significativas na forma, área, volume e textura das partículas.

A análise química dos RCD identificou a presença de oxigênio, silício e cálcio como principais componentes, típicos de materiais de construção, além de alumínio, magnésio e ferro em menores quantidades, sugerindo a utilização de argilas e aditivos no cimento e cerâmicas. Ensaios de DRX confirmaram a predominância de fases cristalinas, como quartzo e carbonato de cálcio, que melhoram a aderência entre os agregados e o asfalto. Adicionalmente, a aplicação do aditivo polimérico foi realizada para melhorar as propriedades de impermeabilização e aderência dos RCD. É importante destacar que esta foi a primeira vez que o aditivo polimérico foi utilizado em RCD e misturas asfálticas, representando uma inovação significativa.

Os resultados obtidos indicam que a aplicação do aditivo polimérico melhorou significativamente as propriedades físicas dos RCD, tornando-os mais adequados para uso em misturas asfálticas. A aplicação do aditivo resultou em agregados com maior densidade, menor porosidade e absorção de água reduzida. As análises de MEV destacaram a presença do aditivo na superfície das partículas de RCD, conferindo maior integridade estrutural e resistência ao desgaste.

Os ensaios de comportamento mecânico das misturas asfálticas, incluindo estabilidade Marshall, relação estabilidade/fluência, resistência à tração indireta (RTI), dano por umidade induzida, creep estático, módulo resiliente e fadiga por tração direta uniaxial cíclica, revelaram que as misturas com aditivo polimérico apresentaram melhorias substanciais em comparação com as misturas sem aditivo. As misturas com aditivo polimérico mostraram teores ótimos de asfalto ligeiramente inferiores, valores de Vv mais baixos e valores de RBV mais altos, indicando uma melhor compactação e aderência do ligante. A compactação giratória mostrou-se mais eficiente do que a compactação Marshall, preservando melhor a integridade dos agregados e resultando em misturas mais homogêneas e coesas.

A análise de fadiga indicou que as misturas com RCD tratado com aditivo polimérico apresentaram melhor desempenho, demonstrando maior resistência a cargas repetidas e maior durabilidade. Esses resultados sugerem que a combinação de RCD tratados com aditivo polimérico em misturas asfálticas pode proporcionar misturas mais duráveis e eficazes, contribuindo para o desenvolvimento de infraestruturas mais robustas e sustentáveis.

1.2. JUSTIFICATIVA

A solidez e presença do concreto nas obras de engenharia civil modernas espelham a predileção histórica por um material que tem sua durabilidade atestada por meio da resistência comprovada ao longo dos séculos (*Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible*, 2009). Contudo, o ciclo de vida deste material, quando encerrado, resulta em RCD, que, apesar do potencial de reutilização, muitas vezes acabam por contribuir significativamente para o acúmulo de resíduos sólidos urbanos, sendo uma preocupação ambiental premente (Morafa *et al.*, 2017; Gómez, 2015; Brandón, 2016; Pasadin & Pérez 2015).

A melhora no tratamento dos RCD está conectada com a implementação de práticas sustentáveis no contexto construtivo (Morales, 2020; Ghisellini *et al.*, 2018; Esa *et al.*, 2017; Pomponi & Moncaster, 2017). As políticas de gestão desses resíduos, guiadas por documentos como o Relatório Brundtland e as diretrizes da Organização das Nações Unidas (ONU) (Comisión Brundtland, 1987; *Organización de las Naciones Unidas*, 1992, citado por Gómez; *Organización de las Naciones Unidas*, 2015, citado por Gómez, 2015; Brandón, 2016), buscam minimizar o impacto ambiental do setor, conciliando progresso e sustentabilidade. No contexto internacional, a gestão eficiente dos RCD é reconhecida como vital, como demonstram as taxas de geração de resíduos na União Europeia (Eurostat, 2018) e em nações como Brasil (Assunção, 2021; Strieder *et al.*, 2023), Estados Unidos (Sandler & Swingle, 2006; Cochran & Townsende, 2010), Austrália (Bell, 1998), China (Dong *et al.*, 2001) e Europa (Mália *et al.*, 2013; Contreras *et al.*, 2016).

No Brasil, as normativas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Norma Brasileira (NBR), NBR 15115 (ABNT, 2004a) e NBR 15116 (ABNT, 2004b) estabelecem diretrizes claras para o uso de RCD reciclado em pavimentos e concretos, respectivamente, incentivando a integração desses materiais na nova construção civil e infraestrutura (Cunha, 2007; Alberte & Handro, 2021). Tal direcionamento é apoiado pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), CONAMA nº 307, que proporciona um marco regulatório para a gestão desses resíduos (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2002; Alberte & Handro, 2021).

Esta orientação é fortalecida pelas inúmeras investigações sobre as capacidades e aplicações dos RCD como agregados comparando o desempenho dos RCD em concretos, misturas

asfálticas bases e sub bases granulares ligadas ou no ligadas (Ahmoghadam *et al.*, 2020; Al-Bayati & Tighe, 2019; Ali & Abd Ali, 2020; Arbabpour Bidgoli *et al.*, 2019; Arulrajah *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2019; Kareem *et al.*, 2018a; Kareem *et al.*, 2019a; Kareem *et al.* 2020; Kirthika *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Mohammadinia *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2014; Strieder *et al.*, 2023; Tam *et al.*, 2018; Vieira & Pereira, 2015).

No entanto, há desafios significativos associados às propriedades intrínsecas dos RCD, nomeadamente uma resistência mecânica menor quando comparados com os agregados naturais (Gómez-Meijide *et al.*, 2015, 2016; Pérez *et al.*, 2012; Raman & Ramasamy, 2020; Ryu, 2002; Xuan *et al.*, 2016; Beja *et al.*, 2020; Agrela *et al.*, 2012; Strieder *et al.*, 2023). Esta realidade impulsionou a pesquisa em busca de aditivos inovadores que promovam a aderência e diminuam o dano na interface entre asfalto e agregado (Figura 1-2), essencial para reduzir a permeabilidade e melhorar a resistência à abrasão dos agregados reciclados (Poon *et al.*, 2006; Saed *et al.* 2007; Grubba; 2009).



Figura 1-2 Dano na interface entre asfalto e agregado (Guo, 2016).

Os métodos mecanicista-empíricos de projeto de pavimentos já começaram a incorporar materiais alternativos como os RCD (Franco & Motta, 2020; South African National Roads Agency & Aiosanra, 2013). No entanto, há necessidade de uma análise mais profunda das propriedades mecânicas e comportamento dos RCD, utilizando testes como triaxiais estáticos e cíclicos para mensurar a resistência ao cisalhamento, módulo resiliente, deformação permanente, fadiga, dano por umidade, entre outros (Strieder *et al.*, 2023; Arulrajah *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2021).

Em 2021, os municípios brasileiros registraram uma coleta de mais de 48 milhões de toneladas de RCD, evidenciando um crescimento de 2,9% em relação ao ano anterior, com uma média

de 227 kg de resíduos coletados por habitante ao ano. Essa coleta foi predominantemente oriunda da região Sudeste, responsável por 52% do total, enquanto a região Centro-Oeste se destacou em termos per capita, com 323 kg por habitante (ABRELPE, 2022). Paralelamente, inovações no campo dos RCD, como o uso de aditivos poliméricos por adsorção, estão abrindo novas fronteiras de pesquisa. Essas inovações prometem não apenas atender às exigências atuais de infraestrutura, mas também estabelecer práticas futuras alinhadas à sustentabilidade e responsabilidade ambiental na construção civil.

A compreensão aprimorada do desempenho dos RCD com a adição de polímeros apresenta uma oportunidade de redefinir a construção de pavimentos, visando soluções mais sustentáveis e duradouras para as futuras gerações. A decisão de utilizar o aditivo polimérico (TERRAFIX 14) neste projeto foi embasada não apenas na sua superioridade sobre outros aditivos como a Cal, Sika-1 e Axton Chapiscos, mas também nos resultados de testes exploratórios realizados com RCD. Esses testes destacaram a baixa viscosidade do aditivo polimérico como um fator chave para uma absorção e distribuição eficiente no RCD, melhorando a aderência e a impermeabilização dos materiais.

Diferentemente do Sika-1, cuja alta viscosidade complicava a mistura e a aplicação, e do Axton Chapiscos ou a Cal, com seu processo complexo de formação de película, o aditivo polimérico demonstrou ser mais eficaz e fácil de aplicar. Importante ressaltar que este produto não foi estudado anteriormente, e a literatura de referência consultada não mostra um aditivo similar. Isso reforça a inovação desta pesquisa e a singularidade do aditivo polimérico no contexto das misturas asfálticas.

A seleção da faixa C do DNIT, com tamanhos de 12,5 mm e 9,5 mm, para a investigação de RCD em misturas asfálticas, é baseada na sua ampla utilização na construção de pavimentos no Brasil. No entanto, para ampliar a compreensão sobre o impacto dos RCD em diferentes tamanhos de agregados, também se considerou necessário avaliar uma granulometria maior. A escolha recaiu na mistura MDC-25 da INVIAS (Colômbia), que inclui tamanhos maiores de 19,1 mm, além dos menores, uma vez que a Faixa B do DNIT, com material de 1 polegada, apresenta dificuldades na obtenção de material nesse tamanho específico. Essa abordagem permite uma análise abrangente, explorando não apenas os efeitos do RCD, mas também como a adição do aditivo polimérico afeta as propriedades da mistura asfáltica em cada um desses diferentes tamanhos de agregados.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como principal objetivo realizar uma análise detalhada do desempenho mecânico de RCD, após tratamento com o aditivo polimérico, e sua subsequente utilização como substitutos parciais dos agregados graúdos de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm em misturas asfálticas. O estudo focará na avaliação do impacto dessa substituição nas propriedades mecânicas das misturas, utilizando as faixas granulométricas tipo C, conforme a norma DNIT 031/2006 – ES, e tipo MDC-25, segundo a INVIAS 450 – 13. A pesquisa visa compreender como a inclusão de RCD tratados com o aditivo polimérico influencia a qualidade, especificamente em termos de resistência e deformabilidade, e o desempenho global das misturas asfálticas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Almejando o objetivo geral deste trabalho, têm-se como objetivos específicos:

- Analisar a caracterização do ligante asfáltico por meio de ensaios convencionais, conforme as especificações técnicas nacionais.
- Analisar a caracterização reológica do ligante asfáltico para compreender melhor suas propriedades e comportamento.
- Estabelecer o processo mais eficiente para a adição de aditivo polimérico em RCD.
- Determinar o teor ótimo de projeto, utilizando compactadores Marshall e giratório, para misturas de controle, misturas com adição de RCD e misturas com RCD e aditivo polimérico.
- Avaliar o desempenho das misturas asfálticas em propriedades de engenharia, incluindo dano por umidade induzida, módulo resiliente e fadiga por tração direta uniaxial cíclica.
- Examinar a composição química do RCD para estabelecer sua influência nos resultados do comportamento das misturas asfálticas.
- Comparar os resultados de comportamento entre as misturas asfálticas com e sem adição de RCD (com e sem aditivo polimérico) produzidas nesta pesquisa, com misturas asfálticas densas produzidas com CAP 50/70 no Brasil, conforme literatura existente.
- Desenvolver um catálogo detalhando a morfologia das partículas de RCD, visando apoiar modelos em futuras investigações, além de analisar se a variação na morfologia

observada em escaneamento de partículas pode indicar degradação sofrida pelas partículas nos processos de lavagem, peneiração e adição de aditivo.

1.4. ESCOPO DA TESE

Esta tese está dividida em 6 capítulos, cada um abordando aspectos específicos relacionados ao estudo dos RCD e sua aplicação em misturas asfálticas. Inicialmente, o primeiro capítulo apresenta a introdução, onde são abordadas a contextualização do tema, justificativa da escolha do tema e a importância da reciclagem e reutilização desses resíduos na construção civil. Também são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa, além de ser descrita a estrutura da tese por capítulos.

O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica e está dividido em várias partes. Primeiramente, é apresentada a história da reciclagem de RCD, seguida pela descrição da composição dos RCD, destacando suas propriedades químicas e físicas. Em seguida, são analisados estudos anteriores realizados com RCD, discutindo-se as aplicações e benefícios desses resíduos. A revisão também inclui uma seção sobre polímeros, focando na sua utilização para melhorar as propriedades dos materiais de construção. Finalmente, é abordada a caracterização morfológica dos resíduos através de técnicas de digitalização 3D.

O terceiro capítulo descreve a metodologia adotada na pesquisa. Este capítulo detalha os processos de seleção, coleta e preparação dos materiais, além dos ensaios laboratoriais realizados para determinar as propriedades físicas, mecânicas e químicas dos materiais. São apresentados os métodos de caracterização dos agregados minerais e dos ligantes, bem como o uso do polímero TERRAFIX 14. Adicionalmente, são descritos os ensaios de dosagem e estabilidade Marshall, além das propriedades mecânicas das misturas asfálticas.

No quarto capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios. Primeiramente, são discutidos os resultados da caracterização do ligante e dos agregados, incluindo análises gravimétrica, granulométrica, de absorção e densidade. Em seguida, são apresentados os resultados das análises químicas e da morfologia das partículas. Também são discutidos os resultados dos ensaios mecânicos e de deformabilidade das misturas asfálticas.

O quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo, destacando as principais descobertas e sua importância para a engenharia civil e ambiental. São discutidas as contribuições do estudo para o campo da reciclagem de resíduos e as implicações práticas dos resultados.

Finalmente, o sexto capítulo oferece sugestões para futuras pesquisas. Com base nos achados do estudo, são propostas novas abordagens e métodos para a utilização de RCD em pavimentação e outras aplicações na construção civil. Nos apêndices, são apresentados resultados adicionais dos ensaios de caracterização e de arrancamento, incluindo detalhes sobre a calibração dos instrumentos e a instrumentação utilizada. Este escopo fornece uma visão abrangente e técnica da tese, elucidando as áreas de investigação, metodologias e objetivos do estudo.

Nos apêndices, são apresentados resultados adicionais dos ensaios de caracterização e de arrancamento, incluindo calibração dos instrumentos e detalhes de instrumentação. Este escopo proporciona uma visão detalhada da estrutura da tese, elucidando as principais áreas de investigação, metodologias empregadas e objetivos do estudo, garantindo uma compreensão abrangente e técnica do trabalho realizado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados de forma concisa os temas de pesquisa fundamentais para o desenvolvimento deste projeto, com um foco específico na Reciclagem de RCD. É de suma importância destacar que o RCD é um campo de estudo amplamente pesquisado em todo o mundo, devido à sua grande relevância no campo da construção e seu potencial de aplicação em diversas disciplinas da engenharia. Inicia-se com uma breve revisão histórica sobre a utilização dos resíduos de construção, seguida de uma análise abrangente das normas internacionais que regulam sua gestão. Adicionalmente, o estudo incluirá pesquisas aprofundadas com foco em ensaios mecânicos realizados em amostras desenvolvidas a partir de material de RCD. Estes ensaios englobarão testes de estabilidade, resistência à tração indireta, avaliação de danos decorrentes da umidade induzida, determinação do módulo de resiliência, análises de fadiga e do módulo dinâmico. Paralelamente, será explorado o impacto do uso de aditivos, como polímeros, na melhoria das propriedades dos materiais RCD, avaliando como esses aditivos podem otimizar o desempenho e a durabilidade do material reciclado em aplicações de construção civil.

2.1. HISTÓRIA DA RECICLAGEM DE RCD

A gestão dos RCD tem representado um desafio significativo nas últimas três décadas, com foco na busca por usos mais eficientes. Os RCD têm sido utilizados em diversas aplicações, como a substituição de materiais granulares nas camadas de base e sub-base de pavimentos, em misturas asfálticas, concretos e como material de drenagem, entre outros (Levy & Helene, 2002).

Apesar dos esforços de vários países para estabelecer regulamentações e especificações para o uso de RCD, existem variações significativas nas regulamentações devido às diferenças nos tipos de construção e nos materiais envolvidos.

Os primeiros trabalhos relacionados a concretos reciclados datam de 1928 e focaram em seu comportamento em relação à variação granulométrica e à relação água-cimento (Levy & Helene, 2002). No entanto, somente após a Segunda Guerra Mundial, em 1945, o material de descarte gerado durante os conflitos começou a ser utilizado em larga escala, atingindo aproximadamente entre 400 e 600 milhões de metros cúbicos. Esses materiais foram destinados à reconstrução de cidades (Alberte & Handro, 2021; Shulz & Hendriks, citado por Leite, 2001).

Na década de 1960, a Austrália descobriu que o RCD poderia ser usado como material de substituição em estruturas de pavimentação (Ratcliffe, 2016). No entanto, somente em 1977, o Japão elaborou as primeiras especificações para o uso desse tipo de material (Xiao, 2018).

Na década de 1980, em Berlim, foi estabelecida a primeira associação federal de qualidade para materiais (Tam *et al.*, 2018). Simultaneamente, em vários países europeus, como Bélgica, Dinamarca, Holanda, Inglaterra e Alemanha, bem como na Rússia, Arábia Saudita, China e Estados Unidos, foram iniciadas pesquisas para reciclar materiais de construção, com foco especial na construção de pavimentos (Alberte & Handro, 2021; Quebaud, 1996; Ballista & Machado Jr, 2000). Nessa mesma década, foi construída a primeira usina de reciclagem (Vyncke & Vrijders, 2010; Affonso, 2005; Xiao, 2018). Após a implementação da política nacional de meio ambiente em 1989 nos Países Baixos, mais de um milhão de toneladas de resíduos de concreto puderam ser aproveitadas (Pietersen *et al.*, 1998; Van, 1998).

No caso do Brasil, as pesquisas iniciais se concentraram na utilização de RCD em argamassas (Pinto, 1986). No entanto, somente em 1991, em Belo Horizonte e São Paulo, foram estabelecidas as primeiras usinas de reciclagem de RCD (Lima, 2000; Levy, 1997). Como mencionado anteriormente, a partir de 2002, foi publicada a Resolução CONAMA número 307, que regulamentou a gestão desse material, e em 2004 foram estabelecidas as normas NBR 15115 e NBR 15116.

Nos últimos anos, o Serviço de Limpeza Urbana (SLU) de Brasília tem reforçado seu compromisso com a sustentabilidade urbana e a gestão ambiental, enfocando especialmente no tratamento adequado dos RCD. Confrontada com o desafio de lidar com o volume crescente de resíduos produzidos pelas atividades de construção e demolição, a capital federal tem implementado medidas proativas e inovadoras para enfrentar essa questão crucial.

A implantação do sistema eletrônico de resíduos da construção civil e volumosos (E-RCC) marcou um avanço significativo na gestão eficiente dos RCD. Este sistema vai além de simplificar o registro e o controle de transportadores e geradores de resíduos; ele promove a rastreabilidade completa por meio da emissão do Controle de Transporte de Resíduos (CTR). O CTR é um documento chave para rastrear os resíduos desde a sua origem até o ponto final de descarte, assegurando transparência e responsabilização ao longo de toda a cadeia de gestão.

Conforme ilustrado na Figura 2-1, a quantidade de RCD coletada pelo SLU nos anos de 2017 a 2020 mostra uma variação anual, culminando em um aumento substancial no ano de 2020, com uma coleta total de aproximadamente 639.706 toneladas. Este incremento não apenas reflete uma possível intensificação das atividades de construção e demolição, mas também pode ser um indicativo da eficácia das políticas de gestão de resíduos implementadas e do aprimoramento dos sistemas de coleta e monitoramento.

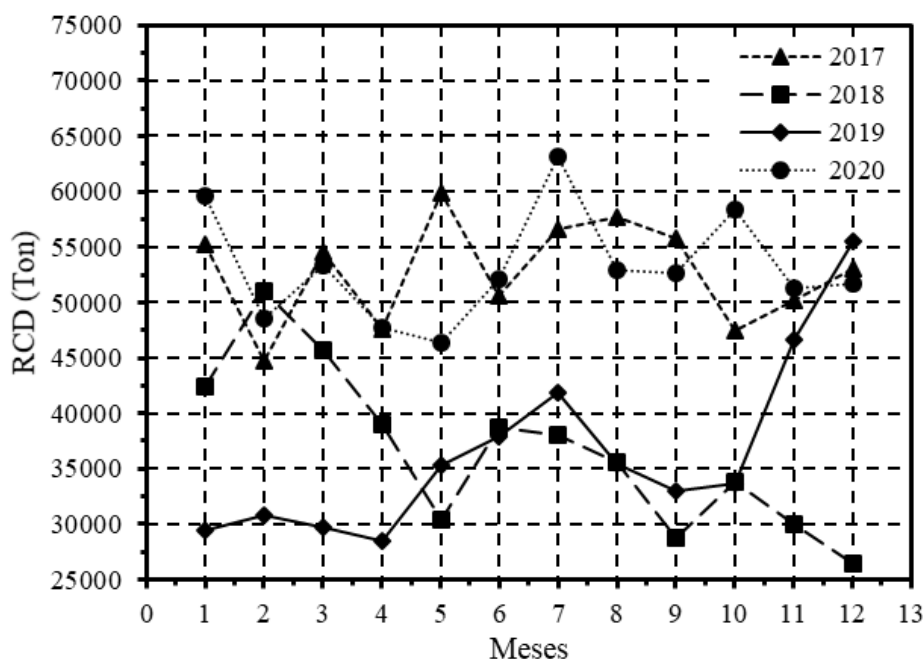


Figura 2-1 RCD removido pelo SLU nos anos de 2017 a 2020 (SLU, 2020).

2.2. COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Quanto à composição dos RCD, é importante destacar que ela apresenta uma variação considerável, que depende substancialmente da origem desses resíduos. Esta diversidade torna os RCD materiais particularmente desafiadores tanto para caracterização quanto para estudo, devido à sua natureza heterogênea e às diferentes propriedades que podem exibir. Cada tipo de projeto de construção gera uma diversidade de materiais residuais. Por exemplo, em projetos de pavimentação, é comum encontrar resíduos que englobam asfalto, concreto simples e uma proporção de areia.

No caso de escavações, a maior parte dos resíduos é composta por solo, argila e poeira. Em projetos de demolição, o componente predominante tende a ser o concreto, seja ele simples ou armado. Por outro lado, em obras de remodelação, é frequente encontrar uma miscelânea de

materiais, como tijolos, papel, madeira e entulho. A composição dos RCD está intrinsecamente relacionada ao tipo de construção e à natureza dos materiais empregados no projeto.

Quanto à sua composição, os RCD incluem diversos materiais, como concreto (65%-72%), agregados naturais (aproximadamente 20%) e tijolos (5%), além de outros elementos em proporções menores, como misturas asfálticas e metais (Arabani & Azarhoosh, 2012; Gedik, 2020; Gómez-Meijide *et al.*, 2015, 2016; Pérez *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2012).

Do ponto de vista químico, esses resíduos podem conter componentes como óxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), entre outros (Chen *et al.*, 2011b; Gedik, 2020; Zhu *et al.*, 2012).

Os ensaios de controle de qualidade, conforme definidos pela NBR 15115 (ABNT, 2004a) e pela NBR 15116 (ABNT, 2004b) para argamassas e concretos, englobam a medição da densidade após secagem em forno, absorção de água, teor de cloretos e sulfatos, compostos de enxofre, teor de finos, presença de torrões de argila e o ensaio de adsorção de azul metileno.

Por outro lado, no contexto de pavimentos, os ensaios incluem a avaliação do índice de forma das partículas dos agregados, a resistência à abrasão de acordo com o ensaio Los Angeles, a taxa de absorção de água, a equivalência com areia, o índice de suporte Califórnia, a determinação do teor de sulfatos e a análise da plasticidade.

É importante destacar que esses ensaios desempenham um papel de extrema importância na verificação das propriedades e na garantia da qualidade dos materiais de construção, tendo um impacto direto no desempenho, na durabilidade e na segurança das estruturas construídas.

No Brasil, a norma NBR 15116 (ABNT, 2004b) define os requisitos para os agregados reciclados de concreto (ARC) e os agregados reciclados mistos (ARM) usados em argamassa. Para os ARC, a absorção de água é de até 7% para agregados grossos (AG) e até 12% para agregados miúdos (AM), com teor de cloretos e sulfatos limitado a 1%. Os ARM têm uma absorção de água de até 12% (AG) e 17% (AM), com teor de finos de até 10% (AG) e 20% (AM), e conteúdo de torrões de argila de até 2%.

Na Alemanha, a norma DIN 4226-100 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2002) classifica os agregados reciclados em quatro tipos. O Tipo 1, classificado como ARC, deve ter uma densidade seca mínima de 2.000 kg/m³, absorção de água de até 10%, teor de cloretos de até 0,04% e teor de sulfatos de até 0,8%. O Tipo 2 (ARC) permite uma absorção de água de até 15%, enquanto o Tipo 3 (ARCE) deve ter uma densidade seca mínima de 1.800 kg/m³ e absorção de água de até 20%. O Tipo 4, classificado como ARM, deve ter uma densidade seca mínima de 1.500 kg/m³ e teor de cloretos de até 0,15%.

Na Bélgica, a norma PTV 406 (ORGANISME IMPARTIAL DE CONTRÔLE DE PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION, 2016) não especifica a classificação dos agregados reciclados, mas impõe que o teor de compostos de enxofre deve ser inferior a 0,15% e o teor de finos inferior a 15%. O ensaio de adsorção de azul de metileno (MBF) deve ser inferior a 8g/kg.

Na Espanha, a norma UNE EN 13139 (ASOCIACION ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN, 2003) também não especifica a classificação dos agregados reciclados, mas exige que o teor de cloretos seja inferior a 0,15% e o teor de sulfatos (f) seja inferior a 0,06%. Os compostos de enxofre devem ser inferiores a 0,08%, e o teor de finos varia entre menos de 3%, 5% e 8%, dependendo da aplicação. O conteúdo de torrões de argila deve ser inferior a 1%.

Na Holanda, a norma NEN 5905 (ROYAL NETHERLANDS STANDARDIZATION INSTITUTE, 2005) classifica os agregados reciclados como ARC e ARM. Para os ARC, a densidade seca deve ser de pelo menos 2.000 kg/m³, o teor de cloretos deve ser inferior a 0,05%, e o teor de sulfatos e compostos de enxofre deve ser inferior a 1%. Para os ARM, não há especificações adicionais.

No Japão, a Building Contractors Society of Japan (1977) classifica os agregados reciclados como ARM, exigindo uma densidade seca mínima de 2.200 kg/m³ e uma absorção de água de até 7% para agregados grossos (AG) e 13% para agregados miúdos (AM). A norma JIS A 5023 (JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD, 2006) classifica os agregados reciclados leves (ARL) como ARC, com as mesmas especificações de absorção de água.

Na Suíça, a norma OT 70085 (CONFÉDÉRATION, 2006) classifica os agregados reciclados como ARC e ARM. Os ARC devem ter um teor de cloretos inferior a 0,12%, teor de sulfatos

inferior a 1%, e compostos de enxofre inferiores a 1%. Para os ARM, não há especificações adicionais.

Nos Estados Unidos, as normas MDOT (MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2012) e FDOT (FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2017) especificam que os ARC devem ter um teor de cerâmica inferior a 5% e 1%, respectivamente. Para o MDOT, o teor de finos deve ser inferior a 100%, enquanto a norma FDOT também permite até 0,1% de partículas leves.

Na Inglaterra, a norma BS 8500-2 (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2006) classifica os ARC com menos de 5% de cerâmica e impurezas até 1%. Também inclui agregados reciclados de cerâmica (ARCE) com até 100% de cerâmica e teor de cloretos e sulfatos de até 1% do agregado reciclado. O BRE DIGEST 433 (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 1998) apresenta três classificações: AR I (ARCE) com cerâmica até 100% e impurezas até 5%, AR II (ARC) com cerâmica até 10% e impurezas até 1%, e AR III (ARM) com cerâmica até 50% e impurezas até 5%, mas a porcentagem de substituição é menos ao 20%.

Na França, a norma Rilem (1994) define três tipos de agregados reciclados: Tipo 1 (ARCE) com cerâmica abaixo de 10% e impurezas até 1%, Tipo 2 (ARC) com cerâmica abaixo de 100% e teor de cloretos e sulfatos até 0,5%, e Tipo 3 (ARM) com cerâmica acima de 10% e impurezas até 0,5%.

A seguir, serão apresentados alguns resultados referentes às características físicas e mecânicas dos RCD conforme encontrados por diversos pesquisadores (Tabela 2-1). Observa-se uma significativa variação nos valores máximos e mínimos relatados por diferentes autores, o que tem complicado a caracterização desses materiais para seu efetivo aproveitamento.

Tal variação é notória no ensaio de absorção, onde os valores variam entre 13,99 e 2,22, sendo este um indicador crucial tanto para a determinação do teor ótimo de asfalto quanto para o comportamento mecânico das misturas. A densidade relativa é outro parâmetro crítico; valores excessivamente baixos podem resultar em misturas mais porosas e aumentar o risco de quebra das partículas de RCD durante a compactação. Este fator também influencia nos resultados dos ensaios de finos a 10% e no desgaste na máquina de Los Angeles. Quanto aos casos de

equivalente de areia e material pulverulento, os desafios são menores, pois é possível aplicar um processo de lavagem ao material para aprimorar suas propriedades físicas.

Tabela 2-1 Propriedades físicas do RCD

Ensaio	Fonte	Max.	Min.
Absorção (%)	(Abbaspour <i>et al.</i> , 2016). Max. (Poon & Chan, 2006). Min.	13,99	2,20
Equivalente de Areia	(Pérez <i>et al.</i> , 2007). Max (Pourtahmasb & Karim, 2014). Min.	87	65
Material Pulverulento (%)	(Saberian & Li, 2021). Max. (Oikonomou, 2005). Min.	3,11	0,50
Densidade Específica	(Yaowarat <i>et al.</i> , 2019). Max. (Rafi <i>et al.</i> , 2011). Min.	2,71	2,23
Partículas Alongadas e/ou Achatadas.	(Mills-Beale & You, 2010). Max. (Cupo-Pagano <i>et al.</i> 1994). Min.	34	3,75
10% de Finos (kN)	(Kareem <i>et al.</i> , 2019a). Max. (Immelman, 2013). Min.	32,4	12,8
Desgaste na Máquina de Los Angeles (%)	(Azam & Cameron, 2013). Max. (Pourtahmasb & Karim, 2014). Min.	43	24,5

A construção sustentável prioriza o conceito de gerenciamento integrado de materiais, focando no ciclo de vida para minimizar resíduos e potencializar a reutilização e reciclagem, visando a redução da extração de matérias-primas (Hendriks *et al.*, 1998; Lopez, 2018). Neste contexto, a hierarquização na disposição de RCD emerge como estratégia para mitigar impactos ambientais, começando pela limpeza e seleção de materiais, seguida pela redução na geração de resíduos e, finalmente, pela sua reciclagem (Lovato, 2007; Leite, 2001).

A implantação de usinas de reciclagem (ver Figura 2-2) facilita esse processo (Leite, 2001; Ângulo & Figueiredo, 2011), permitindo o tratamento dos resíduos para transformá-los em agregados reciclados. Estes, por sua vez, passam por processos de trituração e peneiramento para garantir suas propriedades adequadas ao uso na construção civil (Patto, 2006).

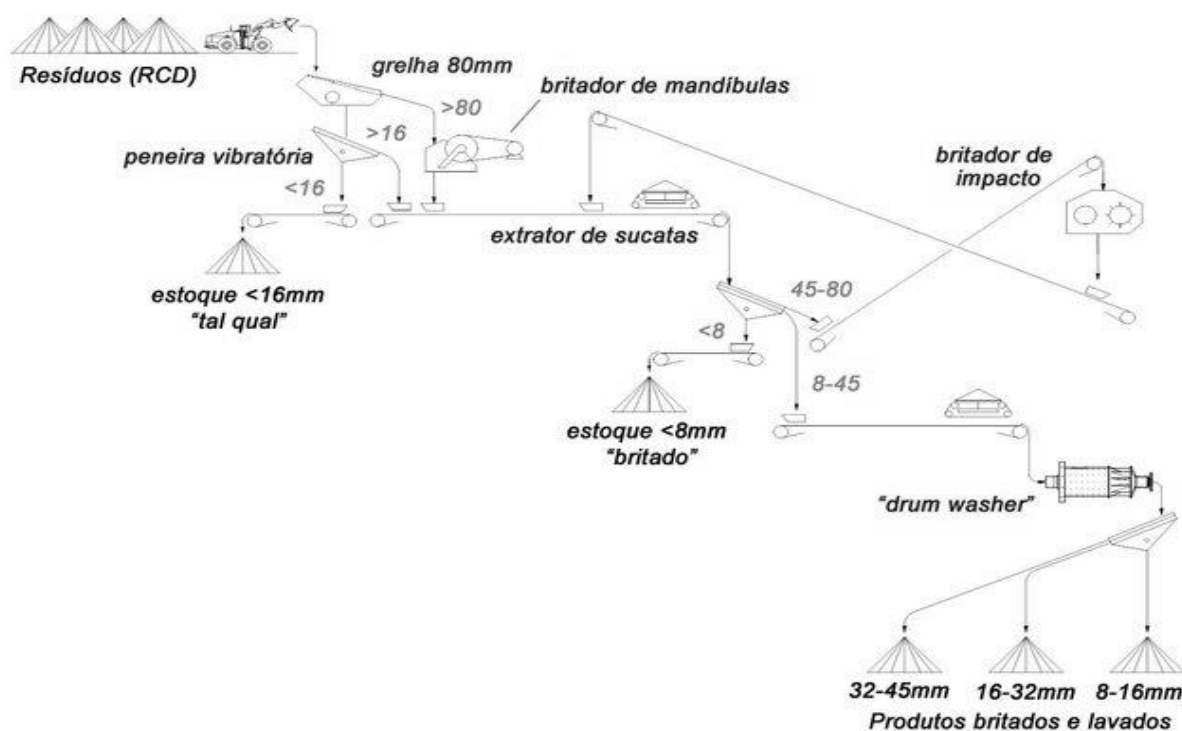


Figura 2-2 Usina fixa de reciclagem de RCD com dois estágios de britagem: BBW Recycling Mittelbe/Magdeburg -Alemanha (Ângulo *et al.*, 2009).

2.3. ESTUDOS REALIZADOS COM RCD

Estudos indicam que a aplicação de RCD em misturas asfálticas é relativamente pouco frequente, apesar do potencial sustentável que oferecem à indústria da construção civil, como enfatizado na "Introdução" (Wu *et al.*, 2013; Pasadín & Pérez 2015; Gómez 2015).

A heterogeneidade das partículas de RCD é notável, particularmente nos grãos de maior dimensão que apresentam uma significativa aderência de argamassa, conferindo-lhes propriedades mecânicas inferiores, uma condição ilustrada na Figura 2-3e ressaltada na "Introdução" e na "Justificativa" (Centeno *et al.*, 2014; Tam, 2009; Shayan, 2003; Cheng, 2005; Zhou, 2010).

As partículas maiores tendem a acumular mais argamassa, impactando negativamente a resistência ao desgaste, como observado no ensaio de abrasão Los Angeles e na variação da granulometria sob compactação (CEDEX, 2014; Shen & Du, 2005). A presença de argamassa altera a densidade, porosidade e absorção dos agregados, especialmente no cascalho, levando a um aumento no consumo de ligante asfáltico nas misturas (Melbouci, 2009; Adams, 2012).

Pesquisas no Brasil revelam que, com a adição de aditivos apropriados, os RCD podem satisfazer os padrões de qualidade exigidos para uma gama de aplicações construtivas, atendendo assim às diretrizes de sustentabilidade discutidas na "Justificativa" (Vernei, 2016; Pasadín & Perez, 2014). Na Universidade de Brasília, inovações têm sido realizadas com o uso de asfalto modificado por borracha em combinação com RCD, o que resultou em aprimoramentos significativos nos ensaios de estabilidade, relação de fluidez (ensaio de Marshall), resistência à tração indireta, resistência à abrasão (ensaio de Cantabro), módulo resiliente, resistência à deformação permanente, fadiga e dano por umidade (ensaio de Lottman modificado).

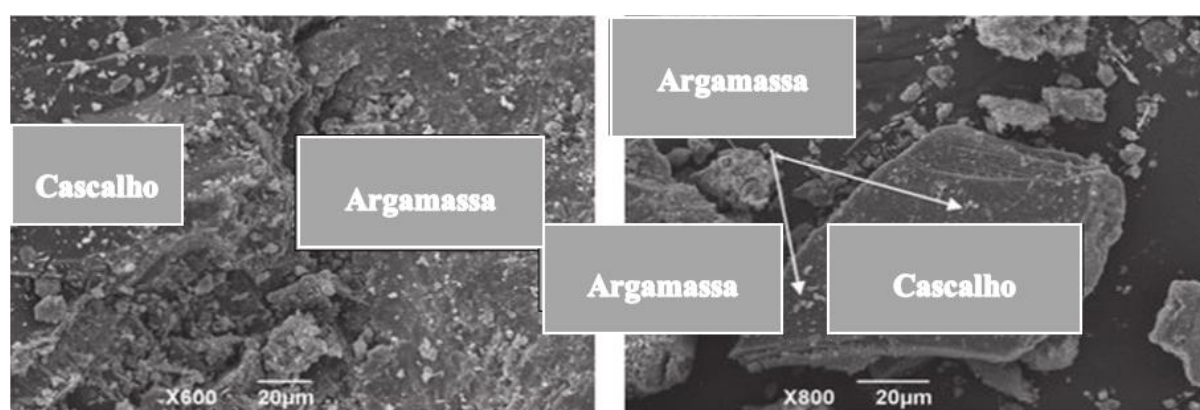


Figura 2-3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de ACR, (Centeno *et al.*, 2014).

Quando o agregado natural é totalmente substituído por agregado resíduo de concreto (RCA), há uma melhora na resistência e redução do dano por umidade, mas a resistência à fadiga é menor. Misturas com RCA e ligante modificado com borracha (CRM) têm menor vida útil em fadiga, porém melhor resistência à deformação permanente (Muniz de Farias *et al.*, 2019; Quiñones, 2014; Amorim, 2013).

Além disso, Algumas pesquisas expandiu-se para incluir a substituição do cimento Portland, avaliando diferentes graus de compactação em solos arenosos e a eficácia dos módulos de resiliência em projetos de pavimentação. Também foram investigadas as aplicações de RCD na elaboração de concretos, estabilização de solos com emulsões asfálticas e sua utilização em coberturas de aterros sanitários. Esses estudos são fundamentais para impulsionar o uso responsável e eficiente dos RCD, alinhando as práticas de construção com os objetivos de sustentabilidade ambiental (Damasceno *et al.*, 2023; Mossmann, 2023; Dias, 2023; Lima, 2023; Nicolau & Barbosa, 2023; Amorim *et al.*, 2023; Santos, 2022).

2.3.1. MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas têm sido amplamente estudadas devido à sua importância na construção e manutenção de pavimentos rodoviários. O uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados reciclados nas misturas asfálticas é uma abordagem promissora para promover a sustentabilidade ambiental. Este estudo aborda os impactos dos RCD nas propriedades físicas e mecânicas das misturas, explorando como diferentes tratamentos podem melhorar a durabilidade, a resistência e a performance geral das misturas asfálticas com a incorporação de RCD.

2.3.1.1. VARIAÇÕES NO CONTEÚDO DE ASFALTO

As misturas asfálticas com RCD requerem maiores consumos de asfalto devido à sua elevada absorção e área superficial. Diversos estudos afirmam que as misturas asfálticas com RCD têm maiores teores ótimos de asfalto do que as misturas convencionais, principalmente devido à alta porosidade da argamassa aderida (Wong, Sun, & Lai, 2007; Pérez et al., 2007, 2010, 2012; Lee, Du, & Shen, 2012; Shen & Du, 2004, 2005; Cho, Hun, Kim, & Choi, 2011; Wen & Bhusal, 2011; Bushal, Li, & Wen, 2011; Rafi, Qadir, & Siddiqui, 2011; Muniz de Farias et al., 2012).

O conteúdo de asfalto está claramente relacionado com a porcentagem e tipo de fração de RCD incorporada. Esta relação é mais evidente quando o RCD é adicionado à fração fina, pelo tipo de mistura e quando se substitui a fração grossa (Álvarez et al., 2020; Bhusal et al., 2011; Ossa et al., 2016; Radević et al., 2017; Shen & Du, 2005). Alguns autores reportaram uma maior absorção de asfalto na fração fina do RCD devido ao seu conteúdo de argamassa e alta área superficial específica (de Juan & Gutiérrez, 2009; Shen & Du, 2005; Rafi, Qadir, & Siddiqui, 2011).

As variações no consumo de asfalto entre diferentes estudos devem-se à heterogeneidade das partículas de RCD, provenientes de diversas fontes e processos de redução de tamanho e trituração (Pérez et al., 2012; de Juan & Gutiérrez, 2009; Bastidas et al., 2022a). Pasandín e Pérez (2013) mencionam que um maior conteúdo de RCD em misturas asfálticas aumenta o teor ótimo de asfalto. De maneira similar, Karem et al. (2019) informaram que as misturas com RCD podem requerer um teor ótimo de asfalto mais alto sem necessariamente melhorar a qualidade (Albayati et al., 2018). No entanto, Bushal et al. (2011) sugeriram adicionar RCD à fração grossa para reduzir o consumo de asfalto.

O recobrimento das partículas de RCD durante a mistura apresenta dificuldades, especialmente para partículas siliciosas e de quartzito, devido à sua composição química e à absorção de asfalto pela argamassa (Pérez et al., 2012). Além disso, a textura rugosa do RCD complica ainda mais o recobrimento. Os diferentes materiais utilizados e o design da mistura influenciam no teor de asfalto, embora as especificações sejam a principal razão para as variações no teor de asfalto com percentuais idênticos de RCD. Fatores como a quantidade e qualidade do recobrimento de argamassa nas partículas de agregado, a qualidade do cimento, a resistência inicial e a idade do concreto, bem como as características físicas dos agregados reciclados, também afetam o consumo de asfalto (Bastidas et al., 2022b).

As misturas asfálticas com RCD requerem mais asfalto do que as convencionais para alcançar a estabilidade ideal, diminuindo a densidade das misturas (Haider et al., 2014; Bhusal & Wen, 2013; Arabani et al., 2013b). Os teores ótimos de asfalto foram obtidos usando o método Marshall. Estudos indicam que o teor efetivo de asfalto em misturas com RCD é menor do que em misturas convencionais devido à maior absorção de asfalto pelo RCD, o que deixa menos asfalto disponível para recobrir os agregados (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Muniz de Farias et al., 2012; Pasandín & Pérez, 2013; Mills-Beale & You, 2010). Bushal et al. (2011) encontraram que a porcentagem de vazios poderia aumentar linearmente com o percentual de RCD na mistura.

Modificações físicas realizadas ao RCD, como o aquecimento e a moagem, podem reduzir o teor ótimo de asfalto na mistura ao eliminar a argamassa, reduzindo a absorção de asfalto e aumentando a densidade do RCD (Liu, 2020). Em tratamentos químicos, a resina de silicone melhora a espessura efetiva do filme de asfalto. Akhtar & Sarmah (2018) encontraram que o teor efetivo de asfalto permanece constante sob diferentes taxas de substituição de RCD. Kareem et al. (2019b) utilizaram um processo de recobrimento de duas camadas para melhorar a adesão do RCD ao asfalto, aumentando a estabilidade da mistura asfáltica. A solução de sal sódico de ácido metanosilícico melhorou o RCD e reduziu o teor ótimo de asfalto da mistura (Chen et al., 2021a).

2.3.1.2. PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS

Como já mencionado, as partículas de RCD possuem uma superfície mais rugosa e maiores poros devido ao concreto aderido, resultando em menor densidade (Álvarez et al., 2019; Zhang et al., 2016; Tahmoorian et al., 2017). Consequentemente, as propriedades volumétricas

também são afetadas pela presença de RCD. Por exemplo, as misturas asfálticas que utilizam RCD têm maiores conteúdos de vazios do que as misturas convencionais (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Pérez et al., 2007, 2010, 2012; Shen & Du, 2004, 2005; Rafi et al., 2011; Gul, 2008; Cupo-Pagano et al., 1994; Tam et al., 2018; Wei, 2020; Radević et al., 2017). Além disso, os vazios no agregado mineral e os vazios preenchidos com ligante também são afetados; com maior conteúdo de RCD, esses parâmetros diminuem (Bushal et al., 2011; Mills-Beale & You, 2010).

Adicionalmente, a quantidade de impurezas que podem estar presentes nos RCD causa os mesmos efeitos nos parâmetros volumétricos (Rahman et al., 2014). Outro efeito causado pela camada de concreto é uma diminuição da camada de ligante que cobre o material granular, o que pode causar maior dificuldade no processo de compactação (Pérez et al., 2007, 2010, 2012; Albayati et al., 2018).

No entanto, essas tendências não são consistentes em todos os estudos, provavelmente devido aos diferentes métodos de design de cada pesquisa e às especificações de cada país. Outro aspecto é que as metodologias de design se concentram em manter o volume de vazios, mas variando o conteúdo de asfalto (Bastidas et al., 2022). Em particular, quanto aos vazios preenchidos com asfalto, alguns estudos não cumprem esse requisito. Em comparação com os agregados naturais, não se observa variação nesses casos, embora haja um aumento no conteúdo de ligante asfáltico (Wong et al., 2007; Pasandín & Pérez, 2015). Essa heterogeneidade dos RCD resulta em estudos com conclusões contraditórias sobre sua aplicação em misturas asfálticas (Muniz de Farias et al., 2019).

Embora essas variações afetem as propriedades volumétricas, não impactam diretamente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com mais de 50% de RCD em tráfego alto. Em contraste, em tráfego médio, os percentuais inferiores a 25% de substituição de RCD podem atender às especificações (Qasrawi & Asi, 2016).

Portanto, é crucial realizar algum tipo de tratamento nos RCD antes de serem usados na elaboração de misturas asfálticas. Isso não só melhora as propriedades físicas dos RCD, como também as propriedades mecânicas das misturas (Pasandín & Pérez, 2015).

Os tratamentos utilizados têm produzido resultados satisfatórios, seja por métodos mecânicos ou de aquecimento do RCD para enfraquecer a camada de argamassa, ou pelo uso de óleo usado para preencher a estrutura porosa, demonstrando afinidade química com o RCD. Além disso, os revestimentos plásticos que cobrem os poros também reduzem a porosidade e diminuem a absorção de ligante, resultando em menores valores de vazios de ar e maiores valores de vazios preenchidos com ligante e vazios do agregado mineral. Esses resultados melhoram as propriedades mecânicas das misturas, aumentando a estabilidade Marshall quando o RCD é tratado (Ma et al., 2019; Azarhoosh et al., 2021).

2.3.2. ENSAIOS E RESULTADOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

As cargas dinâmicas intensificam as variações granulométricas nos RCD, resultando em um aumento no consumo de asfalto quando utilizados em misturas (CEDEX, 2014; Shen & Du, 2005; Melbouci, 2009). Outros estudos apontam que misturas asfálticas incorporando RCD geralmente apresentam menor rigidez e resistência se comparadas às que empregam agregados naturais. No entanto, a variabilidade observada nos resultados destas pesquisas abre espaço para otimizações futuras, indicando um caminho promissor para o aprimoramento desses materiais (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Mills-Beale & You, 2010; Shen & Du, 2005; Zulkati et al., 2013).

2.3.2.1. ENSAIO MARSHALL

Os resultados do ensaio Marshall reafirmam essa variação de desempenho, realçando a necessidade de otimização nas misturas com RCD, que necessita de uma exploração mais aprofundada (Zulkati et al., 2013; Pasandín & Pérez, 2015; Wu et al., 2011; Lee et al., 2012). Além disso, o aumento no teor de RCD está diretamente relacionado ao descolamento do filme de ligante e ao dano por umidade (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Pérez & Pasandín, 2017; Mills-Beale & You, 2010).

Alguns estudos mostraram que a incorporação de RCD incrementa os valores de estabilidade Marshall nas misturas asfálticas (Pérez, Pasandín, & Medina, 2012; Topal et al., 2006; Zulkati et al., 2013; Cho et al., 2011; Heeralal et al., 2009; Arabani et al., 2012; Arabani et al., 2013a; Alvarez et al., 2020; El-Tahan et al., 2018; Giri et al., 2018a; Gopalam et al., 2020a; Pasandín e Pérez, 2020; Radevic et al., 2017). Este comportamento também é observado na fabricação de outros tipos de misturas (Nwakaire et al., 2020). Os incrementos geralmente são mais

notáveis quando apenas a fração grossa do agregado natural é substituída por RCD (Bastidas-Martínez et al., 2021; El-Tahan et al., 2018; Arabani et al., 2012; Alvarez et al., 2020).

A estabilidade melhorada nas misturas com RCD pode ser atribuída à forma angular e cúbica das partículas de RCD (Martinho et al., 2018; Paravithana e Mohajerani, 2006; Zhu et al., 2012), bem como ao uso de cimento como enchimento, aumentando a coesão interna da mistura (Nwakaire et al., 2020). A idade do RCD também influencia os resultados do ensaio Marshall (El-Tahan et al., 2018).

No entanto, outros estudos relataram uma menor estabilidade Marshall após a incorporação de RCD (Lee, Du, & Shen, 2012; Rafi, Qadir, & Siddiqui, 2011; Tanty et al., 2018; Pourtahmasb e Karim, 2014; Bastidas-Martínez et al., 2019; Bastidas-Martínez et al., 2021; Ektas e Karacasu, 2012; Motter et al., 2015; Pasandín e Pérez, 2013; Razzaq, 2016; Vega et al., 2020; Faleschini et al., 2016; Pérez et al., 2012; Lee et al., 2012; Wu et al., 2013; Topal et al., 2006; Zulkati et al., 2013; Cho et al., 2011; Heeralal et al., 2009; Arabani et al., 2012; Arabani et al., 2013a; Gopalam et al., 2020a). Esta redução na estabilidade deve-se à maior porosidade e às propriedades físicas do RCD, especialmente devido à presença de argamassa nas partículas, resultando em coesão insuficiente em alguns casos (Pérez et al., 2007; Tanty et al., 2018). Para compensar, alguns pesquisadores aumentaram o teor de asfalto no projeto da mistura, o que, entretanto, diminui a fricção entre as partículas de agregado e afeta negativamente a estabilidade (Rafi et al., 2011).

Estudos sugerem que a estabilidade Marshall das misturas com RCD é comparável à das misturas convencionais, cumprindo com as especificações de cada país (Pasandín & Pérez, 2013; Wu, Zhong, Zhu, & Wang, 2013; Aljassar et al., 2005; Wu et al., 2013; Pasandín & Pérez, 2014). Embora alguns relatem valores menores de estabilidade Marshall, estes também cumprem com os valores mínimos de especificação (Bastidas-Martínez et al., 2019; Bastidas-Martínez et al., 2021; Motter et al., 2015).

Gopalam et al. compararam o efeito de diferentes enchimentos, como carbono, rocha como filler, cimento e cinzas volantes em misturas asfálticas com RCD, observando um aumento na estabilidade, atribuível ao efeito de endurecimento do carbono e ao comportamento elástico quando se adicionavam partículas de borracha (Gopalam et al., 2020b; Galan, et al., 2020;

Zhang et al., 2019; Pérez, Pasandín, & Medina, 2012; Giri, et al., 2018b; Gopalam, et al., 2020b; Giri, Panda, & Sahoo, 2020; Lee et al., 2012).

Os tratamentos aplicados aos RCD também mostraram um incremento na estabilidade Marshall. O uso de resina de silicone líquida, fosfato trissódico, polietileno de descarte ou tratamentos térmicos têm sido eficazes (Zhu et al., 2012; Chen & Wong, 2013; Giri, et al.; Wong et al., 2007).

As diferenças nos resultados reportados na literatura podem dever-se a fatores como a origem, fonte, composição química, mineralogia, tamanho de partícula e características físicas do RCD, assim como as características da mistura, como o tipo de ligante asfáltico, o conteúdo de asfalto, a distribuição granulométrica, o conteúdo de RCD, o tipo de agregado natural, a metodologia de design da mistura e os parâmetros de composição volumétrica, os tratamentos aplicados e as especificações nacionais. Uma compreensão detalhada destes fatores é essencial para otimizar o uso de RCD em misturas asfálticas, garantindo assim sua viabilidade e desempenho em diversas condições de tráfego e carga.

2.3.2.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA (RTI) E DANOS POR UMIDADE (DUI) EM MISTURAS ASFÁLTICAS COM RCD

A RTI é uma medida crucial para avaliar o DUI em misturas asfálticas. Alguns estudos relatam que a RTI aumenta com a incorporação de RCD, graças às propriedades auto cimentantes do argamassa aderida e ao aumento do conteúdo de ligante asfáltico (Alvarez et al., 2019; Cho et al., 2011; Galan et al., 2019; Giri et al., 2018a; Motter et al., 2015; Pasandín & Pérez, 2015). No entanto, outros estudos indicam uma diminuição da RTI com RCD, atribuída a um menor conteúdo de ligante e à degradação do RCD em condições úmidas (Gopalam et al., 2020a; Hou et al., 2014; Lee et al., 2012; Mikhailenko et al., 2020; Mills-Beale & You, 2010; Qasrawi & Asi, 2016; Sanchez-Cotte et al., 2020). Essas discrepâncias são devidas à interação entre o asfalto e o agregado, e à composição mineralógica do RCD (Nwakaire et al., 2020; Pasandín & Pérez, 2013).

A resistência aos DUI é crítica para a durabilidade e desempenho das misturas asfálticas. A influência dos RCD nessa propriedade varia conforme a taxa de substituição e as características dos RCD. Em geral, as misturas com RCD podem mostrar uma resistência adequada à umidade, cumprindo com as especificações (Shen & Du, 2005; Aljassar, Al-Fadala, & Ali,

2005; Paravithana & Mohajerani, 2006; Pérez, Pasandín, & Medina, 2007; Mills-Beale & You, 2010; Cho, You, & Kim, 2011; Mills-Beale & You). No entanto, a resistência pode diminuir com percentagens crescentes de RCD (Wen & Bhusal, 2011; Pérez et al., 2012; Zhu, Birgisson, & Kringos, 2012; Wu et al., 2013; Ossa, García, & Botero, 2016), e para altos percentuais, não se cumprem as especificações, independentemente do tipo de filler usado como aditivo (Pasandín & Pérez, 2015; Mills-Beale & You, 2010; Pérez et al., 2012).

Alguns estudos sugerem que a inclusão de RCD pode melhorar a resistência à umidade (Chen, et al., 2011c; Lee, Du, & Shen, 2012; Pérez et al., 2007; Paravithana & Mohajerani, 2006; Zou et al., 2020a; Zou et al., 2020b; Albayati & Al-Mosawe, 2018; Pasandín, Pérez, Caamaño, Pérez-Barge, & Gómez-Meijide, 2018; Fatemi & Imaninasab, 2016b; Hou, Wu, Li, & Xu, 2014; Pan, Zhang, & Zeng, 2015; Wu, Ye, & Li, 2003; Pasandín & Pérez, 2014; Motter et al., 2015), embora outros relatem que os resultados superam os valores mínimos requeridos, mesmo com percentagens crescentes de RCD (Pasandín & Pérez, 2015).

A resistência à umidade em misturas asfálticas com RCD depende de vários fatores. A qualidade do agregado natural é fundamental para o desempenho da mistura (Pasandín & Pérez, 2013). As misturas com RCD fino como filler mostram maior resistência ao dano por umidade (Wu et al., 2013). A substituição de RCD pode melhorar a aderência da mistura, provavelmente devido à penetração do ligante nos poros do RCD (Motter et al., 2015). Aumentar a substituição de RCD na mistura geralmente incrementa a resistência ao dano por água (Fatemi & Imaninasab, 2016a). A maior resistência à umidade é atribuída à textura rugosa do RCD (Albayati et al., 2018). No entanto, o uso de RCD em misturas asfálticas mornas tende a reduzir a resistência à umidade, embora o tratamento do RCD com cal e ácido possa melhorar esse parâmetro (Abass & Albayati, 2020). Os RCD provêm de diversas estruturas, afetando sua qualidade e composição. Os RCD de pavimentos de concreto se comportam de maneira distinta dos provenientes de edifícios residenciais (Hou et al., 2018; Zhang et al., 2016; Pasandín & Pérez, 2015).

O tratamento dos agregados reciclados, mediante aditivos ou tratamentos superficiais, pode melhorar a aderência entre o asfalto e o RCD, reduzindo a suscetibilidade à umidade (Chen & Wong, 2013; Pasandín & Pérez, 2014; Wong, Sun, & Lai, 2007; Chen, et al., 2011c; Arabani & Moghadas Nejad, 2013; Suresh, Pal, & Sarkar, 2021). O uso de resíduo de forno de cimento

junto com RCD e o uso de aditivo como o fosfato trissódico também apresentaram resultados positivos (Brooks & Cetin, 2012; Chen & Wong, 2013).

A porosidade e textura do RCD afetam a resistência à umidade, assim como as propriedades mecânicas e físicas vistas anteriormente. Agregados mais porosos podem absorver mais água, diminuindo a aderência do asfalto (Fatemi & Imaninasab, 2016a; Albayati & Al-Mosawe, 2018). A aderência entre o asfalto e o RCD é afetada pela degradação da argamassa na superfície do RCD, permitindo maior penetração da água (Hou et al., 2018). O carbono coo aditivo pode melhorar a resistência à umidade devido ao seu comportamento elástico (Gopalam et al., 2020b).

O conteúdo de argamassa e cimento aderido aos agregados reciclados pode influenciar na resistência à umidade, já que um alto conteúdo de argamassa pode levar a uma maior absorção de água e reduzir a aderência entre o asfalto e os agregados (Pérez et al., 2012; Pasandín & Pérez, 2013). Altos percentuais de RCD podem provocar mudanças na gradação da mistura no momento da compactação (Zhang et al., 2016) e o preenchimento mineral também afeta a resistência à umidade da mistura (Pasandín & Pérez, 2015).

A incorporação de RCD em misturas asfálticas pode reduzir a RTI das amostras submersas, dado que a alta absorção de RCD pode deslocar o ligante pela água, provocando desprendimento dos agregados e perda de propriedades mecânicas (Pérez et al.). Sugere-se usar aditivos para melhorar a resistência à umidade em misturas com RCD (Zulkati et al.).

Para melhorar a resistência à umidade das misturas com RCD, vários métodos foram propostos:

- Aditivos: A incorporação de aditivos pode melhorar a aderência entre o asfalto e os RCD, reduzindo a suscetibilidade à umidade (Zulkati et al., 2013; Mikhailenko et al., 2020).
- Tratamentos Superficiais: O uso de ácidos para remover a camada de argamassa ou recobrir com argamassa adicional também mostrou melhorar a resistência à água (Chidozie et al., 2020; Peng, 2017; Zhao, 2020).

- Emulsões e Aditivos Químicos: O recobrimento com emulsões asfálticas ou o uso de aditivos químicos pode melhorar a aderência e a resistência à umidade (Kareem et al., 2019b; Ma et al., 2019).
- Ajuste de Graduação: A modificação da graduação da mistura para incluir RCD pode melhorar a densidade e reduzir a porosidade, otimizando a resistência à água (Pérez, 2012; Zhang et al., 2016).
- Considerações sobre a Resistência à Umidade

A inclusão de RCD em misturas asfálticas pode ter efeitos diversos na resistência aos danos por umidade. A qualidade do RCD, o tratamento dos agregados e a composição da mistura são fatores-chave para determinar o desempenho. Alguns estudos indicam melhorias na resistência à umidade com RCD, enquanto outros relatam diminuições. É crucial controlar a proporção de RCD e empregar métodos adequados de tratamento e aditivos para assegurar um desempenho ótimo em condições úmidas.

2.3.2.3. MÓDULO DINÂMICO E RESILIENTE

O uso de RCD em misturas asfálticas pode influenciar significativamente o módulo dinâmico e resiliente dessas misturas. A incorporação de RCD geralmente tende a reduzir o módulo de rigidez, especialmente em altas frequências, devido a características como sua maior porosidade e menor resistência da argamassa aderida (Zhang et al., 2016; Qasrawi & Asi, 2016; Radević et al., 2017). Estudos mostraram que, em geral, as misturas que contêm RCD têm um módulo mais baixo em comparação com as misturas de controle, particularmente em frequências elevadas (Giri et al., 2018c, d; Mills-Beale & You, 2010).

No entanto, alguns estudos sugerem que a inclusão de RCD pode melhorar o módulo resiliente e dinâmico das misturas asfálticas. Isso se deve à atividade cementante residual do RCD e sua menor condutividade térmica, que podem contribuir para uma maior capacidade de carga e resistência à deformação, especialmente em altas temperaturas (Monu et al., 2020; Pourtahmasb et al., 2015). A atividade cementante residual na argamassa aderida pode hidratar-se a temperaturas mais altas, aumentando o módulo resiliente, enquanto a maior porosidade do RCD proporciona uma menor condutividade térmica na mistura (Goh & You, 2012; Monu et al., 2020).

Por outro lado, a redução no módulo resiliente e dinâmico às vezes é observada quando se utilizam altas proporções de RCD. As propriedades físicas inferiores do RCD, como sua menor densidade e maior absorção de água, podem afetar negativamente a rigidez da mistura (Pasandín et al., 2018; Kareem et al., 2019b). Além disso, o impacto do RCD na rigidez pode variar em função da fração do agregado utilizada. A fração fina de RCD tende a melhorar o módulo resiliente devido à sua angularidade e ao aumento da fricção interna, enquanto a fração grossa pode reduzir o módulo devido à fraqueza da argamassa aderida (Arabani & Azarhoosh, 2012; Arabani et al., 2013a).

O percentual de RCD na mistura também influencia o módulo dinâmico e resiliente. Foi encontrado que misturas com até 30% de RCD são aceitáveis em termos de módulo, enquanto proporções maiores, especialmente superiores a 50%, podem reduzir significativamente o módulo (Dhir et al., 2019; Zhang et al., 2016). A qualidade do RCD e sua origem também são fatores determinantes. O RCD proveniente de pavimentos rígidos costuma mostrar um melhor desempenho em termos de módulo resiliente em comparação com o RCD de edificações (Vega et al., 2020; Sanchez-Cotte et al., 2020).

A temperatura durante o ensaio e a distribuição do tamanho de partícula na mistura também afetam o módulo dinâmico e resiliente. A temperatura afeta a viscosidade do ligante e a rigidez da mistura, enquanto a distribuição do tamanho de partícula influencia a densidade e homogeneidade da mistura (Monu et al., 2020; Goh & You, 2012). As misturas com RCD podem mostrar uma maior sensibilidade a essas variações (Radević et al., 2017; Giri et al., 2018a, b).

Pesquisas demonstraram que a inclusão de RCD pode levar a uma melhora no módulo resiliente quando a porcentagem de RCD é moderada, devido à atividade cementante residual e à menor condutividade térmica do RCD (Pourtahmasb et al., 2015; Monu et al., 2020). No entanto, em maiores porcentagens de RCD, observa-se uma tendência à diminuição do módulo resiliente devido às características físicas inferiores do RCD (Pasandín et al., 2018; Kareem et al., 2019b). A variabilidade nos resultados pode estar relacionada com as diferenças na qualidade do RCD e nos métodos de avaliação (Fatemi & Imaninasab, 2016b; Giri et al., 2018a, b).

A fração de RCD utilizada também desempenha um papel crucial no desempenho da mistura. O uso de RCD na fração fina pode melhorar o módulo resiliente devido à sua angularidade e

maior fricção interna, enquanto o RCD na fração grossa pode reduzir o módulo resiliente devido à fraqueza da argamassa aderida (Arabani & Azarhoosh, 2012; Arabani et al., 2013a). A inclusão de RCD em misturas asfálticas requer uma consideração cuidadosa desses fatores para otimizar o desempenho e garantir que as propriedades da mistura atendam aos requisitos necessários para sua aplicação (Nwakaire et al., 2020; Pasandín et al., 2018).

Em resumo, o uso de RCD em misturas asfálticas apresenta um equilíbrio complexo entre seus benefícios e desafios. Embora o RCD possa oferecer vantagens, seu impacto no módulo dinâmico e resiliente depende da proporção, da fração e da qualidade do RCD utilizado (Giri et al., 2018a, b; Mills-Beale & You, 2010). A pesquisa contínua é fundamental para entender completamente esses efeitos e otimizar o uso de RCD em aplicações asfálticas (Vega et al., 2020; Sanchez-Cotte et al., 2020).

2.3.2.4. RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

A revisão da literatura sobre a deformação do asfalto misturado a quente com RCD mostrou conclusões variadas. Em alguns casos, essas misturas exibiram desempenho semelhante ou melhor em comparação com os agregados naturais (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Pérez et al., 2007; Pérez et al., 2010; Pérez et al., 2012). No entanto, vários estudos indicaram que, apesar de cumprir com as especificações, um aumento na porcentagem de RCD leva a uma diminuição na resistência à deformação. Essa redução se explica pelo aumento no conteúdo de ligante na mistura, que o RCD absorve e não se inclui no conteúdo efetivo de aglutinante (Wen & Bhusal, 2011; Mills-Beale & You, 2010).

Outros estudos apontaram que a resistência às deformações depende da fração do agregado natural que é substituída pelo RCD. As misturas com RCD em ambas as frações (grossa e fina) mostraram a maior resistência à deformação (Zhu et al., 2012). O uso de RCD em ambas as frações ou apenas na fração grossa mostrou melhor resistência que as misturas com agregados naturais, enquanto o uso de RCD na fração fina a reduziu (Shen & Du, 2004; 2005). Gul (2008) e Wong et al. (2007) concordaram que o uso de RCD na fração grossa melhora o desempenho, enquanto na fração fina o diminui. Cho et al. (2011) encontraram que o uso de RCD tanto na fração grossa quanto na fina resultou em pior desempenho. Arabani e Azarhoosh (2012) atribuíram o desempenho degradado à fraqueza da argamassa aderida no RCD grosso.

Quanto ao uso de RCD como filler, alguns estudos mostraram uma resistência melhorada à deformação (Chen et al., 2011c), enquanto outros não encontraram efeitos significativos (Wong et al., 2007).

Apesar dessa variabilidade, a maioria dos autores afirma que as misturas asfálticas com RCD cumprem com as especificações nacionais relativas à resistência à deformação (Radević et al., 2017; Mikhailenko et al., 2020).

A inclusão de RCD em proporções moderadas resultou em uma melhora na deformação das misturas asfálticas. A atividade cimentante residual das partículas de cimento não hidratado na superfície do RCD aumentou a coesão e a fricção na mistura, melhorando a resistência às trilhas de roda (Pérez et al., 2007; Pérez et al., 2012; Arabani & Azarhoosh, 2012; Arabani et al., 2013a; Motter et al., 2015; Radević et al., 2017; Pasandín & Pérez, 2013). Também foi observado que tratamentos específicos do RCD, como o uso de resina de silicone e sal sódico do ácido metanosilicônico, melhoram significativamente resistência às deformações (Lie et al., 2019; Hao et al., 2018; Zhang, L.S., 2016; Chen et al., 2021b). Outros tratamentos como a imersão em solução ácida e o tratamento mecânico curto também demonstraram melhorias na resistência às trilhas de roda (Wei, 2012; Liu, A.A., 2020).

Em proporções maiores, a inclusão de RCD provocou uma degradação no desempenho de resistência à deformação das misturas asfálticas. A perda de coesão devido à diminuição da eficácia do ligante e à perda de angularidade devido à quebra excessiva do RCD são responsáveis por essa diminuição (Monu et al., 2020; Kareem et al., 2019b; Wen & Bhusal, 2011; Zhang et al., 2016).

Muitos estudos encontraram que a inclusão de RCD deteriora o desempenho de resistência à deformação das misturas de asfalto. O aumento da porosidade do RCD em comparação com os agregados naturais, bem como a absorção do ligante, diminui o conteúdo efetivo disponível na mistura, prejudicando a resistência à deformação (Wen & Bhusal, 2011; Motter et al., 2015). A presença de argamassa aderida no RCD também está associada a um desempenho degradado (Arabani & Azarhoosh, 2012). No entanto, estudos como os de Pasandín e Pérez (2013) concluíram que misturas com quantidades moderadas de RCD mostram um bom desempenho em resistência à deformação.

A face altamente triturada do RCD grosso aumenta a fricção interna na matriz de agregados, melhorando a resistência à deformação (Motter et al., 2015). Isso foi observado em diversos estudos que concluem que o uso de RCD na fração grossa pode melhorar a resistência do pavimento à deformação permanente (Wu et al., 2013; Zhu et al., 2012; Radević et al., 2017). Adicionalmente, a melhoria na resistência à deformação foi atribuída à estrutura superficial porosa do RCD, que ajuda na adesão do ligante asfáltico ao agregado, melhorando a coesão e a fricção na mistura (Deng et al., 2010; Zhao, 2020; Peng, 2017; Motter et al., 2015).

Em resumo, embora a inclusão de RCD em misturas asfálticas possa apresentar desafios em termos de resistência à deformação, especialmente em altas proporções, com tratamentos adequados e controle nas proporções de substituição, é possível obter misturas que cumpram com as especificações e ofereçam um desempenho satisfatório em condições reais de uso (Pérez et al., 2012; Mikhailenko et al., 2020; Radević et al., 2017; Arabani et al., 2013a).

2.3.2.5. VIDA À FADIGA

A fadiga é uma das propriedades menos estudadas das misturas asfálticas com RCD. As pesquisas mostram resultados variados sobre o impacto do RCD na vida à fadiga dessas misturas. Algumas pesquisas concluíram que as misturas asfálticas com RCD se comportam de maneira semelhante às misturas convencionais (Pérez et al., 2007; Pérez et al., 2010). Em outros casos, observou-se uma melhoria na vida à fadiga quando o RCD foi utilizado como filler (Chen et al., 2011c) ou quando o agregado natural foi substituído por até 100% de RCD (Nehad et al., 2013).

A substituição parcial de RCD também tem mostrado ser eficaz. Uma substituição de até 30% de RCD em misturas asfálticas a quente demonstrou ser satisfatória em termos de vida útil à fadiga (Pasandín & Pérez, 2013). Outros estudos também apoiaram essa conclusão, encontrando que a inclusão de até 30% de RCD é aceitável para a vida útil à fadiga (Dhir et al., 2019).

As técnicas de modificação do RCD têm mostrado resultados promissores. Por exemplo, revestir a superfície do RCD com emulsão asfáltica ou resíduos de óleo de cozinha usado melhorou significativamente a vida à fadiga das misturas asfálticas (Pasandín et al., 2014; Ma et al., 2019). Essas modificações melhoram a aderência e reduzem a suscetibilidade aos ciclos de carga repetidos.

Em termos de proporção de RCD, observou-se que a inclusão de até 30% de RCD pode melhorar o desempenho em fadiga das misturas asfálticas, pois aumenta a fricção interna e a coesão na mistura (Pasandín & Pérez, 2017; Arabani & Azarhoosh, 2012; Arabani et al., 2013; Nejad et al., 2013). No entanto, substituições superiores a 50% de RCD podem degradar o desempenho das misturas devido à quebra excessiva das partículas de RCD durante a mistura e compactação (Pérez et al., 2007; Wu et al., 2017).

A inclusão de RCD nas misturas asfálticas mostrou resultados contraditórios em relação à vida à fadiga. Alguns estudos relataram melhorias na resistência à fadiga devido à maior rigidez e melhor distribuição do tamanho das partículas, o que cria uma estrutura mais densa e entrelaçada (Arabani & Azarhoosh, 2012; Arabani et al., 2013). Outros estudos indicaram uma diminuição na vida à fadiga quando se utiliza uma alta proporção de RCD, atribuindo isso à quebra da argamassa aderida (Pérez et al., 2007; Wu et al., 2017).

Em geral, a resistência à fadiga das misturas asfálticas com RCD pode melhorar com um tratamento adequado e uma proporção controlada de RCD. Os estudos demonstraram que a inclusão de RCD pode aumentar a vida útil à fadiga até certo ponto, mas a incorporação excessiva de RCD pode ter efeitos negativos devido à redução na capacidade de carga da mistura (Nwakaire et al., 2020).

A modificação do RCD com materiais como a resina de silicone e outros tratamentos químicos também mostrou melhorias significativas na vida à fadiga das misturas asfálticas (Lie et al., 2019; Hao et al., 2018; Zhang, L.S., 2016; Chen et al., 2021b; Wei, 2012; Liu, A.A., 2020). Esses tratamentos ajudam a reparar a argamassa de cimento superficial e melhorar a aderência do ligante, resultando em um melhor desempenho em condições de carga repetida.

Em resumo, a pesquisa sobre a vida à fadiga das misturas asfálticas com RCD é diversa e apresenta resultados mistos. Enquanto alguns estudos demonstraram melhorias significativas na vida à fadiga com a inclusão de RCD, outros encontraram que altas proporções de RCD podem reduzir a resistência à fadiga. A chave para melhorar a vida à fadiga das misturas asfálticas com RCD reside em um controle cuidadoso da proporção de RCD e na aplicação de tratamentos adequados para melhorar a aderência e a coesão da mistura (Pérez et al., 2012; Mikhailenko et al., 2020; Arabani et al., 2013a).

2.3.3. TIPO DE TRATAMENTOS

2.3.3.1. TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos incluem calcinação e tratamento térmico, aquecimento em forno, e tratamento termomecânico. O tratamento de calcinação implica a aplicação de gradientes térmicos para transformar a calcita presente em cal, melhorando a resistência à deformação em misturas asfálticas (Wong et al., 2007). Por outro lado, o tratamento térmico utiliza a diferença de expansão térmica entre o agregado e a argamassa adesiva para eliminar esta última durante o processo de aquecimento, melhorando propriedades como a absorção de água e a densidade dos RCD (Al-Bayati et al., 2016; Sui et al., 2012). O aquecimento da mistura solta em um forno a 170 °C durante quatro horas após a mistura e antes da compactação aumenta a absorção de ligante, melhorando a resistência da argamassa aderida ao RCD e obstruindo seus poros, o que evita a entrada de água, melhorando assim a resistência ao DUI e a rigidez (Pasandín & Pérez, 2013). Finalmente, o tratamento termomecânico, um processo de moagem por aquecimento no qual a argamassa adesiva e o agregado em RCD se afrouxam sob a ação do calor, facilita a moagem mecânica da argamassa adesiva, melhorando significativamente a redução da absorção de água e a resistência à trituração (Jitsangiam et al., 2021; Liu, 2020).

2.3.3.2. RECOBRIMENTOS COM ADITIVOS

Estes são os diversos aditivos usados para o recobrimento: pasta de cimento de escória, resina de silicone líquida, emulsão betuminosa, resina de silicone orgânica, leite de cimento, emulsão asfáltica, resíduo de óleo de cozinha usado e resíduos plásticos. A aplicação de uma camada de pasta de cimento de escória reduz a porosidade e aumenta a rigidez e resistência à deformação em RCD (Lee et al., 2012). O recobrimento com resina de silicone líquida bloqueia os poros dos RCD e melhora sua resistência à fragmentação e absorção, aumentando a resistência ao DUI em misturas asfálticas (Zhu et al., 2012). A aplicação de uma emulsão betuminosa a 5% sela os poros dos RCD, melhorando a resistência ao DUI e aumentando a afinidade química entre o RCD e o ligante (Pasandín & Pérez, 2014). A resina de silicone orgânica pode preencher eficazmente os poros dos RCD, criando uma película de cura hidrofóbica que melhora a resistência e compacidade do agregado, e melhora sua aderência ao asfalto (Chen et al., 2011e; Zhu et al., 2012; Lie et al., 2019). O recobrimento com leite de cimento implica preencher as microfissuras da superfície dos RCD com leite de cimento, aumentando a resistência e melhorando sua robustez, e é utilizado também na tecnologia de duplo recobrimento para minimizar a absorção de água e asfalto (Kareem et al., 2018b; Zhang,

2016). O recobrimento com emulsão asfáltica após a demulsificação forma uma camada protetora que melhora a estrutura dos poros dos RCD, a adesão e a resistência ao DUI (Chen et al., 2011e; Xie & Wu, 2020; Pasandín & Pérez, 2014). O pré-tratamento com resíduos de óleo de cozinha usado melhora a densidade e a resistência DUI, a vida útil por fadiga e a estabilidade das misturas asfálticas (Ma et al., 2019). Finalmente, o uso de resíduos plásticos descartados como recobrimento para os RCD melhora a coesão entre o agregado e o ligante, resultando em uma maior estabilidade e resistência ao DUI (Giri et al., 2020).

2.3.3.3. DESGASTE MECÂNICO

O desgaste mecânico elimina a argamassa de cimento aderida mediante colisão em uma máquina abrasiva, reduzindo a absorção de água e melhorando a morfologia superficial dos RCD (Chen et al., 2011a; Yang, 2016; Wang, 2018).

2.3.3.4. TRATAMENTOS COM ÁCIDO

As soluções ácidas, como o ácido clorídrico, melhoram os RCD ao dissolver as partículas macias na superfície, reduzindo a porosidade e melhorando a absorção de água e a resistência à trituração (Chen et al., 2011d; Tam et al., 2007).

2.3.3.5. TRATAMENTOS QUÍMICOS

Estes são os diversos tratamentos químicos usados para melhorar o desempenho dos RCD: silicato de sódio, imersão em hidróxido de cálcio, agente de acoplamento de silano e resina de silicone líquido. O tratamento com silicato de sódio melhora o desempenho dos RCD ao formar géis que preenchem as microfissuras e aumentam a resistência da argamassa de cimento superficial (Yang, 2016, 2020; Zhang, 2016). A imersão em uma solução de hidróxido de cálcio forma uma película alcalina na superfície dos RCD, melhorando a aderência entre o agregado e o asfalto, e aumentando a densidade do material (Chen et al., 2021a; Ye, 2020). Os agentes de acoplamento de silano melhoram a adesão entre materiais inorgânicos e orgânicos nos RCD, formando camadas protetoras que reduzem a absorção de água e melhoram a resistência à trituração (Hou et al., 2014, 2013; Zhang et al., 2016). Finalmente, o recobrimento com resina de silicone líquido melhora a estrutura dos poros e a adesão dos RCD, aumentando sua densidade e resistência à água (Zhu et al., 2012).

Outros materiais ou tratamentos usados para a melhoria dos RCD incluem garrafas plásticas descartadas, tecnologia de duplo recobrimento, precipitação microbiana de carbonato e

soluções de nano-SiO₂. O tratamento com garrafas plásticas descartadas (WPB) penetra os poros dos RCD, melhorando a estrutura dos poros e aumentando a densidade do material, formando uma camada impermeável (A. Azarhoosh et al., 2021). A tecnologia de duplo recobrimento combina a aplicação de uma camada de pasta de escória de cimento seguida de Sika Tite-BE, melhorando a resistência e a adesão entre o RCD e o asfalto, resultando em misturas asfálticas com propriedades superiores (Kareem et al., 2018, 2019, 2020). A precipitação de carbonato microbiano utiliza bactérias para formar cristais de carbonato de cálcio nos RCD, melhorando sua resistência e estrutura superficial, e aumentando a adesão entre o RCD e o asfalto (Pan et al., 2015). Finalmente, a imersão em soluções de nano-SiO₂ melhora a estrutura do poro dos RCD e a resistência à água, formando géis que aumentam a densidade e reduzem a absorção de água (Yang, 2020; Liu, 2020).

Finalmente, os processos de compactação dos RCD são cruciais para a melhoria do módulo resiliente, sugerindo que tratamentos adequados podem aprimorar as propriedades desses materiais até alcançarem um desempenho compatível com agregados convencionais, um potencial já reconhecido na "Justificativa" (Jiménez, 2016; Souza, 2015).

2.3.4. Conclusão

Da análise da revisão da literatura, podem-se obter várias conclusões e observações significativas. O uso de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados reciclados em misturas asfálticas apresenta um alto potencial para promover a sustentabilidade na construção de estradas. Os RCD, embora inicialmente de menor qualidade devido à presença de argamassa aderida porosa, podem ser melhorados por meio de diversos tratamentos. Esses tratamentos, como a calcinação, revestimentos com emulsão asfáltica ou resina de silicone, e aquecimento em forno, demonstraram melhorar a resistência à água e a durabilidade das misturas asfálticas. No entanto, é necessária uma avaliação mais exaustiva dos custos e da viabilidade ambiental desses tratamentos para sua implementação em larga escala.

A adoção de RCD em misturas asfálticas oferece numerosos benefícios, como a redução do uso de recursos naturais e a diminuição de emissões de gases de efeito estufa. Apesar desses benefícios, a variabilidade na qualidade dos RCD, os altos custos de tratamento e a falta de padrões claros continuam sendo desafios significativos. É crucial continuar a pesquisa para desenvolver tratamentos mais eficientes e ecológicos e estabelecer especificações padronizadas que aumentem a confiança dos profissionais no uso de RCD.

2.3.5. Lacunas Identificadas

Apesar do avanço na pesquisa sobre o uso de RCD em pavimentos, persistem várias lacunas que requerem atenção:

- **Disparidade nas Recomendações:** Existe uma grande variabilidade nas recomendações sobre os níveis de substituição de RCD, o que dificulta a padronização e adoção generalizada na indústria.
- **Presença de Impurezas:** A presença de argamassa aderida e outras impurezas nos RCD complica seu processamento e tratamento, afetando a qualidade do material final.
- **Variabilidade na Qualidade:** A qualidade dos RCD pode variar significativamente conforme sua fonte e método de tratamento, o que apresenta desafios na sua utilização uniforme.
- **Avaliação In Situ:** É essencial realizar avaliações in situ do desempenho dos pavimentos que utilizam RCD para validar os resultados obtidos em estudos de laboratório.
- **Desenvolvimento de Especificações:** São necessárias diretrizes e especificações detalhadas para o uso de RCD em misturas asfálticas, considerando as diferentes condições de tráfego e tipos de estradas.
- **Métodos de Tratamento Eficientes:** É necessário desenvolver métodos de tratamento mais eficientes e ecológicos para os RCD, bem como ligantes asfálticos inovadores que melhorem seu desempenho.
- **Avaliação do Ciclo de Vida:** Um enfoque integral de ciclo de vida é fundamental para avaliar os benefícios ambientais e econômicos do uso de RCD, identificando as opções de utilização mais benéficas em diversos cenários.

Por isso, nesta pesquisa, abordou-se o uso de um aditivo polimérico por meio de adsorção e o estudo da morfologia das partículas e como elas se degradam através dos diferentes processos que atravessam as misturas asfálticas. Esta abordagem visa melhorar a resistência e durabilidade das misturas asfálticas com RCD, proporcionando uma alternativa sustentável e eficiente para a construção de pavimentos. A pesquisa contínua e o desenvolvimento de tecnologias avançadas permitirão maximizar os benefícios do uso de RCD na construção de pavimentos, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes na indústria da construção.

2.4. POLÍMEROS

Na engenharia civil, os polímeros são essenciais devido à sua capacidade de adaptação e ampla gama de propriedades funcionais. Estas macromoléculas são estrategicamente modificadas para atender às demandas específicas de construção, estabilização de solos e pavimentação. Compostos de solo e polímero melhoram a resistência do solo, ampliando sua aplicabilidade em infraestruturas (Silva, 2020). A adição de polímeros em misturas asfálticas pode resultar em asfaltos com maior rigidez e desempenho mecânico, embora requeiram avaliações adicionais para algumas características (Kareem et al., 2019b).

Polímeros biodegradáveis como o ácido Polilático (PLA) e derivados naturais como o carboximetilcelulose (CMC) são empregados não só pela melhoria de propriedades mecânicas, mas também pelo seu alinhamento com práticas ambientais sustentáveis, substituindo materiais tradicionais e diminuindo o impacto ambiental (Palmeira, 2018). Além disso, emulsões poliméricas utilizadas como membranas impermeáveis e revestimentos protetores ilustram a versatilidade dos polímeros em diversas aplicações de construção (Sika Australia Pty Limited, 2010; Kareem *et al.*, 2019a). Os polímeros também são fundamentais para inovações em estabilização de solos e aditivos para concreto, melhorando a trabalhabilidade e durabilidade do material (Barreto *et al.*, 2018; Lam & Jefferis, 2018; Silva, 2020).

A integração de polímeros aos RCD revoluciona o reaproveitamento desses materiais, ao reforçar o concreto reciclado e melhorar sua resistência mecânica e durabilidade. Esta abordagem não só realça as propriedades estruturais dos agregados reciclados, mas também promove a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de materiais virgens e diminuir o volume de resíduos em aterros, alinhando-se com as metas de uma engenharia civil mais responsável e ecológica (Yaowarat et al., 2019).

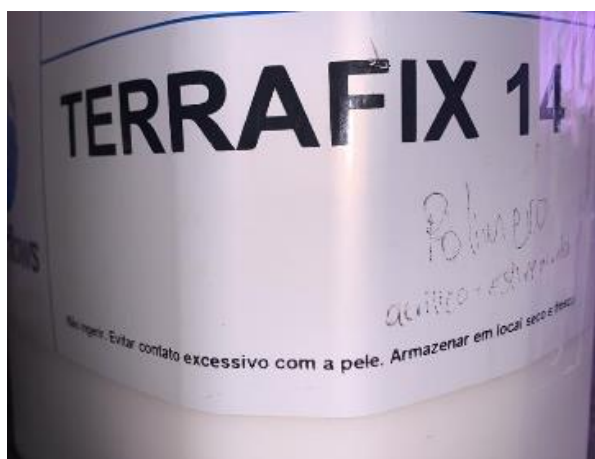
Outros polímeros são empregados para aprimorar as propriedades dos RCD. Os superplastificantes padrão, compostos por polímeros de lignosulfonato e aditivos (SP1), e os superplastificantes de alto desempenho, feitos de polímeros policarboxílicos modificados, são usados para melhorar a trabalhabilidade das misturas sem adicionar excesso de água. Adicionalmente, os polímeros à base de silício, como alquilalcoxissilanos (silano) e polidiorganosiloxanos (siloxano), são aplicados nos RCD para aumentar a resistência à fragmentação e reduzir a absorção de água. Entre esses, os polidimetilsiloxanos se destacam

por sua capacidade de conferir tratamento hidrófobo e melhorar a resistência à radiação UV. O processo de impregnação desses polímeros é cuidadosamente controlado para assegurar uma aplicação eficiente, visando melhorar características cruciais dos RCD, como resistência à deformação permanente, fadiga e dano por umidade, tornando-os mais adequados para aplicações na construção civil, especialmente em misturas asfálticas (Spaeth & Tegguer, 2013).

O TERRAFIX 14 (Figura 2-4), um aditivo polimérico avançado, tem desempenhado um papel crucial na indústria da construção civil. Este produto destaca-se pela sua eficácia como agente aglomerante e impermeabilizante, sendo notavelmente eficiente na aglomeração de partículas finas. Isso aumenta a coesão e a estabilidade de materiais diversos, como solos e resíduos de construção. Além disso, sua capacidade de impermeabilização é fundamental para proteger os materiais contra a penetração de água e outros líquidos, tornando-o extremamente valioso em contextos em que a resistência à umidade é essencial.

Embora o TERRAFIX 14 seja o foco principal, é relevante mencionar as investigações anteriores com o TERRAFIX 11, especialmente em aplicações relacionadas a solos. As descobertas com o TERRAFIX 11 ajudaram a estabelecer uma compreensão aprofundada das propriedades únicas destes polímeros, contribuindo para a melhoria da qualidade e durabilidade dos materiais em contextos de construção civil. No entanto, o TERRAFIX 14, com sua menor viscosidade, emergiu como a escolha preferida para uma ampla gama de aplicações. A baixa viscosidade do TERRAFIX 14 permite uma absorção e distribuição mais eficiente no RCD, melhorando a aderência e a impermeabilização dos materiais, fatores cruciais que não eram tão eficientes com o TERRAFIX 11. Esta propriedade torna o TERRAFIX 14 especialmente eficaz para o tratamento de pilhas de minérios e a estabilização de taludes e leiras em áreas de mineração (de Souza et al., 2022; Alelvan, 2022; Silva, 2020).

A experiência acumulada com o TERRAFIX 11 em estudos de solo proporcionou uma base sólida para a compreensão e aplicação do TERRAFIX 14 (Figura 2-4). Esse conhecimento prévio garante que o TERRAFIX 14 não apenas atenda às necessidades atuais da indústria, mas também estabeleça novos padrões para práticas de construção sustentáveis e ecologicamente corretas. Em suma, o TERRAFIX 14 representa uma evolução significativa nas soluções de construção, unindo robustez mecânica e proteção ambiental.



a)



b)

Figura 2-4 TERREFIX 14.

2.5. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA VIA DIGITALIZAÇÃO 3D

Existem diversas abordagens para a análise da morfologia de partículas, muitas das quais são onerosas e tecnicamente exigentes, particularmente quando o escaneamento a laser ou a tomografia de raios X estão envolvidos (Guo et al., 2019; Deiros et al., 2019; Erdogan et al., 2006; Kutay et al., 2010; Garboczi, 2002; Sun et al., 2014; Anochie-Boateng et al., 2013; Moaveni et al., 2014; Masad et al., 2011). Contudo, avanços como a fotogrametria de curta distância têm emergido como técnicas mais acessíveis e eficientes para a captura 3D de agregados de maior dimensão, provando serem valiosas na obtenção de dados detalhados com uma redução significativa de custos (Zhao et al., 2020; Paixão et al., 2018).

A tecnologia de digitalização em 3D representa um marco no avanço da caracterização morfológica, permitindo não só a criação detalhada de partículas individuais, mas também a simulação do seu arranjo espacial utilizando formas tridimensionais autênticas (Valera et al., 2022).

Com o uso de descritores de Fourier, as informações obtidas de imagens bidimensionais são habilmente convertidas em modelos tridimensionais acurados. Este processo é ilustrado na Figura 2-5, que exhibe a geração de partículas em 3D por meio da manipulação de seções transversais e sua evolução para estruturas sólidas em três dimensões. No que tange ao empacotamento, é empregada uma metodologia sofisticada que promove a disposição ordenada das partículas, mantendo a interação direta entre elas e fornecendo assim uma representação mais fiel da configuração material.

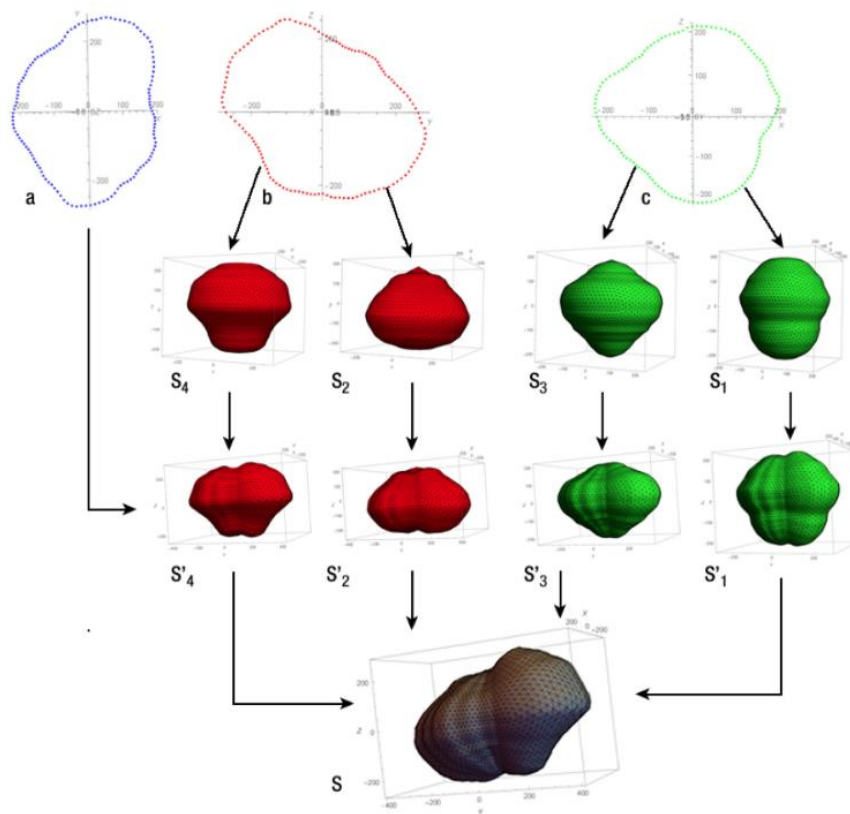


Figura 2-5 Método de geração 3D. (a) seção transversal (x, y); (b) seção transversal (y, z); (c) seção transversal (x, z); (d) sólidos S_1 a S_4 obtidos na revolução das metades das seções transversais; (e) sólidos S'_1 a S'_4 obtidos por alongamento horizontal de S_1 a S_4 ; (f) sólido final (Valera et al., 2022).



a)



b)

Figura 2-6 Imagens do escaneamento. (a) EinScan; (b) Imagem da amostra

O scanner 3D EinScan Pro HD, ilustrado na Figura 2-6, permite uma caracterização morfológica de partículas com alta precisão, fornecendo medidas essenciais como área, perímetro e volume, fundamentais para a análise de desgaste (Paixão & Fortunato, 2021). Paralelamente, a Dinâmica de Partículas Dissipativas (DPD) surge como uma metodologia de

adesimulação eficiente para a modelagem da microestrutura e do empacotamento em misturas asfálticas, representando uma alternativa econômica a métodos experimentais e alinhando-se com dados empíricos de testes de laboratório (Garboczi, 2002).

3. METODOLOGIA

Este capítulo fornece uma descrição detalhada e técnica dos métodos e procedimentos utilizados na caracterização dos materiais, englobando todas as fases, desde a formulação das misturas asfálticas até a produção dos corpos de prova e a execução dos ensaios de desempenho. As investigações foram conduzidas primariamente no Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB/FT/UnB).

Os ensaios de análises químicas, incluindo o processo de metalização por sputtering, foram excepcionalmente realizados no Instituto de Biologia (UnB). O sputtering é uma técnica que deposita uma fina camada de metal sobre a superfície das amostras, tornando-as condutivas e adequadas para análise por MEV. No procedimento, as amostras são colocadas em uma câmara onde íons de um gás inerte são acelerados contra um alvo metálico (geralmente ouro ou platina), desprendendo átomos desse metal que se depositam uniformemente sobre as amostras. Adicionalmente, a MEV ocorreu no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura e Confocal Laser, associado ao Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas (ENM/UnB), enquanto o DRX foi efetuado no Laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geociências (IQ/UnB).

Os materiais e métodos utilizados para a fabricação das misturas asfálticas são expostos neste documento, complementados por um fluxograma explicativo (Figura 3-1), que proporciona uma visão integrada das fases do estudo. Inicialmente, destaca-se a etapa de seleção e coleta dos componentes essenciais à pesquisa, incluindo agregados naturais, RCD e o ligante CAP 50/70. Nessa etapa, o RCD é tratado com o aditivo polimérico, que é selecionado e adicionado por um procedimento específico para melhorar suas propriedades. Em seguida, procede-se à caracterização física, química e mineralógica dos materiais.

Posteriormente, na segunda fase, uma variedade de ensaios é aplicada às misturas asfálticas, incluindo formulações convencionais e aquelas modificadas com RCD tratado com aditivo polimérico. Os ensaios englobam a compactação Marshall e a compactação com compactador giratório, além de testes mecânicos como fadiga por compressão diametral, resistência à tração indireta, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, estabilidade Marshall e creep estático.

Concluindo o processo, a terceira fase se concentra em uma análise morfológica detalhada, utilizando a tecnologia de digitalização em 3D para examinar as partículas de RCD tratadas com o aditivo. Essa abordagem abrangente visa avaliar o impacto da modificação dos RCD nas propriedades das misturas asfálticas e otimizar seu desempenho em aplicações práticas.

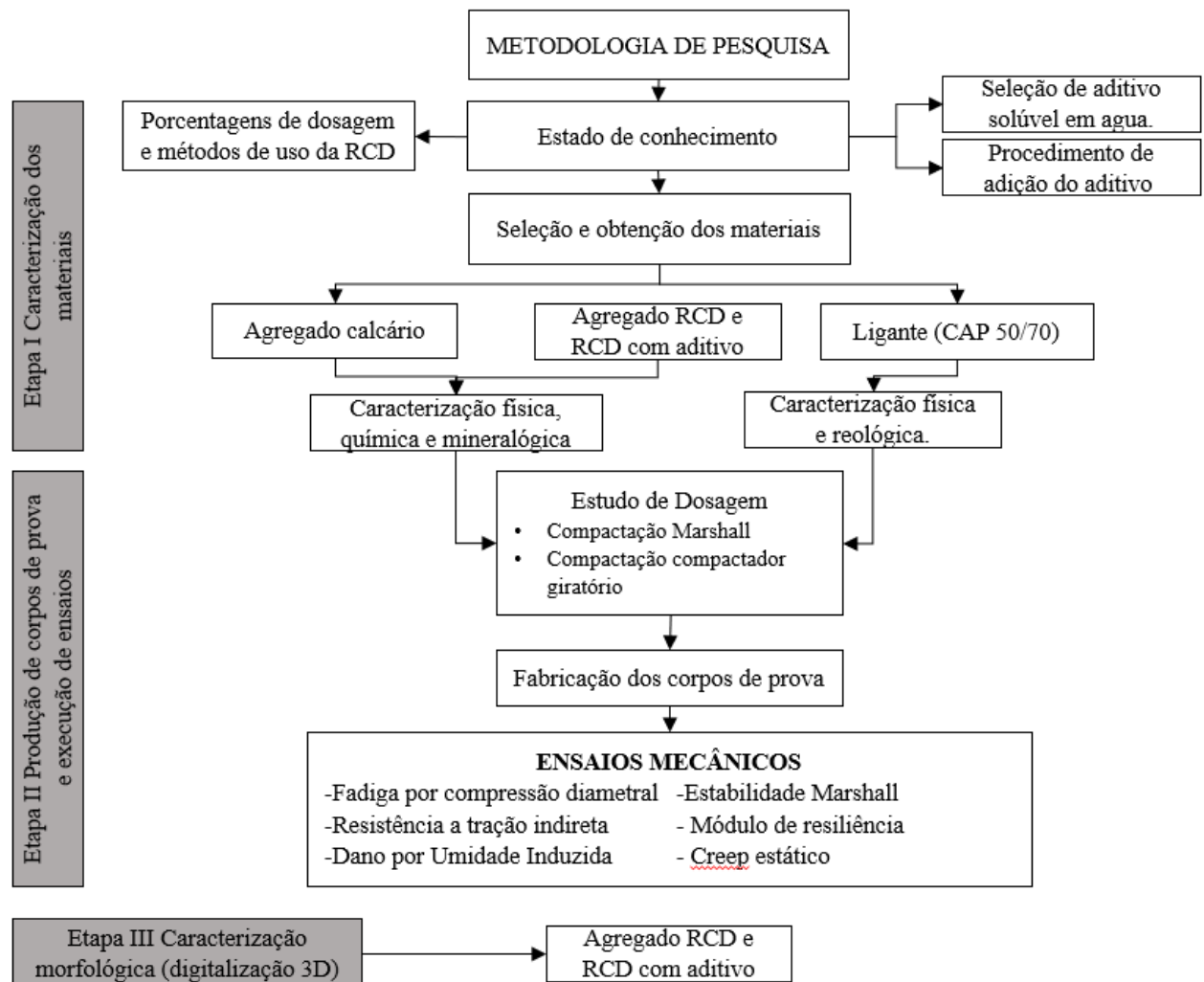


Figura 3-1 Planejamento da pesquisa.

3.1. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

A fase experimental é focada na caracterização dos materiais e no estabelecimento de procedimentos para a elaboração de corpos de prova. Essa etapa é essencial para a análise do comportamento mecânico de misturas de CBUQ, enriquecidas com a adição de RCD que foi melhorado pelo aditivo polimérico. Este aditivo foi selecionado por sua capacidade de substituir certas frações granulométricas no composto asfáltico, revelando propriedades melhoradas na composição final.

3.1.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MINERAL

A caracterização do material granular tem um papel fundamental, impactando diretamente o comportamento das misturas asfálticas em quente. É imperativo realizar uma caracterização física e química detalhada, abrangendo tanto o material natural como o RCD. Além disso, é essencial compreender a razão por trás da seleção cuidadosa dos materiais e dos métodos ou processos usados na modificação do RCD, visando garantir a eficiência e a qualidade das misturas asfálticas resultantes. A escolha apropriada facilita a otimização de atributos críticos das misturas, tais como durabilidade, resistência e desempenho a longo prazo, que são vitais para a integridade estrutural e funcional do pavimento.

3.1.1.1. GRANULOMETRIA

A composição granulométrica da mistura asfáltica foi definida respeitando os limites mínimos e máximos das faixas C do DNIT (especificação de serviço DNIT 031/06) e MDC-25 do INVIAS (INVIAS, 2013), como mostram na Tabela 3-1 e as curvas granulométricas. Para a elaboração das misturas asfálticas, optou-se pela média dessas curvas granulométricas, permitindo uma comparação direta entre as especificações do DNIT e INVIAS e o comportamento do RCD.

Tabela 3-1 Distribuição granulométrica da mistura da faixa C do DNIT e faixa MDC-25 INVIAS.

Tamanho da malha		Porcentagem passando (%)					
(")	(mm)	Limites DNIT Faixa C		Mistura	Limites INVIAS MDC - 25		Mistura
1"	25,4	100	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100	80	95	87,5
1/2"	12,5	80	100	90	67	85	76
3/8"	9,5	70	90	80	60	77	68,5
Nº 4	4,75	44	72	58	43	59	51
Nº 10	2	22	50	36	29	45	37
Nº 40	0,425	8	26	17	14	25	19,5
Nº 80	0,18	4	16	10	8	17	12,5
Nº 200	0,075	2	10	6	4	8	6

A escolha das granulometrias específicas foi motivada pela intenção de avaliar o impacto do uso de diferentes tamanhos de partículas do RCD nas propriedades das misturas asfálticas. A faixa C do DNIT foi selecionada devido à sua ampla utilização em revestimentos asfálticos no Brasil e pela presença recorrente em pesquisas da área. Este gradiente granulométrico é limitado a um tamanho máximo de partícula de 12,5 mm.

Observando a curva granulométrica do RCD (Figura 3-2 e Figura 3-3), percebeu-se a presença de partículas até 19 mm, o que sugeriu a necessidade de considerar uma segunda granulometria que incluísse tamanhos maiores, como as especificadas na granulometria MDC-25 do INVIAS, que contempla partículas de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm.

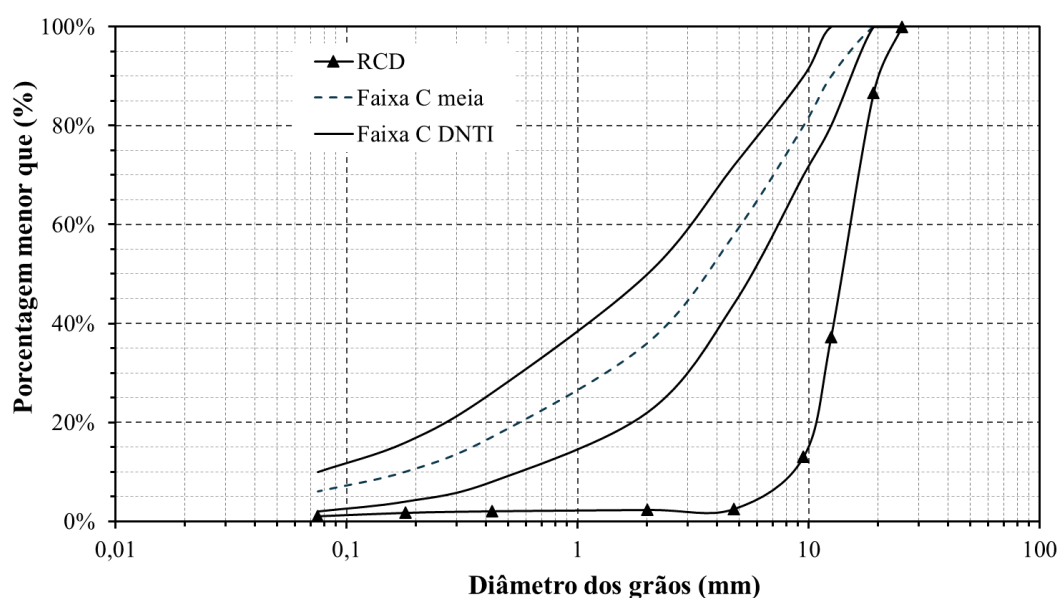


Figura 3-2 Composição gravimétrica da Faixa C DNTI e RCD.

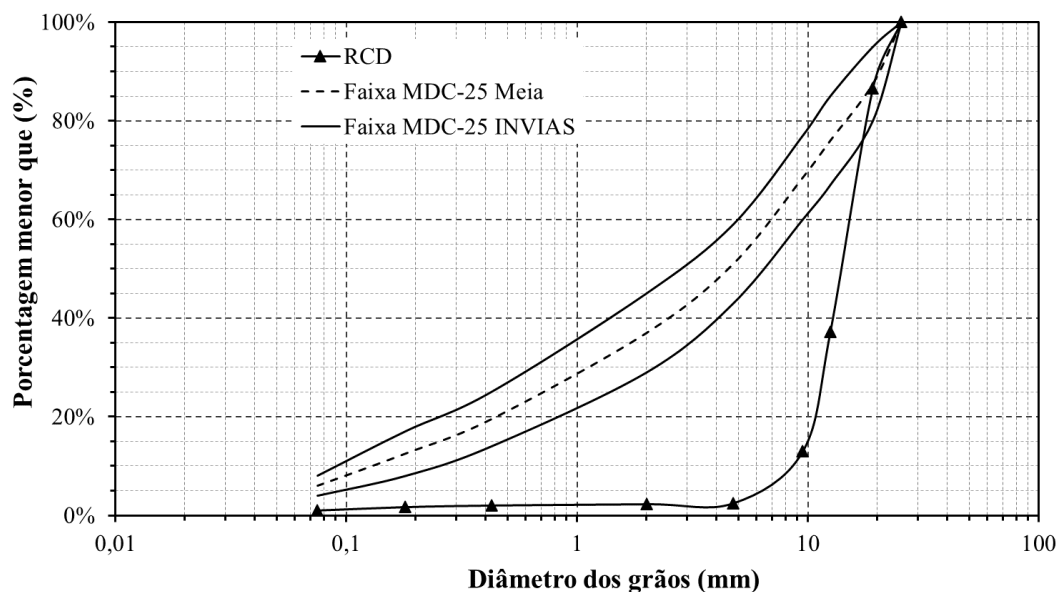


Figura 3-3 Composição gravimétrica da Faixa MDC – 25 INVIAS e RCD.

O material granular natural essencial para a composição das misturas asfálticas foi adquirido da Pedreira Contagem. Situada em Sobradinho-DF, a Pedreira Contagem é uma fonte de calcário dolomítico, um agregado enriquecido com carbonato de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3). Esse recurso é fundamental para a produção de misturas asfálticas pelas empresas locais. A pronta disponibilidade e a superior qualidade deste agregado sublinham a importância da Pedreira Contagem como suporte para a infraestrutura urbana e para o progresso científico na região da capital.

Para a moldagem dos corpos de prova com alterações, o RCD (Figura 3-4a) e brita 1 (Figura 3-4b) por tamanhos, foram os materiais escolhidos, obtido da Fornecedora de Areias Bela Vista em Sobradinho II, Distrito Federal.

Os materiais passaram por um rigoroso processo de seleção e beneficiamento, envolvendo tecnologias de ponta para a trituração e lavagem, além da separação manual, garantindo a remoção de contaminantes como metais e vidro.

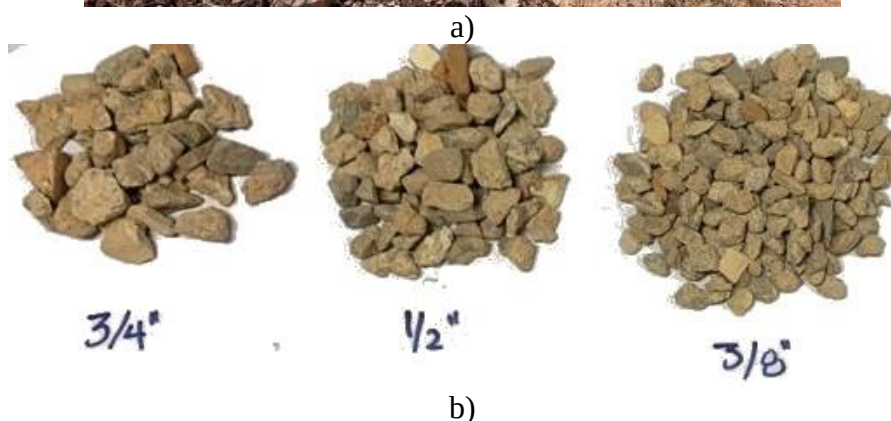


Figura 3-4 a) RCD areia Bela Vista e b) classificação por tamanhos.

Este protocolo assegura a qualidade dos agregados reciclados, cumprindo as normas técnicas exigidas para a construção civil e reforçando o compromisso ambiental com maximização da reutilização de materiais. O RCD, composto principalmente por concreto, argamassa, pedra e cerâmica provenientes de demolições, é transformado em um insumo de alto valor para projetos de engenharia em Brasília, demonstrando a viabilidade da reciclagem na prática construtiva sustentável.

Para a substituição do agregado natural nas curvas granulométricas, levou-se em conta os resultados experimentais das pesquisas consultadas e expostas na introdução, justificativa e revisão bibliográfica, onde se relata que, quanto maior o conteúdo de agregado RCD, maior tende a ser o conteúdo ótimo de asfalto (Centeno *et al.*, 2014; Tam, 2009; Shayan, 2003; Cheng, 2005; Zhou, 2010). Adicionalmente, existe uma correlação inversa entre o conteúdo de RCD nas misturas asfálticas e seu desempenho mecânico quando não é submetido a nenhum tipo de tratamento (Gómez-Meijide *et al.*, 2015, 2016; Pérez *et al.*, 2012; Raman & Ramasamy, 2020; Ryu, 2002; Xuan *et al.*, 2016; Beja *et al.*, 2020; Agrela *et al.*, 2012; Strieder *et al.*, 2023).

Normalmente, as porcentagens de substituição do material são realizadas seja no total da fração grossa ou no total da fração fina ou também de maneira parcial. É crucial, portanto, avaliar como cada tamanho de partícula dos agregados RCD afeta as propriedades mecânicas da mistura, especialmente quando se substitui completamente o tamanho de grão convencional.

Ao considerar a substituição de agregados naturais por agregados de RCD nas misturas asfálticas, a seleção de granulometrias foi embasada em estudos prévios, conforme delineado nas pesquisas apresentadas anteriormente. Verificou-se que substituições de maiores dimensões de agregados geram resultados superiores em termos de desempenho quando comparados com substituições de menores dimensões. A Figura 3-5 ilustra as porcentagens de substituição na granulometria, e a Tabela 3-2 detalha a percentagem de substituição por tamanho de malha, orientando-se por esses achados.

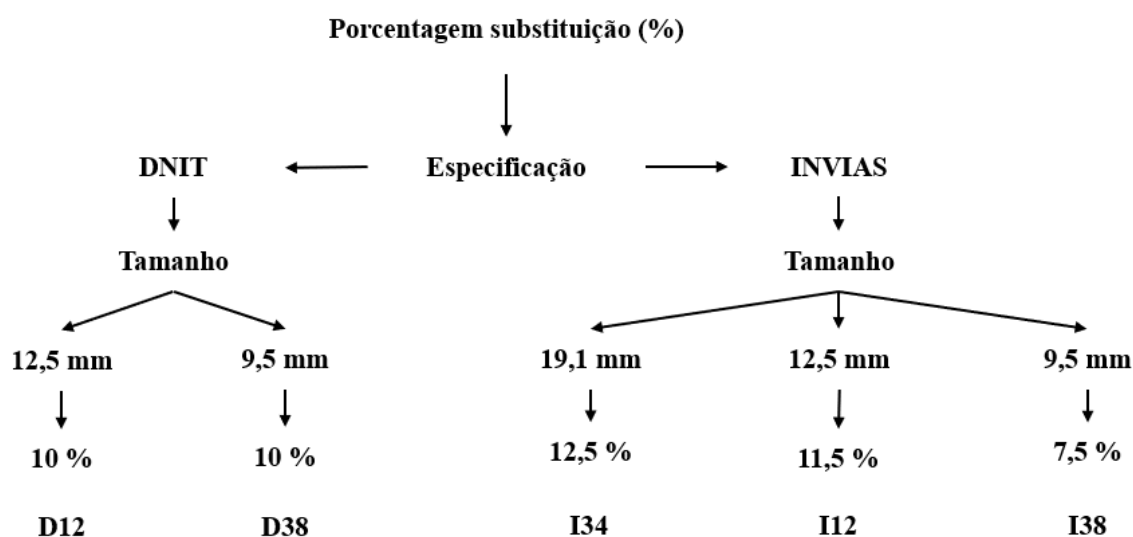


Figura 3-5 Porcentagem de substituição na granulometria.

Em sintonia com o delineamento metodológico proposto, optou-se por uma substituição integral dos tamanhos de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm do material mais grosso. A integralidade dessa substituição confere aos estudos um caráter de precisão quanto à influência do RCD nas propriedades mecânicas das misturas. Esta decisão visou assegurar que a alteração na composição granulométrica não ultrapassasse os limites que pudessem comprometer a integridade estrutural e a funcionalidade das misturas asfálticas.

Portanto, na Tabela 3-2, apresenta-se a caracterização de cinco distribuições granulométricas modificadas pela incorporação de RCD. Seguindo as normativas do DNIT, define-se a

granulometria D12 (D de DNIT e 12 de 1/2 polegada), que implica uma substituição total do agregado convencional de 12,5 mm por RCD, enquanto a granulometria D38 realiza uma substituição idêntica para o agregado de 9,5 mm (3/8").

Por outro lado, de acordo com as especificações do INVIAS, adotou-se um procedimento análogo para estabelecer as granulometrias I34, I12 e I38 (I por INVIAS e 34 por 3/4 de polegada), correspondentes às substituições dos materiais de 19,1 mm (3/4"), 12,5 mm (1/2") e 9,5 mm (3/8"), respectivamente.

A proporção de substituição de RCD para cada uma das granulometrias mencionadas é a seguinte: 10% para D12 e D38, 12,5% para I34, 11,5% para I12 e 7,5% para I38. Esta informação é crítica para compreender o impacto da variação dos tamanhos da granulometria nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas com incorporação de RCD.

Tabela 3-2- Porcentagem substituição.

Tamanho da malha		Porcentagem substituição (%)				
		DNIT		INVIAS		
(")	(mm)	D12	D38	I34	I12	I38
3/4"	19,1	-	-	12,5	-	-
1/2"	12,5	10	-	-	11,5	-
3/8"	9,5		10	-		7,5

Percebeu-se que a manipulação do RCD causa degradação, e mais ainda quando é submetido ao processo de peneiramento. Por isso, realiza-se a seguinte matriz experimental apresentada na Tabela 3-3, na qual o material RCD (Brita 1) é submetido a um peneiramento com diferentes períodos. A quantidade de amostras elaboradas para realizar uma análise estatística foi de 12.

Tabela 3-3 Matriz experimental de granulometria.

GRANULOMETRÍA			
Processo	Tempo (min.)	Réplicas	Total de amostras
Sem lavar	5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60	12	108
Lavada	5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60	12	108

3.1.1.2. ABSORÇÃO E DENSIDADE DE AGREGADO GRAÚDO

A densidade dos agregados é um parâmetro crucial para estabelecer os parâmetros volumétricos em misturas asfálticas. Para determinar a densidade aparente dos agregados de RCD, segue-se a metodologia da DNTI-ME 081/98 (DNTI, 1998), que inclui imersão do agregado por 24 horas após secagem em estufa, remoção da água superficial para atingir a condição de superfície saturada seca, e várias pesagens em diferentes condições de umidade. Especificamente, a análise é aplicada aos grãos maiores que 4,75 mm retidos na peneira N 4. Este processo de teste é essencial para a compreensão da interação entre o RCD e o cimento asfáltico, influenciando o consumo de asfalto e a integridade das misturas asfálticas.

Na Tabela 3-4, é exposta a matriz experimental dos ensaios de densidade e absorção, conforme a norma DNTI-ME 081/98, que inclui agregados de 4,75 mm. Realizaram-se trinta ensaios divididos igualmente entre o material natural, o RCD, o RCD lavado (lav) e o RCD com o aditivo polimérico, visando a robustez estatística dos resultados.

Tabela 3-4 Matriz experimental dos ensaios de densidade e absorção

Tipo	Material	Réplicas	Total de ensaios
Total	Natural, RCD e RCD com TERRAFIX	10	30
TAMANHO			
19,1 mm		10	30
12,5 mm	RCD e RCD com TERRAFIX	10	30
9,5 mm		10	30
FRAÇÕES PARA ANALISIS MORFOLOGICO			
19,1 mm		35	105
12,5 mm	RCD, RCD lav., RCD pen.	35	105
9,5 mm		35	105
19,1 mm	RCD, RCD lav., RCD adi.	35	140
12,5 mm	RCD pen.	35	140
9,5 mm		35	140

Para refinamento da caracterização, testes adicionais foram conduzidos nos agregados de 19,1 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, com e sem aditivo polimérico para as análises por tamanho. No âmbito

da caracterização morfológica tridimensional, submeteu-se um lote de 35 partículas a lavagem e peneiramento, procedendo-se à análise de absorção em cada fase e, posteriormente, à incorporação do aditivo em um segundo estágio experimental.

Para o material RCD com a adição do aditivo, é crucial determinar o tempo necessário para que ocorra a absorção completa da solução de aditivo polimérico dissolvida em água. A fim de avaliar experimentalmente este tempo de absorção, aplicou-se um modelo proposto por Leite (2001), que consiste em medir a porcentagem de absorção em diferentes intervalos de tempo até atingir a saturação total. Esse processo foi realizado com o RCD imerso em uma solução aquosa com concentrações de 1%, 2% e 5% de aditivo polimérico.

3.1.1.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

Para completar a caracterização dos agregados, adotaram-se métodos convencionais conforme as diretrizes estabelecidas pelo DNIT. Os materiais analisados, incluindo tanto o agregado natural quanto o RCD, foram submetidos a uma série de procedimentos padronizados de caracterização, listados na matriz experimental na Tabela 3-5.

Para a matriz experimental dos ensaios de caracterização, definiram-se parâmetros específicos que nortearam a avaliação dos materiais, conforme descrito na Tabela 3-5. No ensaio de abrasão Los Angeles, por exemplo, analisou-se tanto o material natural como o RCD nas formas não modificada e modificada, abrangendo as granulometrias de 19,1 mm, 12,5 mm e 9,5 mm. Essa padronização foi igualmente aplicada nos testes de resistência, adotando-se o método dos 10% de finos e nos ensaios de durabilidade. Importante destacar que, no caso da resistência dos 10% de finos, os procedimentos foram realizados com amostras nas condições seca e úmida.

Tabela 3-5 Matriz experimental de Ensaios de caracterização.

Ensaio	Método	Configuração	Réplicas	Ensaios
Abrasão Los Angeles	DNTI-ME 035/98	3 materiais x 3 tamanhos	1	9
Avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos	DNTI-ME 096/98	3 materiais x 2 estados seco e saturado x 3 tamanhos	1	18

Ensaio	Método	Configuração	Réplicas	Ensaio
Determinação do índice de forma com paquímetro	DNIT 425/2020-ME	3 tamanhos	1	3
Aderência ao ligante asfáltico	DNTI-ME 078/94	2 materiais	1	2

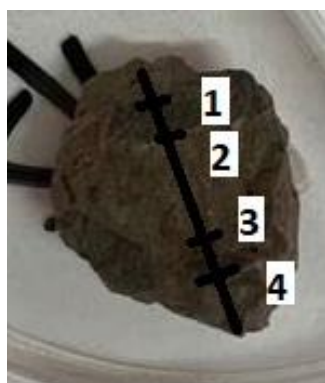
3.1.1.4. ESPECTROSCOPIA POR DISPERSÃO DE ENERGIA (EDS) E MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – (MEV).

No âmbito da caracterização químico-mineralógica de materiais, a integração da Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um procedimento analítico robusto. O MEV, um JEOL JSM 6610 (7100F) com capacidade de 30 kV de voltagem de aceleração, resolução de 1,2 nm e potencial de ampliação de até 300.000X, permite análises qualitativas das microestruturas superficiais das amostras. Este processo é aprimorado por um feixe de elétrons altamente focalizado, gerado por filamentos de tungstênio aquecidos sob condições de vácuo. O EDS, acoplado ao MEV, habilita a caracterização dos elementos químicos das amostras em análise, oferecendo espectros de raios-X indicativos da composição química de maneira qualitativa e semiquantitativa.

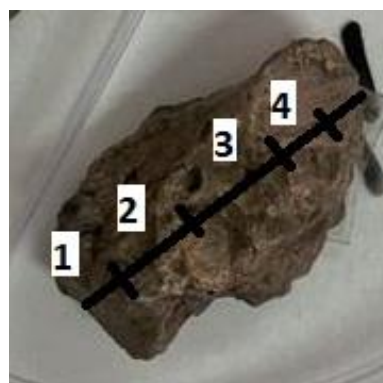
As amostras destinadas à análise via MEV e Espectroscopia por EDS são submetidas a um processo de metalização, realizado com o equipamento LEICA modelo EM SCD 500. Esta técnica consiste na deposição de uma camada ultrafina de ouro sobre as amostras, proporcionando a condutividade necessária para os procedimentos analíticos. A metalização é um passo crítico para prevenir o acúmulo de carga elétrica na superfície da amostra, fenômeno que pode comprometer a qualidade das imagens e dos dados coletados durante a microscopia eletrônica.

Na seleção das amostras de RCD, foram consideradas partículas de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm para a subsequente análise química. As amostras foram coletadas em diferentes estados: sem lavagem (Figura 3-6a), lavadas (Figura 3-6b), com aditivo (Figura 3-6c) e com aditivo mais serpentinito (Figura 3-6d). Análises pontuais foram realizadas em quatro locais distintos ao longo do eixo longitudinal de cada amostra, o que permitiu avaliar a heterogeneidade do

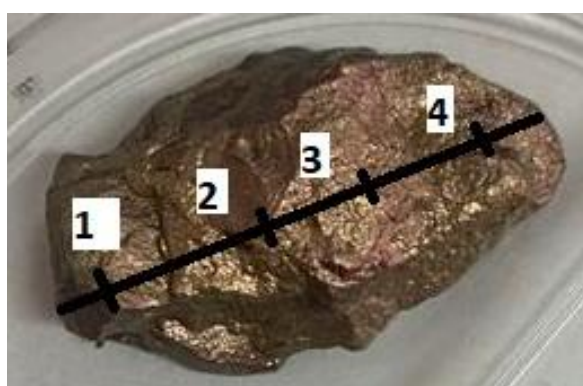
material. Foi observada uma diferença visual no processo de metalização: as amostras sem aditivo mostraram-se mais opacas, indicando uma possível absorção do revestimento de ouro.



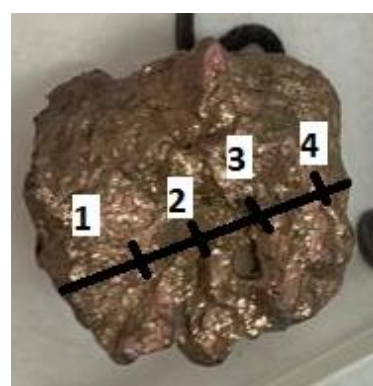
a)



b)



c)



d)

Figura 3-6 Partículas de RCD preparadas para análise química em MEV: a) sem lavar, b) lavadas, c) com aditivo, e d) com aditivo e serpentinito.

As imagens resultantes das análises realizadas com o MEV foram obtidas com diferentes níveis de aumento e tratamentos. Seleccionaram-se partículas de 3/8 de polegada, 1/2 de polegada e 3/4 de polegada para examinar o efeito de distintas condições, incluindo partículas não lavadas, lavadas, com aditivo polimérico e tratadas com aditivo polimérico e serpentinito, um produto empregado para evitar a aderência entre as partículas.

Portanto, a utilização conjunta do MEV e EDS proporciona um entendimento aprofundado da morfologia e da composição química das amostras. Adicionalmente, a Microscopia Óptica oferece observações morfológicas complementares. Essas técnicas desempenham um papel fundamental em contextos de pesquisa científica e desenvolvimento tecnológico, sendo indispensáveis para a análise minuciosa das propriedades dos materiais em estudo.

3.1.1.5. DIFRACTOMETRIA DE RAIOS X (DRX)

A caracterização mineralógica dos materiais usados nesta pesquisa (RCD e Natural) pode ser eficientemente realizada por meio da técnica de DRX. Este método analítico não destrutivo é primordial para identificar a estrutura cristalina dos minerais presentes nessas amostras. Utilizando um difratômetro, a modelo ÚLTIMA IV da marca RIGAKU, os ensaios são conduzidos com precisão, empregando um tubo de cobre e filtro de níquel que operam a uma tensão de 35 kV e corrente de 15 mA. O sistema de detecção DTEX/ULTRA, aliado a uma meticulosa varredura angular de 2° a 60° em 2 Θ e velocidade controlada, permite a aquisição de dados com alta resolução, com comprimentos de onda na casa de 1,54059 Å, correspondente à radiação CuK α .

A preparação das amostras é crítica para a acurácia dos resultados. O procedimento inicia com uma secagem rigorosa para remover a umidade, seguida de uma moagem manual cuidadosa, garantindo a obtenção de um pó fino e homogêneo. Esse pó é então disposto em um porta amostras de modo uniforme, essencial para a difratometria. A relevância deste processo se dá pela correspondência entre os comprimentos de onda dos raios-X e o espaçamento interatômico dos materiais cristalinos, permitindo assim uma identificação precisa dos minerais (Mitchell & Soga, 2005).

3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

Para determinar as propriedades fundamentais do Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 50/70, fornecido pela empresa Centro-Oeste Asfaltos de Brasília, Distrito Federal, e originário da REGAP em Betim, MG, uma série de ensaios de caracterização foi conduzida. O INFRALAB/UnB foi o local escolhido para realizar a caracterização no ligante asfáltico, compilados na Tabela 3-6. Nesta tabela detalham-se os métodos experimentais aplicados, como penetração e ponto de amolecimento, seguindo as normas da ABNT, viscosidades Brookfield em diversas temperaturas, conforme especificações da ASTM, e a densidade à temperatura ambiente.

Tabela 3-6 Matriz experimental da caracterização do ligante

Característica	Método
Penetração	ABNT NBR 6576/2007

Ponto de amolecimento	ABNT NBR 6576/2007
Viscosidade Rotacional Brookfield 135 °C	ASTM D 4402/02
Viscosidade Brookfield 150 °C	ASTM D 4402/02
Viscosidade Brookfield 177 °C	ASTM D 4402/02
Densidade a 20°C	ABNT NBR 6296/2004)
RTFOT Variação em massa	ASTM D 2872/97
RTFOT Penetração Retida	ABNT NBR 6576/2007
RTFOT Ponto de Amolecimento	ABNT NBR 6560/2000

Além dos ensaios de caracterização convencional, as propriedades viscoelásticas foram investigadas, usando um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), conforme a norma ASTM D 7175/2008. Esse teste avançado mede o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (ϕ), aplicando tensões de cisalhamento oscilatórias entre duas placas paralelas que contêm a amostra do ligante. Realizados em um intervalo de temperatura de 10°C a 75°C e frequências de carregamento variadas de 0,10 a 10Hz, os ensaios no DSR foram executados em três amostras com controle de deformação, adotando um modelo sigmoidal para a caracterização reológica.

3.1.3. POLÍMERO TERRAFIX

No atual estudo, o aditivo polimérico, disponibilizado pela Waterflows, foi o escolhido devido às suas notáveis propriedades impermeabilizantes e baixa densidade, além de ser um líquido solúvel em água. A decisão foi fundamentada em resultados de pesquisas anteriores, especificamente uma conduzida por Silva (2020), que empregou o TERRAFIX 11, um polímero similar, para avaliar seu desempenho em solos. O aditivo polimérico se destaca por sua menor viscosidade em comparação ao seu predecessor, sendo um copolímero vinílico orgânico e aleatório, que se apresenta como uma emulsão aquosa de natureza aniônica.

Com pH variando de 7,0 a 8,5, densidade de 1,00 a 1,04 g/cm³ e viscosidade de 500 a 3.000 cps a 25°C, o aditivo polimérico é completamente solúvel em água e se adequa eficazmente como agente aglomerante e impermeabilizante em diversas aplicações industriais, incluindo o transporte ferroviário de minérios e a estabilização de taludes na mineração. No estudo, foram exploradas três diferentes concentrações de soluções poliméricas: 1%, 2% e 5%. A técnica de adsorção foi utilizada para integrar o polímero aos RCD, imergindo o material durante 24 horas para alcançar a adsorção desejada.

Para otimizar a seleção do aditivo mais eficiente na redução da absorção e melhoria da aderência e impermeabilização dos RCD, vários aditivos foram testados de forma experimental. Entre eles, a Cal mostrou-se problemática, pois formava uma camada superficial que poderia diminuir a aderência entre o asfalto e o material granular. O Sika-1, um impermeabilizante à base de silicato e sais minerais, enfrentou desafios devido à sua viscosidade elevada, complicando a mistura e aplicação, além de apresentar baixa absorção pelo material.

Por outro lado, o Axton Umidade, uma solução hidrofugante também à base de silicato, tinha como limitação sua baixa temperatura de degradação, o que poderia ser um obstáculo em misturas asfálticas. Finalmente, o Axton Chapiscos, um adesivo para cimentos, gesso e argamassa feito de dispersões acrílicas à base de água, foi desenvolvido para formar uma película no agregado, mas o processo revelou-se mais complexo do que o previsto. A avaliação destes aditivos foi crucial para entender suas limitações e potenciais na aplicação em RCD, orientando a busca pela solução mais adequada.

No estudo para avaliar a eficácia dos aditivos, especialmente do aditivo polimérico, adaptou-se um método de absorção para o agregado reciclado (Figura 3-7), baseado na metodologia de Leite (2001). Inicialmente, a amostra de material reciclado era seca em estufa e resfriada à temperatura ambiente, em seguida colocada em um recipiente com tampa e fundo revestidos por uma malha de 0,044 mm. A amostra era submersa em água e seu ganho de massa monitorado por uma balança com medida hidrostática de precisão.

As leituras de ganho de massa foram realizadas em intervalos específicos ao longo de 24 horas, com maior frequência nos primeiros 10 minutos e diminuindo gradativamente até a leitura final após 24 horas. Para o agregado reciclado, as leituras iniciais foram ainda mais frequentes devido à rápida absorção de água. A absorção foi calculada tanto em relação à massa seca quanto à massa no início da submersão, e uma média desses valores foi usada para estimar a absorção real. Este método detalhado foi crucial para avaliar a eficiência dos aditivos em termos de absorção, um aspecto fundamental para sua aplicabilidade em misturas asfálticas e outros materiais de construção.

Para a preparação da solução, foram utilizados 10 litros de água. As concentrações de aditivo polimérico empregadas foram de 1%, 2% e 5%, de acordo com as recomendações do fabricante. Inicialmente, misturaram-se 1.000 cm³ de água com a quantidade correspondente de aditivo polimérico para cada concentração: 100 cm³ para a solução a 1%, 200 cm³ para a solução a 2% e 500 cm³ para a solução a 5%. Utilizou-se um agitador operando a uma rotação máxima de 800 rpm para agitar a mistura até obter uma solução homogênea. Após obter a mistura homogênea inicial, esta foi incorporada ao total dos 10 litros de água, garantindo uma distribuição uniforme do aditivo polimérico na solução.

O RCD (de 3/4, 1/2 e 3/8 de polegada) foi completamente submerso na solução de aditivo polimérico. Para evitar a formação de bolhas de ar presas, o material foi continuamente removido e agitado durante a imersão, monitorando o aumento de peso submerso ao longo do tempo para garantir uma distribuição uniforme do aditivo. Após 24 horas de imersão, o material foi retirado da solução e deixado para drenar por um período aproximado de 10 minutos. O material foi então colocado em um recipiente e foi aplicada uma camada de serpentinita para evitar que as partículas tratadas se aglutinassem entre si, facilitando um secado mais rápido do aditivo. Finalmente, o material foi levado ao forno a uma temperatura de 50 graus Celsius por um período de 24 horas para garantir que as partículas ficassem completamente secas. Essa temperatura foi escolhida para acelerar o processo de secagem sem deteriorar a aderência entre o aditivo e o RCD.

A uniformidade da distribuição do aditivo polimérico na solução foi monitorada visualmente e através de agitação constante com um agitador a 800 rpm. Para garantir que não houvesse bolhas de ar presas durante a imersão, o material foi continuamente removido e agitado, monitorando o aumento do peso submerso ao longo do tempo para assegurar uma distribuição eficiente do aditivo. Foram utilizadas balanças de alta precisão para medir a absorção de água e o ganho de massa das amostras. A média dos valores de absorção foi calculada ponderando as leituras em diferentes intervalos de tempo, garantindo a precisão das medições.

As melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos RCD tratados com o aditivo polimérico foram avaliadas através de testes subsequentes detalhados nos resultados da pesquisa. Esses testes incluíram ensaios de estabilidade, resistência ao desgaste, dano por umidade, fadiga, módulo de resiliência e resistência à tração. As questões de segurança no manuseio dos aditivos poliméricos e durante o processo de secagem foram consideradas conforme as indicações do

fabricante. Os resíduos e subprodutos do processo foram descartados de acordo com as normas ambientais e de segurança.

Foram realizadas três repetições para cada concentração de aditivo polimérico para garantir a consistência dos resultados. As variações nos resultados entre diferentes lotes de RCD e diferentes lotes de aditivo polimérico foram documentadas e discutidas posteriormente na análise dos resultados. Embora o processo descrito tenha sido eficaz, algumas etapas podem ser automatizadas no futuro para aumentar a precisão e eficiência. Além disso, em algumas ocasiões, o ar preso não foi facilmente removido, sendo necessário mover as partículas manualmente para liberar as bolhas de ar.



Figura 3-7 Processo de incorporação do aditivo polimérico.

3.1.4. DOSAGEM E ESTABILIDADE MARSHALL

No desenvolvimento da composição da mistura asfáltica para este projeto de investigação, a metodologia de dosagem foi cuidadosamente selecionada com o objetivo de determinar o teor ótimo de ligante asfáltico. Esse teor é crítico para garantir a estabilidade necessária e a resistência contra deformações permanentes exigidas pelo tráfego. Além disso, é essencial manter uma porcentagem de vazios que possibilite a adequada movimentação do ligante asfáltico sob altas temperaturas, evitando exsudação ou permeabilidade excessiva, que poderiam prejudicar as camadas inferiores do pavimento ou acelerar o envelhecimento do

ligante. A mistura deve ainda possuir uma textura apropriada para oferecer resistência ao deslizamento e ser trabalhável para permitir uma construção eficiente com o mínimo de segregação.

Para este estudo, selecionou-se o Método Marshall em conformidade com a Norma ME 043 (DNTI, 1995), reconhecido por sua adoção global, custo acessível de equipamentos e aplicabilidade tanto em laboratório quanto no controle de campo.

Foram desenvolvidos diversos corpos de prova utilizando uma variedade de agregados: natural, RCD e RCD modificado com aditivo polimérico. Adicionalmente, realizou-se a produção de diferentes corpos de prova submetidos a dois métodos de compactação, incluindo a compactação Marshall e a compactação giratória, resultando assim em quatro principais tipos de misturas de controle.

A primeira mistura, designada como MCD (Mistura de Controle - Compactação Marshall, conforme a faixa C da especificação DNIT), foi elaborada pelo método de compactação Marshall. Para maximizar o aproveitamento das características do RCD, também foi desenvolvida uma segunda mistura, denominada MDC-25, seguindo as diretrizes do INVIAS e referida a partir de então como MCI, conforme ilustrado na Tabela 3-7 e na Figura 3-8. Ambas as misturas foram submetidas ao processo de compactação, seguindo as diretrizes do DNIT, com percentuais teóricos de asfalto variando entre 3,5% e 5,0% em relação à massa total dos corpos de prova, que foi estabelecida em 1200 g.

A análise volumétrica foi realizada de acordo com as especificações da norma DNIT 031/2006, abordando a determinação do volume de vazios (V_v), a relação betume-vazios (RBV) e os vazios no agregado mineral (VAM), além da estabilidade Marshall, a fluência e a relação estabilidade/fluência dos corpos de prova, os resultados podem ser consultados no apêndice B.

Quanto aos demais tipos de mistura, suas variações foram determinadas com base na porcentagem de substituição do material natural, conforme as dimensões apresentadas na Figura 3-5 e na Tabela 3-2. Seguindo essa metodologia, as misturas destinadas à compactação Marshall foram definidas como: MD12R, que segue a especificação do DNIT com tamanho de substituição de 12,5 mm e compactação tipo Marshall; e MD38R, que se alinha ao tamanho de 9,5 mm da especificação DNIT, também compactada pelo método Marshall. A nomenclatura

utilizada para os tipos de mistura reflete o método de compactação (M para Marshall (Figura 3-8), C para compactação giratória (Figura 3-9)), a fonte da metodologia (D para DNIT, I para INVIAS), o tamanho nominal do agregado (por exemplo, 34 para 19 mm, 12 para 12,5 mm e 38 para 9,5 mm) e o tipo de material (R para RCD, A para RCD com aditivo polimérico).

Tabela 3-7 Porcentagem de RCD em cada mistura asfáltica.

DNIT	INVIAS
COMPACTAÇÃO MARSHALL	
MCD = 100% MN	MCI = 100% AN
RECICLADO	
MD12R = 90% AN – 10% RCD	MI34R = 87,5% AN – 12,2% RCD
MD38R = 90% AN – 10% RCD	MI12R = 88,5% AN – 11,5% RCD
	MI38R = 92,5% AN – 7,5% RCD
RECICLADO COM ADITIVO	
MD12A = 90% AN – 10% RCD(A)	MI34A = 87,5% AN – 12,5% RCD(A)
MD12A = 90% AG – 10% RCD(A)	MI12A = 88,5% AN – 11,5% RCD(A)
	MI38A = 92,5% AN – 7,5% RCD(A)
COMPACTAÇÃO GIRATÓRIA	
CCD = 100% AN	CCI = 100% AN
RECICLADO	
CD12R = 90% AN – 10% RCD	CI34R = 87,5% AN – 12,5% RCD
CD38R = 90% AN – 10% RCD	CI12R = 88,5% AN – 11,5% RCD
	CI38R = 92,5% AN – 7,5% RCD
RECICLADO COM ADITIVO	
CD12A = 90% AN – 10% RCD(A)	CI34A = 87,5% AN – 12,5% RCD(A)
CD38A = 90% AN – 10% RCD(A)	CI12A = 88,5% AN – 11,5% RCD(A)
	CI38A = 92,5% AN – 7,5% RCD(A)

Portanto, as misturas elaboradas conforme as especificações INVIAS foram nomeadas como MI34R, MI12R e MI38R, onde a primeira corresponde à mistura compactada pelo método Marshall, seguindo as especificações do INVIAS para o material substituído RCD, nos tamanhos de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, respectivamente. As misturas designadas como MD12A e MD38A referem-se às compactações Marshall para agregados RCD de 12,5 mm e

9,5 mm, respectivamente, com adição de aditivo polimérico. Para a metodologia INVIAS, as misturas com aditivo foram denominadas MI34A para 19 mm, MI12A para 12,5 mm e MI38A para 9,5 mm.

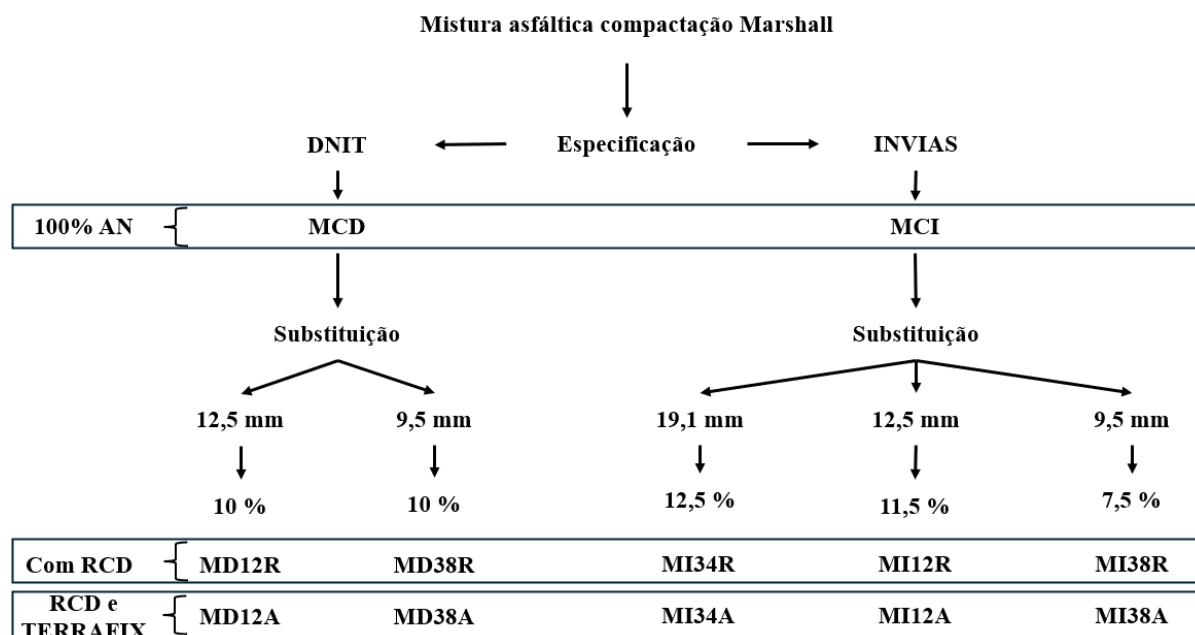


Figura 3-8 Denominação de misturas com compactação Marshall

Considerando o potencial de danos associados à compactação pelo Método Marshall, que pode resultar em fissuras e, conseqüentemente, na redução das propriedades mecânicas dos materiais, optou-se por confeccionar amostras sob condições similares às do ensaio Marshall, porém, utilizando a compactação giratória, com o objetivo de realizar comparações relevantes.

Nesse contexto, definiram-se duas amostras de controle: uma para a mistura de controle submetida à compactação giratória, seguindo a granulometria da faixa C (denominada CCD), e outra para a mistura de controle submetida à compactação giratória, com granulometria ajustada à faixa MDC-25 (denominada CCI). As substituições de materiais foram efetuadas individualmente para o material retido nas peneiras de 19,1 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, conforme detalhado na Tabela 3-7 e ilustrado na Figura 3-9.

Adotando essa abordagem, as misturas destinadas à compactação giratória foram identificadas como CD12R e CD38R. A mistura CD12R, que segue a especificação do DNIT, apresenta um

de 160 giros. Este processo permitiu a elaboração de um gráfico correlacionando o Vv com o número de giros. Assim, para cada tipo de mistura, estabeleceu-se o número de giros necessário para a construção dos corpos de prova por meio do compactador giratório (Mitchell et al., 2005).

3.1.5. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para a realização dos ensaios de caracterização mecânica em misturas asfálticas, foram considerados os percentuais ótimos de conteúdo de asfalto, determinados pela dosagem com a Metodologia Marshall. Esta metodologia, conhecida por sua precisão na definição da composição ideal de misturas asfálticas, inclui a compactação Marshall e o uso do compactador giratório, que são fundamentais para alcançar a densidade desejada e o volume de vazios em 4%. Isso garante que as propriedades mecânicas da mistura sejam otimizadas para desempenho em condições reais de pavimento.

Utilizando o procedimento de dosagem estabelecido, foram desenvolvidas 24 configurações diferentes de misturas asfálticas para a realização de ensaios focados em avaliar propriedades mecânicas essenciais. O ensaio de Resistência à Tração Indireta é fundamental para determinar a capacidade das misturas resistirem a tensões de tração, sendo crucial na prevenção de trincas e fissuras no pavimento. O Módulo de Resiliência, por sua vez, quantifica a capacidade de um material asfáltico de resistir a deformações elásticas sob cargas cíclicas. Já o teste de Dano por Umidade Induzida (DUI) é essencial para verificar a susceptibilidade da mistura à água, medindo a potencial perda de adesão entre o agregado e o asfalto sob condições de umidade. O ensaio de Fadiga por tensão controlada mede a resistência da mistura asfáltica à formação de fissuras sob cargas repetidas ao longo do tempo, um aspecto importante para entender o comportamento do material sob o efeito contínuo do tráfego. Além disso, foram realizados os ensaios de creep estático e fluência dinâmica para avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas. Esses ensaios são críticos para determinar a capacidade das misturas em resistir a deformações plásticas sob cargas estáticas e dinâmicas, garantindo a durabilidade e a integridade estrutural do pavimento ao longo do tempo.

A quantidade de ensaios realizados, assim como os resultados obtidos para cada uma dessas propriedades, é detalhadamente apresentada na Tabela 3.8. Esta abordagem abrangente na avaliação das misturas asfálticas fornece uma base sólida para o projeto de pavimentos mais duráveis e seguros.

Tabela 3-8-Número de ensaios conduzidos para cada propriedade da mistura asfáltica.

LIGANTES			
Ensaio	Temperatura/Frequência/Carregamento/Níveis de deformação	Réplicas	Total de amostras
Resistência à tração	24 configurações	3	72
DUI	1 Temperaturas x 24 configurações x condições (amostras condicionadas e amostras não condicionadas)	3	144
Fadiga	3 Nível de tensão s x 24 configurações	1	72
Modulo de resiliência	1 Temperatura x 1 Frequências x 24 configurações	3	72
Creep estático	1 Temperatura x 24 configurações	3	72

3.1.5.1. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (RT)

Utilizando o procedimento de dosagem estabelecido, foram desenvolvidas 24 configurações diferentes de misturas asfálticas para a realização de ensaios focados em avaliar propriedades mecânicas essenciais. O ensaio de Resistência à Tração Indireta é fundamental para determinar a capacidade das misturas resistirem a tensões de tração, sendo crucial na prevenção de trincas e fissuras no pavimento.

O ensaio foi realizado conforme a Norma ME 138 (DNER, 1994), utilizando corpos de prova cilíndricos. O procedimento consiste na aplicação de uma força vertical (F) diametralmente no corpo de prova, até que ocorra a sua ruptura. Esta carga aplicada induz tensões de tração (σ_t) no corpo de prova, que possui dimensões de altura (H) e diâmetro (D) conhecidas, levando à sua ruptura. A equação 3.1 foi utilizada para calcular a resistência à tração.

$$RT = \frac{2F}{\pi DH} \quad (3.1)$$

A execução do ensaio requer um equipamento específico, incluindo uma prensa mecânica com sensibilidade de no máximo 19,6N (ou 2,0kgf), operando a uma velocidade de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. Além disso, é necessária uma estufa capaz de manter a temperatura entre 30 e 60°C, uma sala climatizada para conservar a temperatura em torno de 25°C, e um paquímetro para medições

das dimensões dos corpos de prova. Foram testadas 24 configurações diferentes de misturas, com três amostras para cada configuração, totalizando 72 corpos de prova. Os ensaios foram realizados em amostras secas.

3.1.5.2. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

No método de ensaio DNIT 135/2018-ME, que orienta a determinação da resistência à tração por compressão diametral em misturas asfálticas, define-se o módulo de resiliência como a relação entre a tensão de tração cíclica (σ) e a deformação elástica recuperável específica (ϵ_e). Esta medida é realizada sob uma temperatura definida e uma frequência de carga especificada. Para distribuir o carregamento vertical, utiliza-se um friso de carga curvo, e os deslocamentos horizontais são medidos com transdutores tipo LVDT.

Neste estudo específico, para determinar o módulo de resiliência, aplicou-se um carregamento que gerou uma tensão aproximada de 15% da resistência à tração da mistura. Esta seleção de tensão foi devida a problemas de carga máxima durante os ensaios. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 25°C, aplicando uma carga cíclica em forma haversine a frequências de 1 Hz. Inicialmente, realizou-se um pré-condicionamento de 200 aplicações.

É fundamental na montagem do ensaio destacar o posicionamento dos LVDTs, pois são essenciais para a medição precisa dos deslocamentos horizontais que a amostra experimenta sob a aplicação da carga. A metodologia descrita aqui permite uma avaliação detalhada das propriedades de resiliência das misturas asfálticas, contribuindo significativamente para o campo da engenharia de pavimentos.

Foram testadas 24 configurações diferentes de misturas, com três amostras para cada configuração, totalizando 72 corpos de prova. A metodologia descrita permite uma avaliação detalhada das propriedades de resiliência das misturas asfálticas, contribuindo significativamente para o campo da engenharia de pavimentos.

3.1.5.3. DANO POR UMIDADE INDUZIDA

O ensaio de Dano por Umidade Induzida, conforme descrito pela norma DNIT 180/2018 – ME, é um método utilizado para avaliar a sensibilidade à água de misturas asfálticas moldadas em laboratório. Esse ensaio examina a aderência entre agregado e ligante e a coesão da mistura sob condições de saturação e condicionamento acelerado em água. O dano por umidade

induzida, que compromete as propriedades mecânicas da mistura asfáltica, é mensurado pela relação entre a resistência à tração de amostras condicionadas e a resistência à tração de amostras não condicionadas.

Durante a investigação, foram fabricados 48 corpos de prova para cada teor de asfalto determinado como ótimo nas misturas detalhadas na Tabela 3.7. Estes foram organizados em grupos de três e todos submetidos a um processo de condicionamento de umidade. Contrariamente à prática padrão de manter uma porcentagem de vazios com ar de $7\% \pm 1\%$, optou-se por utilizar os valores de vazios específicos, calculados durante o processo de dosagem para cada tipo de mistura, incluindo aquelas com RCD modificado e não modificado. Essa abordagem foi aplicada tanto aos corpos de prova compactados pelo método Marshall quanto àqueles compactados pelo compactador giratório. Ajustes de massa e giros foram meticulosamente controlados no compactador giratório para alcançar as especificações de vazios de cada mistura.

Os corpos de prova foram parcialmente saturados, entre 55 e 80 %, colocados em um plástico com 10 ml de água destilada e submetidos a um ciclo de congelamento a -18°C por 16 horas, seguido por um banho a 60°C por 24 horas. Após o condicionamento, os corpos de prova foram equalizados em temperatura a 25°C e submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral. A razão de resistência à tração (RRT) é calculada pela fórmula 3.2

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \times 100 \quad (3.2)$$

onde RT_c é a resistência à tração média do grupo condicionado ou saturada e RT é a resistência à tração média de referência ou seca. O valor de RRT indica a suscetibilidade da mistura ao dano por umidade. A norma DNIT 180/2018 – ME não estabelece um valor limite para RRT, indicando que este deve ser conforme o especificado no projeto.

3.1.5.4. ENSAIO CREEP ESTÁTICO

Para realizar o ensaio de creep estático, aplicou-se uma carga contínua de compressão uniaxial de 100 kPa durante 3600 segundos, seguida de um período de recuperação sem carga de 900 segundos. Os corpos de prova, elaborados tanto por compactação Marshall quanto por compactação giratória, foram condicionados aos teores de projeto e suas faces foram lixadas ou recobertas com gesso pedra para garantir uma superfície perfeitamente lisa e paralela. O

ensaio foi realizado em uma prensa pneumática do laboratório INFRALAB, com uma placa de carga com um par de LVDTs para medir a deformação axial da amostra. A temperatura do ensaio foi de 25 °C.

O procedimento de teste consistiu no condicionamento dos corpos de prova a 25 °C, aplicando 100 kPa de tensão axial durante uma hora. Transcorrido este tempo, a carga foi aliviada. O critério de ruptura foi definido pela aparição da zona de plastificação ou quando o corpo de prova mostrou 5% de deformação axial permanente. Foram produzidas um total de duas amostras por cada condição e mistura. A função matemática que modelou o dano foi do tipo potencial, foi:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (3.3)$$



Figura 3-10 Amostra com gesso

As alturas das amostras foram mantidas de acordo com os padrões de compactação Marshall e compactação giratória, seguindo os giros estabelecidos. As amostras cilíndricas preparadas tiveram dimensões padronizadas, em conformidade com as normativas relevantes, geralmente de $100\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ de diâmetro aproximadamente. A superfície foi preparada polindo o topo e a base com gesso para diminuir as irregularidades Figura 3-10.

3.1.5.5. ENSAIO DE FADIGA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL À TENSÃO CONTROLADA

A avaliação da vida de fadiga em misturas asfálticas é um componente crítico na determinação da durabilidade de pavimentos asfálticos. A norma DNIT 183/2018-ME descreve uma metodologia detalhada para o ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada, que visa replicar as condições de serviço e prever a resposta do pavimento sob carregamento repetitivo. No contexto da engenharia rodoviária, dois parâmetros são essenciais: a vida de fratura (N_f), que é o número de ciclos até a fratura completa do material, e a vida de serviço (N_s), que representa o número de ciclos até que a rigidez inicial do material seja reduzida a um nível predeterminado.

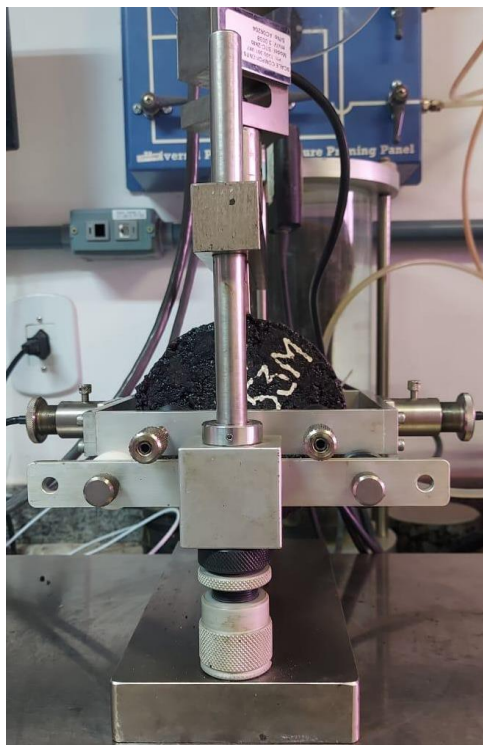


Figura 3-11 Montagem fadiga

Para esta pesquisa específica, foram confeccionados 96 corpos de prova, destinados aos três níveis de carregamento propostos e 24 tipos de misturas. Além desses, um corpo de prova

adicional foi preparado para cada conjunto como reserva, a fim de assegurar a continuidade do estudo em caso de qualquer eventualidade que comprometesse a integridade dos espécimes durante o ensaio submetidos a um regime de tensão constante ou controlada a montagem do ensaio pode-se observar na Figura 3-11.

A fadiga, enquanto fenômeno de degradação, depende das características do tráfego, das condições ambientais e da composição específica do pavimento. A vida de fadiga é obtida por meio da aplicação de carregamentos cíclicos, expressos pela relação entre o número de solicitações (N) e a tensão de tração (σ_t). Estes dados são frequentemente representados em gráficos mono-log, utilizando as seguintes expressões para ensaios à deformação controlada ou tensão controlada, respectivamente. A fórmula para o número de ciclos até a fadiga sob tensão controlada (Di Benedetto & De la Roche, 2005) é dada por:

$$N = K_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^n \quad (3.4)$$

Tradicionalmente, o ensaio laboratorial é realizado com compressão diametral à tensão controlada, aplicando-se a carga a uma frequência de 1 Hz, ou seja, 60 aplicações por minuto. Os ensaios à tensão controlada foram realizados com carregamentos que correspondiam aproximadamente 10%, 20% e 30% da resistência à tração da mistura. A fadiga foi determinada pela fratura total da amostra, normalmente sob condições térmicas de aproximadamente $25 \pm 0,5$ °C. Este ensaio permite uma análise comparativa detalhada da resistência à fadiga entre diferentes misturas asfálticas e proporciona informações valiosas para o projeto de pavimentos mais resistentes e duradouros.

3.1.5.6. MATRIZ EXPERIMENTAL PARA A CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

Um dos objetivos deste estudo investigativo é avaliar as alterações na morfologia de partículas de RCD ao longo do processo de preparação para sua reutilização em projetos de engenharia civil. Para tal, procedeu-se à digitalização de uma amostra de partículas por meio de escaneamento 3D com luz estruturada, capturando a forma das partículas em diferentes etapas do processo: (1) partícula não lavada; (2) partícula lavada; (3) partícula com aditivo aplicado; e (4) partícula peneirada. A amostra foi dividida em dois grupos processados de maneira distinta, alternando a presença ou ausência do aditivo, e cada grupo foi constituído por 35

partículas de cada uma das granulometrias: 1/2", 3/4" e 3/8". Ao longo de todo o procedimento, realizaram-se 752 escaneamentos de partículas, incluindo fragmentos individuais que se separaram durante a etapa de peneiração.

Após a digitalização das partículas utilizando o equipamento EinScan Pro HD, procede-se a uma revisão manual do volume resultante por meio do uso do software acompanhante David3D, para identificar e corrigir pequenas imprecisões que possam ocorrer no processo de construção da malha a partir das imagens adquiridas. Esses resultados podem ser exportados em vários formatos de malhas de superfície padrão disponíveis no aplicativo. Neste caso, foi utilizado o formato OBJ para a representação da superfície como uma malha de triângulos.

O processamento dessas malhas de triângulos para obter características geométricas, como área de superfície, volume, centro de massa, vetores de inércia principais, entre outros, é realizado por meio da aplicação de código aberto MeshLab (Cignoni et al., 2008), em sua versão para a linguagem de programação Python.

O MeshLab foi desenvolvido como uma ferramenta geral de processamento de malhas 3D, visando ser de fácil utilização por usuários que não possuem habilidades avançadas em modelagem 3D, ao mesmo tempo mantendo a capacidade para que usuários mais experientes possam modificá-la e expandir sua funcionalidade. Assim, o MeshLab é uma aplicação de visualização de malhas, onde um objeto 3D pode ser carregado e inspecionado de forma interativa e simples. Uma vez carregada uma malha 3D, o usuário pode trabalhar sobre ela por meio de uma ampla variedade de filtros paramétricos diretos, que realizam tarefas automáticas sem supervisão. Esta capacidade de aplicar filtros de processamento de forma automatizada permite a automatização da análise de toda a amostra.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios laboratoriais realizados no material granular, no RCD, nos ligantes e nas misturas asfálticas produzidas. São apresentados os resultados dos ensaios reológicos e de desempenho realizados nos ligantes. Nas misturas são apresentados os ensaios de dosagem, resistência à tração indireta, dano por umidade induzida, fadiga por tensão controlada, módulo de resiliência, creep estático e fluência dinâmica. Esses ensaios abrangem uma avaliação completa das propriedades mecânicas e de desempenho das misturas asfálticas, proporcionando uma base sólida para compreender o comportamento dos materiais sob diversas condições de carga e ambiente.

4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

Na Tabela 4-1 detalham-se os resultados obtidos para cada teste de caracterização convencional do CAP 50/70, seguindo as normativas aplicáveis. Com base nos resultados de viscosidade do ligante asfáltico, determinaram-se as temperaturas ótimas para os agregados, o próprio ligante, a mistura e o processo de compactação. A temperatura de mistura foi de 150 °C para uma viscosidade de 280 cP e de compactação de 140 °C para uma viscosidade de 170 cP de acordo a Figura 4-1.

Tabela 4-1 Resultados da caracterização do ligante.

Característica	Valor obtido	Especificação
Penetração (0,1 mm)	50	50 a 70 mm
Ponto de amolecimento (°C)	50	mín. 46 °C
Viscosidade Rotacional		
Brookfield		
135 °C (cP)	376	mín. 274 cP
150 °C (cP)	170	mín. 112 cP
177 °C (cP)	55	57 a 285 cP
Densidade a 20°C (g/cm ³)	1,003	
Ponto de fulgor (°C)	328	Min 235 °C
Índice de susceptibilidade térmica	-1,2	
RTFOT		
Penetração (0,1 mm)	60	mín. 55 %

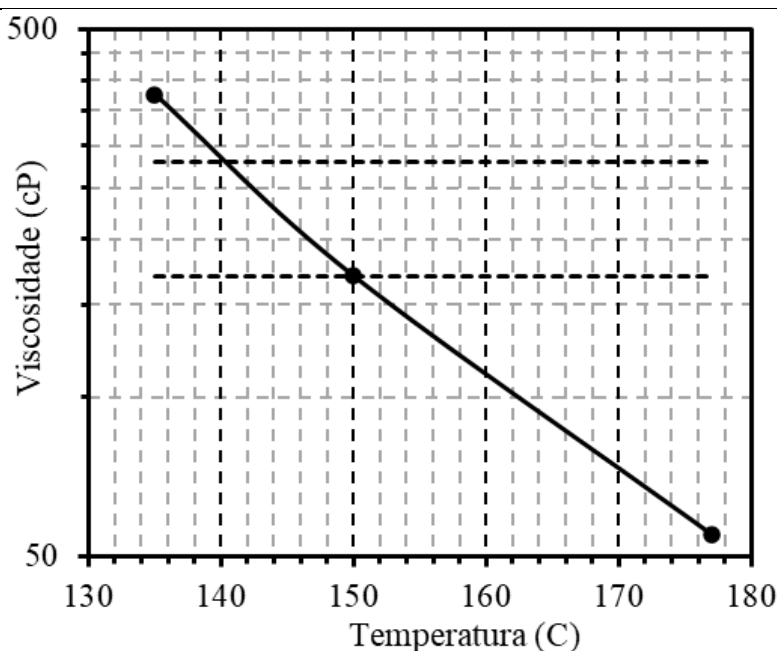


Figura 4-1 Viscosidade em função da temperatura

4.2. AGREGADOS

4.2.1. ANÁLISE GRAVIMÉTRICA

De acordo com a análise gravimétrica realizada, conforme descrito na tabela 4.2 e ilustrada na Figura 4-2 y Figura 4-3, as amostras RCD, apresentam uma composição significativamente consistente. O concreto surge como o componente mais predominante, com uma média ponderada de 73,38%, revelando a recorrência desse material no RCD e confirmando a sua posição como principal componente, em linha com estudos anteriores realizados por Viera et al. (2016), Secco et al. (2022), Ok et al. (2022), Agarwal et al. (2023), Arabani & Azarhoosh, (2012), Gedik, (2020), Gómez-Meijide et al. (2015), Gómez-Meijide et al. (2016), Pérez et al. (2012), Xu et al. (2018) e Zhu et al. (2012).

Fragmentos de rocha natural, majoritariamente quartzo, foram o segundo maior componente, com 21,61%. Tijolos e cerâmica também foram identificados em quantidades relevantes, com médias de 2,32% e 2,41%, respectivamente, enquanto materiais orgânicos como madeira e contaminantes como vidro e ferro apareceram em proporções marginais, todos abaixo de 0,03%. A soma dos componentes de cada ensaio se aproxima dos 100%, reafirmando a abrangência e precisão da análise realizada.



Figura 4-2 Materiais presentes no RCD.

As amostras, estritamente selecionadas de acordo com os critérios de aceitação das usinas de reciclagem no Distrito Federal e submetidas a processos de trituração com múltiplas etapas de lavagem, como prevê a norma NBR 15116 (ABNT, 2004), não apresentaram teor de solo, em consonância com Santos (2011), Fleury (2018), Fleury et al. (2019) e Oliveira (2020).

Isso denota uma cuidadosa seleção de material, que exclui terra vegetal e detritos orgânicos, assegurando a qualidade do agregado reciclado. Classificado como agregado de resíduos mistos (ARM) e de Classe A, segundo a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002), o material demonstra grande potencial de reutilização, especialmente em concretos não estruturais e em pavimentação.

Tabela 4-2 Composição gravimétrica dos RCD (%).

Composição	Ensaio					Média
	1	2	3	4	5	
Concreto	70,21	76,5	74,35	73,6	72,23	73,378
Rocha natural	23,85	19,91	20,3	20,58	23,43	21,614
Tijolos	2,69	1,25	2,84	3,45	1,38	2,322
Cerâmica	3,10	2,30	1,58	2,27	2,78	2,406
Madeira	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,014
Plástico	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Vidro	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,014
Ferro	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,008
Outros	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,008
Total	99,89	100	99,15	99,96	99,87	99,774

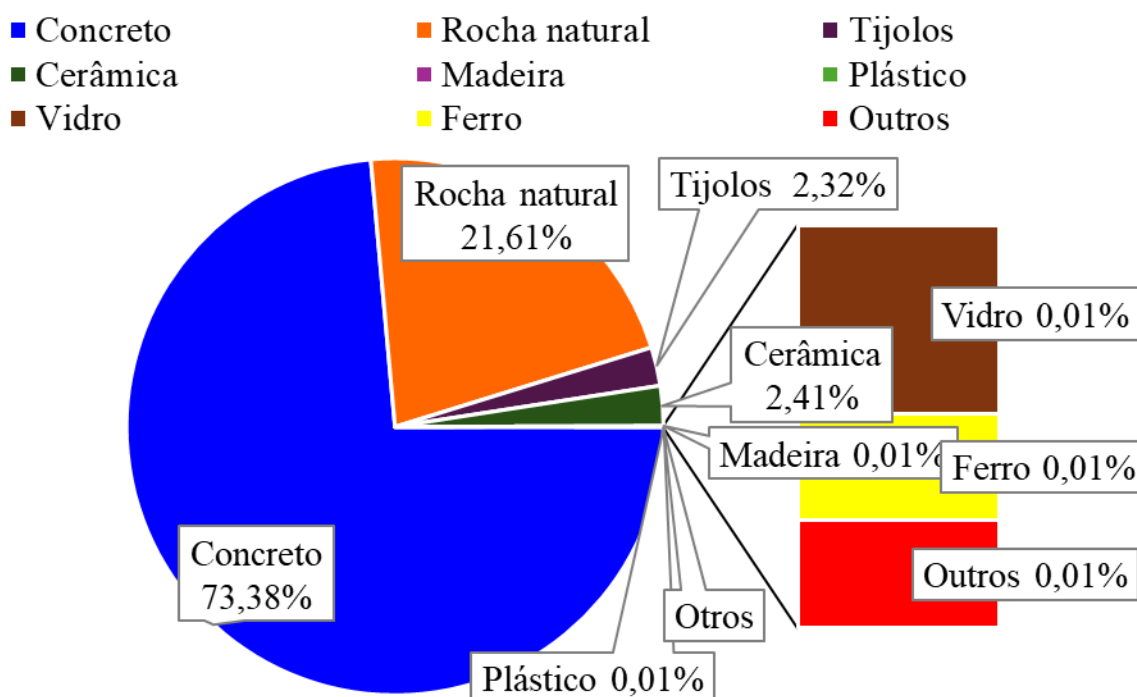


Figura 4-3 Composição gravimétrica da amostra de RCD.

4.2.2. ANÁLISE GRANULOMETRIA

Como foi previamente estabelecido, análises granulométricas foram realizadas no material, e observou-se que durante os processos de lavagem e peneiração, as partículas exibiam uma certa degradação. Em virtude disso, optou-se por conduzir ensaios granulométricos em diversos intervalos temporais. Assim, foram coletadas 12 amostras, que foram submetidas a peneiramento nos seguintes intervalos de tempo: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 minutos. Selecionaram-se dois tipos de amostras para análise: uma amostra foi lavada previamente utilizando a peneira número 200, conforme apresentado na Tabela 4-4, e outra amostra não foi lavada, referente à Tabela 4-3.

A análise das perdas e ganhos de massa nas peneiras revelou que, para o material RCD não lavado (Tabela 4-3 e Figura 4-4), ao longo de diferentes intervalos de peneiramento, observa-se uma tendência consistente: à medida que o tempo de peneiramento aumenta, há um acréscimo na quantidade de material que passa pelas peneiras de granulometria mais fina.

Inicialmente, todas as amostras passam pela peneira de 1 polegada, indicando a ausência de partículas superiores a este tamanho. A peneira de 3/4 de polegada apresenta um leve incremento na passagem de material de 85,18% para 87,62% do tempo de 5 para 60 minutos,

sugerindo uma gradual desagregação das partículas maiores ou a eficácia do processo em separar finos à medida que o tempo avança.

Este aumento progressivo é também evidente nas peneiras subseqüentes até a Nº 200, o que reflete uma presença cada vez maior de partículas finas no material. Este aspecto pode ser um indicador da degradação sofrida pelo RCD ao longo do tempo, onde a ação mecânica do peneiramento contribui para a quebra de partículas maiores em fragmentos menores. O D10, D30 e D60 mostram uma redução nos diâmetros, confirmando o aumento da fração de finos.

O coeficiente de uniformidade (Cu) crescente indica que a distribuição do tamanho das partículas do RCD se amplia com o tempo de peneiramento, tornando a amostra menos uniforme. Este fato pode ter implicações diretas na qualidade do material para certas aplicações, pois uma granulometria mais variada pode afetar a compactação, a estabilidade e o comportamento mecânico dos agregados em uso. Por outro lado, o aumento do coeficiente de curvatura (Cc) para 0,95 aos 60 minutos aponta para uma alteração na curva de graduação que pode ser atribuída à contaminação do material por partículas pulverulentas.

Essa contaminação, frequentemente resultante da presença de materiais pulverulentos e finos no RCD, reforça a necessidade de um processo de lavagem. O material fino, muitas vezes composto por argamassa, gesso, terra e outros detritos, pode afetar a adesão entre os agregados e a matriz cimentícia em novas misturas de concreto, além de reduzir a trabalhabilidade e aumentar a demanda por água. A lavagem do RCD, portanto, não só melhora a qualidade do material, removendo contaminantes, mas também minimiza o impacto negativo desses finos nas propriedades físicas do agregado reciclado. A uniformização do material, removendo excessos de finos, é um passo crítico para garantir que o RCD reciclado possa ser reutilizado de maneira eficaz e sustentável em diversas aplicações na construção civil.

Tabela 4-3 Granulometria do material RCD sem lavar

Tempo	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Peneira	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa
1"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	85,18%	85,60%	85,97%	86,62%	86,88%	87,00%	87,04%	87,22%	87,62%
1/2"	34,78%	35,67%	36,50%	37,00%	37,26%	37,89%	38,38%	38,63%	38,80%
3/8"	10,90%	11,47%	12,18%	12,81%	13,20%	13,54%	14,03%	14,38%	14,71%
Nº 4	0,97%	1,46%	1,89%	2,29%	2,61%	2,89%	3,20%	3,47%	3,71%

Tempo	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Nº 10	0,88%	1,34%	1,73%	2,12%	2,43%	2,69%	2,99%	3,25%	3,47%
Nº 40	0,77%	1,18%	1,52%	1,87%	2,15%	2,38%	2,64%	2,87%	3,07%
Nº 80	0,62%	0,97%	1,26%	1,56%	1,81%	2,02%	2,25%	2,45%	2,63%
Nº 200	0,36%	0,57%	0,73%	0,93%	1,08%	1,22%	1,37%	1,50%	1,61%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
D10	12,19	12,01	11,79	11,62	11,51	11,41	11,29	11,20	9,00
D30	11,83	11,72	11,62	11,55	11,51	11,44	11,37	11,34	11,31
D60	15,41	15,33	15,25	15,18	15,14	15,09	15,06	15,03	14,99
Cc	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,95
Cu	1,26	1,28	1,29	1,31	1,32	1,32	1,33	1,34	1,67

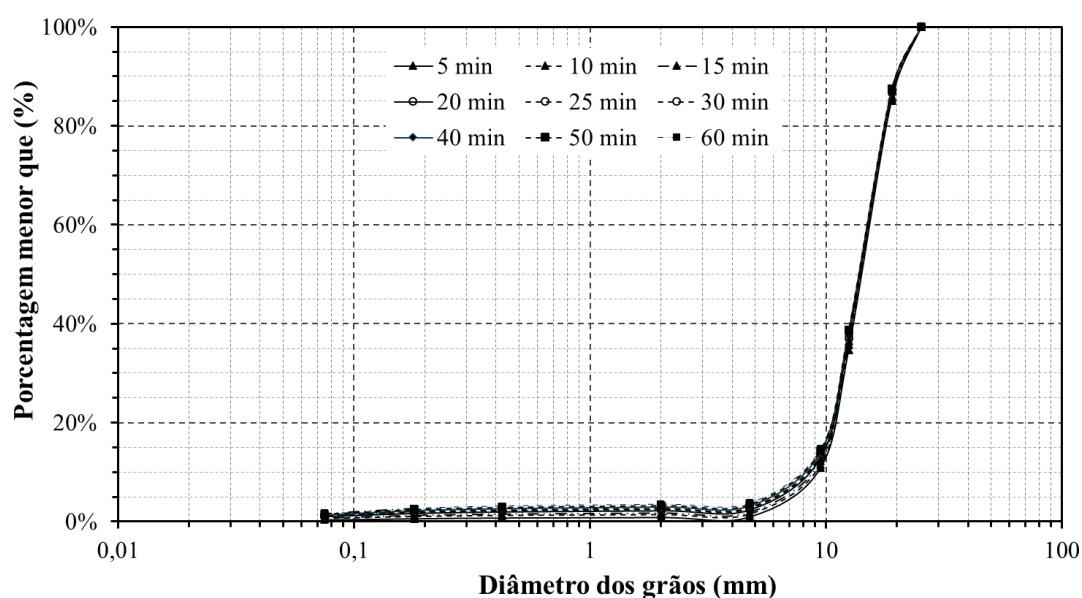


Figura 4-4 Composição gravimétrica da amostra de RCD sem lavar.

Comparando os RCDs lavados e não lavados, percebe-se que o processo de lavagem afeta substancialmente a distribuição granulométrica do material. A lavagem, ao remover impurezas e material pulverulento, inclusive uma parcela do morteiro aderido, resulta em um aumento na qualidade das frações mais grossas, que são cruciais para aplicações estruturais.

Nas peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, os percentuais passantes no RCD lavado Tabela 4-4 mostram que a lavagem preserva essas frações maiores, sugerindo menos perda de agregados graúdos e, ao mesmo tempo, uma redução no conteúdo de partículas finas. Isto é evidenciado pelo incremento contido das porcentagens que passam pelas peneiras nesses diâmetros após o peneiramento do RCD lavado em comparação com o não lavado.

Ao observar os coeficientes de uniformidade e curvatura, a lavagem parece contribuir para uma distribuição de tamanho de grãos mais ampla. Isso pode ser visto pelo aumento do coeficiente de uniformidade (Cu), que é um indicativo da variação do tamanho dos grãos no material. Um Cu mais alto em material lavado significa que o espectro de tamanhos de grãos está mais disperso.

A curva granulométrica para o material lavado Figura 4-5, deslocada para tamanhos maiores de grãos, destaca o impacto positivo da lavagem na remoção de partículas indesejáveis. Isso é reforçado pelo perfil das curvas granulométricas observadas, onde a remoção de finos é uma vantagem para as propriedades físicas do material, impactando diretamente a qualidade do RCD como um agregado reciclado.

Tabela 4-4 Granulometria do material RCD lavada

Tempo	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	40 min	50 min	60 min
Peneira	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa
1"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	85,06%	85,45%	85,64%	85,96%	86,38%	86,41%	86,42%	86,63%	86,72%
1/2"	38,03%	38,82%	39,45%	40,00%	40,44%	40,75%	40,96%	41,25%	41,44%
3/8"	14,31%	15,03%	15,73%	16,16%	16,61%	16,84%	17,06%	17,32%	17,58%
Nº 4	2,69%	3,00%	3,27%	3,56%	3,83%	4,00%	4,18%	4,35%	4,52%
Nº 10	2,62%	2,90%	3,16%	3,42%	3,68%	3,84%	3,99%	4,16%	4,32%
Nº 40	2,60%	2,84%	3,06%	3,30%	3,53%	3,68%	3,81%	3,96%	4,10%
Nº 80	2,54%	2,77%	2,98%	3,19%	3,40%	3,53%	3,65%	3,79%	3,91%
Nº 200	2,48%	2,60%	2,71%	2,83%	2,96%	3,04%	3,12%	3,20%	3,28%
Fundo	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
D10	11,29	11,15	11,02	10,93	10,85	10,80	10,75	10,71	8,71
D30	11,39	11,29	11,21	11,14	11,08	11,05	11,02	10,99	10,96
D60	15,20	15,12	15,06	15,00	14,94	14,91	14,90	14,86	14,84
Cc	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,93
Cu	1,35	1,36	1,37	1,37	1,38	1,38	1,39	1,39	1,70

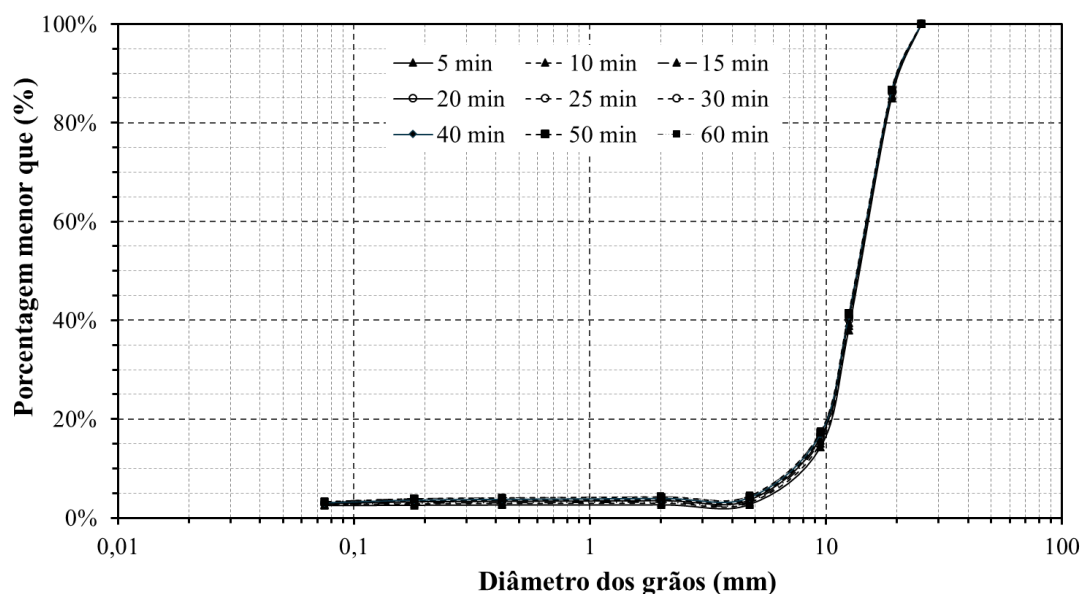


Figura 4-5 Composição gravimétrica da amostra de RCD Lavada.

A Tabela 4-5 resumida apresenta os resultados de uma análise de variância (ANOVA) para três diferentes tamanhos de peneira (19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm) utilizados para separar o material e medir a massa retida.

Para o tamanho de 19 mm, a Razão-F é de 3,57, indicando o quociente da variação entre os grupos pela variação dentro dos grupos. Uma Razão-F alta sugere que as médias dos grupos são distintas entre si do que seria esperado por variação aleatória. O valor-p associado a esta Razão-F é de 0,0011, significativamente menor do que o limiar comum de 0,05. Isso evidencia diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos tempos para a peneira de 19 mm. Já para o tamanho de 12,5 mm, a Razão-F é de 0,66. Este valor baixo da Razão-F sugere que a variância entre os grupos é pouco distinta da variância dentro dos grupos, o que implica que as médias dos grupos são bastante similares. O valor-p de 0,7234 é maior que 0,05, indicando a ausência de evidência estatística de que as médias dos tempos diferem entre si para a peneira de 12,5 mm.

No caso do tamanho de 9,5 mm, a Razão-F é de apenas 0,07, indicando que qualquer diferença entre as médias dos grupos é muito pequena em comparação com a variabilidade dentro dos grupos. O valor-p é de 0,9998, extremamente alto, sugerindo a inexistência de diferença estatística entre as médias dos tempos para a peneira de 9,5 mm.

Para a peneira de 19 mm, constata-se uma diferença estatisticamente significativa nas médias da massa retida entre os diferentes tempos, com um nível de confiança de 95%. Isso implica que o tempo de afeta significativamente a massa retida para esta granulometria.

Quanto às peneiras de 12,5 mm e 9,5 mm, as diferenças entre as médias da massa retida nos diferentes tempos não são estatisticamente significativas, pois os tamanhos de 12,5 mm e 9,5 mm recebem material das peneiras que se encontram acima delas. Isso sugere que o tempo, nessas granulometrias, não possui um impacto estatisticamente significativo sobre a massa retida.

Tabela 4-5 ANOVA para massa retida por tempo do RCD sem lavar.

Tamanho		19 mm				12,5 mm				9,5 mm			
Fonte	Gl	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão- F	Valor- P	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão- F	Valor- P	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão- F	Valor- P
Entre grupos	8	6303,77	787,971	3,57	0,0011	3532,5	441,562	0,66	0,7234	261,285	32,6606	0,07	0,9998
Dentro dos grupos	99	21840,3	220,609			66007,6	666,744			46306,1	467,739		
Total (Corr.)	107	28144,0				69540,1				46567,4			

As Figura 4-6, Figura 4-7 e Figura 4-8 apresentam gráficos de barras de erro que representam as médias e os intervalos de confiança de 95% para a massa retida nas peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm respectivamente correspondente a diferentes tempos (5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 minutos). As barras de erro indicam a dispersão dos dados em torno da média e são baseadas no procedimento de Diferença Mínima Significativa (LSD) de Fisher.

As barras de erro associadas a cada ponto médio mostram o intervalo de confiança de 95%, o que significa que está ao 95% confiante de que a verdadeira média do grupo está dentro desse intervalo. Quanto maior a barra de erro, maior é a variabilidade dos dados para aquele ponto no tempo. Se as barras de erro de dois tempos diferentes não se sobrepõem, há uma sugestão de que as diferenças entre as médias podem ser estatisticamente significativas.

Com base na Figura 4-6 para o tamanho 19 mm sem lavar, observa-se uma tendência de redução na massa retida conforme o tempo aumenta, embora a variabilidade também pareça

diminuir com o tempo. As médias da massa retida diminuem geralmente com o aumento do tempo, indicando que menos material é retido na peneira à medida que o tempo avança.

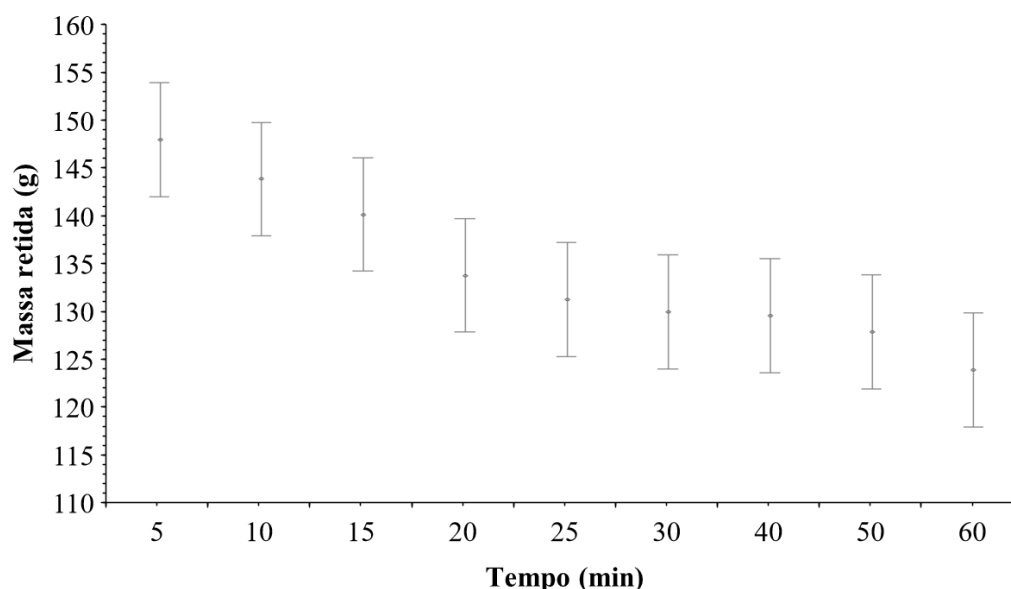


Figura 4-6 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 19 mm sem lavar

Na Figura 4-7 para o tamanho 12,5 mm sem lavar, não se identifica uma tendência clara e consistente de aumento ou diminuição na massa retida com o tempo, indicado pela posição das médias ao longo dos tempos de tamisação. Uma das causas é que recebe o material que passa do tamanho de 19 mm. As barras de erro são relativamente grandes em alguns pontos, especialmente nos primeiros tempos, o que sugere uma variabilidade considerável nas medições da massa retida. A variabilidade parece diminuir um pouco à medida que o tempo de tamisação aumenta, indicado pelo estreitamento das barras de erro.

Para a Figura 4-8, observa-se para o tamanho de 9,5 mm sem lavar que as médias da massa retida parecem diminuir ligeiramente com o tempo, mas essa tendência não é clara ou consistente ao longo dos intervalos. Por exemplo, não há uma diminuição linear, pois alguns intervalos de tempo têm médias superiores aos anteriores ou posteriores. Isso ocorre porque recebe material dos tamanhos de 19 e 12,5 mm. As barras de erro são relativamente grandes em comparação com a variação nas médias, o que sugere que há uma considerável sobreposição nos intervalos de confiança. Isso pode indicar que não há diferenças estatisticamente significativas entre alguns dos tempos. Com base na amplitude das barras de erro, a

variabilidade das massas retidas é relativamente alta para a peneira de 9,5 mm em todos os tempos.

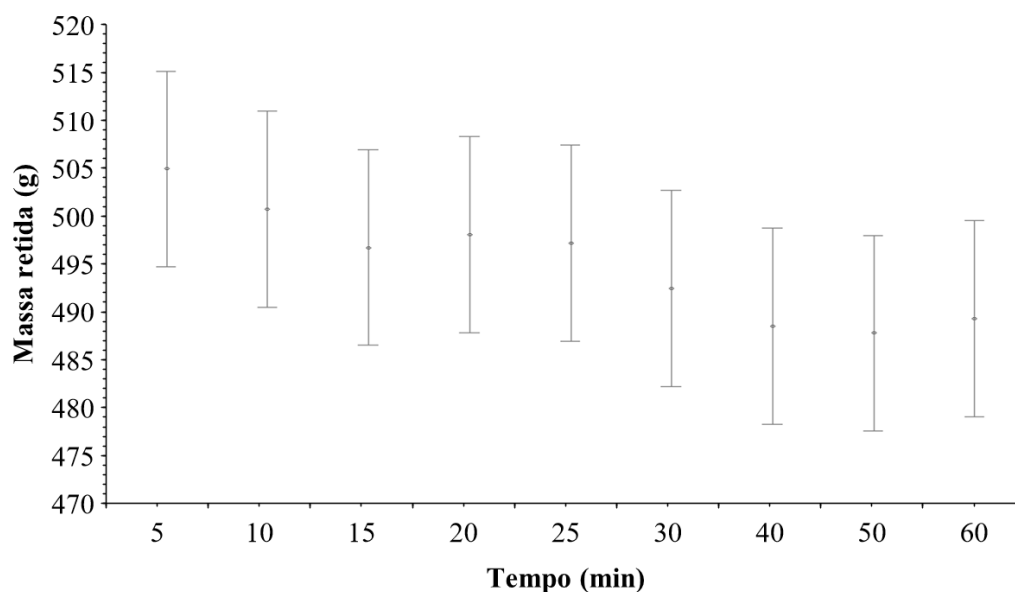


Figura 4-7 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 12,5 mm sem lavar

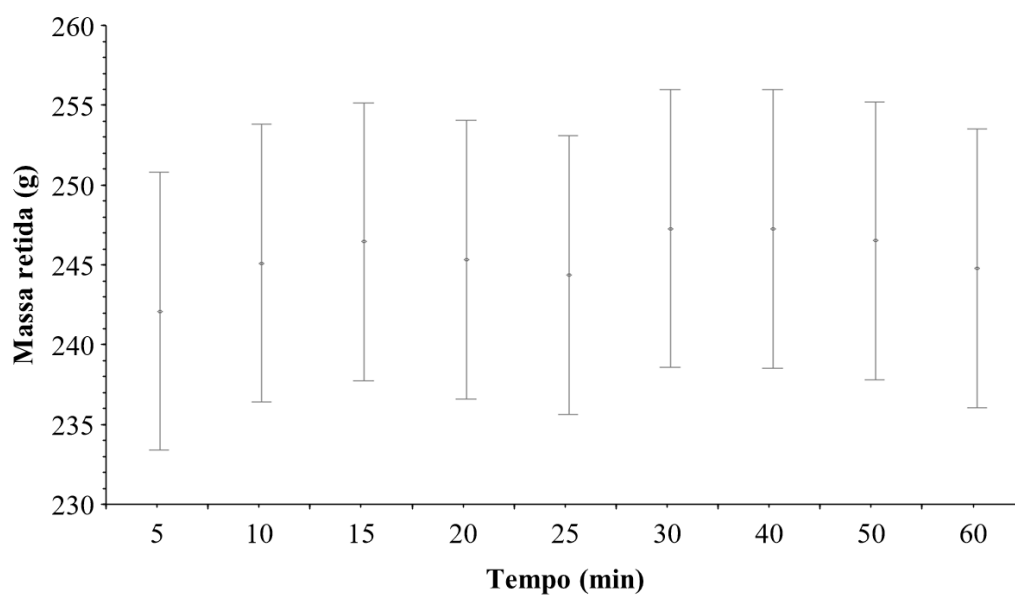


Figura 4-8 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 9,5 mm sem lavar

Na Tabela 4-6, utilizou-se um procedimento de comparação múltipla para identificar diferenças estatisticamente significativas entre as médias dos pesos retidos na peneira, de acordo com o tempo de peneiramento e o tamanho das partículas. Esta tabela apresenta três colunas correspondentes aos tamanhos de peneira de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm.

Para o tamanho de 19 mm, as médias dos pesos retidos variam significativamente com o tempo de peneiramento, como indicado pela presença de "X" em diferentes níveis. Quatro grupos homogêneos foram identificados: o grupo com maior média corresponde ao tempo de peneiramento mais curto (5 minutos), e o grupo com menor média corresponde ao tempo mais longo (60 minutos).

No caso das partículas de 12,5 mm e 9,5 mm, todas as médias de tempo foram classificadas em um único grupo homogêneo. Isso sugere que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os tempos de peneiramento para estas dimensões de partículas, indicando que o peneiramento nestas categorias de tamanho apresenta um resultado consistente ao longo dos diferentes tempos.

Tabela 4-6 Método: 95.0 porcentagem LSD para massa retida sem lavar

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
Tempo	Casos	Média	Grupos Homogêneos	Média	Grupos Homogêneos	Média	Grupos Homogêneos
60	12	123,867	X	487,966	X	242,035	X
50	12	127,905	X	488,68	X	244,294	X
40	12	129,625	XX	489,518	X	244,745	X
30	12	130,024	XX	492,74	X	245,056	X
25	12	131,303	XX	497,096	X	245,278	X
20	12	133,873	XXX	497,554	X	246,394	X
15	12	140,319	XXX	498,472	X	246,459	X
10	12	144,08	XX	501,182	X	247,192	X
5	12	148,243	X	505,494	X	247,229	X

Na Tabela 4-7, emprega-se a análise de contrastes para avaliar as diferenças entre as médias das massas retidas em diferentes intervalos de tempo de peneiramento. A análise foi realizada para três tamanhos de peneira: 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm. A coluna "Seg." indica a significância das diferenças entre os pares de tempos, onde a presença do asterisco (*) sugere uma diferença estatisticamente significativa.

Para o tamanho de peneira de 19 mm, os contrastes entre os tempos de peneiramento de 5 minutos e outros tempos indicaram diferenças estatisticamente significativas (marcadas com asterisco) para vários pares de tempos, confirmando a tendência observada na Figura 4.6. Isso implica que, com um nível de confiança de 95%, a variação na massa retida é significativa e deve ser considerada no ajuste do processo de peneiramento para este tamanho de partícula.

Em relação às peneiras de 12,5 mm e 9,5 mm, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os tempos, o que indica uma homogeneidade na massa retida, independente do tempo de peneiramento aplicado.

Tabela 4-7 Diferencias estatisticamente significativas do RCD sem lavar

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm			
Contraste	Seg.	Diferença	+/- Limites	Seg.	Diferença	+/- Limites	Seg.	Diferença	+/- Limites
05 - 10		4,16333	12,0317		4,3125	20,9167		-3,02083	17,5193
05 - 15		7,92417	12,0317		8,39833	20,9167		-4,35917	17,5193
05 - 20	*	14,37	12,0317		7,0225	20,9167		-3,24333	17,5193
05 - 25	*	16,94	12,0317		7,94	20,9167		-2,25917	17,5193
05 - 30	*	18,2192	12,0317		12,7542	20,9167		-5,19417	17,5193
05 - 40	*	18,6183	12,0317		16,8142	20,9167		-5,15667	17,5193
05 - 50	*	20,3383	12,0317		17,5283	20,9167		-4,42417	17,5193
05 - 60	*	24,3767	12,0317		15,9767	20,9167		-2,71	17,5193
10 - 15		3,76083	12,0317		4,08583	20,9167		-1,33833	17,5193
10 - 20		10,2067	12,0317		2,71	20,9167		-0,2225	17,5193
10 - 25	*	12,7767	12,0317		3,6275	20,9167		0,761667	17,5193
10 - 30	*	14,0558	12,0317		8,44167	20,9167		-2,17333	17,5193
10 - 40	*	14,455	12,0317		12,5017	20,9167		-2,13583	17,5193
10 - 50	*	16,175	12,0317		13,2158	20,9167		-1,40333	17,5193
10 - 60	*	20,2133	12,0317		11,6642	20,9167		0,310833	17,5193
15 - 20		6,44583	12,0317		-1,37583	20,9167		1,11583	17,5193
15 - 25		9,01583	12,0317		-0,45833	20,9167		2,1	17,5193
15 - 30		10,295	12,0317		4,35583	20,9167		-0,835	17,5193
15 - 40		10,6942	12,0317		8,41583	20,9167		-0,7975	17,5193

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
15 - 50	*	12,4142	12,0317	9,13	20,9167	-0,065	17,5193
15 - 60	*	16,4525	12,0317	7,57833	20,9167	1,64917	17,5193
20 - 25		2,57	12,0317	0,9175	20,9167	0,984167	17,5193
20 - 30		3,84917	12,0317	5,73167	20,9167	-1,95083	17,5193
20 - 40		4,24833	12,0317	9,79167	20,9167	-1,91333	17,5193
20 - 50		5,96833	12,0317	10,5058	20,9167	-1,18083	17,5193
20 - 60		10,0067	12,0317	8,95417	20,9167	0,533333	17,5193
25 - 30		1,27917	12,0317	4,81417	20,9167	-2,935	17,5193
25 - 40		1,67833	12,0317	8,87417	20,9167	-2,8975	17,5193
25 - 50		3,39833	12,0317	9,58833	20,9167	-2,165	17,5193
25 - 60		7,43667	12,0317	8,03667	20,9167	-0,45083	17,5193
30 - 40		0,399167	12,0317	4,06	20,9167	0,0375	17,5193
30 - 50		2,11917	12,0317	4,77417	20,9167	0,77	17,5193
30 - 60		6,1575	12,0317	3,2225	20,9167	2,48417	17,5193
40 - 50		1,72	12,0317	0,714167	20,9167	0,7325	17,5193
40 - 60		5,75833	12,0317	-0,8375	20,9167	2,44667	17,5193
50 - 60		4,03833	12,0317	-1,55167	20,9167	1,71417	17,5193

A Tabela 4-8 ao examinar os resultados da ANOVA para o RCD lavado, constata-se que, no tamanho de 19 mm, não se observam diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes tempos de peneiramento, dado o valor-P de 0,1041, que supera o limite convencional de 0,05. Isso indica uma consistência na massa retida, independentemente do tempo de peneiramento aplicado, sugerindo que o processo de lavagem uniformizou as partículas dessa granulometria.

Para as partículas de 12,5 mm, embora a Razão-F indique uma possível variação entre os tempos de peneiramento, o valor-P de 0,0847 reforça que essas possíveis variações não são estatisticamente significativas. Isto é, qualquer variação observada pode ser atribuída ao acaso e não a um efeito sistemático do processo de peneiramento após a lavagem.

Já nas partículas de 9,5 mm, com uma Razão-F próxima a zero e um valor-P de 1, conclui-se que definitivamente não há diferenças estatísticas na massa retida entre os diversos tempos de

peneiramento. Isso implica uma homogeneidade notável para essa granulometria no RCD lavado.

Olhando para o resumo estatístico, percebe-se uma baixa variabilidade na massa retida, com coeficientes de variação inferiores a 10,849% para a peneira de 19 mm. Isso contrasta com o RCD não lavado, onde se esperava uma maior dispersão de resultados devido à presença de impurezas e material fino aderido. A uniformidade obtida com o RCD lavado é crucial, particularmente para as peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm, pois assegura a qualidade do material para a utilização em aplicações específicas da construção civil.

Tabela 4-8 ANOVA para massa retida por tempo do RCD lavada.

Tamanho		19 mm				12,5 mm				9,5 mm			
Fonte	Gl	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Entre grupos	8	3221,56	402,695	1,72	0,1041	4501,92	562,74	1,81	0,0847	172,785	21,5981	0,04	1,0000
Dentro dos grupos	99	23241,5	234,762			30844,9	311,565			48818,4	493,115		
Total (Corr.)	107	26463,0				35346,8				48991,2			

Analisando a Figura 4-9, que representa as médias e intervalos de confiança de 95% para a massa retida da peneira de 19 mm lavada ao longo de diversos tempos. Inicialmente pode-se observar que, a média da massa retida parece diminuir com o aumento do tempo, sugerindo que o procedimento em questão pode estar relacionado a um processo de desgaste ou separação em que menos material é retido pela peneira conforme o tempo passa.

Os intervalos de confiança de 95% são representados pelas barras de erro verticais que se estendem acima e abaixo dos pontos de média.

Nota-se que os intervalos de confiança são relativamente amplos, o que indica uma variabilidade significativa nas medições ou no processo subjacente. A largura dos intervalos de confiança também parece variar com o tempo, o que pode ser interpretado como uma mudança na precisão das medições ou na homogeneidade do processo em diferentes momentos.

Especificamente, para os primeiros tempos (5 e 10 minutos), as barras de erro são mais longas, indicando uma maior incerteza nas medições ou uma maior variação na massa retida. À medida

que o tempo avança, as barras tendem a se tornar um pouco mais curtas, o que pode sugerir que a variabilidade nas medições diminui, ou que o processo se estabiliza.

A diminuição geral na média da massa retida e as amplas barras de erro sugerem que há um fator temporal que afeta o material retido pela peneira de 19 mm, e que há uma variação considerável devido.

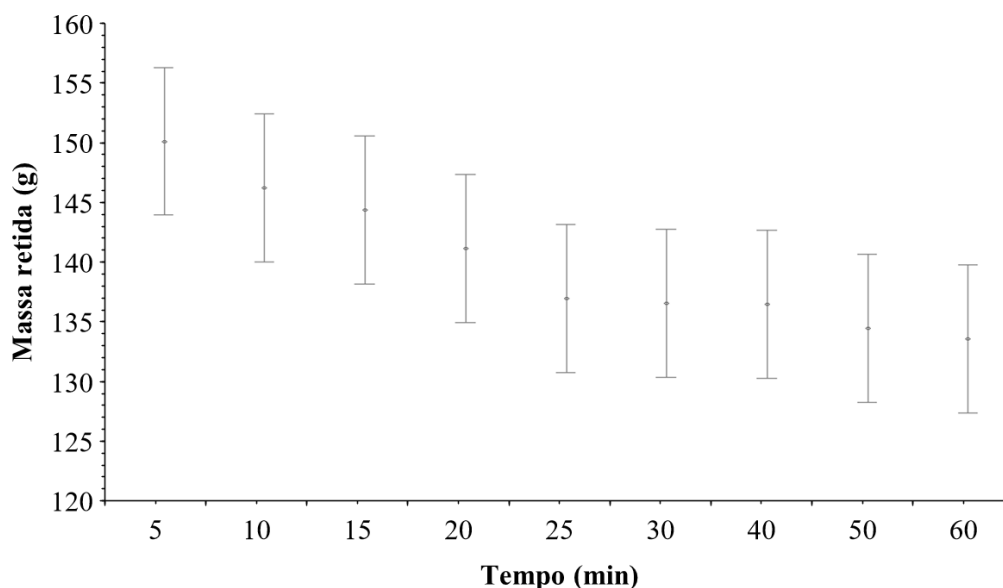


Figura 4-9 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 19 mm lavada

A Figura 4-10 não mostra uma tendência clara na variação da massa retida com o aumento do tempo. A massa parece começar com valores mais altos nos primeiros tempos, depois diminui e, posteriormente, estabiliza-se. Este comportamento poderia sugerir uma influência do tempo no procedimento de lavagem ou no tratamento do material, com maior perda de material nos estágios iniciais, seguida por uma estabilização.

Os intervalos de confiança de 95%, indicados pelas barras de erro, variam em tamanho, mas em geral são menores do que os da peneira de 19 mm analisada anteriormente. Isso sugere que as medições ou o processo para esta dimensão de peneira são menos variáveis ou mais controlados. Contudo, ainda existe uma variação considerável, dado que os intervalos de confiança para alguns pontos são relativamente largos.

O ponto inicial, correspondente ao tempo de 5 minutos, tem um intervalo de confiança particularmente largo, indicando uma maior variabilidade ou incerteza na medição ou no

processo neste momento específico. À medida que o tempo progride, esses intervalos tendem a ser menores, sugerindo uma maior consistência nas medições ou no processo.

As barras de erro que não se sobrepõem claramente entre os diferentes tempos podem indicar diferenças estatisticamente significativas na massa retida. No entanto, a presença de sobreposições entre os intervalos de confiança em outros pontos sugere que algumas médias não são estatisticamente diferentes.

Assim como na análise anterior, para determinar com precisão quais as diferenças entre os tempos são estatisticamente significativas, seria necessário realizar um teste post-hoc, como o LSD de Fisher, com os dados numéricos específicos. A sobreposição dos intervalos de confiança pode ser uma indicação de que não existem diferenças significativas, mas a confirmação requer uma análise estatística detalhada.

Em resumo, a Figura 4.10 para a peneira de 12,5 mm lavada mostra uma relação menos clara entre a massa retida e o tempo em comparação com a peneira de 19 mm não lavada. A variabilidade das medições é aparente, mas parece ser reduzida em comparação com a peneira de maior tamanho, sugerindo que a lavagem ou o tamanho da peneira pode ter um papel na consistência do material retido. A análise reforça a necessidade de uma interpretação cuidadosa dos resultados e consideração da variabilidade presente.

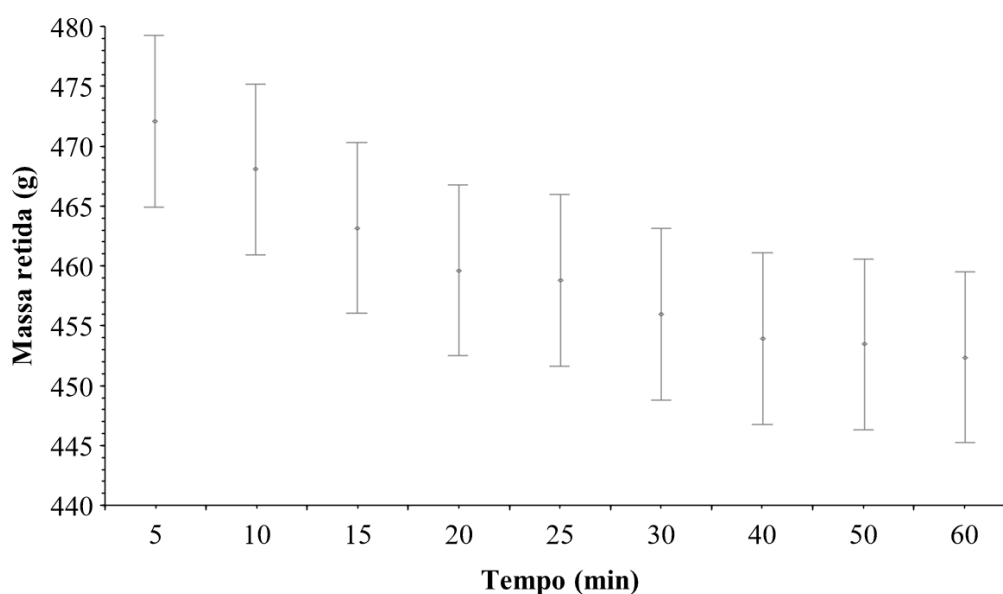


Figura 4-10 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 12,5 mm lavada

A Figura 4-11 não exibe uma tendência clara de aumento ou diminuição na massa retida ao longo do tempo, sugerindo que o processo de lavagem pode estar estabilizando a quantidade de massa retida independente do tempo de lavagem após os 5 minutos iniciais.

A variação da massa retida parece consistente ao longo dos tempos, como evidenciado pelos intervalos de confiança que se mantêm relativamente estáveis. Isso pode indicar que a variabilidade no processo ou nas medições não é fortemente influenciada pelo tempo de lavagem.

A amplitude dos intervalos de confiança, embora não seja estreita, parece ser menor do que as amplitudes observadas nas peneiras de tamanhos maiores (19 mm e 12,5 mm), o que pode sugerir uma maior precisão nas medições ou um processo mais controlado para essa faixa de tamanho de grãos.

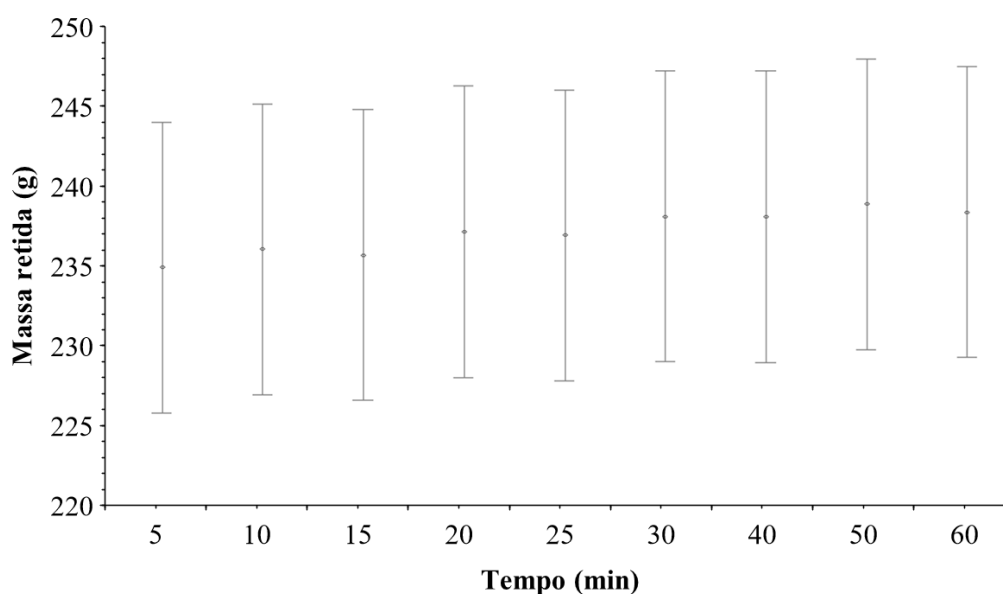


Figura 4-11 Meias e 95% de Fisher LSD massa retida da peneira 9,5 mm lavada

Para a comparação múltipla e determinação das diferenças estatisticamente significativas entre os três tamanhos lavados (19 mm, 12,5 mm, 9,5 mm), é apresentada na Tabela 4-9.

Para os tamanhos de 19 mm e 12,5 mm, foram identificados três grupos homogêneos, representados pelo alinhamento das 'X's nas colunas. As médias que compartilham a mesma coluna de 'X's não apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si. Isso sugere

que, dentro de cada grupo homogêneo, as médias podem ser consideradas estatisticamente equivalentes com um nível de confiança de 95%.

Para o tamanho de 9,5 mm, apenas um grupo homogêneo foi identificado, indicando que não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre as médias com um nível de confiança de 95%. Todas as médias compartilham a mesma coluna de 'X's, sugerindo que são estatisticamente equivalentes dentro do nível de confiança estabelecido.

Para os tamanhos de 19 mm e 12,5 mm, foram detectadas diferenças estatisticamente significativas entre 6 pares de médias, indicados por asteriscos. Isso implica que, para esses pares, as diferenças observadas são suficientemente grandes para não serem atribuídas à variabilidade aleatória, com um nível de confiança de 95%. Para o tamanho de 9,5 mm, não foram observadas diferenças significativas.

Tabela 4-9 Método: 95.0 porcentagem LSD para massa retida lavada

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
Tempo	Casos	Média	Grupos Homogêneos	Média	Grupos Homogêneos	Média	Grupos Homogêneos
60	12	133,159	X	452,247	X	234,64	X
50	12	134,055	XX	453,331	X	235,412	X
40	12	136,085	XX	453,828	XX	235,778	X
30	12	136,183	XX	455,844	XX	236,637	X
25	12	136,551	XX	458,674	XXX	236,853	X
20	12	140,753	XXX	459,499	XXX	237,782	X
15	12	143,97	XXX	463,04	XXX	237,816	X
10	12	145,873	XX	467,922	XX	238,07	X
5	12	149,755	X	471,946	X	238,572	X

A Tabela 4-10 analisada apresenta uma avaliação detalhada das diferenças entre pares de tratamentos para três dimensões distintas (19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm). Essas diferenças são expressas para cada par de contrastes, com os respectivos limites de confiança. A presença de um asterisco (*) indica que a diferença entre os pares de tratamentos é estatisticamente significativa ao nível de 95% de confiança. Observa-se que, para o tamanho de 19 mm, os

contrastes entre os tempos 05 e 25, 05 e 30, 05 e 40, 05 e 50, 05 e 60, e entre 10 e 60 apresentam diferenças significativas, sugerindo que as alterações no tratamento entre esses tempos específicos têm um impacto significativo no parâmetro medido. Os limites de confiança para as diferenças estimadas são consistentes, indicando uma estabilidade na precisão das estimativas de diferença para este tamanho.

Para o tamanho de 12,5 mm, há um número maior de contrastes significativos, especialmente nos tempos mais tardios, o que pode indicar uma maior sensibilidade deste tamanho às variações de tratamento em comparação com o tamanho de 19 mm. Os limites de confiança são ligeiramente maiores do que para o tamanho de 19 mm, o que pode sugerir uma maior variabilidade nas estimativas de diferença para este tamanho.

Em relação ao tamanho de 9,5 mm, não há contrastes marcados com asterisco, indicando a ausência de diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos para este tamanho. Isso pode sugerir que as variações nos tempos de tratamento não têm um efeito apreciável no parâmetro medido para este tamanho específico, ou que a variabilidade dentro dos grupos é relativamente alta, dificultando a detecção de potenciais diferenças significativas. Os limites de confiança são consideravelmente mais amplos para este tamanho, refletindo uma maior incerteza nas estimativas de diferença.

A análise indica que há uma resposta diferenciada aos tratamentos conforme o tamanho, com o tamanho de 12,5 mm mostrando uma maior sensibilidade às variações de tratamento. A consistência dos limites de confiança para os tamanhos de 19 mm e 12,5 mm sugere uma precisão relativamente estável nas estimativas de diferença para esses tamanhos, enquanto o tamanho de 9,5 mm mostra maior variabilidade.

Tabela 4-10 Diferencias estatisticamente significativas do RCD Lavada

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm			
Contraste	Seg.	Diferença	+/-	Seg.	Diferença	+/-	Seg.	Diferença	+/-
		Limites	Limites		Limites				
05 - 10		3,88167	12,4116		4,02417	14,2984		-1,1375	17,9882
05 - 15		5,785	12,4116		8,90583	14,2984		-0,7725	17,9882
05 - 20		9,00167	12,4116		12,4467	14,2984		-2,21333	17,9882

Tamanho		19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
05 - 25	*	13,2042	12,4116	13,2717	14,2984	-1,99667	17,9882
05 - 30	*	13,5717	12,4116	* 16,1017	14,2984	-3,17583	17,9882
05 - 40	*	13,67	12,4116	* 18,1183	14,2984	-3,14167	17,9882
05 - 50	*	15,7	12,4116	* 18,615	14,2984	-3,93167	17,9882
05 - 60	*	16,5958	12,4116	* 19,6983	14,2984	-3,43	17,9882
10 - 15		1,90333	12,4116	4,88167	14,2984	0,365	17,9882
10 - 20		5,12	12,4116	8,4225	14,2984	-1,07583	17,9882
10 - 25		9,3225	12,4116	9,2475	14,2984	-0,859167	17,9882
10 - 30		9,69	12,4116	12,0775	14,2984	-2,03833	17,9882
10 - 40		9,78833	12,4116	14,0942	14,2984	-2,00417	17,9882
10 - 50		11,8183	12,4116	* 14,5908	14,2984	-2,79417	17,9882
10 - 60	*	12,7142	12,4116	* 15,6742	14,2984	-2,2925	17,9882
15 - 20		3,21667	12,4116	3,54083	14,2984	-1,44083	17,9882
15 - 25		7,41917	12,4116	4,36583	14,2984	-1,22417	17,9882
15 - 30		7,78667	12,4116	7,19583	14,2984	-2,40333	17,9882
15 - 40		7,885	12,4116	9,2125	14,2984	-2,36917	17,9882
15 - 50		9,915	12,4116	9,70917	14,2984	-3,15917	17,9882
15 - 60		10,8108	12,4116	10,7925	14,2984	-2,6575	17,9882
20 - 25		4,2025	12,4116	0,825	14,2984	0,216667	17,9882
20 - 30		4,57	12,4116	3,655	14,2984	-0,9625	17,9882
20 - 40		4,66833	12,4116	5,67167	14,2984	-0,928333	17,9882
20 - 50		6,69833	12,4116	6,16833	14,2984	-1,71833	17,9882
20 - 60		7,59417	12,4116	7,25167	14,2984	-1,21667	17,9882
25 - 30		0,3675	12,4116	2,83	14,2984	-1,17917	17,9882
25 - 40		0,465833	12,4116	4,84667	14,2984	-1,145	17,9882
25 - 50		2,49583	12,4116	5,34333	14,2984	-1,935	17,9882
25 - 60		3,39167	12,4116	6,42667	14,2984	-1,43333	17,9882
30 - 40		0,0983333	12,4116	2,01667	14,2984	0,0341667	17,9882
30 - 50		2,12833	12,4116	2,51333	14,2984	-0,755833	17,9882
30 - 60		3,02417	12,4116	3,59667	14,2984	-0,254167	17,9882
40 - 50		2,03	12,4116	0,496667	14,2984	-0,79	17,9882
40 - 60		2,92583	12,4116	1,58	14,2984	-0,288333	17,9882

Tamanho	19 mm		12,5 mm		9,5 mm	
50 - 60	0,895833	12,4116	1,08333	14,2984	0,501667	17,9882

* mostra uma diferença significativa.

4.2.3. AVALIAÇÃO DA ABSORÇÃO E DENSIDADE DE AGREGADO GRAÚDO

Conforme exposto na metodologia, aplicou-se um modelo proposto por Leite (2001) para o material RCD com aditivo, a fim de determinar o tempo necessário para a absorção completa da solução de aditivo polimérico dissolvida em água.

Na Figura 4-12, observa-se que a água pura alcança 100% de absorção em aproximadamente 360 minutos. Enquanto isso, a solução com 1% de aditivo mostra um tempo ligeiramente superior para atingir a totalidade da absorção. A solução com 2% de aditivo exibe um comportamento semelhante à solução com 1% de aditivo, indicando que pequenas variações na concentração do aditivo não alteram significativamente a cinética de absorção.

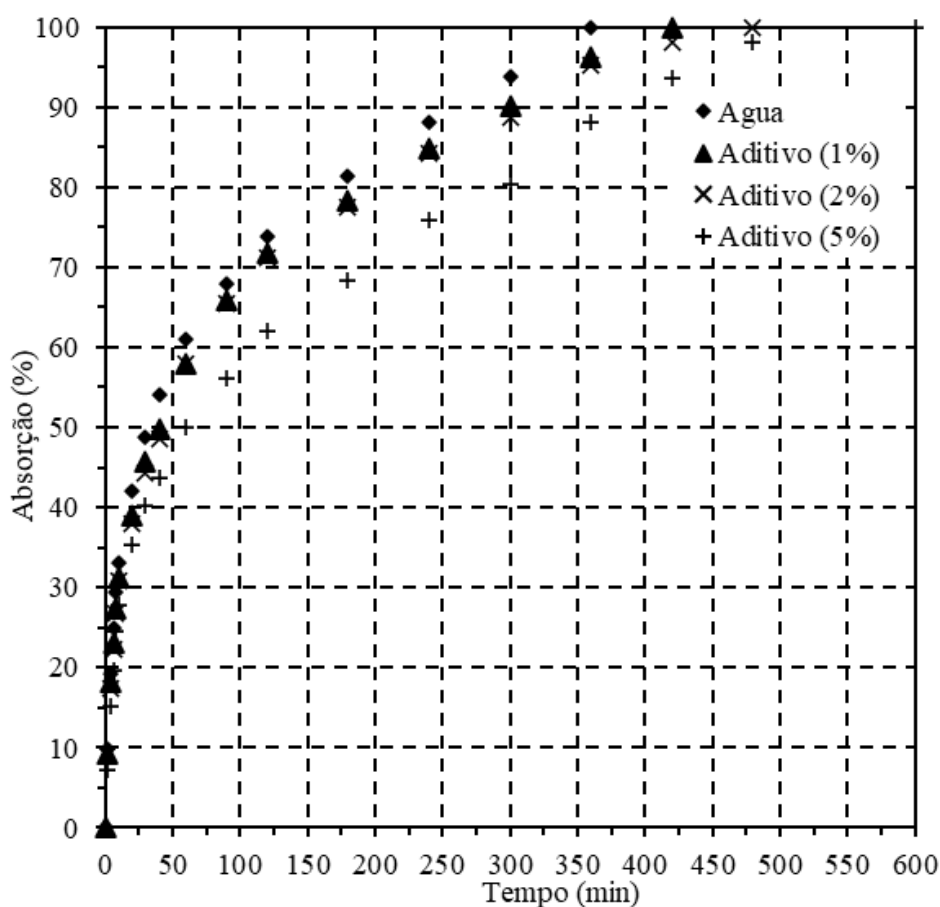


Figura 4-12 Tempo de adsorção do aditivo no RCD

No entanto, a solução com 5% de aditivo apresenta uma dinâmica de absorção notavelmente mais lenta, alcançando 100% apenas após 480 minutos. Ao analisar o tempo necessário para chegar a 50% de absorção, todas as soluções demonstram um tempo de aproximadamente 60 minutos, em comparação aos 40 minutos necessários para a água.

Esse resultado sugere que, até certo ponto, o aumento na concentração do aditivo não impacta a taxa de absorção inicial. Por outro lado, para o processo completo de absorção, a solução com 5% de aditivo mostra uma taxa mais lenta, o que implica que concentrações mais elevadas podem retardar significativamente a absorção total ao longo do tempo. Por tanto é possível concluir que, em um período de 24 horas (ou 1440 minutos), todas as soluções testadas atingem 100% de absorção. Isso implica que, independentemente da concentração do aditivo (1%, 2% ou 5%), as partículas granulares em todas as soluções se encontram saturadas com o aditivo após esse período.

A análise dos dados sobre as propriedades de agregados tratados com aditivo polimérico com uma concentração de 2% de acordo ao estudo anterior, um polímero solúvel em água, revela impactos significativos sobre a massa específica aparente, a porosidade e a absorção de água (ver Tabela 4-11). Por exemplo, para partículas de 19 mm, a massa específica aparente aumenta de 2,30 (sem lavar) para 2,31 (lavada), um aumento de aproximadamente 0,43%. Com o aditivo polimérico, a massa específica aparente sobe para 2,39, representando um aumento total de cerca de 3,91% em relação às partículas sem lavar.

A porosidade diminui significativamente quando os agregados são lavados e ainda mais com o uso do aditivo, indicando uma estrutura mais densa e menos porosa. Para partículas de 19 mm, a porosidade reduz de 15,27% (sem lavar) para 13,2% (lavada), uma diminuição de cerca de 13,55%. Com o aditivo polimérico, a porosidade diminui ainda mais para 7,4%, resultando em uma redução total de aproximadamente 51,55% em relação às partículas sem lavar.

A absorção de água dos agregados também diminui ao serem lavados e reduz drasticamente com o uso do aditivo polimérico, refletindo uma menor capacidade de retenção de água. Para partículas de 19 mm, a absorção cai de 6,97% (sem lavar) para 6,03% (lavada), uma diminuição de cerca de 13,48%. Com o aditivo polimérico, a absorção diminui para 3,2%, uma redução total de aproximadamente 54,95% em comparação com as partículas sem lavar.

Essas melhorias entre as partículas sem lavar e lavadas ocorrem porque, durante a lavagem, todas as impurezas, como argila aderida e algumas partículas de argamassa, são removidas. Já o aditivo polimérico penetra nos poros das partículas e impermeabiliza a superfície.

A diminuição na porosidade e na absorção de água sugere uma melhoria significativa na qualidade dos agregados, o que é essencial para a durabilidade e eficácia das misturas quentes utilizadas em construções. A maior densidade e a estrutura menos porosa dos agregados tratados com aditivo polimérico podem contribuir para uma maior resistência e vida útil das misturas asfálticas, aspectos fundamentais na escolha de materiais para pavimentação e outras aplicações estruturais. Além disso, ao reduzir a porosidade, pode-se diminuir o consumo de asfalto, o que é um benefício econômico significativo. Assim, a utilização de RCD com o aditivo polimérico emerge como uma alternativa promissora na indústria da construção, oferecendo não apenas benefícios ambientais pelo reaproveitamento de resíduos, mas também melhorias técnicas significativas nas propriedades dos materiais utilizados.

Tabela 4-11 Resultados de massa aparente, porosidade e Absorção

Agregado	Massa específica aparente	ηa (%) Porosidade	αa (%) Absorção
Sem lavar			
19 mm	2,30	15,27	6,97
12,5 mm	2,37	14,15	6,42
9,5 mm	2,38	10,85	4,91
Lavada			
19 mm	2,31	13,2	6,03
12,5 mm	2,38	13,11	5,95
9,5 mm	2,39	8,82	4,01
TERRAFIX 14			
19 mm	2,39	7,4	3,2
12,5 mm	2,42	6,97	3,12
9,5 mm	2,45	3,65	1,56

4.2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO

A análise dos dados da Abrasão Los Angeles (ver Tabela 4-12 e Figura 4-13) revela resultados importantes sobre a durabilidade de diferentes materiais usados na construção. Comparando o material natural com RCD, observa-se uma tendência clara: o RCD apresenta uma porcentagem mais alta de abrasão em todos os tamanhos de partículas testados.

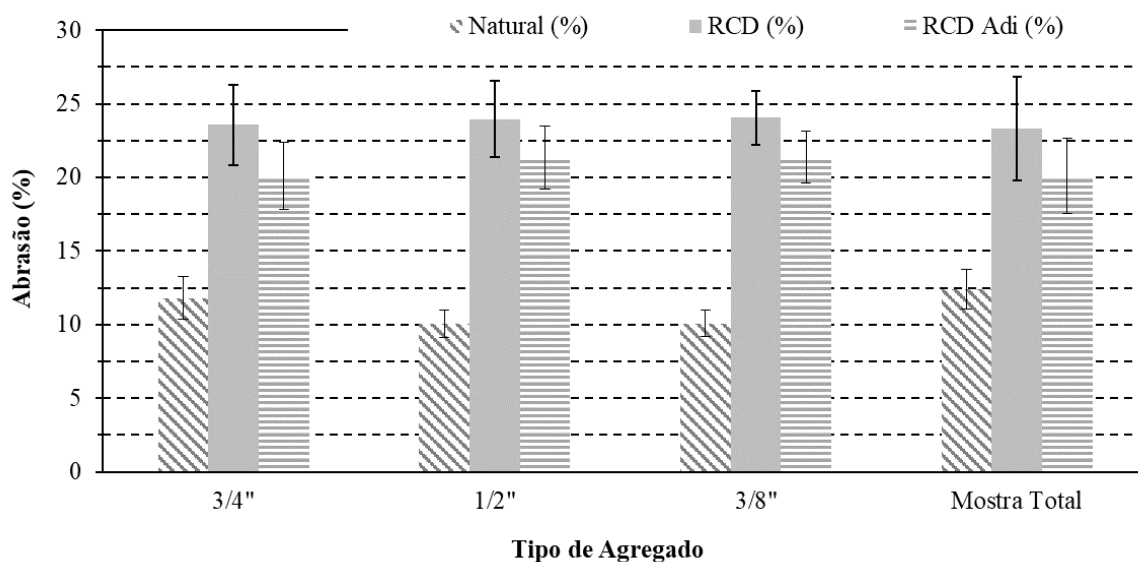


Figura 4-13 Abrasão Los Angeles

Por exemplo, para partículas retidas em 3/4", o material natural mostrou uma abrasão de 11,79%, enquanto o RCD apresentou um índice significativamente mais alto de 23,56%. Este aumento na abrasão para o RCD é estatisticamente significativo, conforme indicado pela diferença de -11,77 na Tabela 4-13, que é maior que o limite de 3,6015 kN. Este resultado sugere uma maior susceptibilidade ao desgaste para o RCD, provavelmente devido à sua composição heterogênea e à presença de componentes menos resistentes. Resultados similares foram reportados por outros pesquisadores (Bastidas et al., 2022c; Radevic et al., 2017; Chen & Wong, 2015).

Interessantemente, quando um aditivo é aplicado ao RCD, nota-se uma diminuição na abrasão. No caso das partículas retidas em 3/4", a taxa de abrasão cai de 23,56% para 20,12%. Esta redução também é estatisticamente significativa, com a diferença de -8,33 entre o NAT 3/4" e o RCD Adi 3/4". Este resultado, sendo maior que o limite de 3,6015 kN, indica que o aditivo está fortalecendo o material de forma significativa. O aditivo possivelmente penetra nas

microfissuras presentes nas partículas de RCD, garantindo uma melhor união entre os componentes. Essa penetração ajuda a preencher e selar as microfissuras, resultando em uma estrutura mais densa e estável. Além disso, o aditivo pode estar formando uma camada protetora ao redor das partículas, o que reduz o desgaste e aumenta a durabilidade do material. Essas melhorias são cruciais para a aplicabilidade do RCD tratado em misturas asfálticas, proporcionando melhor desempenho mecânico e maior resistência ao desgaste.

Ao observar as tendências gerais, percebe-se que as partículas de tamanho menor (retidas em 1/2" e 3/8") tendem a ter uma porcentagem de abrasão menor em comparação com as de tamanho maior (retidas em 3/4"), independentemente do tipo de material. Isso pode ser devido às características físicas das partículas menores, que podem ser intrinsecamente mais resistentes ao desgaste.

Tabela 4-12 Abrasão Los Angeles

Tamanho	Natural (%)	Desvio padrão	RCD (%)	Desvio padrão	RCD Adi (%)	Desvio padrão
3/4"	11,79	1,45	23,56	2,72	20,12	2,29
1/2"	10,05	0,96	23,94	2,59	21,31	2,14
3/8"	10,07	0,90	24,04	1,81	21,36	1,75
Mostra Total	12,42	1,34	23,32	3,52	20,12	2,57

Considerando a amostra total, o RCD sem tratamento apresenta um índice de abrasão de 23,32%, significativamente mais alto que o do material natural (12,42%). A diferença significativa de -10,9 entre o natural mostra total e o RCD mostra total reforça essa observação. No entanto, o tratamento com aditivo reduz a taxa de abrasão do RCD para 20,12%, com diferenças significativas de -7,7, -8,89 e -8,94 entre o natural mostra total e os RCD Adi 3/4", RCD aditivo 1/2" e RCD aditivo 3/8", respectivamente.

Essas diferenças significativas reforçam a qualidade superior do agregado natural em termos de resistência à abrasão, mesmo quando os RCD são tratados com aditivo. A alta porosidade e a composição heterogênea dos RCD são fatores que contribuem para sua menor resistência comparativa.

Tabela 4-13 Diferencias estatisticamente significativas do RCD Abrasão Los Angeles

Contraste	Seg.	Diferença +/-	Limites
NAT 3/4” - NAT Mostra Total		-0,63	3,6015
NAT 3/4” - RCD 3/4”	*	-11,77	3,6015
NAT 3/4” - RCD Mostra Total	*	-11,53	3,6015
NAT 3/4” - RCD Adi 3/4”	*	-8,33	3,6015
NAT 3/4” - RCD Adi Mostra Total	*	-8,33333	3,6015
NAT 1/2” - NAT Mostra Total		-2,37	3,6015
NAT 1/2” - RCD 1/2”	*	-13,89	3,6015
NAT 1/2” - RCD Mostra Total	*	-13,27	3,6015
NAT 1/2” - RCD Adi 1/2”	*	-11,2633	3,6015
NAT 1/2” - RCD Adi Mostra Total	*	-10,0733	3,6015
NAT 3/8” - NAT Mostra Total		-2,35333	3,6015
NAT 3/8” - RCD 3/8”	*	-13,9733	3,6015
NAT 3/8” - RCD Mostra Total	*	-13,2533	3,6015
NAT 3/8” - RCD Adi 3/8”	*	-11,2967	3,6015
NAT 3/8” - RCD Adi Mostra Total	*	-10,0567	3,6015
NAT Mostra Total - RCD 3/8”	*	-11,62	3,6015
NAT Mostra Total - RCD Mostra Total	*	-10,9	3,6015
NAT Mostra Total - RCD Adi 3/4”	*	-7,7	3,6015
NAT Mostra Total - RCD Adi 1/2”	*	-8,89333	3,6015
NAT Mostra Total - RCD Adi 3/8”	*	-8,94333	3,6015

* mostra uma diferença significativa.

Em relação à determinação do Índice de Forma com paquímetro, os dados apresentados na Tabela 4-12 revelam um perfil de forma predominantemente cúbica nas partículas, com 95%, 90% e 87% para os tamanhos de 3/8, 1/2 e 3/4, respectivamente. Esta característica é especialmente benéfica no concreto asfáltico, visto que partículas mais equidimensionais favorecem uma melhor trabalhabilidade e compactação, contribuindo também para a durabilidade da mistura asfáltica.

Alguns autores, como McGennis et al. (1995), Barksdale (1992) e Kandhal & Parker (1998), descobriram que o não cumprimento deste requisito pode resultar em um desempenho insatisfatório. Conforme as especificações da NBR 7211/2005, o índice de forma dos

agregados, deve ser menor que 3. Os valores obtidos para os RCDs, que são 1,95 para 3/8, 2,03 para 1/2 e 1,88 para 3/4, indicam uma conformidade clara com a norma, apontando a qualidade dos agregados em termos de forma. A ausência de partículas alongadas-lamelares é um ponto positivo, pois esse tipo de forma pode afetar negativamente a homogeneidade e a resistência mecânica do concreto asfáltico (McGennis et al. 1995; Barksdal, 1992).

Em resumo, o perfil de forma dos RCDs analisados sugere um potencial de uso satisfatório no concreto asfáltico, atendendo às normas de qualidade e prometendo bom desempenho na aplicação final. Isso é reforçado pela análise do índice de forma, que está bem abaixo dos limites estabelecidos, garantindo que os agregados possam contribuir para uma mistura asfáltica mais estável e durável.

Tabela 4-14 Resultados da classificação da forma do RCD

Classificação da Forma		RCD 3/8	RCD 1/2	RCD 3/4
NBR 7211/2005	Cúbica	95%	90%	87%
	Lamelar	3%	9%	10%
	Alongada	2%	1%	3%
	Alongada-Lamelar	0%	0%	0%
ABNT - NBR 5564	$C_{\text{médio}}$	20,27	25,72	32,93
	$e_{\text{médio}}$	10,37	12,69	17,44
	Índice de Forma	1,95	2,03	1,88

Para a Avaliação da resistência mecânica pelo método dos 10% de finos, apresenta-se na Figura 4-14, um estudo comparativo da resistência mecânica de diferentes tipos de agregados, avaliados tanto em condições secas quanto úmidas. Observa-se que o agregado natural exibe a resistência mais alta e significativa em ambas as condições, com valores de 334,45 kN quando seco e 264,8 kN quando úmido. Os agregados RCD em diferentes granulometrias (3/4", 1/2", 3/8") sem aditivo apresentam resistências mecânicas inferiores ao agregado natural, com uma redução notável da resistência quando passam do estado seco para o úmido, refletindo relações úmido/seco de 69% a 97%. Esses resultados são consistentes com os achados reportados por Al-bayati (2019), Zhang et al. (2016) e Martinez-arguelles et al. (2019). Uma das causas dessas diferenças pode ser a alta porosidade e absorção dos agregados RCD, que afeta negativamente sua resistência mecânica.

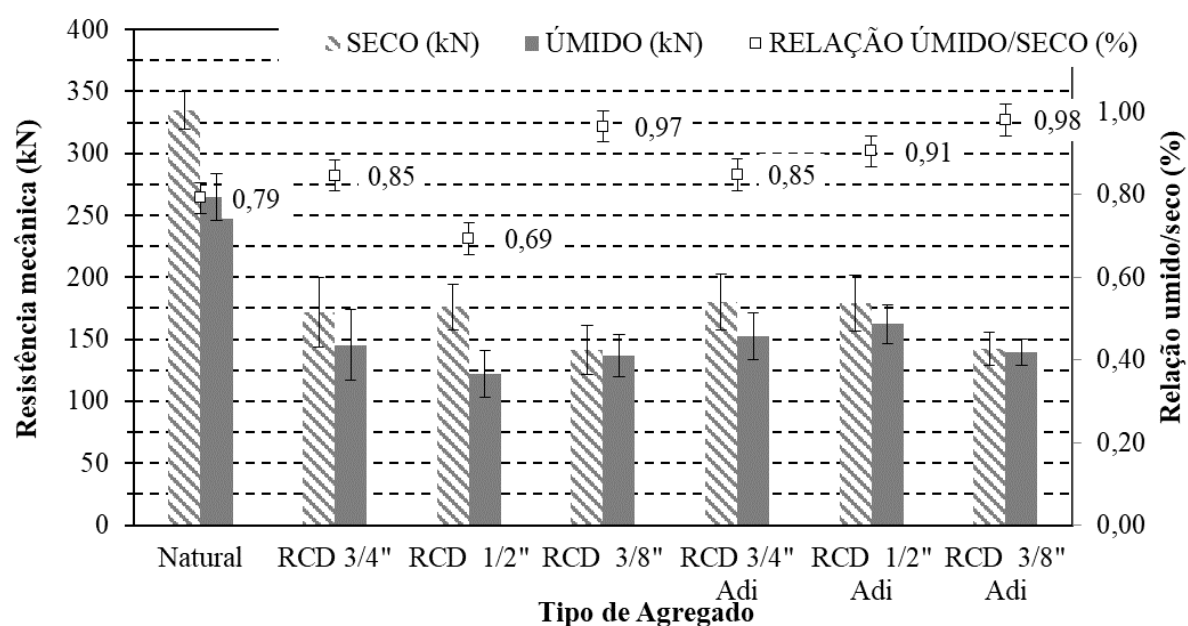


Figura 4-14 Resistência mecânica 10% finos

A análise da Figura 4-14 e Tabela 4-15 sugere que o tratamento de agregados RCD com o aditivo polimérico pode ser uma estratégia eficaz para melhorar a resistência mecânica desses materiais, especialmente em condições úmidas (Kareem et al., 2018; Sanchez-cotte et al., 2020). Isso é fundamental para aplicações em misturas quentes na construção civil, onde a integridade estrutural e a resistência à água são essenciais. Portanto, a utilização de RCD com aditivo se apresenta como uma opção viável e promissora na reciclagem de materiais de construção e demolição, contribuindo tanto para a sustentabilidade ambiental quanto para a eficiência estrutural.

Tabela 4-15 Resistência mecânica 10% finos

Material	SECO (kN)	Desvio padrão	ÚMIDO (kN)	Desvio padrão	RELAÇÃO ÚMIDO/SECO (%)
Natural	334,45	15,33	264,80	19,09	0,79
RCD 3/4"	171,64	28,10	145,30	28,36	0,85
RCD 1/2"	176,02	18,54	122,00	19,17	0,69
RCD 3/8"	141,70	19,84	136,80	17,14	0,97
RCD 3/4" Adi	180,02	22,56	152,60	19,12	0,85

RCD 1/2" Adi	179,42	22,48	162,40	15,49	0,91
RCD 3/8" Adi	142,10	13,56	139,30	10,52	0,98

Interessantemente, a adição do aditivo polimérico aos agregados RCD parece influenciar positivamente a resistência mecânica, especialmente em condições úmidas, com as relações úmido/seco aumentando para 85% a 98%. Esse efeito é mais pronunciado no agregado RCD 3/8" adi (com aditivo polimérico), que mostra uma relação úmido/seco praticamente igual (98%), indicando uma resistência úmida muito próxima à resistência seca, um indicativo de excelente desempenho em condições de umidade.

A Tabela 4-16 de contrastes entre as resistências mecânicas indica se as diferenças são significativas. Com base no limite de significância de 33,1709 kN, destacamos que todas as diferenças entre o agregado natural seco e os agregados RCD (secos ou úmidos, com ou sem aditivo) são significativas. Por exemplo, a diferença entre o SECO Natural e o SECO RCD 3/4" é de 162,813 kN, que é significativa. Similarmente, a diferença entre o ÚMIDO Natural e o ÚMIDO RCD 3/4" é de 119,503 kN, também significativa.

Além disso, dentro dos materiais RCD, algumas diferenças são significativas, como entre o SECO RCD 1/2" e o SECO RCD 3/8" (34,3167 kN). Para os materiais úmidos, a diferença entre o ÚMIDO RCD 1/2" e o ÚMIDO RCD 1/2" adi é significativa (40,4 kN). Essas diferenças reforçam a importância da granulometria e da presença de aditivo na resistência mecânica dos materiais RCD.

Tabela 4-16 Diferencias estatisticamente significativas do RCD 10% finos

Contraste	Seg.	Diferença +/-	Limites
SECO Natural - SECO RCD 3/4"	*	162,813	33,1709
SECO Natural - SECO RCD 1/2"	*	158,433	33,1709
SECO Natural - SECO RCD 3/8"	*	192,75	33,1709
SECO Natural - SECO RCD 3/4" Adi	*	154,433	33,1709
SECO Natural - SECO RCD 1/2" Adi	*	155,03	33,1709
SECO Natural - SECO RCD 3/8" Adi	*	192,35	33,1709
SECO Natural – ÚMIDO Natural	*	69,6467	33,1709
SECO RCD 3/4" - SECO RCD 1/2"		-4,38	33,1709

SECO RCD 3/4" - SECO RCD 3/8"	29,9367	33,1709
SECO RCD 3/4" - SECO RCD 3/4" Adi	-8,38	33,1709
SECO RCD 3/4" - SECO RCD 1/2" Adi	-7,78333	33,1709
SECO RCD 3/4" - SECO RCD 3/8" Adi	29,5367	33,1709
SECO RCD 1/2" - SECO RCD 3/8"	* 34,3167	33,1709
SECO RCD 1/2" - SECO RCD 3/4" Adi	-4,0	33,1709
SECO RCD 1/2" - SECO RCD 1/2" Adi	-3,40333	33,1709
SECO RCD 1/2" - SECO RCD 3/8" Adi	* 33,9167	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 3/4"	* 119,503	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 1/2"	* 142,803	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 3/8"	* 128,0	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 3/4" Adi	* 112,203	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 1/2" Adi	* 102,403	33,1709
ÚMIDO Natural - ÚMIDO RCD 3/8" Adi	* 125,503	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" - ÚMIDO RCD 1/2"	23,3	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" - ÚMIDO RCD 3/8"	8,49667	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" - ÚMIDO RCD 3/4" Adi	-7,3	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" - ÚMIDO RCD 1"2" Adi	-17,1	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" - ÚMIDO RCD 3"8" Adi	6,0	33,1709
ÚMIDO RCD 1/2" - ÚMIDO RCD 3"8"	-14,8033	33,1709
ÚMIDO RCD 1/2" - ÚMIDO RCD 3"4" Adi	-30,6	33,1709
ÚMIDO RCD 1/2" - ÚMIDO RCD 1"2" Adi	* -40,4	33,1709
ÚMIDO RCD 1/2" - ÚMIDO RCD 3"8" Adi	-17,3	33,1709
ÚMIDO RCD 3/8" - ÚMIDO RCD 3/4" Adi	-15,7967	33,1709
ÚMIDO RCD 3/8" - ÚMIDO RCD 1/2" Adi	-25,5967	33,1709
ÚMIDO RCD 3/8" - ÚMIDO RCD 3/8" Adi	-2,49667	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" Adi - ÚMIDO RCD 1/2" Adi	-9,8	33,1709
ÚMIDO RCD 3/4" Adi - ÚMIDO RCD 3/8" Adi	13,3	33,1709
ÚMIDO RCD 1/2" Adi - ÚMIDO RCD 3/8" Adi	23,1	33,1709

* mostra uma diferença significativa.

A diferença significativa entre o material natural seco e úmido (69,6467 kN) pode ser atribuída à diminuição da fricção devido à presença de água. Em resumo, a alta porosidade e absorção

dos agregados RCD são fatores que contribuem para sua menor resistência em comparação com o agregado natural. A incorporação do aditivo polimérico em agregados RCD é uma estratégia promissora para melhorar a resistência mecânica desses materiais, especialmente em ambientes úmidos, reforçando seu potencial para uso em aplicações estruturais na construção civil.

O objetivo principal do ensaio de aderência realizado nesta pesquisa foi avaliar a eficácia da aderência do ligante asfáltico ao agregado graúdo, seguindo a Norma ME 078 (DNER, 1994). Este método envolve determinar a existência ou não de deslocamento do filme de ligante após a amostra ser mantida por 72 horas imersa em água a 40°C. Para este ensaio, utilizou-se aproximadamente 500 g de material retido nas peneiras de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm. O material foi inicialmente imerso em água destilada por um minuto, seguido de secagem em estufa a 120°C por duas horas. Posteriormente, o material foi misturado com cerca de 18 g de ligante asfáltico aquecido a 120°C. Após o resfriamento da mistura asfáltica, a amostra foi coberta com água destilada e mantida em estufa a 40°C por 72 horas.

Durante o ensaio, constatou-se que os RCD sem aditivo não foram satisfatórios na prova de aderência, apresentando significativos deslocamentos da película de CAP em todas as partículas Figura 4-15. Isso pode ser atribuído à quantidade insuficiente de ligante utilizado e à presença de partículas de argamassa, argila e material pulverulento. Como a adesão do filme asfáltico se desenvolve na superfície do agregado, é essencial haver uma boa compatibilidade química entre o ligante e o agregado. O RCD tratado com o aditivo polimérico manteve o recobrimento quase total das partículas ao final do ensaio, demonstrando a eficácia do aditivo em melhorar a aderência do ligante às partículas do agregado reciclado. O aditivo polimérico, sendo um produto alcalino, melhora significativamente a aderência do asfalto (Xu et al., 2017).

Adicionalmente, foi realizado o ensaio de DUI para compreender melhor o efeito da umidade nas misturas asfálticas. O descolamento do filme asfáltico, promovido pela ação da água, está associado a fatores como materiais, clima, tráfego e construção da via, podendo levar ao comprometimento do pavimento em curto tempo se houver má compatibilidade entre os componentes (Quiñones, 2016).

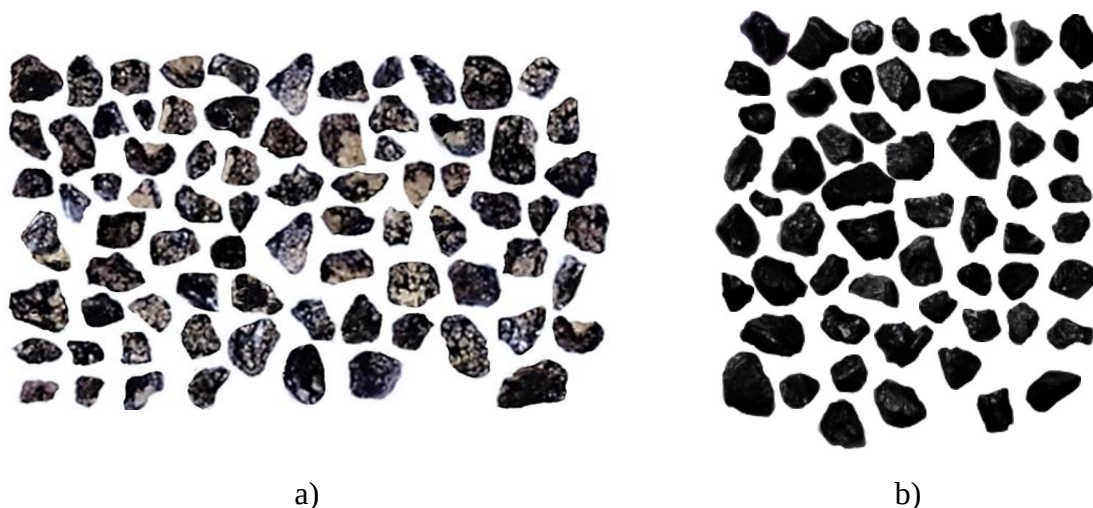


Figura 4-15 Ensaio de aderência. a) RCD; b) RCD com aditivo polimérico

Em suma, o uso do aditivo polimérico melhora significativamente a aderência do ligante asfáltico aos RCD, comparado aos RCD sem aditivo, que apresentaram maiores deslocamentos da película de asfalto e falta de aderência devido à insuficiência de ligante. Resultados similares foram observados em outros estudos com diferentes tipos de aditivos (Velasquez et al., 2012; Liberatori & Constantino, 2006), confirmando a eficácia dos aditivos na melhoria da aderência e durabilidade dos agregados.

4.2.5. ANÁLISE QUÍMICA

A análise de EDS, conforme ilustrado na Figura 4-16, revela a composição química predominante do material RCD. A maior parte da composição é constituída por oxigênio, que representa 65,27% do total, conforme análises que levam em conta as informações obtidas do DRX. Este alto teor de oxigênio é esperado, considerando a natureza dos materiais de construção. O silício e o cálcio, cada um contribuindo com 13,87 e 10,41% respectivamente, são os próximos elementos mais abundantes. Essa presença significativa de cálcio pode ser atribuída ao calcário utilizado na fabricação do cimento, assim como à cal hidratada empregada na elaboração de concreto e argamassa. Enquanto o cálcio melhora a aderência dos agregados com o asfalto, o silício diminui essa propriedade. É importante mencionar que nas análises de EDS se observam concentrações desses elementos, o que pode causar a perda do ligante no ensaio de aderência (Hesami et al., 2013; Xu et al., 2017). Outro aspecto relevante é a influência desses componentes na durabilidade das misturas asfálticas.

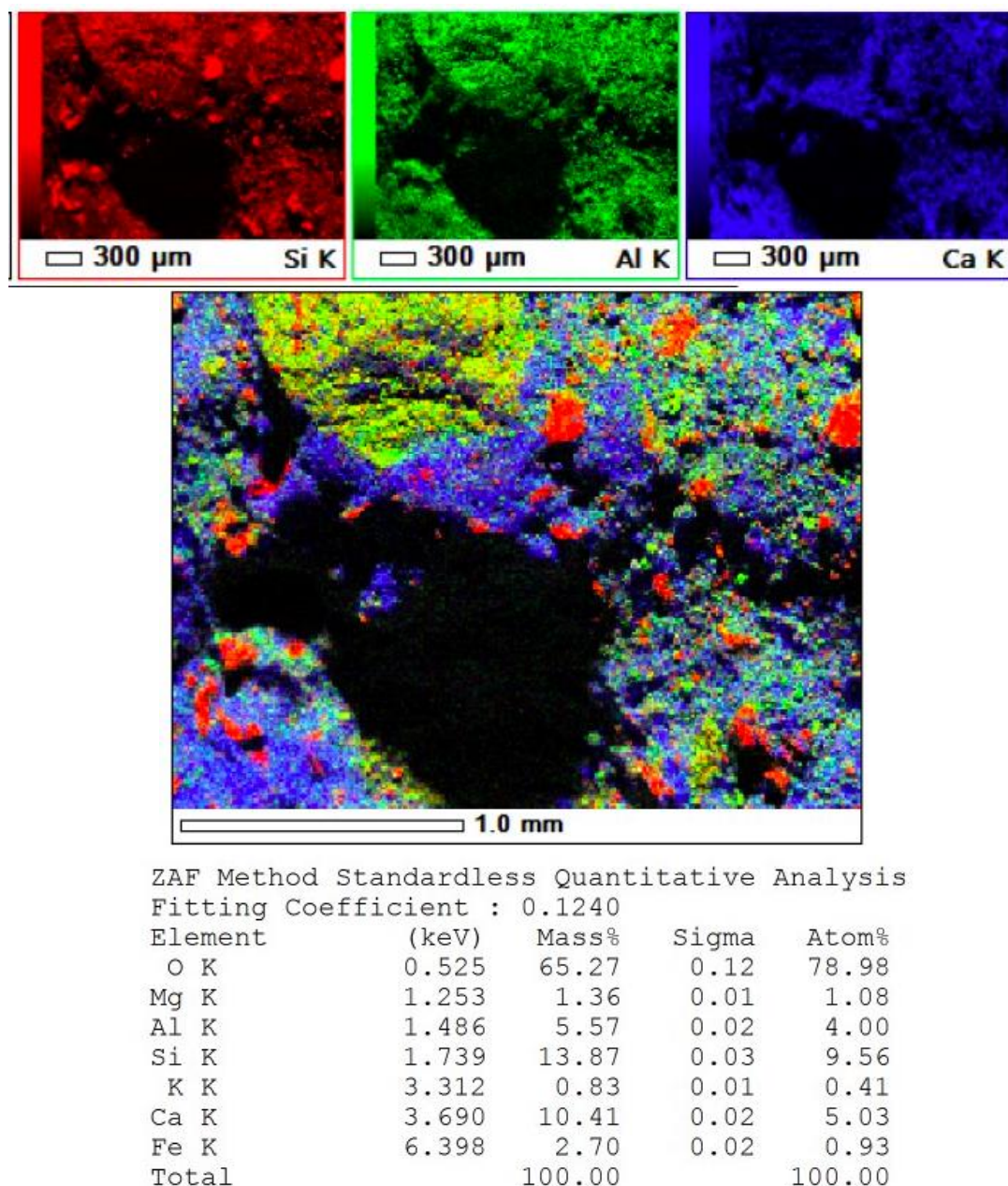


Figura 4-16 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS)

Além desses componentes principais, a análise EDS identificou concentrações menores de alumínio (5%), magnésio (2%) e ferro (1%). A presença de magnésio provavelmente deriva do carbonato de magnésio (MgCO_3) encontrado no cimento Portland. O alumínio e o ferro, embora em menores quantidades, são elementos importantes na composição do material e podem ter sua origem nas argilas utilizadas na fabricação de tijolos, no próprio cimento Portland, em aditivos específicos e em produtos de cerâmica. A presença desses elementos (Al, Mg e Fe) pode acelerar o envelhecimento nas misturas asfálticas devido à oxidação do cimento asfáltico. Adicionalmente, na presença de água, o magnésio pode se expandir, gerando tensões

na estrutura, assim como o dióxido de carbono, que pode ocasionar fissuras observáveis nas figuras do MEV (Moschopedis & Speight, 1978; Ebberts, 1942; Herold et al., 2008; Ye et al., 2015; He et al., 2016).

Outros elementos identificados na análise compõem menos de 1% da composição total do RCD, indicando que sua contribuição para as propriedades gerais do material é relativamente menor. Essa composição diversificada reflete a complexidade e a variedade dos materiais presentes nos RCD, o que destaca a importância de considerar a heterogeneidade desses materiais em qualquer aplicação ou processo de reciclagem.

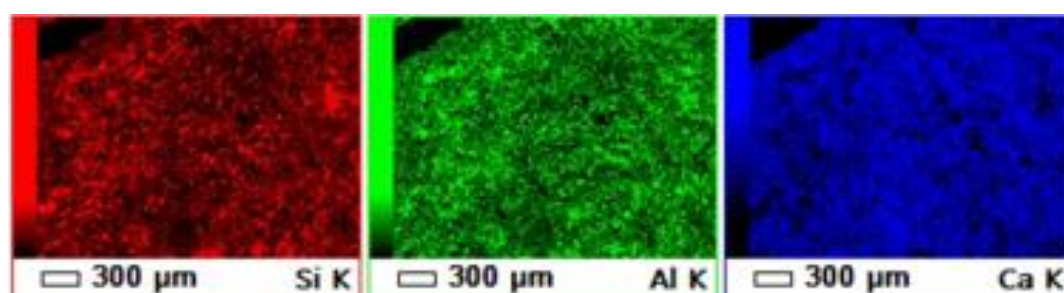
A análise realizada por DRX, conforme apresentada na Figura 4-16, Figura 4-17 e Tabela 4-17, revelou aspectos importantes sobre a composição mineralógica do RCD, corroborando resultados similares obtidos nas análises desenvolvidas por Cantero et al. (2020), Santos & Tubino (2021), Junkes et al. (2023) e Agarwal et al. (2023) em RCD usinados no Brasil. Os resultados destacaram a presença predominante de fases cristalinas, com quartzo (SiO_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3) sendo os componentes mais significativos. Estes minerais são comumente encontrados em materiais de construção e refletem a natureza típica dos resíduos gerados no setor (Sánchez de Guzman, 2001; Neville A. M. & Brooks J. J., 1998; Lagares, 2017).

Além disso, a análise preliminar do DRX identificou a presença de hematita, caulinita, albita e ilita. Estes minerais secundários são frequentemente encontrados como produtos residuais das argilas empregadas na fabricação de cimento Portland e cerâmicas. A presença de ferro (Fe) e magnésio (Mg) em forma elementar também foi observada, o que corrobora a composição das matérias-primas utilizadas.

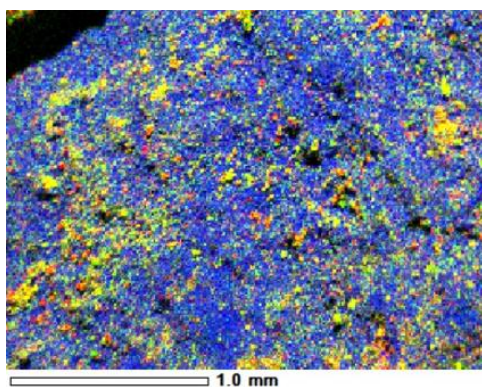
Tabela 4-17- Composição Química dos Agregados

Elemento químico	Fórmula	Natural (%)	RCD (%)
Oxigênio	O	0,8	65,27
Silício	Si	21,35	13,87
Alumínio	Al	8,29	5,57
Cálcio	Ca	48,63	10,41
Ferro	Fe	6,58	2,7

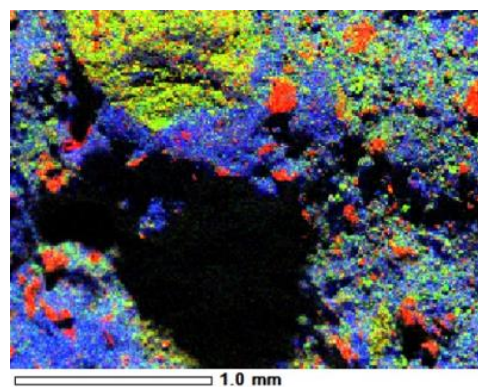
Elemento químico	Fórmula	Natural (%)	RCD (%)
Potássio	K	3,45	0,83
Magnésio	Mg	5,15	1,36
Sódio	Na	0,4	



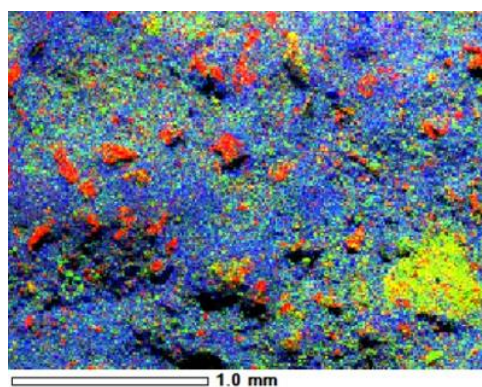
a)



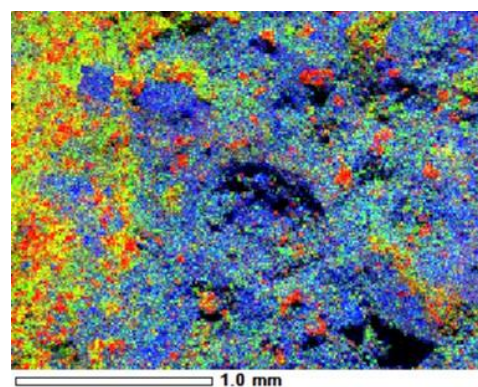
b)



c)



d)



e)

Figura 4-17 Espectroscopia por dispersão de energia (EDS), a) cores de acordo ao elemento, b) ponto 1 de RCD, c) ponto 2 de RCD, d) ponto 3 de RCD e e) ponto 4 de RCD

As imagens de EDS mostram diferentes pontos de uma mesma partícula, conforme ilustrado nas Figura 4-17 b), c), d) e e), correspondentes aos pontos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, da

amostragem química realizada em uma única partícula. Esse enfoque permite analisar a composição química de diferentes regiões da mesma partícula, revelando sua heterogeneidade em nível microscópico.

Além disso, ao observar diferentes partículas, foi notada uma base mais heterogênea na amostra. Algumas partículas são constituídas inteiramente por sílica, enquanto outras são formadas por carbonato de cálcio. Dentro de uma mesma partícula, é possível identificar setores com maior concentração de carbonato de cálcio e outros com maior conteúdo de silício e alumínio. Esse achado destaca a variabilidade na composição das partículas e a complexidade da amostra analisada.

Adicionalmente, na Tabela 4-18, são mostrados os diferentes tipos de elementos químicos detectados em cada um dos pontos analisados, fornecendo informações detalhadas sobre a composição elementar das diferentes regiões da partícula.

A variação dos elementos químicos dentro de uma mesma partícula foi observada no EDS e a informação foi corroborada na Tabela 4-18, que mostra as porcentagens em massa dos elementos químicos nos 4 pontos.

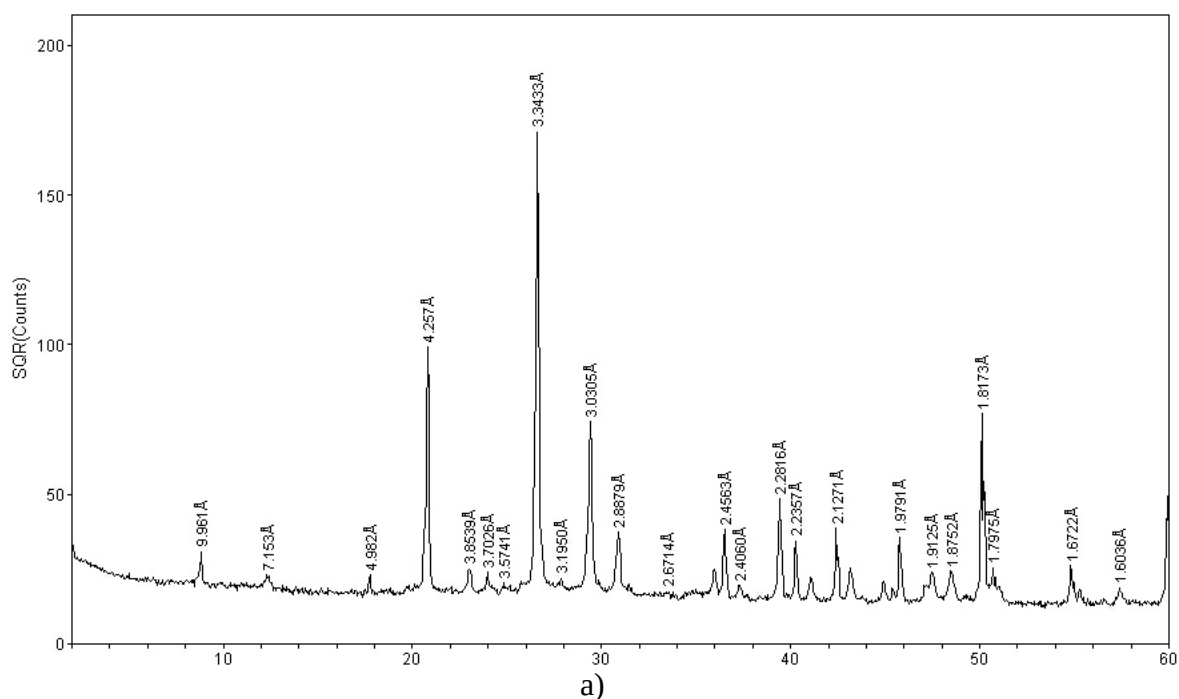
Observou-se que do ponto 1 ao ponto 2, por exemplo, há uma variação significativa na concentração de silício, passando de 4,57% para 13,87% em massa, enquanto a concentração de cálcio diminui de 20,79% para 10,41%, esta variação poderia acontecer quando o ponto está em argamassa, ou material gráudo natural, ou concreto. Essa tendência de variação também é observada no ponto 4, onde são identificados elementos químicos secundários, como titânio e sódio associados a algum tipo de argila, que não foram detectados nos outros pontos. Essa análise detalhada destaca a heterogeneidade química presente nas diferentes regiões da mesma partícula, reforçando a complexidade e a variabilidade da amostra de RCD analisada.

Tabela 4-18 Composição Química dos Agregados de acordo ao ponto do RCD

Elemento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %
O	70.39	65.27	67.20	66.43
Na	0.00	0.00	0.00	0.41

Elemento	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
	Massa %	Massa %	Massa %	Massa %
Mg	0.81	1.36	1.14	1.51
Al	2.65	5.57	4.78	5.25
Si	4.57	13.87	10.79	14.02
K	0.00	0.83	0.61	0.65
Ca	20.79	10.41	13.35	9.34
Ti	0.00		0.00	0.27
Fe	0.78	2.70	2.14	2.12
Total	100.00	100.00	100.00	100.00

É importante ressaltar que os resultados obtidos na análise DRX (Figura 4-18), estão em consonância com os achados da EDS e alinham-se bem com os valores e observações reportados na literatura técnica sobre RCD. Especificamente, os resíduos provenientes de áreas ricas em rochas siliciosas apresentam padrões similares, reforçando a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Essa correlação entre os resultados DRX e EDS, juntamente com a concordância com a literatura, fornece uma compreensão robusta e detalhada da composição mineralógica dos RCD, enfatizando a complexidade e a diversidade desses materiais.



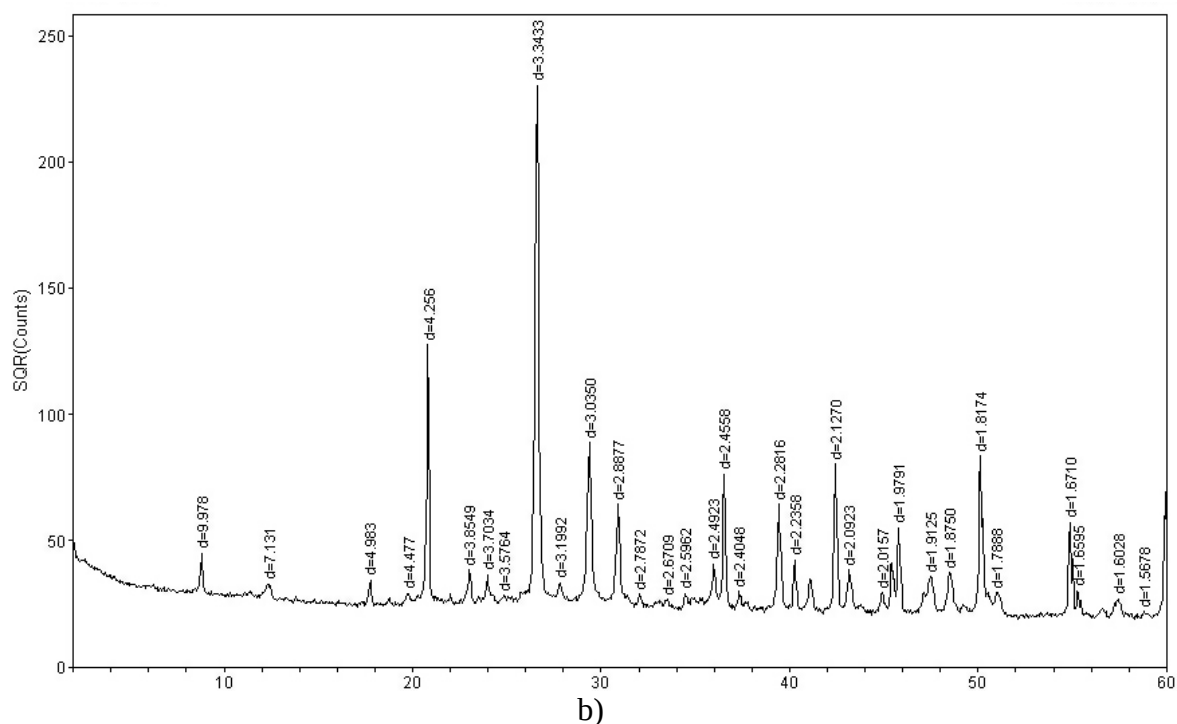


Figura 4-18 Difratometria de Raios-X a) partícula 3/4” e b) partícula 1/2”

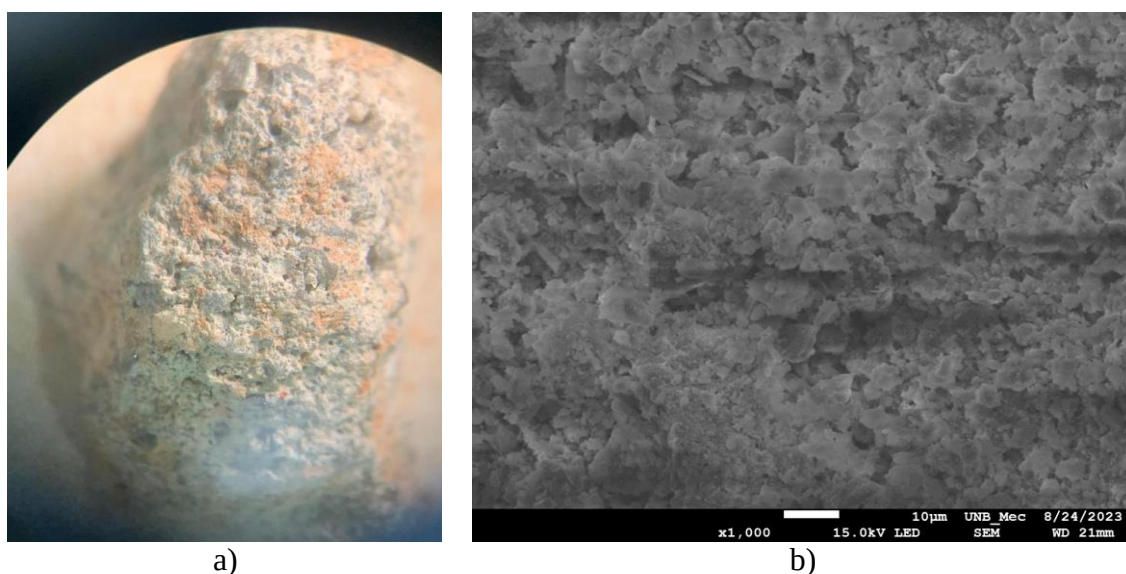


Figura 4-19 Partícula de RCD sem lavagem; a) microscópio ótico e b) microscópio eletrônico de varredura

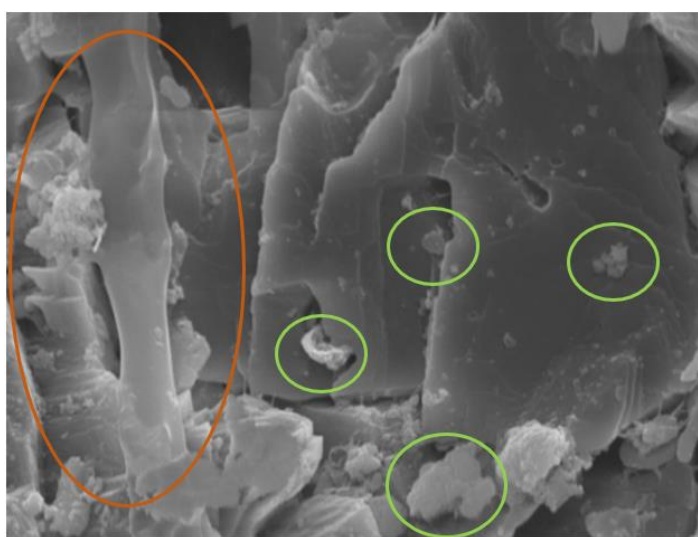
A análise detalhada realizada por meio da MEV proporcionou imagens de alta resolução dos RCD, trazendo informações valiosas sobre a morfologia das partículas. Como é evidenciado na Figura 4-19, as partículas dos RCD exibem um grau de esfericidade que varia entre médio e baixo, caracterizando-se por terem arestas que vão de angulares a muito angulares, além de superfícies que oscilam entre rugosas e muito rugosas. Essas características morfológicas são

indicativas da natureza dos processos pelos quais esses materiais passaram, como britagem e fragmentação.

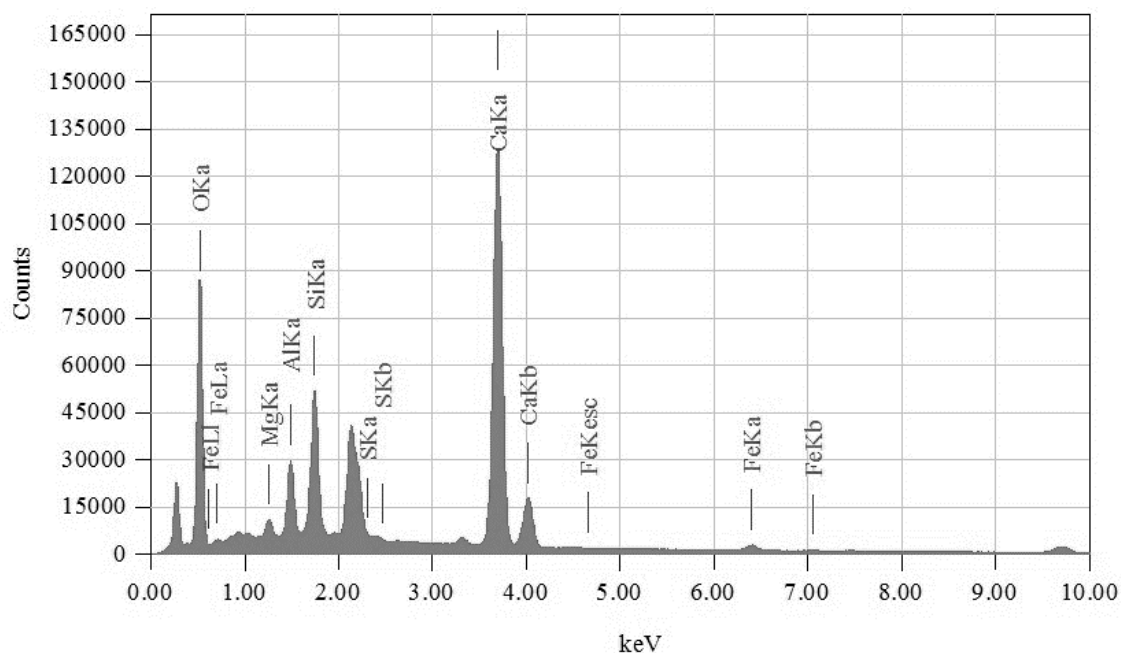
Adicionalmente, a análise MEV revelou a presença de partículas aderidas ao material, como argila, conforme mostrado na Figura 4-20. Esta observação é particularmente importante, pois sugere a aderência de materiais finos às partículas maiores, um fenômeno comum em RCD.

Adicionalmente, a análise MEV revelou a presença de partículas aderidas ao material, como argila nos círculos verdes, e em uma análise gravimétrica preliminar, algumas impurezas que poderiam ser madeira, plástico ou metal, mas esse percentual é baixo, sendo pelo menos inferior a 5%, conforme mostrado na Figura 4-20 a) círculos laranja. Esta observação é particularmente importante, pois sugere a aderência de materiais finos às partículas maiores, um fenômeno comum em RCD.

Na Figura 4-20 b), no mesmo ponto, observa-se que o elemento mais comum é o cálcio. Isso ocorre devido a um fragmento de concreto rico em cálcio ou de um fragmento de argamassa.



a)



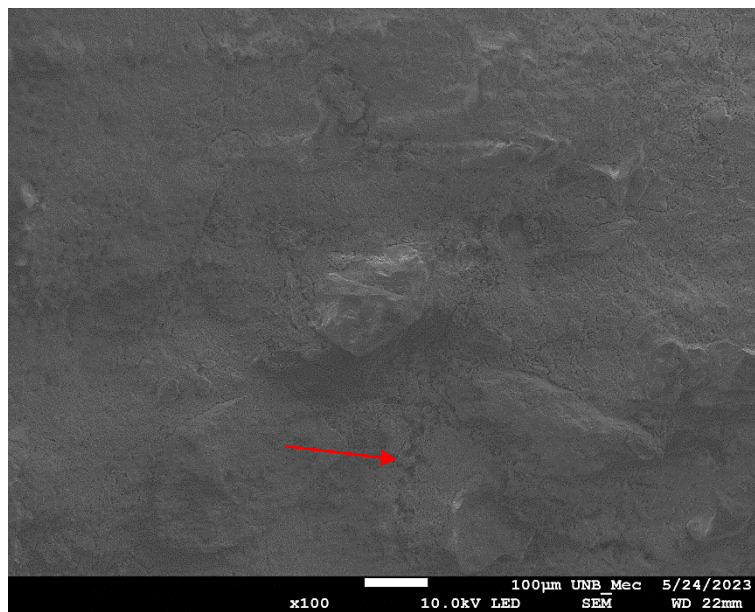
b)

Figura 4-20- Partículas de argila aderidas nas superfícies dos RCD a) e EDS b) Espectros de raio X

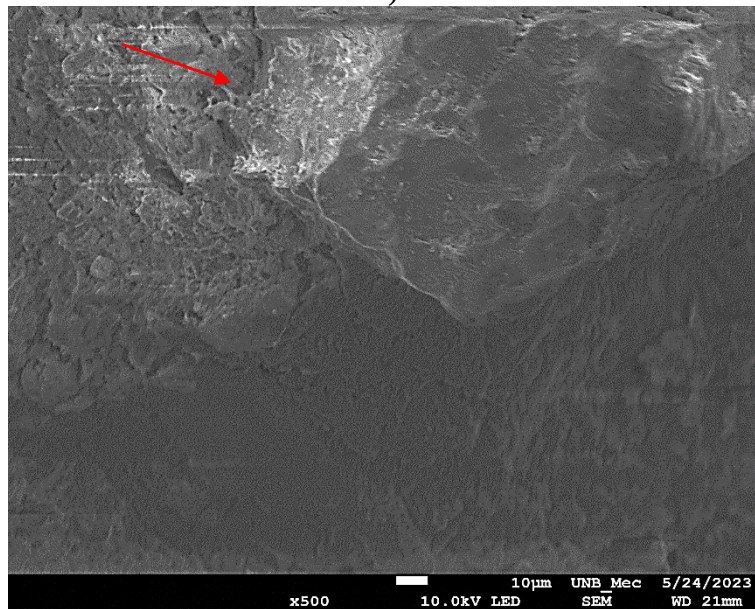
Nas partículas lavadas, algumas diferenças podem ser observadas nas imagens de MEV. As microfissuras no material são mais evidentes e não são observadas partículas de impurezas (Figura 4-21). Essas microfissuras são geralmente causadas pela presença de argamassa aderida, que é frágil e quebradiça. Além disso, podem ser atribuídas principalmente à natureza não uniforme do concreto, do qual a maioria dos RCD se origina. A presença de microfissuras pode afetar tanto a resistência mecânica das partículas quanto sua resistência à abrasão, especialmente em áreas onde há contato direto entre os agregados e o concreto.

Por outro lado, a rugosidade da superfície das partículas também pode desempenhar um papel importante, especialmente no que diz respeito à aderência do aditivo. A rugosidade e a porosidade superficial das partículas podem influenciar sua resistência à tração, o que, por sua vez, pode afetar a resistência geral do material RCD.

Em termos de composição, a presença ou ausência de partículas aderidas pode indicar diferenças significativas. Por exemplo, a presença de partículas de argila na superfície pode ter implicações na resistência e em outras propriedades do material. É crucial considerar esses aspectos ao analisar a estrutura e as características do RCD.



a)



b)

Figura 4-21 Partículas de RCD 3/4”, lavada com trincas a) x100 b) x500

Além disso, as imagens também destacaram a presença de trincas, microfissuras, microfissuras e cavidades, como ilustrado na Figura 4-22. Estas características são provavelmente resultantes dos processos de trituração e britagem aos quais o material foi submetido. A identificação dessas imperfeições é crucial, pois elas podem influenciar as propriedades mecânicas do RCD, como a resistência e a durabilidade, quando utilizado em novas aplicações de construção ou em processos de reciclagem.

Portanto, a análise MEV dos RCD fornece uma compreensão profunda da textura superficial, forma e integridade estrutural das partículas, oferecendo informações valiosas para a avaliação da qualidade desses materiais e para o planejamento de sua reutilização ou reciclagem.

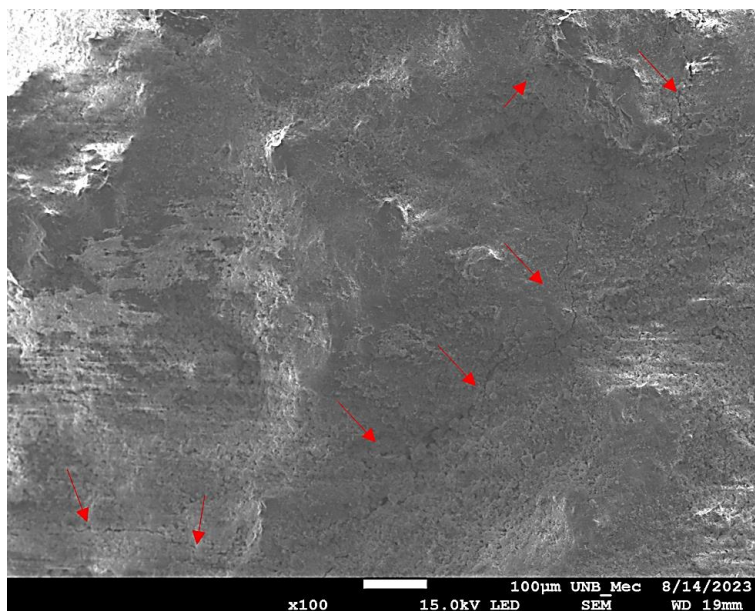


Figura 4-22 Partículas de RCD de 3/8'' com trinca transversal

Uma análise minuciosa revela o impacto significativo do aditivo na impermeabilização de superfícies e trincas de partículas em materiais de construção (Figura 4-23). É notável observar como o aditivo cria uma barreira eficaz contra a penetração de água, atuando nas superfícies das partículas e nas trincas abertas. Este efeito impermeabilizante é um detalhe crucial, pois poderia aumentar a durabilidade do material ao protegê-lo contra a infiltração de umidade, um fator comum de deterioração em materiais de construção.

Além disso, a presença do aditivo parece influenciar a textura das partículas. Observa-se que o aditivo contribui para a redução da rugosidade tanto das faces quanto das arestas das partículas. Esta alteração na textura superficial pode ter implicações importantes nas propriedades de aderência e na interação das partículas com outros componentes em misturas de construção. A suavização das superfícies e arestas pode facilitar uma melhor distribuição e aderência do aditivo, otimizando ainda mais as propriedades impermeabilizantes e, consequentemente, melhorando a qualidade geral do material.

Portanto, o uso deste aditivo não apenas melhora a impermeabilidade das partículas de construção, mas também modifica sua textura superficial, oferecendo benefícios adicionais em termos de aderência e eficácia. Estas observações destacam a importância de considerar os efeitos multifacetados dos aditivos no desenvolvimento e na melhoria de materiais de construção.

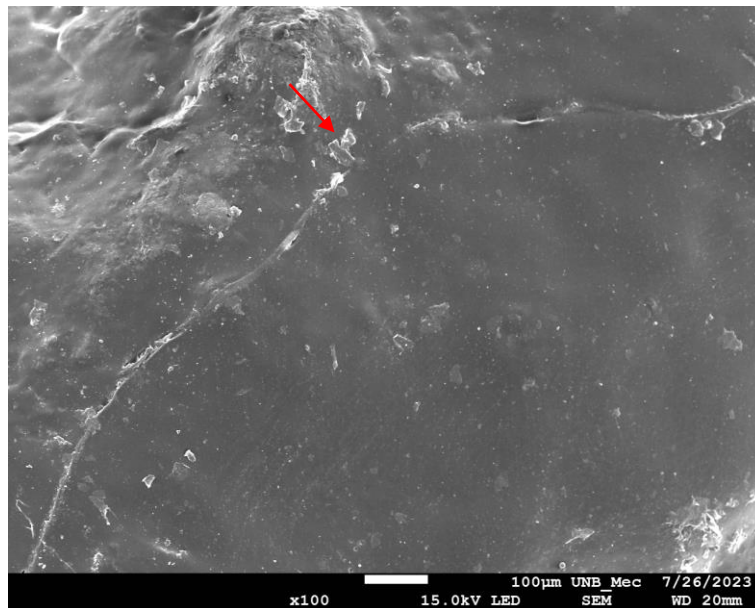


Figura 4-23 Partícula de RCD com aditivo

Observa-se que o aditivo não penetrou nas microfissuras presentes na superfície da partícula de RCD. Isso pode ocorrer quando as fissuras são muito estreitas ou estão muito próximas umas das outras, impedindo a entrada do aditivo polimérico. Em alguns casos, apenas moléculas menores, como as de água, poderiam penetrar nessas pequenas aberturas. A aglomeração de partículas pode ter criado barreiras físicas que impediram a penetração do aditivo nas áreas entre elas. A proximidade e o possível contato direto entre as partículas pode ser suficiente para impedir a infiltração do aditivo.

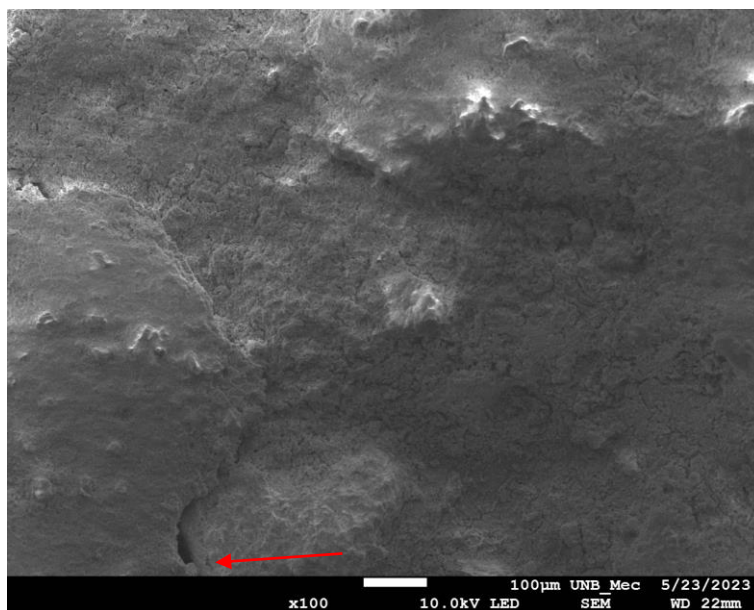


Figura 4-24 Partícula de RCD com aditivo com trinca sem aditivo

Na Figura 4-23 e Figura 4-25 se observa que o aditivo polimérico forma uma camada sobre as partículas, conferindo-lhes uma superfície notavelmente mais lisa em comparação com a textura rugosa típica da argamassa não tratada. Esta característica sugere que o aditivo está atuando eficientemente para criar uma barreira protetora sobre as partículas. A ausência de rugosidade na superfície das partículas indica que o aditivo polimérico pode estar preenchendo as microporosidades e fissuras da argamassa, o que poderia ajudar a estabilizar as partículas e reduzir a sua capacidade de absorção de água, contribuindo assim para a impermeabilização do material. A distribuição do polímero sobre as partículas e a aparente adesão uniforme sugerem que o processo de aplicação foi realizado de maneira eficaz.

No entanto, a mobilidade das partículas e a capacidade do aditivo de penetrar completamente em todas as regiões da partícula ainda são incertas. A presença do aditivo polimérico na superfície pode diminuir a degradação do material, mas não a impede completamente. Na Figura 4-25, observam-se partículas e argamassa aderidas, o que pode ser causado pela contínua movimentação das partículas durante todo o processo. Dependendo de como o polímero interage com a matéria-partícula e a matriz de RCD como um todo, o aditivo polimérico pode tanto evitar a separação, reforçando a união entre elas.

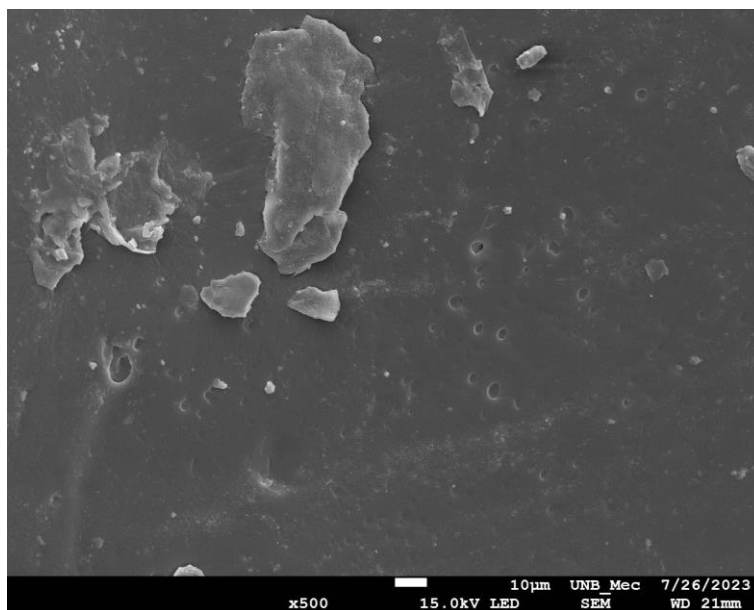


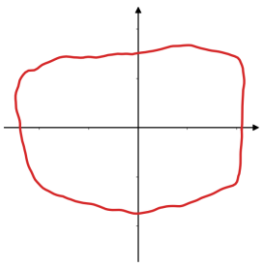
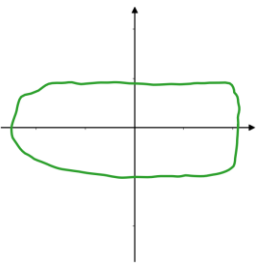
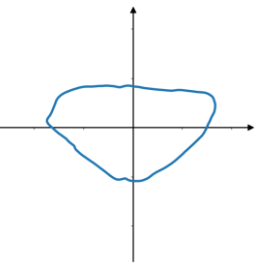
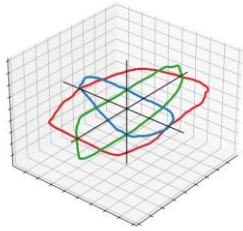
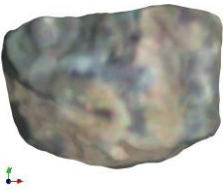
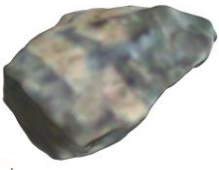
Figura 4-25 Partícula de RCD com aditivo e partícula ligada de argamassa pelo aditivo

4.2.6. MORFOLOGIA DAS PARTÍCULAS

Como resultado desta análise, obteve-se um catálogo (ver Tabela 4-19) com informações sobre a morfologia das partículas da amostra em cada etapa do seu processamento. Essas informações permitem avaliar a variação de alguns parâmetros da partícula, tais como volume ou área de superfície, como resultado de cada processo. Além disso, as informações sobre as características geométricas podem ser utilizadas para a geração de partículas virtuais 3D com características semelhantes às da amostra real, por meio de algoritmos de reconstrução de partículas. Isso possibilita a construção de amostras virtuais de materiais para realizar simulações ou ensaios utilizando o Método de Elementos Discretos (DEM).

Tabela 4-19 formato de catálogo de partículas

Material: Partículas RCD - Peneirada - Amostra 1	
Descrição:	
Equipamento experimental: EinScan Pro HD	
	Descrição:
	Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui

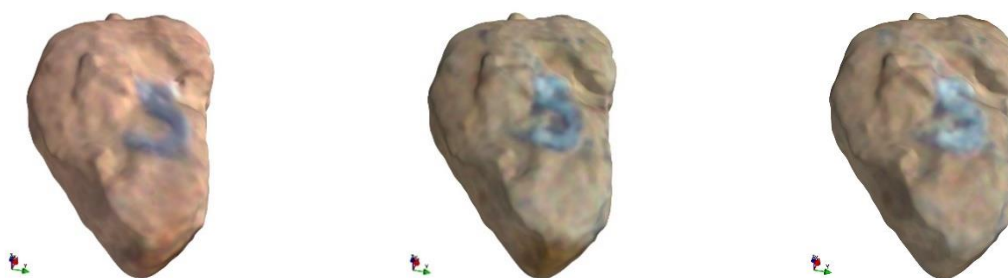
		software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 1	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 941.8346		Volume: 1868.6994	
Dimensão maior (dl): 23.21 mm	Dimensão Intermediária (di): 17.09 mm	Dimensão Menor (ds): 9.69 mm	
Achatamento (F): 0.567	Alongamento (E): 0.736	Relação F&E: 2.396	Esfericidade: 0.675
Diâmetro equivalente (dv): 15.282 mm	Diâmetro equivalente (ds): 42.412 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 11.905 mm	
Centro de massa: -3.967 8.569 490.372	Principais eixos: 74063.6 -2149.1 1463.5 -2149.1 53208.1 27549.2 1463.5 27549.2 67799.8	Momentos de inércia: 31845.4 74221.7 89004.4	Vetores de inércia: 0.061 0.791 -0.609 0.998 -0.042 0.045 -0.010 0.610 0.792

Para avaliar como as mudanças nos valores de volume e área de superfície das partículas na malha de triângulos obtida do escaneamento se expressam, podem-se calcular mapas de distância entre as malhas em diferentes processos. Para isso, inicialmente, é necessário um esquema de alinhamento dessas malhas no espaço. Com este objetivo, pode-se utilizar o algoritmo de ponto mais próximo iterativo (Iterative Closest Point - ICP), que é um algoritmo empregado para minimizar a diferença entre duas nuvens de pontos.

Este algoritmo está disponível na biblioteca para Python de trabalho com malhas de triângulos, Trimesh. Utilizando o Trimesh, podem-se alinhar duas malhas no espaço utilizando seu centro de massa e seus vetores principais de inércia como ponto de partida para o alinhamento inicial. Uma vez alinhadas as malhas resultantes do escaneamento de uma partícula em cada momento do seu processamento, calcula-se as distâncias entre todos os pontos de uma das malhas até a superfície da outra. Desta forma é possível avaliar como o impacto dos diferentes processos se expressa na superfície da malha que representa a partícula real.

Para calcular o mapa de distâncias entre as malhas de dois processos a fim de avaliar o impacto sobre as características da superfície da partícula, toma-se como referência a malha do segundo processo e calculam-se as distâncias entre todos os pontos da malha do processo anterior. No caso dos resultados obtidos pelo uso do algoritmo ICP na biblioteca Trimesh, valores negativos indicam que os pontos estão fora da malha de referência, e valores positivos indicam que os pontos estão dentro da malha de referência ou dentro da margem de tolerância de erro.

Na Figura 4-26 mostram-se as malhas de uma partícula do grupo 1, que não recebe aditivo, em cada um dos seus 3 processos: Sem Lavagem, Lavada e Peneirada. Espera-se que no processo de lavagem haja a perda de material aderido à superfície da partícula, o que resultaria numa perda de volume muito pequena, expressa pela presença de pequenos valores negativos na maior parte da superfície do mapa de distância (Figura 4-27 a). Da mesma forma, o processo de peneiração leva a uma pequena perda de volume devido a desprendimentos na superfície, o que se reflete nos valores negativos presentes na maior parte da superfície do mapa de distância na (Figura 4-27b).

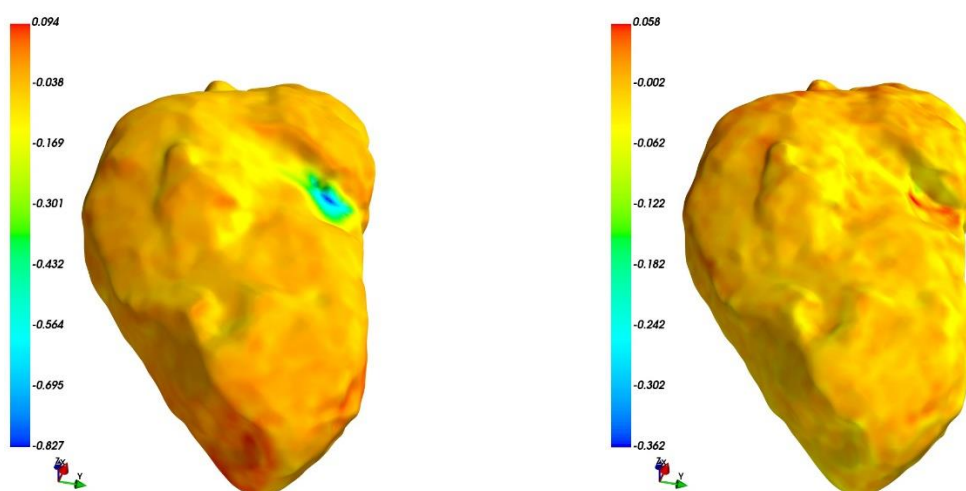


a) Sem lavar

b) Lavada

c) Peneirada

Figura 4-26 Partícula escaneada em cada momento do processamento, alinhada no espaço.



a) Variação de Sem Lavagem para Lavada

b) Variação de Lavada para Peneirada

Figura 4-27 Variações na superfície da partícula entre processos.

As malhas de uma partícula do grupo 2 que recebe aditivo como parte do seu processamento (sem lavar, lavada, com aditivo polimérico e peneirada) apresentaram o mesmo tipo de comportamento.

De maneira similar, a Figura 4-28 a,b,c,d, mostra as malhas de uma partícula do grupo 2 que recebe aditivo como parte do seu processamento: sem lavar, lavada, com aditivo polimérico e

peneirada. Assim como no caso anterior, espera-se que durante os processos de lavagem e peneiração haja perda de material da superfície. No entanto, ao realizar o processo de aplicação de aditivo, este deveria se manifestar com um leve aumento de volume Figura 4-29.

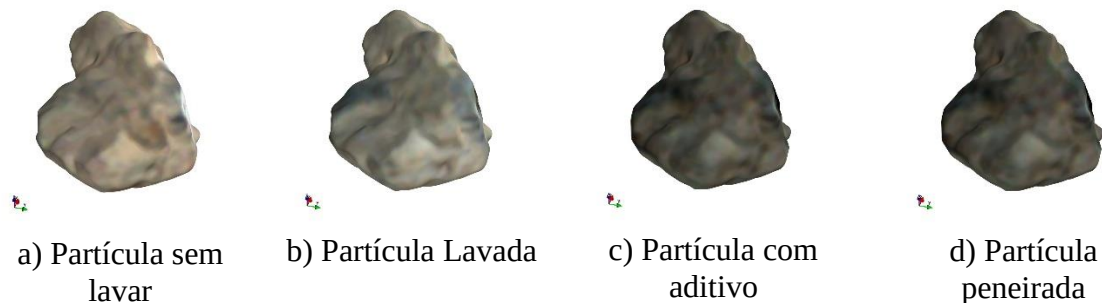


Figura 4-28 Partícula escaneada em cada momento do processamento, alinhada no espaço

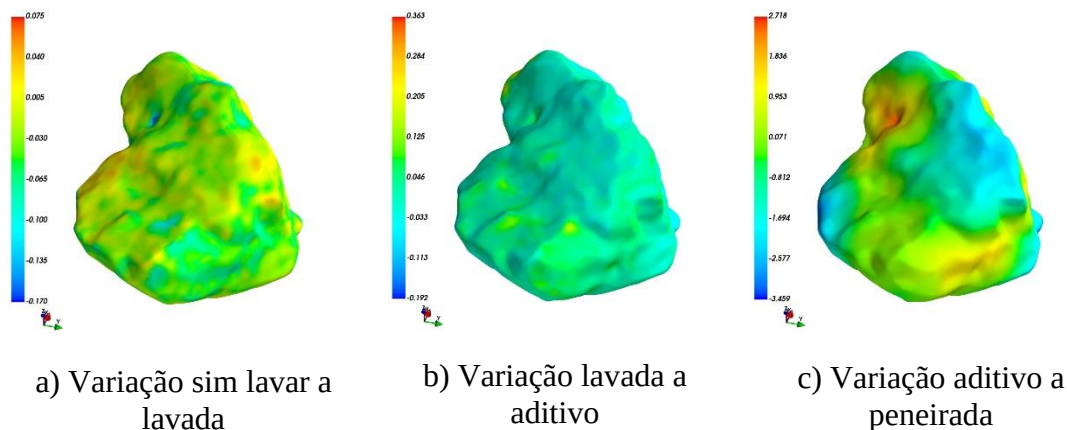


Figura 4-29 Variações na superfície da partícula entre processos

A Figura 4-29 mostra os mapas de distância ao longo dos processos desta partícula. Novamente, podem-se observar valores negativos na maior parte da superfície da partícula lavada. Por outro lado, podem-se observar valores positivos na superfície da partícula uma vez colocado o aditivo, indicando um leve aumento de volume.

A análise do Figura 4-30 revela que a perda de espessura aumenta de forma gradativa com o aumento do percentual de partículas. Isso sugere que, à medida que um maior número de partículas é submetido ao processo de lavagem, há uma perda incremental de espessura média. No início do processo, com até 20% das partículas lavadas, a perda de espessura é relativamente baixa, não ultrapassando 0,03 mm. Isso pode indicar que as partículas menores ou menos contaminadas perdem menos material durante a lavagem. A partir de aproximadamente 60%

das partículas lavadas, há um aumento mais acentuado na perda de espessura, chegando até 0,09 mm quando 100% das partículas são lavadas. Este comportamento pode estar associado ao fato de que as partículas maiores ou mais contaminadas requerem uma lavagem mais intensa, resultando em maior perda de material.

Este gráfico é crucial para entender a eficiência e o impacto do processo de lavagem em RCD, ajudando a determinar a viabilidade e os ajustes necessários para otimizar o processo de reciclagem, minimizando perdas materiais e maximizando a reutilização dos resíduos.

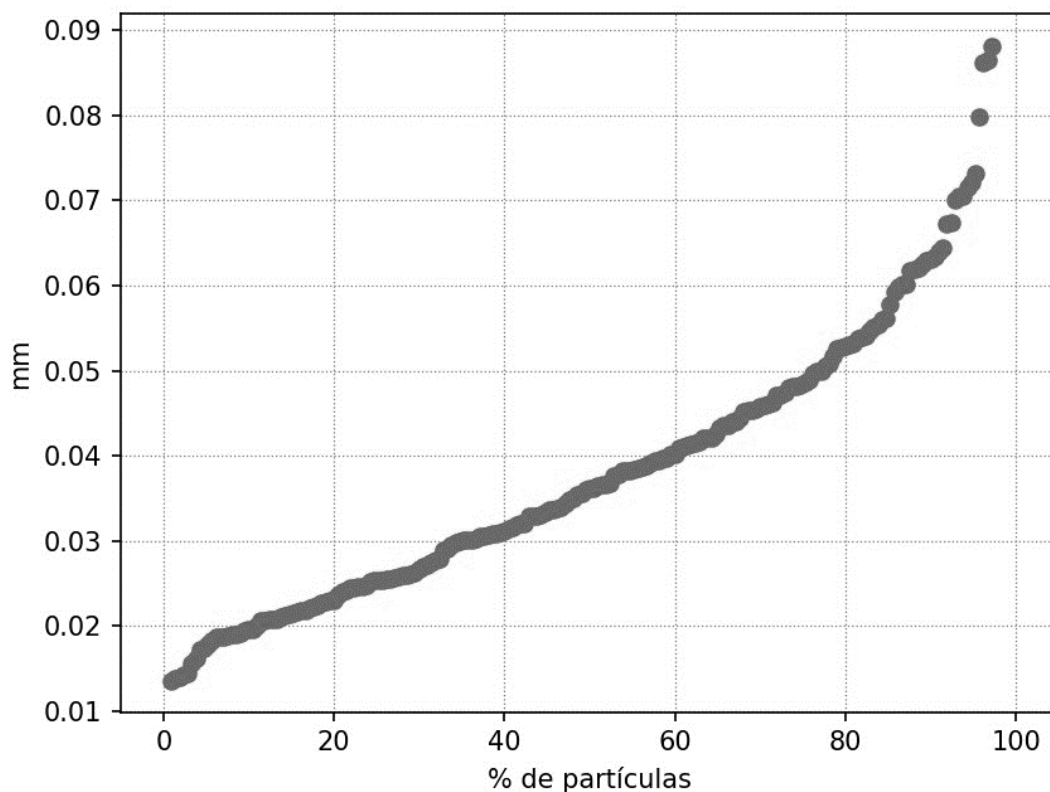


Figura 4-30 Perda média de espessura do processo de lavagem

A análise da Figura 4-31 revela que o ganho de espessura aumenta de forma gradativa com o aumento do percentual de partículas que receberam o aditivo. Inicialmente, até cerca de 20% das partículas, o ganho de espessura é relativamente baixo, variando entre 0,02 mm e 0,03 mm. Isso sugere que o aditivo começa a ter um efeito positivo nas partículas menores ou menos modificadas. À medida que a proporção de partículas tratadas aumenta para cerca de 60%, o ganho de espessura mostra um incremento mais notável, alcançando aproximadamente 0,05 mm.

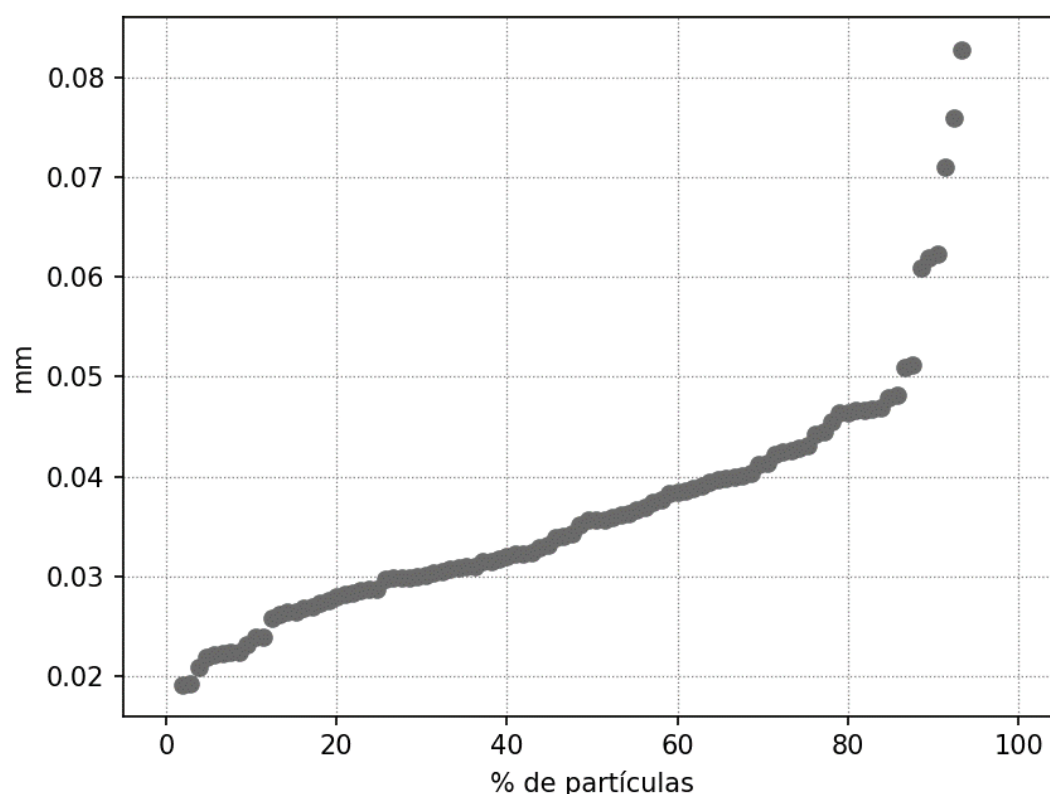


Figura 4-31 Ganho de espessura pelo aditivo

Quando 80% ou mais das partículas são tratadas com o aditivo, o ganho de espessura se torna ainda mais pronunciado, chegando a valores próximos de 0,08 mm. Este comportamento indica que o aditivo polimérico é eficaz em aumentar a espessura das partículas, possivelmente promovendo a agregação ou cobertura delas, o que pode melhorar suas propriedades para uso em misturas asfálticas.

Este gráfico é fundamental para avaliar a eficácia do aditivo polimérico em aumentar a espessura média das partículas de RCD, oferecendo insights valiosos para otimizar a aplicação deste aditivo no processo de reciclagem e reutilização dos resíduos na construção civil.

A análise da Figura 4-32 revela que a perda de espessura para a Amostra 1 (sem aditivo) aumenta de forma gradativa à medida que o percentual de partículas peneiradas aumenta. No início do processo, até cerca de 20% das partículas, a perda de espessura é baixa, variando entre 0,02 mm e 0,03 mm. Conforme o percentual de partículas peneiradas aumenta para cerca de 60%, a perda de espessura aumenta mais significativamente, alcançando aproximadamente

0,05 mm. Quando 80% ou mais das partículas são peneiradas, a perda de espessura se torna ainda mais pronunciada, chegando a valores próximos de 0,10 mm.

Por outro lado, a Amostra 2 (com aditivo) apresenta um comportamento diferente. No início do processo de peneiramento, a perda de espessura é semelhante à da Amostra 1, variando entre 0,02 mm e 0,03 mm até cerca de 20% das partículas peneiradas. No entanto, à medida que o percentual de partículas peneiradas aumenta, a perda de espessura da Amostra 2 cresce mais lentamente em comparação com a Amostra 1. Quando 80% ou mais das partículas são peneiradas, a perda de espessura na Amostra 2 é significativamente menor, alcançando valores próximos de 0,06 mm.

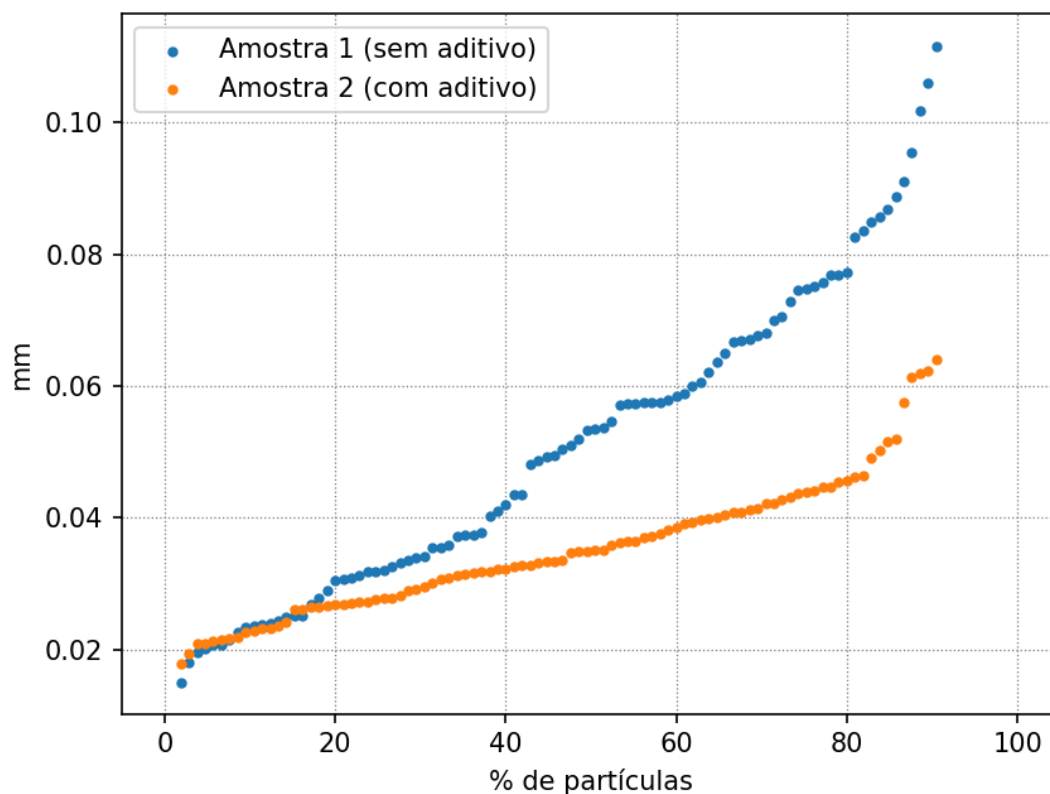


Figura 4-32 Perda média de espessura como resultado do peneiramento com e sem aditivo

Este comportamento indica que o aditivo polimérico é eficaz em reduzir a perda de espessura das partículas de RCD durante o processo de peneiramento. O uso do aditivo parece proteger melhor as partículas, resultando em menor desgaste e perda de material. Esta redução na perda de espessura é especialmente notável em etapas avançadas do peneiramento, onde as partículas são mais suscetíveis ao desgaste. Esses resultados estão em concordância com os ensaios de

degradação dos agregados, observados através do ensaio de 10% de finos por abrasão, que revelaram a formação de fissuras e perda de massa nas partículas. Em amostras sem o uso do aditivo, a abrasão resultou em uma significativa perda de massa e degradação das partículas, conforme observado na análise granulométrica pós-ensaio. Em contraste, as amostras tratadas com aditivo polimérico apresentaram uma resistência melhorada, com menores perdas de massa e menos fissuras, indicando uma maior integridade estrutural dos agregados tratados. Estes resultados sugerem que o aditivo polimérico é eficaz na redução da degradação dos agregados (Hesami et al., 2013; Cantero et al., 2020).

4.2.7. DOSAGEM

Na Tabela 4-20, diversas composições foram analisadas sob diferentes especificações e adições. Para as misturas elaboradas sob as normas DNIT, o teor ótimo de asfalto para MCD foi determinado em 4,4%. As misturas sem aditivo (MD12R e MD38R) apresentam teores ótimos de asfalto de 5,0% e 4,7%, respectivamente. Esses valores são consistentes com a caracterização do material previamente exposta, que demonstrou uma maior porosidade e absorção do RCD. As fissuras observadas no material por meio de MEV e as análises granulométricas que evidenciam a degradação do material sugerem uma mudança na sua granulometria para partículas mais finas, o que aumenta a área superficial e, portanto, o consumo de asfalto. A maior porosidade e rugosidade dos grãos de RCD provocam uma maior absorção do ligante asfáltico, deixando a mistura mais seca e dificultando o rearranjo de partículas durante a compactação (Muniz et al., 2012; Lee et al., 2012; Perez et al., 2012; Pérez, et al., 2007; Wong et al., 2007; Panda et al. 2016; Yasreen et al. 2011; Heitzman 2005; Rondón et al. 2019). Portanto, a substituição de agregados naturais por RCD nas misturas aumenta a absorção, resultando em um maior teor ótimo de asfalto.

As misturas modificadas com aditivo polimérico (MD12A, MD38A) apresentam teores ótimos de asfalto de 4,6% e 4,5%, respectivamente. Esses valores indicam que o aditivo polimérico reduz ligeiramente o teor ótimo de asfalto em comparação com suas contrapartes não modificadas (MD12R, MD38R). O aditivo polimérico melhora a aderência e o preenchimento dos vazios com betume, diminuindo assim a necessidade de um maior teor de asfalto para alcançar uma mistura adequada. Os ensaios de caracterização do material e as observações por meio de MEV mostram que o aditivo polimérico diminui a porosidade e a absorção, e penetra em algumas fissuras e poros, melhorando as propriedades mecânicas do RCD. Alguns autores

têm utilizado outros tipos de aditivos e encontraram resultados similares (Ma et al., 2019; Matias et al., 2013; Spaeth & Djerbi Tegguer, 2013; Wu et al., 2018; Zhang et al., 2016).

Para as misturas sob as normas INVIAS, o teor ótimo de asfalto para a amostra de controle (MCI) foi de 4,0%. As misturas sem aditivo (MI34R, MI12R, MI38R) têm teores ótimos de asfalto de 4,5%, 4,5% e 4,2%, respectivamente. Por outro lado, as misturas modificadas com aditivo polimérico (MI34A, MI12A, MI38A) apresentam teores ótimos de asfalto de 4,3%, 4,2% e 4,1%, respectivamente. Esses valores confirmam que o aditivo polimérico reduz ligeiramente o teor ótimo de asfalto em comparação com suas contrapartes não modificadas.

Tabela 4-20 Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall, teor de ligante, Vv e RBV

Mistura	Teor de ligante (%)	Vv (%)	DP	RBV (%)	DP
DNIT					
MCD	4,4	3,5	0,33	75,70	6,06
MD12R	5,0	3,7	0,69	76,85	14,66
MD38R	4,7	3,7	0,57	75,49	11,12
TERRAFIX 14					
MD12A	4,6	3,5	0,51	76,30	11,00
MD38A	4,5	3,3	0,42	77,22	8,60
Especificação ES 031 (DNIT, 2006)		3-5		75-82	
Camada de Rolamento					
INVIAS					
MCI	4,0	4,4	0,53	69,50	9,11
MI34R	4,5	5,3	1,17	67,50	13,85
MI12R	4,5	4,8	0,96	68,51	14,06
MI38R	4,2	4,4	0,84	70,30	10,91
TERRAFIX 14					
MI34A	4,3	4,5	0,76	69,50	11,72
MI12A	4,2	4,5	0,61	67,50	9,41
MI38A	4,1	4,1	0,42	68,51	7,84

Mistura	Teor de ligante (%)	Vv (%)	DP	RBV (%)	DP
Especificação ES 031 (DNIT, 2006)		4-6		65-72	
Camada de Ligação (Binder)					

Análise das misturas segundo as normas DNIT e INVIAS revela diferenças significativas nos Vv e na RBV ao comparar amostras de controle com misturas sem aditivos e misturas modificadas com aditivo polimérico, alinhadas com os resultados anteriores (Tabela 4-20 e Figura 4-33). Para as misturas segundo as normas DNIT, a amostra de controle MCD apresenta um Vv de $3.5\% \pm 0.33$. As misturas sem aditivo (MD12R, MD38R) têm valores de Vv de $3.7\% \pm 0.69$ e $3.7\% \pm 0.57$, respectivamente, o que representa um aumento de 5.71% em comparação com MCD. Embora o aumento seja notável, a diferença não é estatisticamente significativa conforme a Tabela 4-21. É importante destacar que a heterogeneidade nas misturas pode influenciar a precisão dos resultados e, por isso, se percebe um aumento no desvio padrão. Além disso, como mencionado anteriormente, as propriedades dos RCD, como porosidade e rugosidade, podem afetar a absorção do ligante asfáltico e o comportamento durante a compactação, ocasionando um aumento no Vv em comparação com as misturas convencionais (Paranavithana & Mohajerani, 2006; Perez et al., 2012; Rafi et al., 2011).

As misturas modificadas com aditivo polimérico (MD12A, MD38A) mostram valores de Vv de $3.5\% \pm 0.51$ e $3.3\% \pm 0.42$, respectivamente. MCD e MD12A têm o mesmo Vv, enquanto MCD tem um Vv 6.06% maior que MD38A. Isso sugere que aditivo polimérico não altera significativamente os valores de Vv em comparação com suas contrapartes não modificadas. Esses resultados são respaldados pela melhoria observada no comportamento do RCD quando modificado com o aditivo.

Assim como com a granulometria menor, as misturas segundo as normas INVIAS apresentam resultados semelhantes. A amostra de controle MCI apresenta um Vv de $4.4\% \pm 0.53$. As misturas sem aditivo (MI34R, MI12R, MI38R) têm valores de Vv de $5.3\% \pm 1.17$, $4.8\% \pm 0.96$ e $4.4\% \pm 0.84$, respectivamente. MI34R tem um Vv 20.45% maior que MCI, MI12R 9.09% maior, e MI38R tem o mesmo Vv que MCI. Apesar dessas diferenças, nenhuma é estatisticamente significativa conforme a Tabela 4-21. As misturas modificadas com aditivo polimérico (MI34A, MI12A, MI38A) apresentam valores de Vv de $4.5\% \pm 0.76$, $4.5\% \pm 0.61$ e $4.1\% \pm 0.42$, respectivamente. MI34A e MI12A têm um Vv 2.27% maior que MCI, e MI38A

tem um Vv 6.82% menor que MCI. Novamente, essas diferenças não são estatisticamente significativas.

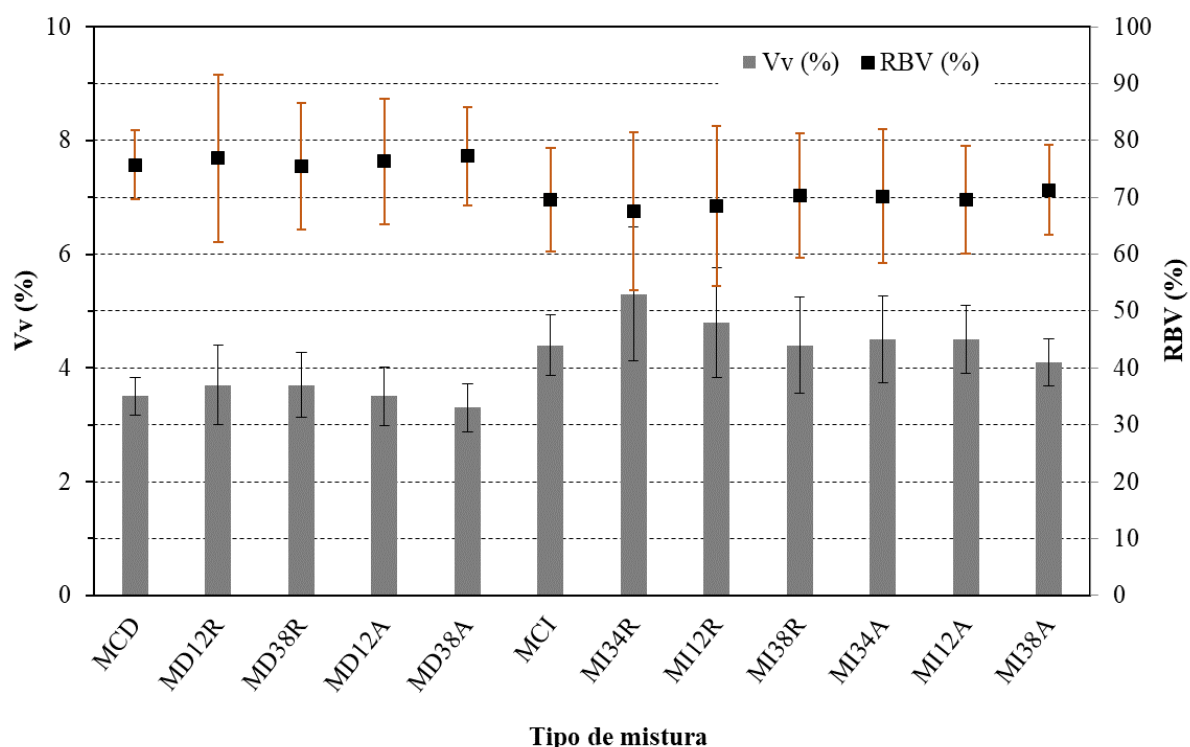


Figura 4-33 Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall Vv e RBV

Para as misturas segundo as normas DNIT, a amostra de controle MCD apresenta um RBV de $75.7\% \pm 6.06$. As misturas sem aditivo (MD12R, MD38R) têm valores de RBV de $76.85\% \pm 14.66$ e $75.49\% \pm 11.12$, respectivamente. As misturas modificadas com aditivo polimérico (MD12A, MD38A) mostram valores de RBV de $76.3\% \pm 11.00$ e $77.22\% \pm 8.60$, respectivamente. Todas as misturas cumprem com a especificação ES 031 (DNIT, 2006) para a camada de rolamento. Segundo a Tabela 4-21, nenhuma das diferenças em RBV é significativa. Para as misturas segundo as normas INVIAS, a amostra de controle MCI apresenta um RBV de $69.5\% \pm 9.11$. As misturas sem aditivo (MI34R, MI12R, MI38R) têm valores de RBV de $67.5\% \pm 13.85$, $68.51\% \pm 14.06$ e $70.3\% \pm 10.91$, respectivamente. As misturas modificadas com aditivo polimérico (MI34A, MI12A, MI38A) apresentam valores de RBV de $70.18\% \pm 11.72$, $69.55\% \pm 9.41$ e $71.3\% \pm 7.84$, respectivamente. Todas as misturas cumprem com a especificação ES 031 (DNIT, 2006) para a camada de ligação. Segundo a Tabela 4-21, as diferenças em RBV entre MCI e as misturas modificadas com aditivo polimérico não são significativas.

Tabela 4-21 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Volumétricos das misturas pela compactação Marshall Vv e RBV

Contraste	Seg. Diferença	+/- Limites	Seg. Diferença	+/- Limites
Mistura	Vv(%)		RBV (%)	
MCD - MD12R	-0,196667	1,16774	-1,15333	18,5195
MCD - MD38R	-0,2	1,16774	0,203333	18,5195
MCD - MD12A	0,0	1,16774	-0,596667	18,5195
MCD - MD38A	0,203333	1,16774	-1,52533	18,5195
MCD - MCI	-0,896667	1,16774	6,19667	18,5195
MD12R - MD38R	-0,00333333	1,16774	1,35667	18,5195
MD12R - MD12A	0,196667	1,16774	0,556667	18,5195
MD38R - MD12A	0,2	1,16774	-0,8	18,5195
MD38R - MD38A	0,403333	1,16774	-1,72867	18,5195
MD12A - MD38A	0,203333	1,16774	-0,928667	18,5195
MCI - MI34R	-0,9	1,16774	2,0	18,5195
MCI - MI12R	-0,4	1,16774	0,99	18,5195
MCI - MI38R	0,0	1,16774	-0,8	18,5195
MCI - MI34A	-0,103333	1,16774	-0,68	18,5195
MCI - MI12A	-0,103333	1,16774	-0,05	18,5195
MCI - MI38A	0,3	1,16774	-1,8	18,5195
MI34R - MI12R	0,5	1,16774	-1,01	18,5195
MI34R - MI38R	0,9	1,16774	-2,8	18,5195
MI34R - MI34A	0,796667	1,16774	-2,68	18,5195
MI12R - MI38R	0,4	1,16774	-1,79	18,5195
MI12R - MI12A	0,296667	1,16774	-1,04	18,5195
MI38R - MI38A	0,3	1,16774	-1,0	18,5195
MI34A - MI12A	0,0	1,16774	0,63	18,5195
MI34A - MI38A	0,403333	1,16774	-1,12	18,5195
MI12A - MI38A	0,403333	1,16774	-1,75	18,5195

* mostra uma diferença significativa.

Este conjunto de dados oferece uma visão abrangente do impacto das variações no teor de ligante, volume de vazios e relação betume/vazios em misturas asfálticas sob diferentes condições e aditivo, proporcionando insights valiosos para otimização de formulações de misturas asfálticas.

A partir dos dados volumétricos adquiridos através da compactação Marshall, foi possível desenvolver corpos de prova empregando o compactador giratório (CG). Para cada tipo de mistura asfáltica, quatro corpos de prova foram produzidos, respeitando o teor específico de ligante de cada mistura.

Seguindo a metodologia proposta por Mitchell (2005), cada um desses corpos de prova foi submetido a 160 giros no CG. O principal objetivo desse procedimento era alcançar um volume de vazios menor do que o resultado obtido na compactação Marshall. A escolha do número de giros foi estratégica, visando construir uma relação entre o Vv e o Número de Giros, garantindo que o volume de vazios após a compactação no CG fosse inferior ao observado na compactação Marshall.

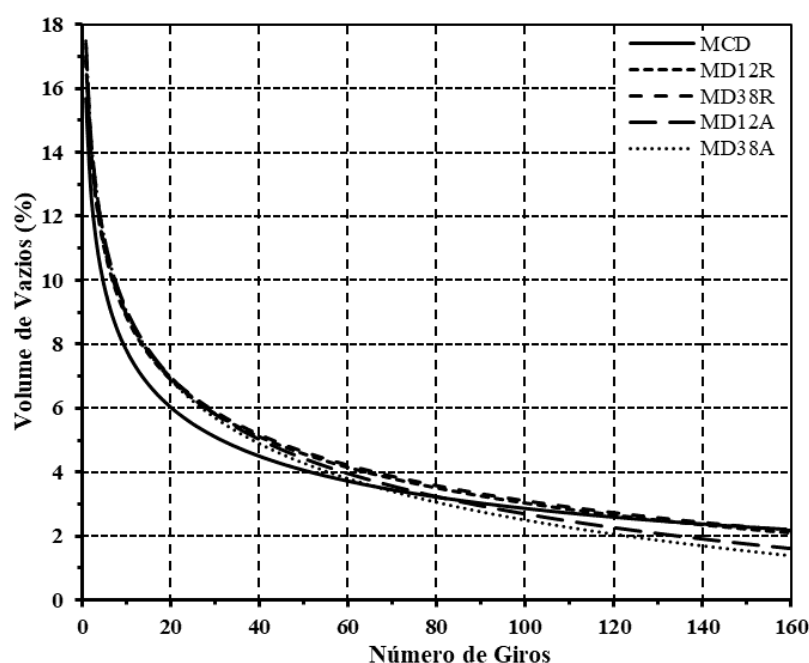


Figura 4-34 Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a misturas DNTI

Utilizando as curvas já estabelecidas (Figura 4-34 para a granulometria do DNIT, Figura 4-35 para o INVIAS sem aditivo e Figura 4-36 para o INVIAS com aditivo) e os valores de Vv

obtidos na compactação Marshall, procedeu-se ao cálculo do número de giros necessário para atingir o volume de vazios desejado. Os giros necessários para a elaboração de cada corpo de prova no CG são apresentados na Tabela 4.9.

A Tabela 4-22 apresenta uma análise comparativa do comportamento de várias misturas asfálticas em relação à compactação Marshall. Essa comparação se baseia nos teores de ligante, percentuais de vazios de ar (V_v) e no número de giros de compactação necessários para cada tipo de mistura, seguindo as especificações das granulometrias da faixa C do DNIT e da faixa MDC-25 do INVIAS.

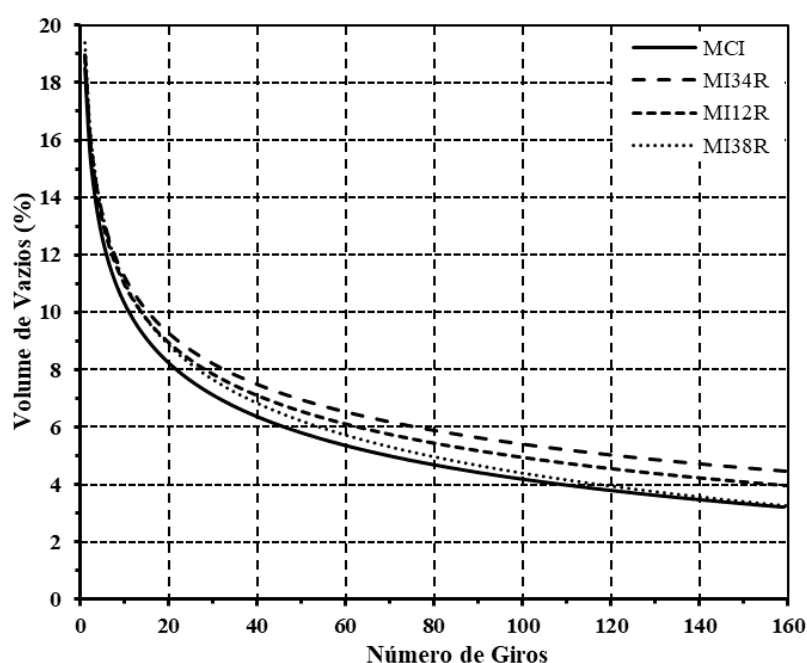


Figura 4-35 Curvas representativas da relação V_v x Número de giros para a misturas INVIAS sem Aditivo

Nas misturas correspondentes ao DNIT (MCD, MD12R, MD38R), observa-se que à medida que o teor de ligante aumenta, há um ligeiro aumento no percentual de V_v , acompanhado de um incremento no número de giros de compactação. Especificamente, a mistura MCD, com 4,4% de ligante, requer 65 giros para atingir 3,5% de V_v , enquanto a MD12R, com 5,0% de ligante, necessita de 76 giros para alcançar 3,7% de V_v . Isso sugere uma relação direta entre o aumento do teor de ligante e a necessidade de maior energia de compactação.

A análise dos dados de misturas asfálticas mostra que tanto para granulometrias maiores (INVIAS) quanto para granulometrias menores (DNIT), as misturas com o aditivo polimérico (MD12A, MD38A) requerem menos giros de compactação em comparação com as misturas sem aditivo. Por exemplo, MD12A requer 71 giros, enquanto MD12R requer 76 giros; e MD38A requer 69 giros, enquanto MD38R requer 71 giros. Isso indica que o aditivo polimérico melhora a compatibilidade das misturas, reduzindo o esforço necessário para alcançar a compactação desejada.

No entanto, ao comparar com as amostras de controle, observa-se que tanto as misturas com RCD com aditivo quanto sem aditivo exigem um maior número de giros e um teor de ligante mais elevado para alcançar os volumes de vazios adequados. Isso significa que, ao substituir o material convencional por RCD, é necessário ajustar o teor de asfalto para compensar o aumento dos V_v e o maior esforço de compactação requerido.

Para as misturas da faixa INVIAS (MCI, MI34R, MI12R, MI38R), nota-se um padrão distinto. Apesar dos teores de ligante variarem de 4,0% a 4,5%, os V_v são significativamente mais altos, variando de 4,1% a 5,3%. Além disso, o número de giros necessários para atingir esses valores é consideravelmente maior, indicando que, para essa faixa, uma compactação mais intensiva é necessária, mesmo para V_v mais elevados.

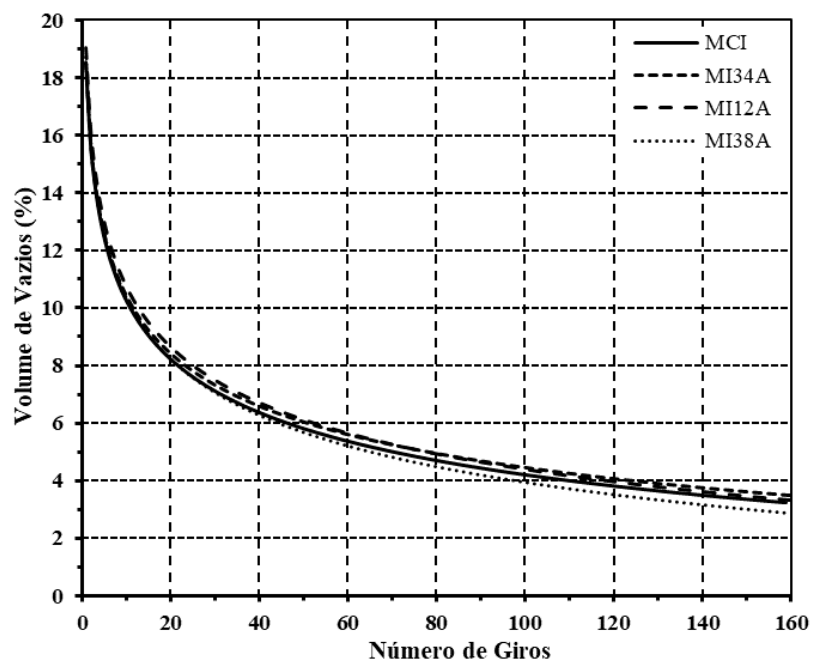


Figura 4-36 Curvas representativas da relação Vv x Número de giros para a misturas INVIAS com Aditivo

Por fim, as misturas com aditivo polimérico na faixa INVIAS (MI34A, MI12A, MI38A) seguem a tendência das misturas INVIAS, com teores de ligante um pouco menores e Vv similares. Contudo, o número de giros necessário é ligeiramente menor que nas misturas INVIAS sem aditivo, sugerindo que o aditivo polimérico pode estar contribuindo para uma compactação mais eficiente.

Essa análise evidencia a complexa relação entre o teor de ligante, os vazios de ar e a energia de compactação necessária nas misturas asfálticas, ressaltando como as diferentes composições e aditivos podem influenciar a compactação nas metodologias de pavimentação.

Tabela 4-22 Número de giros no (CG) para o teor de ligante e Vv

Mistura	Teor de ligante (%)	Vv (%)	N giros de compactação
DNIT			
MCD	4,4	3,5	65
MD12R	5,0	3,7	76
MD38R	4,7	3,7	71

Mistura	Teor de ligante (%)	Vv (%)	N giros de compactação
TERRAFIX 14			
MD12A	4,6	3,5	71
MD38A	4,5	3,3	69
INVIAS			
MCI	4,0	4,4	90
MI34R	4,5	5,3	107
MI12R	4,5	4,8	104
MI38R	4,2	4,4	99
TERRAFIX 14			
MI34A	4,3	4,5	97
MI12A	4,2	4,5	95
MI38A	4,1	4,1	93

4.2.8. ENSAIOS MECÂNICOS

4.2.8.1. ESTABILIDADE MARSHALL E ESTABILIDADE/FLUÊNCIA

Após realizar a dosificação das misturas conforme os padrões estabelecidos pelo DNIT e INVIAS, e submetê-las aos processos de compactação Marshall, foram obtidos resultados relevantes em termos de Estabilidade Marshall, e a relação estabilidade/fluência. Estes resultados estão detalhados na

Tabela 4-23 Resultados de Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Marshall

Mistura	Estabilidade Marshall (kN)	DP	Estabilidade/fluência (kN/mm)	DP
DNIT				
MCD	12,248	0,32	3,48	0,09
MD12R	12,011	0,84	3,13	0,24
MD38R	12,235	0,88	3,3	0,22
ADITIVO POLIMÉRICO				
MD12A	12,616	0,83	3,45	0,24
MD38A	12,840	0,59	3,88	0,12
INVIAS				

Mistura	Estabilidade Marshall (kN)	DP	Estabilidade/fluência (kN/mm)	DP
MCI	13,490	0,54	3,92	0,12
MI34R	12,944	1,04	3,65	0,30
MI12R	13,066	1,18	3,71	0,29
MI38R	13,28	0,66	3,77	0,17
ADITIVO POLIMÉRICO				
MI34A	13,692	0,90	3,8	0,29
MI12A	13,800	0,73	3,83	0,20
MI38A	14,052	0,51	4,02	0,18

Na Tabela 4-23, apresentam-se os resultados de estabilidade Marshall e a relação estabilidade/fluxo para diferentes misturas asfálticas, observando-se tendências claras influenciadas pela presença de aditivos, RCD e o tipo de granulometria. As misturas com aditivos apresentam um desempenho superior em comparação com as misturas sem aditivos resultados esperados de acordo às análises feitas na caracterização do RCD com aditivos e a influência nos resultados dos RCD sem aditivos evidenciaram os problemas da argamassa aderida ocasionado uma diminuição nas Estabilidade e Estabilidade/fluência.

Em primeiro lugar, a examinar o impacto do aditivo observa-se que as misturas contendo aditivo demonstram um desempenho superior em comparação às misturas sem aditivo. Isso é evidenciado por um aumento na Estabilidade Marshall Figura 4-37 nas misturas com aditivo.

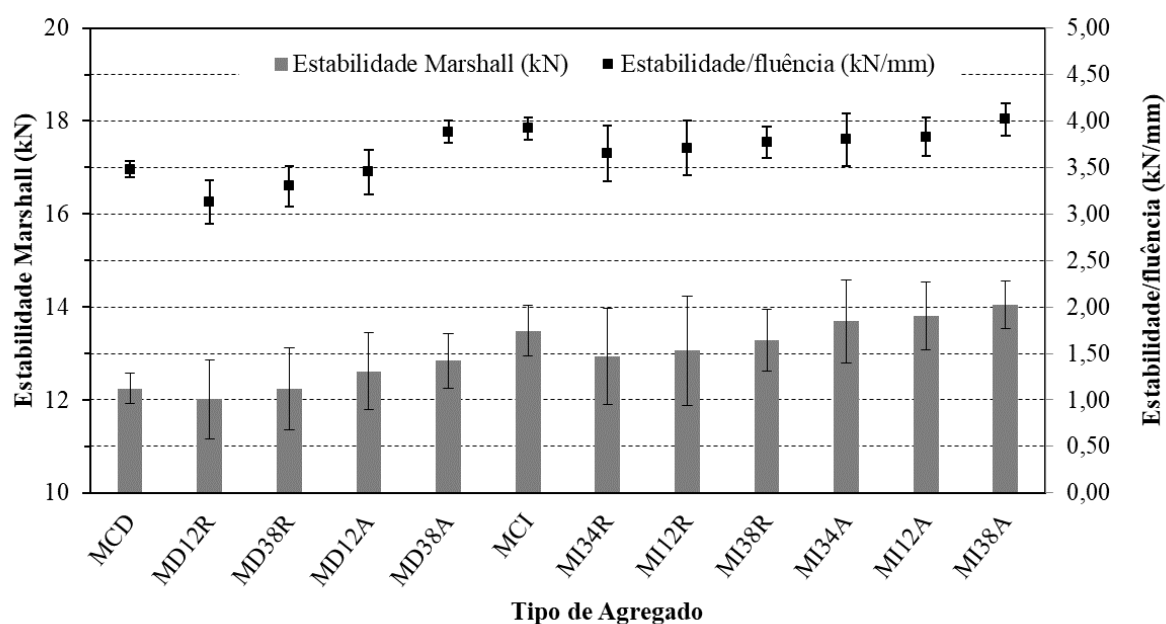


Figura 4-37 Resultados de Estabilidade Marshall e Estabilidade/fluência de acordo ao tipo de mistura baixo compactação Marshall

As comparações das misturas com e sem aditivo polimérico amostra-se na Figura 4-37, analisando a influência do aditivo polimérico, observa-se que a mistura MD12A possui uma estabilidade Marshall de $12,616 \pm 0,83$ kN em comparação com $12,011 \pm 0,84$ kN da MD12R, representando um aumento de 5,04%. De forma similar, a mistura MD38A demonstra uma estabilidade de $12,840 \pm 0,59$ kN comparada com $12,235 \pm 0,88$ kN da MD38R, indicando um aumento de 4,95%. Quando a granulometria é mais grossa, a mistura MI34A apresenta uma estabilidade de $13,692 \pm 0,90$ kN em relação a $12,944 \pm 1,04$ kN da MI34R, significando um aumento de 5,78%. A MI12A possui uma estabilidade de $13,800 \pm 0,73$ kN em comparação com $13,066 \pm 1,18$ kN da MI12R, resultando em um aumento de 5,62%, e a MI38A mostra $14,052 \pm 0,51$ kN em comparação com $13,280 \pm 0,66$ kN da MI38R, incrementando 5,81%. Essas diferenças indicam que o aditivo polimérico contribui significativamente para melhorar a capacidade de carga das misturas asfálticas, embora os resultados não sejam estatisticamente significativos segundo a Tabela 4-24 para a comparação de todas as misturas. Uma das razões para os resultados não serem estatisticamente significativos é a variação no tamanho das partículas conforme o tipo de mistura e os baixos percentuais de substituição do RCD utilizados, aproximadamente 10%. Além disso, conforme demonstrado nas dosagens, o aditivo reduz a absorção e a porosidade das misturas, permitindo o uso de uma quantidade menor de cimento asfáltico e melhorando a aderência. Estudos anteriores obtiveram resultados

semelhantes com outros tratamentos superficiais (Aman e Ramasamy, 2020; Zhu et al., 2012, 2013; Pasandín e Pérez, 2014; Hou et al., 2014; Lee et al., 2012; Giri et al., 2018a; Al-Bayati et al., 2018).

Comparando as misturas de controle pela influência do RCD, a MCD apresenta uma estabilidade de $12,248 \pm 0,32$ kN, enquanto a MCI possui uma estabilidade de $13,490 \pm 0,54$ kN, devido ao maior tamanho de partículas da MCI (19 mm). As misturas recicladas sem aditivo, como a MD12R ($12,011 \pm 0,84$ kN) e a MD38R ($12,235 \pm 0,88$ kN), estão ligeiramente abaixo da mistura de controle MCD, com reduções de 1,94% e 0,11%, respectivamente. No entanto, com aditivo, as misturas MD12A ($12,616 \pm 0,83$ kN) e MD38A ($12,840 \pm 0,59$ kN) superam a MCD com aumentos de 3,00% e 4,83%, respectivamente. Para as misturas INVIAS, as recicladas sem aditivo, como a MI34R ($12,944 \pm 1,04$ kN), a MI12R ($13,066 \pm 1,18$ kN) e a MI38R ($13,280 \pm 0,66$ kN), estão abaixo da MCI, com reduções de 4,05%, 3,14% e 1,56%, respectivamente. Contudo, as misturas com aditivo, como a MI34A ($13,692 \pm 0,90$ kN), a MI12A ($13,800 \pm 0,73$ kN) e a MI38A ($14,052 \pm 0,51$ kN), superam a MCI com aumentos de 1,50%, 2,30% e 4,17%, respectivamente. A comparação entre as amostras de controle e aquelas elaboradas com RCD, tanto com quanto sem aditivo, revela que as diferenças observadas não são estatisticamente significativas Tabela 4-24. Essa insignificância estatística pode ser atribuída às variações no desvio padrão, que são influenciadas por mudanças na granulometria resultantes da compactação e pela heterogeneidade dos materiais. Considerando esses fatores, o uso de misturas com RCD é considerado adequado para aplicação em vias urbanas ou de baixo tráfego, onde as exigências de carga são menos rigorosas. Estudos anteriores apoiam essa adequação, destacando a viabilidade do uso de RCD em condições semelhantes (Cho et al., 2011; Pérez et al., 2007; Taibo et al., 2010).

Comparando as misturas que utilizam tamanhos de agregado de 12,5 mm (MD12R, MD12A, MD38R e MD38A) com aquelas que empregam tamanhos de 19 mm (MI34R, MI34A, MI12R, MI12A, MI38R e MI38A), observa-se que as misturas com tamanhos de 19 mm resultam em maior densidade e estabilidade em comparação com as misturas de 12,5 mm. Esta diferença se deve ao fato de que os agregados de 19 mm são normalmente utilizados para a camada de base, proporcionando uma estrutura mais robusta e estável, enquanto os agregados de 12,5 mm são mais comumente utilizados para as camadas de rolamento, que requerem uma textura mais fina para um contato adequado com os pneus e uma melhor resistência ao desgaste, (Brown et al., 2011; Harrigan et al., 1989; Shen & Yu, 2006)

Quanto à relação Estabilidade/fluência, as misturas com aditivo polimérico também apresentam uma relação Estabilidade/fluência mais alta, conforme ilustrado na Figura 4-37. A adição do aditivo polimérico mostrou-se eficaz na melhoria da estabilidade/fluência das misturas asfálticas. Por exemplo, a mistura MD12A apresentou um valor de $3,45 \pm 0,24$ kN/mm, enquanto a MD12R, sem aditivo, registrou $3,13 \pm 0,24$ kN/mm, resultando em um incremento de aproximadamente 10,22%. De maneira similar, a MD38A apresentou uma estabilidade/fluência de $3,88 \pm 0,12$ kN/mm em comparação com $3,30 \pm 0,22$ kN/mm da MD38R, indicando um aumento de cerca de 17,58%. Nas misturas que seguem as especificações do INVIAS, a MI34A alcançou uma estabilidade/fluência de $3,80 \pm 0,29$ kN/mm, enquanto a MI34R apresentou $3,65 \pm 0,30$ kN/mm, refletindo um aumento de aproximadamente 4,11%. A mistura MI12A registrou $3,83 \pm 0,20$ kN/mm comparada a $3,71 \pm 0,29$ kN/mm da MI12R, representando um incremento de cerca de 3,23%. Já a MI38A apresentou $4,02 \pm 0,18$ kN/mm, enquanto a MI38R teve $3,77 \pm 0,17$ kN/mm, resultando em um aumento de aproximadamente 6,63%.

A importância de analisar a relação estabilidade/fluência reside no fato de que essa propriedade pode ser considerada uma medida indireta de rigidez no ponto de estado de falha, quando a amostra é submetida a uma carga e um deslocamento. Observa-se que a fluência apresenta uma diminuição, aumentando a relação estabilidade/fluência entre algumas misturas. Por exemplo, a comparação entre MCD e MD38A mostra uma diferença significativa Tabela 4-24, com a MD38A apresentando um aumento de cerca de 23,28% em relação à MCD. Da mesma forma, ao comparar MD12R e MD38R, observa-se um aumento de aproximadamente 5,43% na estabilidade/fluência para MD38R. Entre MD12A e MD38A, a diferença é ainda mais pronunciada, com um aumento de 12,46% para MD38A. Por fim, a comparação entre MCI e MI34R mostra que MI34R tem um aumento de cerca de 7,12% em relação à MCI.

Essas diferenças podem ser ocasionadas por um melhor intertravamento do esqueleto de agregados devido à maior angularidade e rugosidade das partículas, bem como pela menor lubrificação entre grãos pelo ligante. Além disso, misturas com granulometria maior requerem menos teor ótimo de asfalto devido à menor área superficial dos agregados. No entanto, de acordo com a Tabela 4-24, essas diferenças não são estatisticamente significativas, exceto para a comparação entre MD38A e MCD, MD12R e MD38R, MD12A e MD38A, e MCI e MI34R, que mostraram diferenças significativas na relação estabilidade/fluência. Esses aumentos

confirmam a eficiência do aditivo em melhorar a resistência e estabilidade das misturas, como demonstrado em estudos anteriores

Tabela 4-24 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Marshall

Contraste	Seg. Diferença +/- Limites		Seg. Diferença +/- Limites		
Mistura	Estabilidade			Estabilidade/fluência	
MCD - MD12R	0,235	1,32385		0,35	0,362671
MCD - MD38R	0,0117	1,32385		0,18	0,362671
MCD - MD12A	-0,3693	1,32385		0,03	0,362671
MCD - MD38A	-0,593	1,32385	*	-0,4	0,362671
MD12R - MD38R	-0,224	1,32385	*	-0,44	0,362671
MD12R - MD12A	-0,605	1,32385		-0,17	0,362671
MD38R - MD38A	-0,605	1,32385		-0,32	0,362671
MD12A - MD38A	-0,224	1,32385	*	-0,72	0,362671
MCI - MI34R	0,546	1,32385	*	-0,43	0,362671
MCI - MI12R	0,424	1,32385		0,27	0,362671
MCI - MI38R	0,21	1,32385		0,21	0,362671
MCI - MI34A	-0,202	1,32385		0,15	0,362671
MCI - MI12A	-0,31	1,32385		0,12	0,362671
MCI - MI38A	-0,562	1,32385		0,09	0,362671
MI34R - MI12R	-0,122	1,32385		-0,1	0,362671
MI34R - MI38R	-0,336	1,32385		-0,06	0,362671
MI34R - MI34A	-0,748	1,32385		-0,12	0,362671
MI12R - MI38R	-0,214	1,32385		-0,15	0,362671
MI12R - MI12A	-0,734	1,32385		-0,18	0,362671
MI38R - MI38A	-0,772	1,32385		-0,06	0,362671
MI34A - MI12A	-0,108	1,32385		-0,12	0,362671
MI34A - MI38A	-0,36	1,32385		-0,25	0,362671
MI12A - MI38A	-0,252	1,32385		-0,03	0,362671

* indica una diferencia significativa.

Na análise da compactação giratória Tabela 4-25 e Figura 4-38, observa-se que as tendências gerais são consistentes com as observadas na compactação Marshall. As misturas contendo

aditivo polimérico mostram um desempenho superior em comparação às misturas sem aditivo. Por exemplo, a mistura CD12A apresentou uma estabilidade Marshall de $12,957 \pm 0,59$ kN em comparação com $12,568 \pm 0,95$ kN da CD12R, resultando em um aumento de 3,10%. De maneira similar, a mistura CD38A demonstrou uma estabilidade de $13,098 \pm 0,39$ kN comparada com $12,652 \pm 0,91$ kN da CD38R, indicando um aumento de 3,52%.

Comparando as misturas recicladas sem aditivo polimérico, observa-se que as misturas CD12R ($12,568 \pm 0,95$ kN) e CD38R ($12,652 \pm 0,91$ kN) estão ligeiramente abaixo da mistura de controle CCD ($13,152 \pm 0,13$ kN), com reduções de 4,44% e 3,80%, respectivamente. No entanto, com aditivo polimérico, as misturas CD12A ($12,957 \pm 0,59$ kN) e CD38A ($13,098 \pm 0,39$ kN) superam a CCD com aumentos de 2,55% e 3,44%, respectivamente.

Tabela 4-25 Resultados de Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória

Mistura	Estabilidade Marshall (kN)	DP	Estabilidade/fluência (kN/mm)	DP
DNIT				
CCD	13,152	0,13	3,42	0,03
CD12R	12,568	0,95	3,44	0,30
CD38R	12,652	0,91	3,40	0,20
ADITIVO POLIMÉRICO				
CD12A	12,957	0,59	3,42	0,24
CD38A	13,098	0,39	3,39	0,12
INVIAS				
CCI	14,567	0,25	3,92	0,07
CI34R	13,252	0,93	3,72	0,30
CI12R	13,452	0,97	3,72	0,29
CI38R	13,502	0,62	3,66	0,17
ADITIVO POLIMÉRICO				
CI34A	14,289	1,00	3,78	0,28
CI12A	14,247	0,51	3,73	0,19
CI38A	14,465	0,52	3,91	0,17

Ao comparar misturas com diferentes granulometrias, as misturas com agregados de 19 mm (CI34R, CI34A, CI12R, CI12A, CI38R e CI38A) mostraram maior estabilidade em comparação com as de 12,5 mm (CD12R, CD12A, CD38R e CD38A) onde o tamanho de partícula oferece maior rigidez à mistura. Por exemplo, a CI34A apresentou uma estabilidade de $14,289 \pm 1,00$ kN em comparação com $13,252 \pm 0,93$ kN da CI34R, significando um aumento de 7,82%. Quanto à relação estabilidade/fluência, as misturas com aditivo polimérico também apresentam valores mais altos. Por exemplo, a CI38A apresentou uma estabilidade/fluência de $3,91 \pm 0,17$ kN/mm em comparação com $3,66 \pm 0,17$ kN/mm da CI38R, resultando em um aumento de aproximadamente 6,83%.

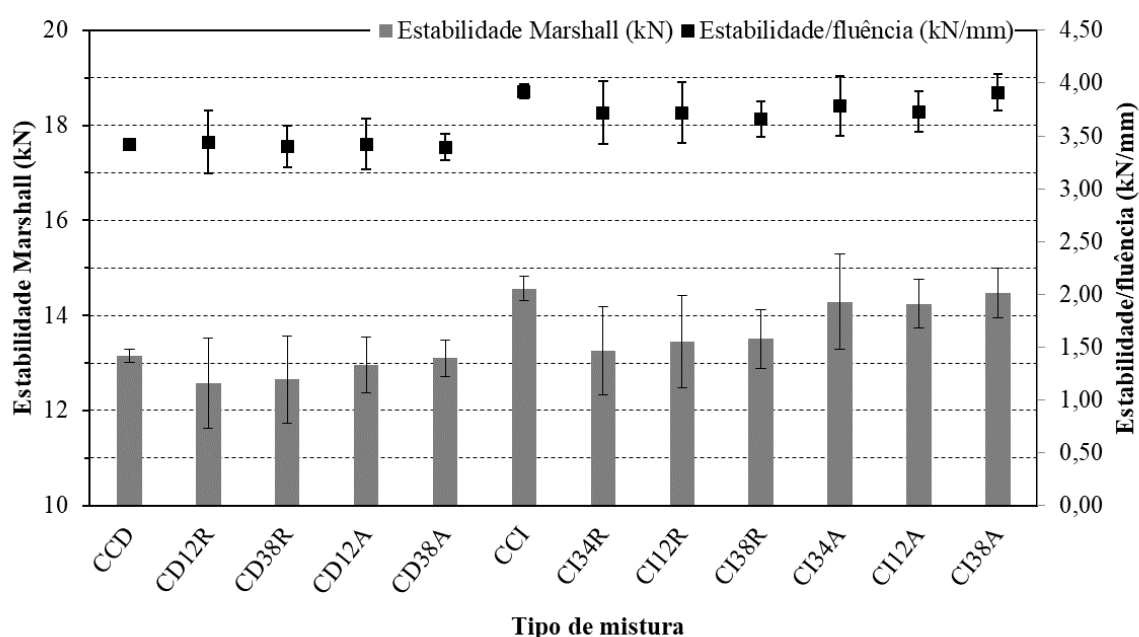


Figura 4-38 Resultados de Estabilidade Marshall e Estabilidade/fluência de acordo ao tipo de mistura baixo compactação Giratória

Em termos de significância estatística, de acordo com a Figura 4-28, algumas comparações específicas revelaram diferenças estatisticamente significativas na estabilidade Marshall. Entre CD12A ($12,957 \pm 0,59$ kN) e CD38A ($13,098 \pm 0,39$ kN), observou-se uma diferença significativa, indicando que a CD38A apresentou um desempenho superior. Comparando CCD ($13,152 \pm 0,13$ kN) e CCI ($14,567 \pm 0,25$ kN), a CCI mostrou um aumento significativo na estabilidade, destacando a influência positiva de uma granulometria maior. Além disso, a comparação entre CD38R ($12,652 \pm 0,91$ kN) e CI38A ($14,465 \pm 0,52$ kN) revelou uma diferença significativa, com a CI38A apresentando melhor desempenho.

No entanto, para as demais comparações, os resultados não indicam diferenças estatisticamente significativas. Esses resultados confirmam a consistência entre os métodos de compactação Marshall e giratória, destacando a eficiência do aditivo polimérico em melhorar a resistência e estabilidade das misturas asfálticas, assim como a influência positiva de uma granulometria maior na estabilidade das misturas.

Tabela 4-26 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória

Contraste	Seg. Diferença +/- Limites		Seg. Diferença +/- Limites		
Mistura	Estabilidade			Estabilidade/fluência	
CCD - CD12R	0,583	1,19606		-0,02	0,363322
CCD - CD38R	0,5	1,19606		0,02	0,363322
CCD - CD12A	0,19	1,19606		0	0,363322
CCD - CD38A	0,052	1,19606		0,03	0,363322
CCD - CCI	-0,083	1,19606	*	-0,5	0,363322
CD12R - CD38R	-0,393	1,19606		0,04	0,363322
CD12R - CD12A	-0,448	1,19606		0,02	0,363322
CD38R - CI38A	-0,138	1,19606	*	-0,51	0,363322
CD12A - CD38A	* 1,315	1,19606		0,03	0,363322
CCI - CI34R	1,115	1,19606		0,2	0,363322
CCI - CI12R	1,065	1,19606		0,2	0,363322
CCI - CI38R	0,278	1,19606		0,26	0,363322
CCI - CI34A	0,32	1,19606		0,14	0,363322
CCI - CI12A	0,102	1,19606		0,19	0,363322
CCI - CI38A	-0,2	1,19606		0,01	0,363322
CI34R - CI12R	-0,25	1,19606		0	0,363322
CI34R - CI38R	-1,037	1,19606		0,06	0,363322
CI34R - CI34A	-0,05	1,19606		-0,06	0,363322
CI34R - CI12A	-0,795	1,19606		-0,01	0,363322
CI12R - CI38R	-0,963	1,19606		0,06	0,363322
CI12R - CI12A	0,042	1,19606		-0,01	0,363322
CI38R - CI38A	-0,176	1,19606		-0,25	0,363322
CI34A - CI12A	-0,218	1,19606		0,05	0,363322

* indica uma diferença significativa.

Na análise comparativa entre as misturas compactadas pelo método Marshall e pela compactação giratória, não observaram-se variações estatisticamente significativas nos valores de estabilidade e na relação estabilidade/fluência. Em termos de estabilidade, a compactação giratória apresentou valores superiores em todas as comparações. Por exemplo, a mistura CCD possui uma estabilidade Marshall de $13,152 \pm 0,13$ kN, enquanto a mistura MCD tem $12,248 \pm 0,32$ kN, mostrando um aumento de 7,38%. De maneira similar, CD12R apresentou uma estabilidade de $12,568 \pm 0,95$ kN em comparação a $12,011 \pm 0,84$ kN de MD12R, resultando em um aumento de 4,63%. Comparações semelhantes revelaram que as misturas CD38R, CD12A, CD38A, CCI, CI34R, CI12R, CI38R, CI34A, CI12A e CI38A apresentaram aumentos na estabilidade de 3,41%, 2,71%, 2,01%, 7,99%, 2,38%, 2,96%, 1,67%, 4,36%, 3,24% e 2,94%, respectivamente, em relação às suas contrapartes compactadas pelo método Marshall, todos os resultados não apresentam diferenças significativas (Tabela 4-27).

Ao analisar a relação estabilidade/fluência, os resultados são variados. A mistura MCD apresentou uma relação de $3,48 \pm 0,09$ kN/mm, ligeiramente superior à de $3,42 \pm 0,03$ kN/mm da CCD. A mistura MD12R apresentou $3,13 \pm 0,24$ kN/mm em comparação a $3,44 \pm 0,30$ kN/mm de CD12R, com CD12R sendo 9,90% superior. A comparação entre MD38R e CD38R mostrou $3,30 \pm 0,22$ kN/mm versus $3,40 \pm 0,20$ kN/mm, respectivamente, com CD38R sendo 3,03% superior. Entre MD12A e CD12A, a relação foi de $3,45 \pm 0,24$ kN/mm e $3,42 \pm 0,24$ kN/mm, com MD12A sendo 0,87% superior. No entanto, na comparação entre MD38A e CD38A, a relação de MD38A foi de $3,88 \pm 0,12$ kN/mm contra $3,39 \pm 0,12$ kN/mm de CD38A, com MD38A sendo 14,45% superior, apresentando uma diferença significativa, todos os resultados não apresentam diferenças significativas (Tabela 4-27).

Esses resultados mostram que, em termos de estabilidade, a compactação giratória oferece resultados superiores em todas as misturas. No entanto, a relação estabilidade/fluência varia, sendo em alguns casos superior na compactação Marshall e em outros na compactação giratória. A única diferença significativa observada foi na comparação entre MD38A e CD38A, onde a relação estabilidade/fluência de MD38A foi significativamente superior à de CD38A. Os resultados elevados de estabilidade nas misturas compactadas por impacto Marshall podem ser causados pelo não fraturamento das partículas, gerando desgaste e quebra das mesmas, resultando em um maior consumo de asfalto.

Tabela 4-27 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados Estabilidade e Estabilidade/fluência baixo compactação Giratória

Contraste	Seg. Diferença +/- Limites		Seg. Diferença +/- Limites	
Mistura	Estabilidade		Estabilidade/fluência	
MCD - CCD	-0,903333	1,22901	0,06	0,353629
MD12R - CD12R	-0,555667	1,22901	-0,31	0,353629
MD38R - CD38R	-0,415	1,22901	-0,1	0,353629
MD12A - CD12A	-0,344	1,22901	0,03	0,353629
MD38A - CD38A	-0,258	1,22901	*	0,49
MCI - CCI	-1,077	1,22901	0	0,353629
MI34R - CI34R	-0,508	1,22901	-0,07	0,353629
MI12R - CI12R	-0,386	1,22901	-0,01	0,353629
MI38R - CI38R	-0,222	1,22901	0,11	0,353629
MI34A - CI34A	-0,597	1,22901	0,02	0,353629
MI12A - CI12A	-0,447	1,22901	0,1	0,353629
MI38A - CI38A	-0,413	1,22901	0,11	0,353629

* indica una diferencia significativa.

4.2.8.2. E RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (RT) E DANO POR UMIDADE INDUZIDA

A análise dos dados de resistência à tração indireta (RT), resistência à tração indireta condicionada (RTc) e o índice de resistência à tração (RRT) Tabela 4-28 e Figura 4-39 proporciona uma compreensão detalhada do comportamento das misturas asfálticas com diferentes tratamentos e percentagens de RCA, tanto com aditivo polimérico quanto sem ele.

Tabela 4-28 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação Marshall

Mistura	RT (kPa)	DP	RTc (kPa)	DP	RRT (%)	DP
DNIT						
MCD	977	25,71	867	34,50	88,70	1,52
MD12R	933	65,00	780	71,36	83,60	2,34
MD38R	960	53,70	809	68,88	84,30	2,84

Mistura	RT (kPa)	DP	RTc (kPa)	DP	RRT (%)	DP
ADITIVO POLIMÉRICO						
MD12A	1006	60,83	863	56,43	85,80	3,13
MD38A	1039	52,00	898	72,00	86,40	2,61
INVIAS						
MCI	1153	41,61	985	54,60	85,40	1,69
MI34R	1064	87,11	853	89,79	80,20	2,21
MI12R	1080	71,14	882	88,50	81,70	2,93
MI38R	1114	56,00	918	75,32	82,40	2,80
ADITIVO POLIMÉRICO						
MI34A	1181	89,01	973	86,24	82,40	1,74
MI12A	1189	54,34	996	74,97	83,80	2,51
MI38A	1214	53,11	1026	67,10	84,50	3,15

Como esperado e de acordo com os ensaios realizados tanto no RCD com e sem aditivo polimérico, assim como no ensaio de estabilidade Marshall para os diferentes tipos de misturas, os resultados apresentaram comportamento semelhante. A incorporação de aditivo polimérico nas misturas asfálticas mostrou melhorias significativas nos valores de RT, RTc e RRT. Considerando, por exemplo, a mistura MD12A, observou-se um RT de 1006 kPa $\pm$ 60,83 em comparação com a mistura MD12R, que apresentou um RT de 933 kPa $\pm$ 65,00. Isso representa um aumento de aproximadamente 7,8% em RT. Da mesma forma, a RTc para MD12A é de 863 kPa $\pm$ 56,43 em comparação com 780 kPa $\pm$ 71,36 para MD12R, mostrando uma melhoria de 10,6%. Em termos de RRT, MD12A tem um valor de 85,8% $\pm$ 3,13, enquanto MD12R tem 83,6% $\pm$ 2,34, indicando um aumento de 2,6%. É importante destacar que, de acordo com a Tabela XXX, essa diferença não foi significativa, ao contrário do que ocorreu para as misturas MI34R e MI12R, que tiveram diferenças significativas estatisticamente. Esse comportamento positivo pode ser atribuído à capacidade do aditivo de melhorar a coesão interna e a aderência entre as partículas de RCA e o ligante asfáltico, reduzindo a absorção de umidade e melhorando a estabilidade geral da mistura. Também foi demonstrado que os aditivos podem melhorar significativamente essas propriedades (Eisa, 2018; Giri et al., 2018a).

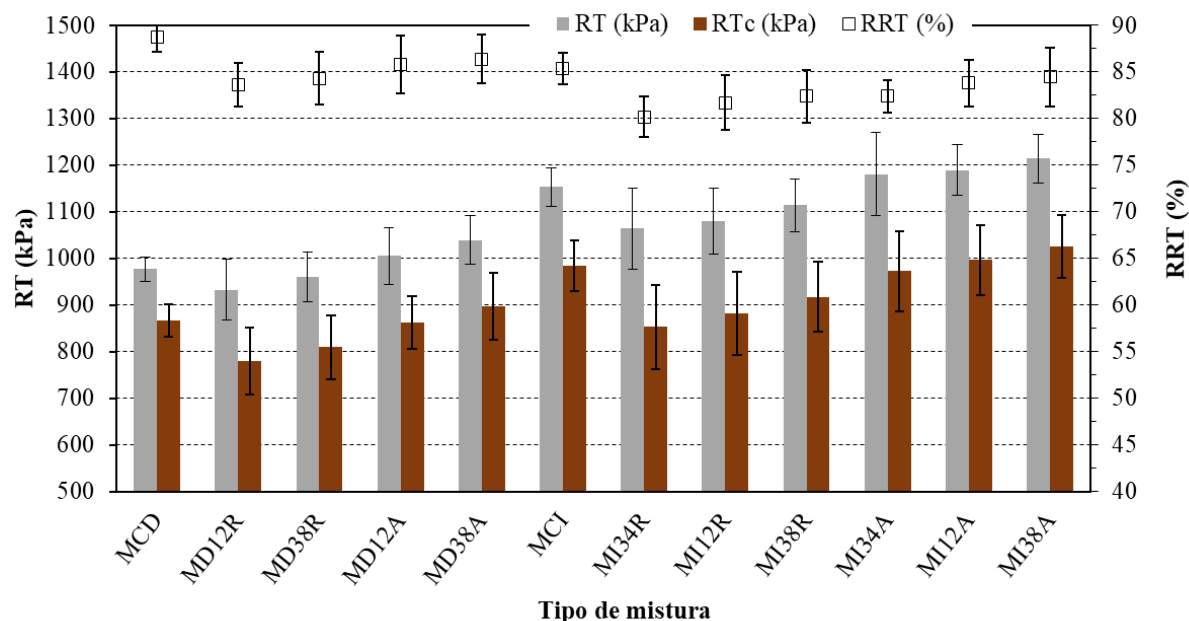


Figura 4-39 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação Marshall

A substituição de diferentes tamanhos granulométricos de RCA mostra efeitos diversos na resistência à tração e no dano por umidade. Por exemplo, a mistura MD12R, com RCA de tamanho 12,5 mm, apresenta um RT de 933 kPa $\pm$ 65,00, enquanto a mistura MD38R, que utiliza RCA de tamanho 9,5 mm, tem um RT de 960 kPa $\pm$ 53,70, representando uma melhoria de 2,9%. É importante mencionar que nenhuma variação de tamanho tem diferenças significativas Tabela 4-29. Esses resultados estão em concordância com o observado na estabilidade Marshall; esses aumentos podem ser devidos ao fato de que as partículas de 9,5 mm apresentam menor porosidade e absorção, como mostrado em resultados anteriores desta pesquisa. A RTc de MD12R é de 780 kPa $\pm$ 71,36 em comparação com 809 kPa $\pm$ 68,88 para MD38R, uma melhoria de 3,7%. Em termos de RRT, MD12R tem 83,6% $\pm$ 2,34 frente a 84,3% $\pm$ 2,84 de MD38R, indicando uma melhoria de 0,8%. Esses resultados continuam positivos devido ao fato de que o aditivo polimérico é considerado um impermeabilizante. Adicionalmente, partículas de maior tamanho, como as misturas elaboradas com tamanhos de 19 mm em comparação com as de 12 mm, podem proporcionar um melhor intertravamento e distribuição de carga, resultando em maior resistência à tração. No entanto, a variabilidade nos resultados sugere que a distribuição desigual do mortário aderido às partículas RCA pode influenciar o desempenho da mistura (Huang et al., 2021; Pasandín e Pérez, 2020).

Tabela 4-29 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Marshall

Mistura	RT			RTc			RRT		
	Contraste	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites
MCD - MD12R		44	103,638		86,6667 120,643	*	5,16667		4,23226
MCD - MD38R		17	103,638		57,3333 120,643	*	4,46667		4,23226
MCD - MD12A		-29	103,638		3,66667 120,643		2,93333		4,23226
MCD - MD38A		-62	103,638		-31 120,643		2,4		4,23226
MCD - MCI	*	-176	103,638		-118 120,643		3,36667		4,23226
MD12R - MD38R		-27	103,638		-29,3333 120,643		-0,7		4,23226
MD12R - MD12A		-73	103,638		-83 120,643		-2,23333		4,23226
MD38R - MD38A		-79	103,638		-88,3333 120,643		-2,06667		4,23226
MD12A - MD38A		-33	103,638		-34,6667 120,643		-0,533333		4,23226
MCI - MI34R		89	103,638	*	131,333 120,643	*	5,23333		4,23226
MCI - MI12R		73	103,638		102,333 120,643		3,76667		4,23226
MCI - MI38R		39	103,638		66,6667 120,643		3		4,23226
MCI - MI34A		-28	103,638		11,6667 120,643		2,96667		4,23226
MCI - MI12A		-36	103,638		-11,6667 120,643		1,6		4,23226
MCI - MI38A		-61	103,638		-41 120,643		0,866667		4,23226
MI34R - MI12R		-16	103,638		-29 120,643		-1,46667		4,23226
MI34R - MI38R		-50	103,638		-64,6667 120,643		-2,23333		4,23226
MI34R - MI34A	*	-117	103,638		-119,667 120,643		-2,26667		4,23226
MI12R - MI38R		-34	103,638		-35,6667 120,643		-0,766667		4,23226
MI12R - MI12A	*	-109	103,638		-114 120,643		-2,16667		4,23226

* indica una diferencia significativa.

A análise do comportamento do RCA no dano por umidade e na resistência à tração indireta mostra que um maior conteúdo de RCA geralmente leva a uma redução no RRT e RT. Por exemplo, a mistura MD12R tem um RRT de $83,6\% \pm 2,34$ em comparação com $88,7\% \pm 1,52$ da mistura de controle MCD, o que representa uma redução de 5,7%, embora de acordo com a Tabela 4-29 não existem diferenças significativas. Em termos de RT, MD12R mostra 933 kPa $\pm 65,00$ frente a 977 kPa $\pm 25,71$ de MCD, indicando uma redução de 4,5%. É importante mencionar que as diferenças entre o RT e o RTc apresentam em quase todos os casos uma diferença significativa, o que sugere que o RCD pode aumentar a suscetibilidade ao dano por umidade devido à sua maior porosidade e capacidade de absorção de água, o que leva à degradação da mistura em condições de umidade (Tahmoorian e Samali, 2018; Mikhailenko et al., 2020). Dado o processo realizado para o RTc, pode-se mencionar que as mudanças de

temperatura podem afetar o aditivo polimérico. Além disso, esses resultados indicam que as misturas sem aditivo têm uma resistência significativamente menor ao dano por umidade em comparação com a mistura de controle. No entanto, nem todas as diferenças observadas em RT e RTc são significativas, o que sugere que outros fatores, como a variabilidade no tamanho e na distribuição das partículas RCA, também podem influenciar os resultados.

A Tabela 4-30 e Figura 4-40 apresenta os resultados de RT, RTc e RRT para diversas misturas asfálticas. As misturas com o aditivo polimérico (CD12A, CD38A, CI34A, CI12A, CI38A) mostraram, em geral, valores superiores de RT, RTc e RRT em comparação com as misturas sem aditivo correspondente (CD12R, CD38R, CI34R, CI12R, CI38R). Por exemplo, CD12A apresentou um RT superior ao de CD12R, demonstrando uma melhoria significativa em RT com o uso de aditivo polimérico. Os resultados estão em concordância com análises anteriores reforçando que o aditivo melhora as propriedades do RCD, pela diminuição da porosidade. O aditivo polimérico melhora a coesão interna das misturas, reduz a absorção de umidade e aumenta a resistência à tração indireta. Isso é evidenciado pelo desempenho superior das misturas CD12A, CD38A, CI34A, CI12A e CI38A em relação às suas contrapartes sem aditivo (CD12R, CD38R, CI34R, CI12R, CI38R). Por exemplo, CD12A apresentou um RT superior ao de CD12R, demonstrando uma melhoria significativa em RT com o uso de aditivo polimérico.

Tabela 4-30 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação giratória

Mistura	RT (kPa)	DP	RTc (kPa)	DP	RRT (%)	DP
DNIT						
CCD	1125	22,52	1029	31,01	91,50	0,94
CD12R	1025	61,51	878	66,49	85,70	1,44
CD38R	1032	47,47	890	49,66	86,20	1,85
ADITIVO POLIMÉRICO						
CD12A	1105	50,41	971	64,05	87,90	1,82
CD38A	1096	39,66	966	38,50	88,10	0,91
INVIAS						
CCI	1265	33,45	1147	34,50	90,70	0,93
CI34R	1129	85,04	959	81,93	84,90	1,63

Mistura	RT (kPa)	DP	RTc (kPa)	DP	RRT (%)	DP
CI12R	1120	78,00	950	68,37	84,80	1,42
CI38R	1138	46,00	972	53,70	85,40	1,46
ADITIVO POLIMÉRICO						
CI34A	1205	84,00	1056	73,50	87,60	0,02
CI12A	1212	63,22	1068	65,43	88,10	0,89
CI38A	1253	33,45	1101	50,30	87,90	2,27

As misturas com RCA de tamanho 9,5 mm (CD38R) tendem a mostrar desempenho ligeiramente superior em comparação com RCA de 12,5 mm (CD12R), embora as diferenças não sejam estatisticamente significativas na maioria dos casos. Por exemplo, a comparação entre CD38R e CD12R não apresentou diferenças significativas. A Tabela 4-31 detalha as diferenças estatisticamente significativas nos resultados de RT, RTc e RRT. Alguns contrastes notáveis incluem: a RT foi significativamente maior na mistura CCD (1125 kPa $\pm$ 22,52) comparada a CD12R (1025 kPa $\pm$ 61,51), com uma diferença de 100 kPa. Similarmente, a RTc e RRT mostraram melhorias significativas em CCD em comparação com CD12R. Esses resultados inferiores observados na mistura CD12R podem ser justificados pelo menor peso unitário do RCD. Devido a essa característica, há uma maior quantidade de partículas presentes na mistura, ocupando um volume maior durante o ensaio. Ao tentar realizar a compactação, ocorre maior desgaste e fraturamento dessas partículas, o que resulta na diminuição das propriedades mecânicas da mistura.

CCI mostrou um RT significativamente maior (1265 kPa $\pm$ 33,45) em comparação com CI12R (1120 kPa $\pm$ 78,00), com uma diferença de 145 kPa. As melhorias foram também evidentes na RTc e RRT. O uso do aditivo polimérico demonstrou melhorias consistentes nos valores de RT, RTc e RRT, indicando sua eficácia na redução da absorção de umidade e melhoria da coesão interna das misturas. Por exemplo, CI12A mostrou um RT de 1212 kPa $\pm$ 63,22, significativamente superior ao RT de 1120 kPa $\pm$ 78,00 de CI12R. CI34A apresentou um RRT de 87,60% $\pm$ 0,02 em comparação com 84,90% $\pm$ 1,63 de CI34R, indicando uma melhoria de 3,2% no índice de resistência à tração. Esses resultados são atribuídos à capacidade do aditivo de melhorar o intertravamento dos agregados e reduzir a porosidade, aumentando assim a coesão e resistência da mistura.

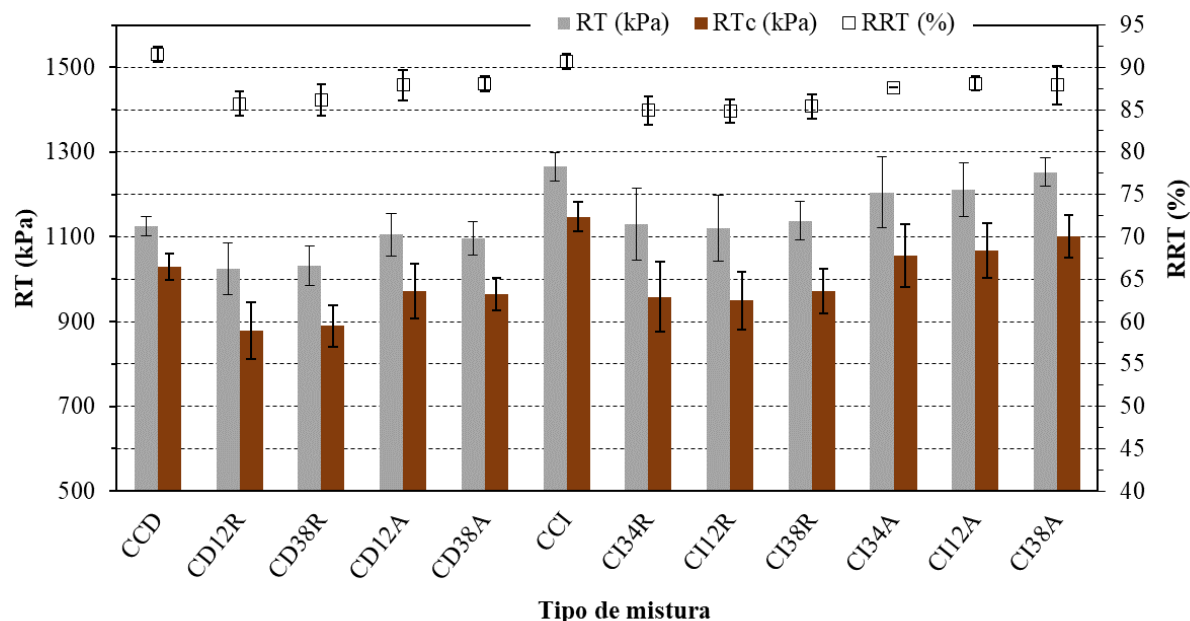


Figura 4-40 Dano por umidade induzida (RT, RTc e RRT) compactação giratório

A compactação giratória, ao ser menos agressiva, revelou diferenças importantes no desempenho das misturas asfálticas com e sem aditivo polimérico. Os resultados sugerem que o aditivo polimérico pode melhorar significativamente a resistência à tração e a durabilidade das misturas, especialmente em condições de umidade. Além disso, a granulometria do RCA também influencia o desempenho, embora as variações não sejam sempre estatisticamente significativas. Por exemplo, comparações como CI34R - CI34A e CI12R - CI12A mostraram diferenças significativas, indicando que o aditivo melhora a coesão e a resistência à tração, especialmente em misturas condicionadas.

Tabela 4-31 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Giratório

Tamanho	RT			RTc			RRT		
	Contraste	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites	Seg.	Diferença +/- Limites
	CCD - CD12R	*	100 96,5351	*	151 98,6324	*	5,8 2,3739		
	CCD - CD38R		93 96,5351	*	139,667 98,6324	*	5,23333 2,3739		
	CCD - CD12A		20 96,5351		58 98,6324	*	3,63333 2,3739		
	CCD - CD38A		29 96,5351		63,6667 98,6324	*	3,36667 2,3739		
	CCD - CCI	*	-140 96,5351	*	-118 98,6324		0,766667 2,3739		
	CD12R - CD38R		-7 96,5351		-11,3333 98,6324		-0,566667 2,3739		
	CD12R - CD12A		-80 96,5351		-93 98,6324		-2,16667 2,3739		
	CD38R - CD38A		-64 96,5351		-76 98,6324		-1,86667 2,3739		

Tamanho		RT		RTc		RRT	
CD12A - CD38A		9	96,5351	5,66667	98,6324	-0,266667	2,3739
CCI - CI34R	*	136	96,5351	* 188,667	98,6324	* 5,83333	2,3739
CCI - CI12R	*	145	96,5351	* 197,667	98,6324	* 5,9	2,3739
CCI - CI38R	*	127	96,5351	* 175,333	98,6324	* 5,33333	2,3739
CCI - CI34A		60	96,5351	91,6667	98,6324	* 3,1	2,3739
CCI - CI12A		53	96,5351	79,6667	98,6324	* 2,63333	2,3739
CCI - CI38A		12	96,5351	46	98,6324	* 2,8	2,3739
CI34R - CI12R		9	96,5351	9	98,6324	0,0666667	2,3739
CI34R - CI38R		-9	96,5351	-13,3333	98,6324	-0,5	2,3739
CI34R - CI34A		-76	96,5351	-97	98,6324	* -2,73333	2,3739
CI12R - CI38R		-18	96,5351	-22,3333	98,6324	-0,566667	2,3739
CI12R - CI12A		-92	96,5351	* -118	98,6324	* -3,26667	2,3739

* indica uma diferença significativa.

A análise comparativa das misturas asfálticas revelou que a compactação giratória proporcionou maiores valores de RT, RTc e RRT. As misturas com o aditivo polimérico, em geral, apresentaram desempenho superior, o que indica que o aditivo melhora a coesão interna e a resistência das misturas. Comparando MCD com MCI, a MCI apresentou valores superiores de RT e RTc, com diferenças significativas em ambos os casos, mas não em RRT. Entre MD12R e CI12R, CI12R mostrou valores superiores de RT e RTc com diferenças significativas, mas sem diferença significativa em RRT. MI38R apresentou valores superiores de RT e RTc em relação a MD38R, com diferenças significativas em ambos os parâmetros, mas sem diferença significativa em RRT. Na comparação entre MD12A e CD12A, CD12A apresentou valores superiores de RT e RTc, com uma diferença significativa em RTc, mas sem diferença significativa em RRT. CD38A mostrou valores superiores de RT em relação a MD38A, com diferença significativa, mas sem diferença significativa em RTc e RRT. A mistura CCD apresentou valores superiores de RT e RTc em comparação com MCI, com diferenças significativas em ambos os casos, mas sem diferença significativa em RRT. CI38A teve valores superiores de RT em relação a MI38A, com diferença significativa, mas sem diferença significativa em RTc e RRT. De maneira geral, a compactação giratória mostrou-se mais eficaz em preservar a integridade dos agregados e proporcionar uma melhor distribuição interna, resultando em misturas mais coesas e resistentes. As diferenças significativas observadas em RT e RTc reforçam a eficácia do aditivo polimérico e da compactação giratória na melhoria das propriedades das misturas asfálticas.

A compactação giratória confirmo ser melhor o que a compactação Marshall porque proporciona uma aplicação de carga mais uniforme e gradual, evitando a fratura e o desgaste excessivo das partículas de agregados. Isso resulta em uma melhor integridade dos agregados e uma distribuição interna mais homogênea, o que contribui para misturas mais resistentes. Diferente da compactação Marshall, que pode ser mais agressiva e causar quebra de partículas, a compactação giratória simula de forma mais realista as condições de compactação em campo, resultando em misturas que apresentam melhor desempenho em testes de resistência à tração indireta (RT), resistência à tração indireta condicionada (RTc) e índice de resistência à tração (RRT). Isso é evidenciado pelos valores superiores observados nas misturas compactadas pelo método giratório, especialmente quando combinadas com o aditivo polimérico, que melhora a coesão interna e reduz a absorção de umidade.

Tabela 4-32 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados (RT, RTc e RRT) compactação Marshall e compactação giratorio

Mistura			RT		RTc		RRT		
Contraste	Seg.	Diferença	+/- Limites	Seg.	Diferença	+/- Limites	Seg.	Diferença	+/- Limites
MCD - MCI	*	-176	98,7225	*	-118	107,345	*	3,36667	3,34273
MD12R - CI12R	*	-205	98,7225	*	-169,667	107,345		-1,26667	3,34273
MD38R - MI38R	*	-154	98,7225	*	-108,667	107,345		1,9	3,34273
MD12A - CD12A		-90	98,7225	*	-108,333	107,345		-2,06667	3,34273
MD38A - CD38A	*	-226	98,7225		-68	107,345		-1,8	3,34273
MCI - CCD	*	128	98,7225		-44,6667	107,345	*	-6,13333	3,34273
MI34R - CI34R		-56	98,7225		-105,333	107,345	*	-4,76667	3,34273
MI12R - CI12R		-58	98,7225		-67,3333	107,345		-3,23333	3,34273
MI38R - CI38R		-91	98,7225		-54	107,345		-3,03333	3,34273
MI34A - CI34A		-31	98,7225		-82,6667	107,345	*	-5,23333	3,34273
MI12A - CI12A		-64	98,7225		-71,3333	107,345	*	-4,33333	3,34273
MI38A - CI38A	*	112,667	98,7225		-75,6667	107,345	*	-3,43333	3,34273
MCD - MCI	*	-176	98,7225	*	-118	107,345	*	3,36667	3,34273

* indica una diferencia significativa.

4.2.8.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Neste análise, observa-se que os resultados do MR estão em consonância com os obtidos na avaliação da estabilidade Marshall, RT e DUI. Esses achados coincidem, além disso, com os ensaios de caracterização do material tanto com quanto sem RCD Tabela 4-33 e Figura 4-41.

A coerência entre os diferentes parâmetros avaliados reforça a validade dos resultados obtidos, proporcionando uma visão integral sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas modificadas.

Tabela 4-33 Resultados de MR compactação Marshall e compactação Giratória

Mistura	MR (MPa) 1Hz	DP	Mistura	MR (MPa) 1Hz	DP
DNIT					
MCD	4903	49,00	CCD	5150	29,44
MD12R	4858	170,00	CD12R	5052	84,00
MD38R	4876	111,95	CD38R	5091	89,96
ADITIVO POLIMÉRICO					
MD12A	4957	131,34	CD12A	5186	91,66
MD38A	4977	124,00	CD38A	5193	62,27
INVIAS					
MCI	5102	67,85	CCI	5300	35,00
MI34R	4913	177,37	CI34R	5183	124,53
MI12R	5034	176,00	CI12R	5187	104,00
MI38R	5078	141,17	CI38R	5257	97,62
ADITIVO POLIMÉRICO					
MI34A	5083	158,77	CI34A	5321	98,61
MI12A	5162	134,23	CI12A	5314	89,00
MI38A	5112	88,33	CI38A	5310	53,00

O uso de aditivo polimérico em misturas asfálticas com RCD mostrou efeitos positivos no MR Tabela 4-33 e Figura 4-41. Os valores obtidos indicam que a incorporação de aditivo polimérico tende a aumentar a rigidez das misturas asfálticas em comparação com as misturas que contêm apenas RCD. Por exemplo, para a mistura MD12A, o MR foi de 4957 MPa ($\pm 131,34$), enquanto para MD12R foi de 4858 MPa ($\pm 170,00$), embora essa diferença de 2,04% não tenha sido estatisticamente significativa Tabela 4-34. De maneira similar, para MD38A, o MR foi de 4977 MPa ($\pm 124,00$), comparado com 4876 MPa ($\pm 111,95$) para MD38R, com uma diferença de 2,07%, também não significativa. No entanto, as diferenças na compactação

giratória foram significativas, com CD12A mostrando um MR de 5186 MPa ($\pm 91,66$) frente a 5052 MPa ($\pm 84,00$) para CD12R, uma diferença de 2,65% que resultou significativa Tabela 4-34. De maneira similar, CD38A teve um MR de 5193 MPa ($\pm 62,27$), comparado com 5091 MPa ($\pm 89,96$) para CD38R, uma diferença de 2,00%, também significativa. O aumento do módulo resiliente com a adição de aditivo polimérico pode ser explicado pela capacidade do aditivo de melhorar a adesão entre os agregados reciclados e o asfalto, bem como pela redução do volume de vazios na mistura. Estudos anteriores demonstraram que os polímeros alcalinos, como o aditivo polimérico, podem melhorar a aderência das misturas asfálticas, aumentando sua rigidez e resistência sob cargas cíclicas (Walubita, et al., 2013).

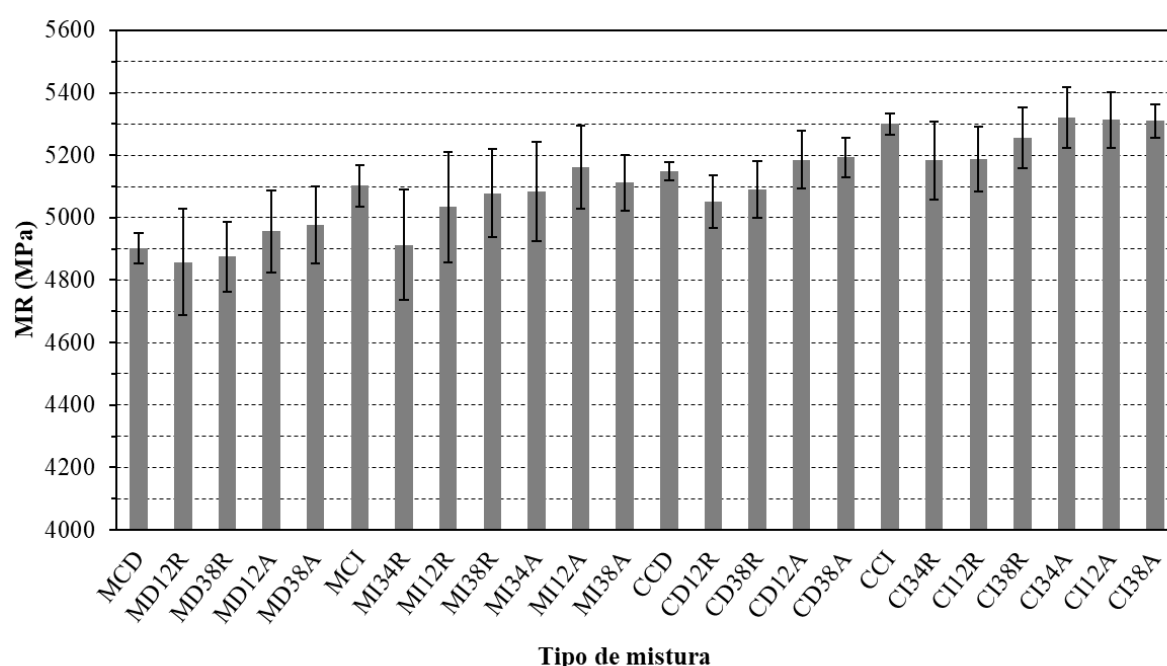


Figura 4-41 Resultados de MR compactação Marshall e compactação Giratória

A granulometria dos agregados também influencia o comportamento mecânico das misturas asfálticas. Comparando diferentes tamanhos, as diferenças não foram estatisticamente significativas. Por exemplo, MD12R teve um MR de 4858 MPa ($\pm 170,00$), enquanto MD38R mostrou um MR de 4876 MPa ($\pm 111,95$), com uma diferença de 0,37%. Do mesmo modo, MI34A mostrou um MR de 5083 MPa ($\pm 158,77$) frente a 5162 MPa ($\pm 134,23$) para MI12A, uma diferença de 1,53%. A variabilidade nas substituições dos diferentes tamanhos dentro do intervalo estudado não afetou decisivamente o MR, sugerindo que outros fatores, como a qualidade do RCD e o tratamento com aditivo polimérico, têm um impacto maior. A variação de tamanho na faixa granulométrica tem um impacto direto no comportamento mecânico das

misturas asfálticas. Em geral, os agregados mais finos proporcionam uma maior superfície de contato e, portanto, uma maior quantidade de cimento asfáltico, o que pode diminuir a rigidez da mistura. No entanto, neste caso, as diferenças observadas não são estatisticamente significativas, o que sugere que a variabilidade na granulometria dentro do intervalo estudado não afeta de maneira decisiva o módulo resiliente.

O uso de RCD em misturas asfálticas tende a reduzir o módulo resiliente em comparação com misturas controle (MCD e MCI). Por exemplo, a mistura MCD mostrou um MR de 4903 MPa ($\pm 49,00$) frente a 4858 MPa ($\pm 170,00$) para MD12R, embora essa diferença de 0,92% não tenha sido significativa. No entanto, ao comparar MCI (5102 MPa, $\pm 67,85$) com MI34R (4913 MPa, $\pm 177,37$), a diferença de 3,71% foi significativa Tabela 4-34, o que destaca como a qualidade do RCD pode influenciar a rigidez da mistura. Isso pode ser atribuído à menor qualidade e às propriedades heterogêneas dos agregados reciclados, que podem conter revestimentos de argamassa e apresentar maior porosidade. Esses fatores diminuem a coesão interna e a rigidez da mistura. Estudos têm relatado que a incorporação de RCD tende a reduzir a rigidez das misturas asfálticas devido à presença de revestimentos de argamassa e ao aumento no volume de vazios (Mills-Beale and You, 2010; Giri et al., 2018a,b).

A compactação é um fator crítico que afeta o módulo resiliente das misturas asfálticas. Comparando MCD (4903 MPa, $\pm 49,00$) e MCI (5102 MPa, $\pm 67,85$), as diferenças em MR não foram significativas. No entanto, ao analisar MD12R (4858 MPa, $\pm 170,00$) frente a CI12R (5187 MPa, $\pm 104,00$), observaram-se diferenças significativas de 6,77% Tabela 4-34. Além disso, as misturas compactadas pelo método giratório geralmente mostraram maiores valores de MR em comparação com as compactadas pelo método Marshall. Por exemplo, MD12A teve um MR de 4957 MPa ($\pm 131,34$), enquanto CD12A mostrou 5186 MPa ($\pm 91,66$), uma diferença de 4,62%. Isso se deve ao fato de que a compactação giratória proporciona uma densificação mais uniforme e uma distribuição mais eficaz do ligante asfáltico, melhorando a coesão interna e reduzindo o Vv (Walubita et al., 2011).

Tabela 4-34 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados MR da compactação Marshall e Giratório

Mistura	MR (MPa)	Mistura	MR (MPa)
Contraste	Seg. Diferença +/- Limites	Contraste	Seg. Diferença +/- Limites

MCD - MD12R	45	217,788	CCD - CD12R	*	5,8	2,3739
MCD - MD38R	27	217,788	CCD - CD38R	*	5,23333	2,3739
MCD - MD12A	-54	217,788	CCD - CD12A	*	3,63333	2,3739
MCD - MD38A	-74	217,788	CCD - CD38A	*	3,36667	2,3739
MCD - MCI	-199	217,788	CCD - CCI		0,766667	2,3739
MD12R - MD38R	-18	217,788	CD12R - CD38R		-0,566667	2,3739
MD12R - MD12A	-99	217,788	CD12R - CD12A		-2,16667	2,3739
MD38R - MD38A	-101	217,788	CD38R - CD38A		-1,86667	2,3739
MD12A - MD38A	-20	217,788	CD12A - CD38A		-0,266667	2,3739
MCI - MI34R	189	217,788	CCI - CI34R	*	5,83333	2,3739
MCI - MI12R	68	217,788	CCI - CI12R	*	5,9	2,3739
MCI - MI38R	24	217,788	CCI - CI38R	*	5,33333	2,3739
MCI - MI34A	19	217,788	CCI - CI34A	*	3,1	2,3739
MCI - MI12A	-60	217,788	CCI - CI12A	*	2,63333	2,3739
MCI - MI38A	-10	217,788	CCI - CI38A	*	2,8	2,3739
MI34R - MI12R	-121	217,788	CI34R - CI12R		0,0666667	2,3739
MI34R - MI38R	-165	217,788	CI34R - CI38R		-0,5	2,3739
MI34R - MI34A	-170	217,788	CI34R - CI34A	*	-2,73333	2,3739
MI12R - MI38R	-44	217,788	CI12R - CI38R		-0,566667	2,3739
MI12R - MI12A	-128	217,788	CI12R - CI12A	*	-3,26667	2,3739
MI34A - MI12A	-79	217,788	CI34A - CI12A		-0,466667	2,3739
MI34A - MI38A	-29	217,788	CI34A - CI38A		-0,3	2,3739
MI12A - MI38A	50	217,788	CI12A - CI38A		0,166667	2,3739

* indica una diferencia significativa.

4.2.8.4. FLUÊNCIA ESTÁTICA

A Tabela 4-35 e Figura 4-42, apresenta dados sobre a deformação total, deformação plástica e recuperação elástica para diferentes misturas asfálticas, incluindo a mistura de controle MCD, misturas recicladas sem aditivo MD12R, MD38R e misturas recicladas com aditivo aditivo polimérico MD12A, MD38A. A seguir, é feita uma análise comparativa entre essas misturas.

Tabela 4-35 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall

Mistura	Deformação total (μϵ)	DP	Deformação Plástica (μϵ)	DP	Recuperação elástica (%)	DP
DNIT						
MCD	3037,2	52,54	2286,7	23,01	24,7	0,35
MD12R	4115,8	247,00	3292,6	205,69	20,0	1,21
MD38R	3659,6	167,48	2864,2	159,40	21,7	1,10
ADITIVO POLIMÉRICO						
MD12A	3044,7	157,91	2397,4	86,67	21,3	0,86
MD38A	2871,2	115,00	2154,9	108,00	24,9	1,15
INVIAS						
MCI	2509,3	66,34	1837,4	48,76	26,8	0,68
MI34R	2975,4	214,25	2441,7	184,24	17,9	1,33
MI12R	2824,0	156,89	2210,4	154,50	21,7	1,36
MI38R	2920,2	117,00	2115,9	112,07	27,5	1,27
ADITIVO POLIMÉRICO						
MI34A	2230,3	146,32	1540,8	93,54	30,9	1,91
MI12A	2227,2	80,43	1747,2	79,98	21,6	0,87
MI38A	2043,1	71,01	1378,5	50,06	32,5	1,07

A mistura MCD apresentou uma deformação total de 3037,2 μϵ, uma deformação plástica de 2286,7 μϵ e uma recuperação elástica de 24,7%. Esses valores servem como referência para avaliar o desempenho das demais misturas Figura 4-43 e Figura 4-42.

Por exemplo, a mistura MD12A apresentou uma deformação plástica de 1672,8 μϵ (±131,34) e uma recuperação elástica de 28,8%, enquanto MD12R, sem aditivo polimérico, teve uma deformação plástica de 3063,3 μϵ (±170,00) e recuperação elástica de 19,5%. A diferença de desempenho entre MD12A e MD12R é estatisticamente significativa, Tabela 4-36. A melhoria pode ser atribuída à capacidade do aditivo polimérico de melhorar a adesão entre o ligante asfáltico e os agregados reciclados, resultando em uma mistura mais coesa e menos suscetível a deformações permanentes (El-Tahan et al., 2018; Arani et al., 2012, 2013).

Além disso, as misturas MD38A e MD38R apresentam uma comparação semelhante. MD38A tem uma deformação plástica de 1596,8 μϵ (±124,00) e uma recuperação elástica de 29,5%, enquanto MD38R apresenta deformação plástica de 2937,9 μϵ (±111,95) e recuperação elástica

de 21,7%. Novamente, a diferença é estatisticamente significativa, indicando uma melhora na resistência com o uso de aditivo polimérico.

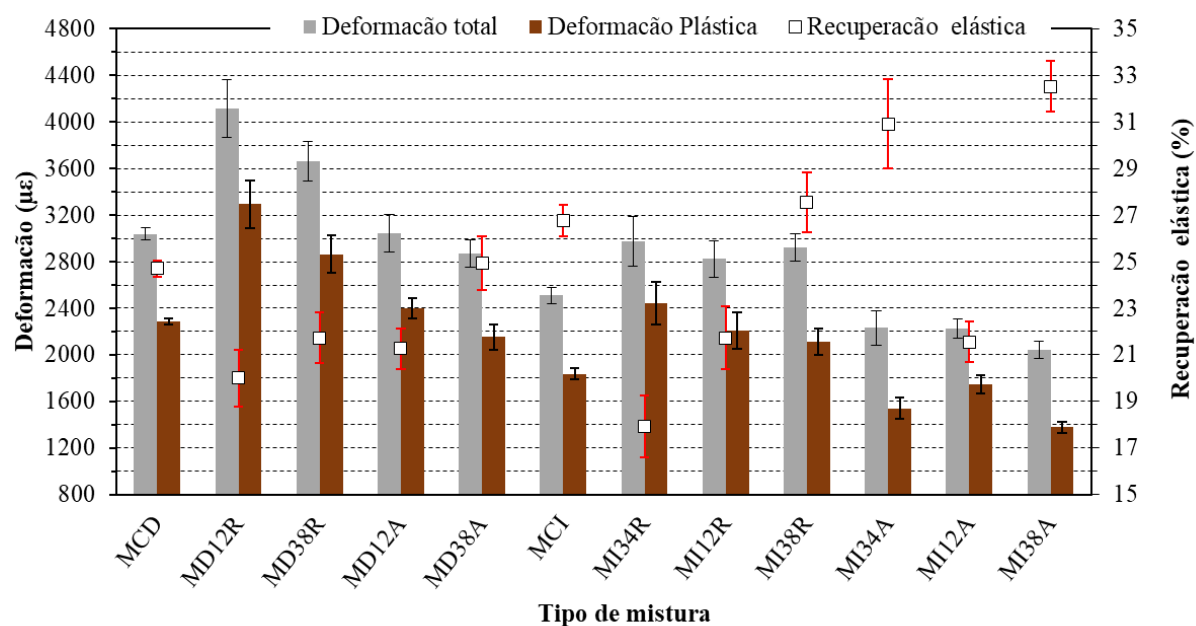


Figura 4-42 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall

Como já se abordou nas análises anteriores o aditivo polimérico é uma solução polimérica alcalina que melhora a adesão entre o asfalto e os agregados, aumentando a coesão interna da mistura e reduzindo a susceptibilidade a deformações permanentes. Além disso, o aditivo polimérico pode preencher os vazios entre os agregados, resultando em uma distribuição mais uniforme do ligante asfáltico e aumentando a rigidez da mistura (Walubita et al., 2011).

Tabela 4-36 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados do creep estática compactação Marshall

Mistura	Deformação total (µε)			Deformação Plástica (µε)		
	Sig.	Diferencia	+/- Límites	Sig.	Diferencia	+/- Límites
MCD - MD12R	*	-1078,33	243,966	*	-1006	205,14
MCD - MD38R	*	-622,333	243,966	*	-577,667	205,14
MCD - MD12A		-7,33333	243,966		-110,667	205,14
MCD - MD38A		166	243,966		131,667	205,14
MCD - MCI	*	528	243,966	*	449,333	205,14
MD12R - MD38R	*	456	243,966	*	428,333	205,14

Mistura	Deformação total ($\mu\epsilon$)			Deformação Plástica ($\mu\epsilon$)		
	Sig.	Diferencia	+/- Límites	Sig.	Diferencia	+/- Límites
MD12R - MD12A	*	1071	243,966	*	895,333	205,14
MD38R - MD38A	*	788,333	243,966	*	709,333	205,14
MD12A - MD38A		173,333	243,966	*	242,333	205,14
MCI - MI34R	*	-466	243,966	*	-604,333	205,14
MCI - MI12R	*	-314,667	243,966	*	-373	205,14
MCI - MI38R	*	-411	243,966	*	-278,667	205,14
MCI - MI34A	*	279	243,966	*	296,667	205,14
MCI - MI12A	*	282	243,966		90	205,14
MCI - MI38A	*	466,333	243,966	*	458,667	205,14
MI34R - MI12R		151,333	243,966	*	231,333	205,14
MI34R - MI38R		55	243,966	*	325,667	205,14
MI34R - MI34A	*	745	243,966	*	901	205,14
MI12R - MI38R		-96,3333	243,966		94,3333	205,14
MI12R - MI12A	*	596,667	243,966	*	463	205,14
MI38R - MI38A	*	877,333	243,966	*	737,333	205,14
MI34A - MI12A		3	243,966	*	-206,667	205,14
MI34A - MI38A		187,333	243,966		162	205,14
MI12A - MI38A		184,333	243,966	*	368,667	205,14

A granulometria dos agregados exerce uma influência significativa no comportamento das misturas asfálticas. Comparando as misturas MD12R, MD38R e outras, pode-se observar variações nos resultados de deformação plástica e módulo resiliente Figura 4-44 e Figura 4-42.

As misturas MD12R e MD38R apresentaram deformações plásticas de 3063,3 $\mu\epsilon$ ($\pm 170,00$) e 2937,9 $\mu\epsilon$ ($\pm 111,95$), respectivamente. Embora ambas as misturas tenham um desempenho inferior sem aditivo polimérico, as diferenças entre elas não são estatisticamente significativas, indicando que a granulometria dentro do intervalo estudado não afeta decisivamente a deformação plástica. No entanto, ao adicionar aditivo polimérico, as misturas MD12A e MD38A mostraram deformações plásticas de 1672,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 131,34$) e 1596,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 124,00$), respectivamente. A diferença entre MD12A e MD38A também não é estatisticamente significativa (173,333 $\mu\epsilon$, não significativa), sugerindo que o aditivo polimérico é eficaz independentemente da granulometria dos agregados.

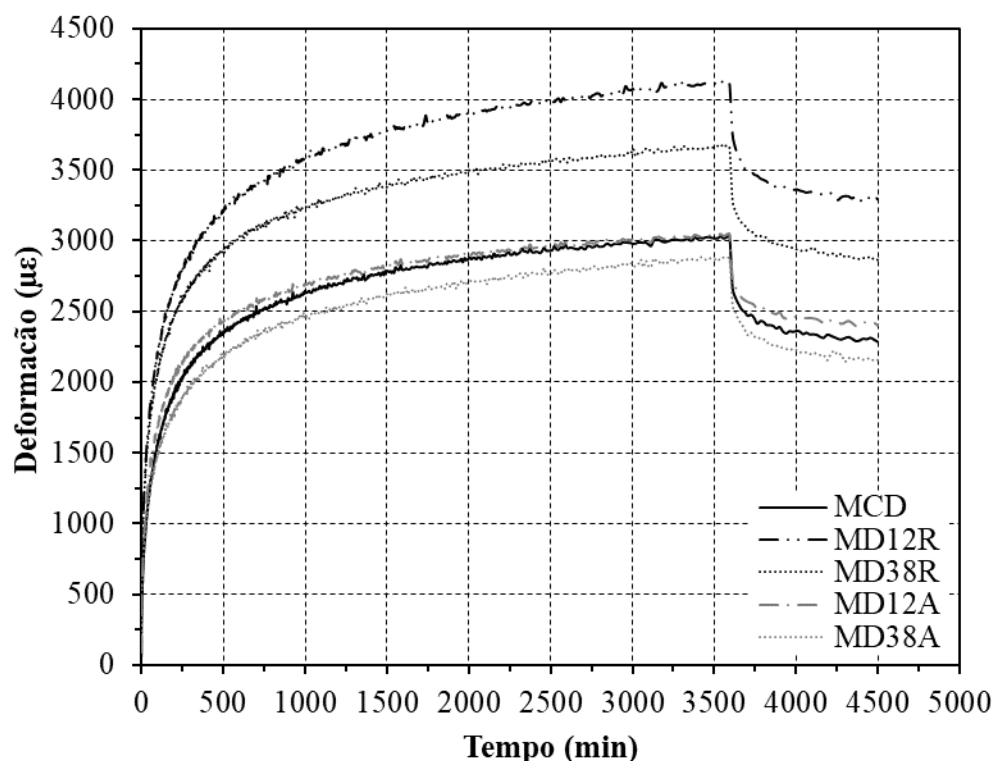


Figura 4-43 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall norma DNIT

Comparando MI34A, MI12A e MI38A, observamos que as deformações plásticas foram 1348,5 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$), 1425,6 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$) e 1242,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$), respectivamente. A diferença entre MI34A e MI38A não é estatisticamente significativa, enquanto MI34A e MI12A têm uma diferença significativa de 206,667 $\mu\epsilon$. Isso sugere que a granulometria fina, especialmente quando tratada com aditivo polimérico, proporciona uma maior resistência à deformação plástica devido ao aumento da superfície de contato e maior fricção interna entre as partículas (Arani et al., 2012, 2013).

Observa-se que misturas como MI34R e MI12R apresentam deformações plásticas de 1777,6 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$) e 1724,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$) Figura 4-44, respectivamente, indicando uma menor resistência à deformação permanente em comparação com MI34A e MI12A que apresentam 1348,5 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$) e 1425,6 $\mu\epsilon$ ($\pm 243,966$), respectivamente. A diferença é estatisticamente significativa (745 $\mu\epsilon$ para MI34R-MI34A e 596,667 $\mu\epsilon$ para MI12R-MI12A, ambos $p < 0,05$).

A menor resistência das misturas com RCA pode ser atribuída à presença de revestimentos de argamassa nos agregados reciclados, o que diminui a coesão interna da mistura e aumenta o volume de vazios (Mills-Beale et al., 2010). No entanto, a adição de aditivo polimérico melhora

a adesão entre os agregados reciclados e o asfalto, compensando as deficiências do RCA e resultando em misturas com melhor desempenho mecânico (Lubinda et al., 2013; Mikhailenko et al., 2020).

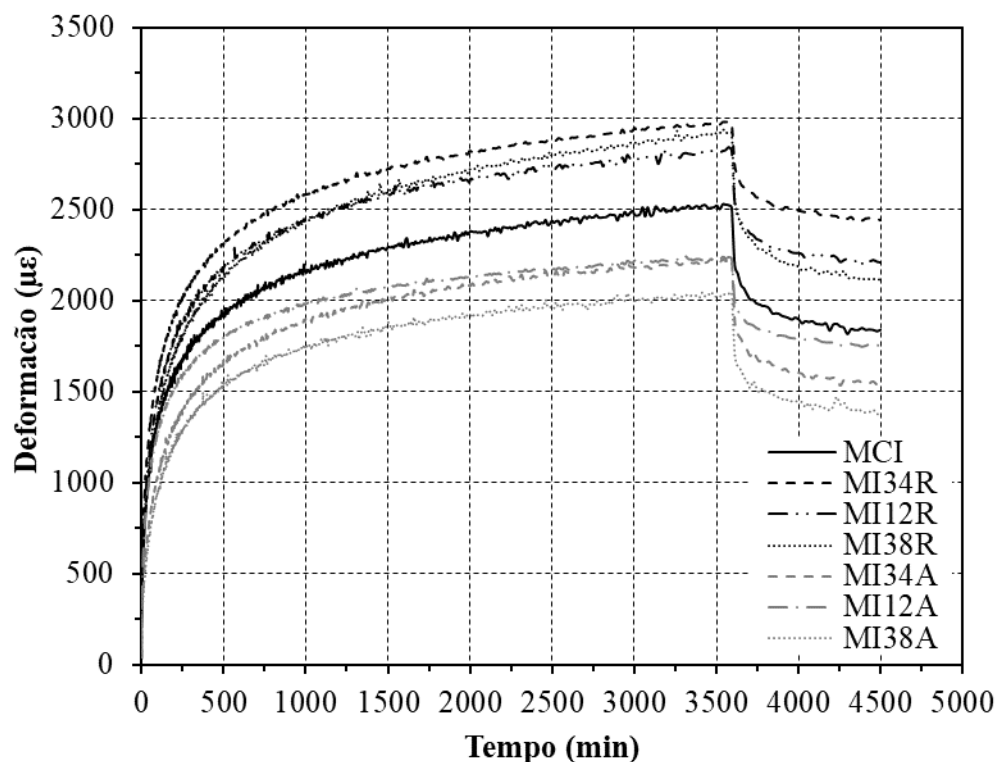


Figura 4-44 Resultados do ensaio de creep estático para compactação Marshall Norma INVIAS

A Tabela 4-37 e Figura 4-45, apresentadas os resultados de deformação acumulada ao longo do tempo para diferentes misturas asfálticas com compactação giratória, conforme as normas DNIT e INVIAS. As misturas analisadas incluem a mistura CCD, misturas recicladas sem aditivo (CD12R, CD38R) e misturas recicladas com aditivo polimérico (CD12A, CD38A). A seguir, é feita uma análise detalhada com base nos dados compilados.

As misturas modificadas com aditivo polimérico, CD12A e CD38A, apresentaram deformações totais de 2348,2 $\mu\epsilon$ ($\pm 53,46$) e 2266,4 $\mu\epsilon$ ($\pm 41,19$), respectivamente (Figura 4-45 e Tabela 4-37). As deformações plásticas foram 1672,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 46,44$) e 1596,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 24,01$), e as recuperações elásticas foram de 28,8% ($\pm 0,71$) e 29,5% ($\pm 0,51$). As diferenças entre CD12A e CD38A não foram estatisticamente significativas (Tabela 4-38), sugerindo que a adição de aditivo polimérico é eficaz em melhorar a resistência à deformação permanente.

independentemente da granulometria dos agregados. O aditivo polimérico é uma solução polimérica alcalina que melhora a adesão entre o asfalto e os agregados.

Tabela 4-37 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória

Mistura	Deformação total ($\mu\epsilon$)	DP	Deformação Plástica ($\mu\epsilon$)	DP	Recuperação elástica (%)	DP
DNIT						
CCD	2777,0	28,00	2108,4	21,01	24,1	0,25
CD12R	3806,2	114,00	3063,3	100,88	19,5	0,65
CD38R	3752,5	85,87	2937,9	67,76	21,7	0,50
TERRAFIX 14						
CD12A	2348,2	53,46	1672,8	46,44	28,8	0,71
CD38A	2266,4	41,19	1596,8	24,01	29,5	0,51
INVIAS						
CCI	2027,8	26,46	1450,1	14,53	28,5	0,30
CI34R	2335,1	88,02	1777,6	67,42	23,9	0,90
CI12R	2290,7	80,50	1724,8	54,12	24,7	0,82
CI38R	2298,0	46,00	1651,8	37,64	28,1	0,60
TERRAFIX 14						
CI34A	1931,0	68,00	1348,5	40,50	30,2	0,95
CI12A	1941,7	50,52	1425,6	36,67	26,6	0,72
CI38A	1894,7	25,32	1242,8	22,74	34,4	0,50

As misturas CD12R e CD38R apresentaram deformações plásticas de 3063,3 $\mu\epsilon$ ($\pm 100,88$) e 2937,9 $\mu\epsilon$ ($\pm 67,76$), respectivamente Tabela 4-36 e Figura 4-45. Embora ambas as misturas tenham um desempenho inferior sem aditivo polimérico, as diferenças entre elas não são estatisticamente significativas Tabela 4-38, indicando que a granulometria dentro do intervalo estudado não afeta decisivamente a deformação plástica. No entanto, ao adicionar aditivo polimérico, as misturas CD12A e CD38A mostraram deformações plásticas de 1672,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 46,44$) e 1596,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 24,01$), respectivamente. A diferença entre CD12A e CD38A também não é estatisticamente significativa (173,333 $\mu\epsilon$, não significativa), sugerindo que o aditivo polimérico é eficaz independentemente da granulometria dos agregados. O aditivo polimérico pode preencher os vazios entre os agregados, resultando em uma proteção ao desgaste da compactação.

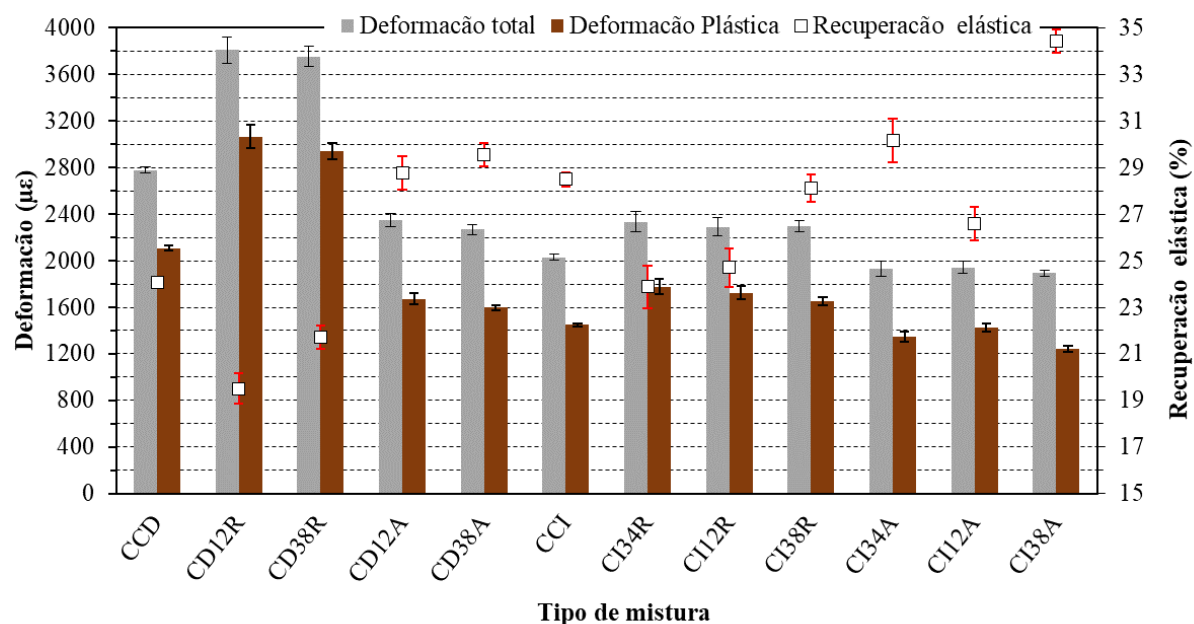


Figura 4-45 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória

Observa-se que misturas como CI34R e CI12R apresentam deformações plásticas de 1777,6 $\mu\epsilon$ ($\pm 67,42$) e 1724,8 $\mu\epsilon$ ($\pm 54,12$), respectivamente Figura 4-46, indicando uma menor resistência à deformação permanente em comparação com CI34A e CI12A que apresentam 1348,5 $\mu\epsilon$ ($\pm 40,50$) e 1425,6 $\mu\epsilon$ ($\pm 36,67$), respectivamente. A diferença é estatisticamente significativa Tabela 4-38 (745 $\mu\epsilon$ para CI34R-CI34A e 596,667 $\mu\epsilon$ para CI12R-CI12A). A menor resistência das misturas com RCA pode ser atribuída à presença de revestimentos de argamassa nos agregados reciclados, o que diminui a coesão interna da mistura e aumenta o volume de vazios (Mills-Beale et al., 2010)

Tabela 4-38 Diferencias estatisticamente significativas do Resultados do creep estática compactação Marshall

Mistura	Deformação total ($\mu\epsilon$)			Deformação Plástica ($\mu\epsilon$)		
	Sig.	Diferencia	+/- Límites	Sig.	Diferencia	+/- Límites
CCD - CD12R	*	-1029,33	109,396	*	-955	85,0218
CCD - CD38R	*	-975,667	109,396	*	-829,667	85,0218
CCD - CD12A	*	428,667	109,396	*	435,667	85,0218
CCD - CD38A	*	510,667	109,396	*	511,667	85,0218
CCD - CCI	*	749	109,396	*	658,333	85,0218
CD12R - CD38R		53,6667	109,396	*	125,333	85,0218

CD12R - CD12A	*	1458	109,396	*	1390,67	85,0218
CD38R - CD38A	*	1486,33	109,396	*	1341,33	85,0218
CD12A - CD38A		82	109,396		76	85,0218
CCI - CI34R	*	-307	109,396	*	-327,667	85,0218
CCI - CI12R	*	-262,667	109,396	*	-274,667	85,0218
CCI - CI38R	*	-270	109,396	*	-202	85,0218
CCI - CI34A		97	109,396	*	101,333	85,0218
CCI - CI12A		86,3333	109,396		24,3333	85,0218
CCI - CI38A	*	133,333	109,396	*	207,333	85,0218
CI34R - CI12R		44,3333	109,396		53	85,0218
CI34R - CI38R		37	109,396	*	125,667	85,0218
CI34R - CI34A	*	404	109,396	*	429	85,0218
CI12R - CI38R		-7,33333	109,396		72,6667	85,0218
CI12R - CI12A	*	349	109,396	*	299	85,0218
CI38R - CI38A	*	403,333	109,396	*	409,333	85,0218
CI34A - CI12A		-10,6667	109,396		-77	85,0218
CI34A - CI38A		36,3333	109,396	*	106	85,0218
CI12A - CI38A		47	109,396	*	183	85,0218

Os resultados dos ensaios de creep estático estão em concordância com os resultados do módulo resiliente, demonstrando que a adição de aditivo polimérico melhora significativamente o comportamento mecânico das misturas asfálticas modificadas com RCA. Tanto nos ensaios de creep estático quanto nos ensaios de módulo resiliente, as misturas modificadas com aditivo polimérico apresentaram menores valores de deformação plástica e maiores recuperações elásticas, indicando maior resistência e durabilidade. Com base nos dados analisados, pode-se observar que a compactação giratória, em geral, apresenta menores valores de deformação total e deformação plástica comparados à compactação Marshall, indicando uma maior resistência à deformação das misturas compactadas giratoriamente. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que a compactação giratória proporciona uma densificação mais uniforme e eficiente das misturas asfálticas. O processo de compactação giratória aplica uma carga rotacional e vertical simultaneamente, permitindo uma melhor distribuição do ligante asfáltico e uma redução mais significativa dos vazios na mistura.

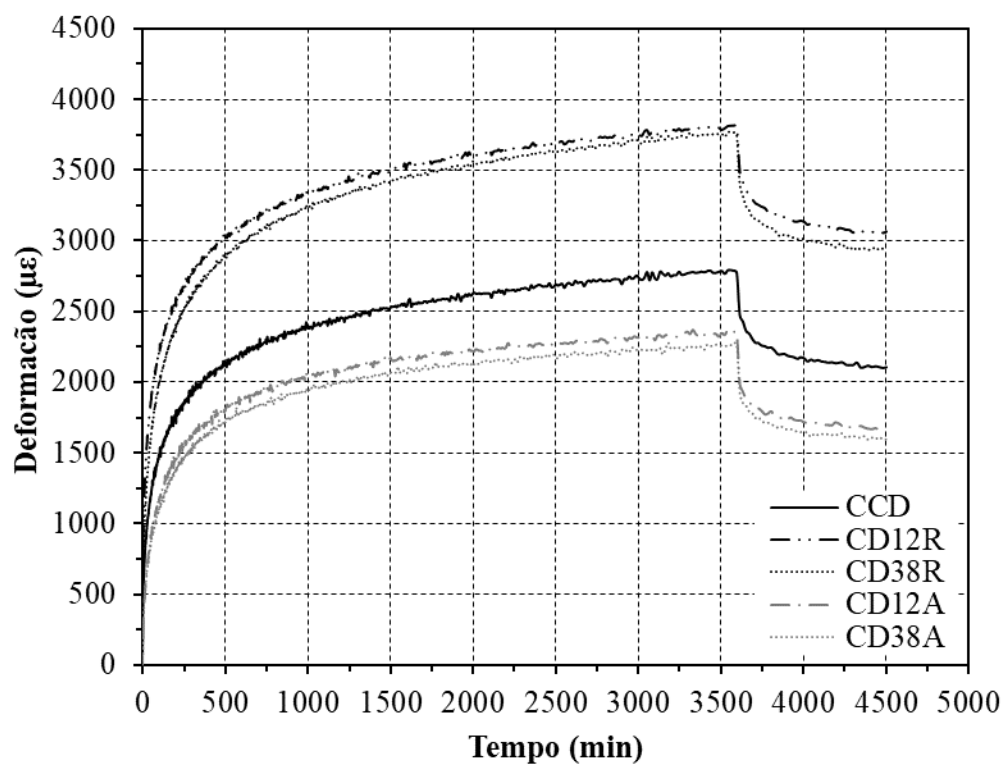


Figura 4-46 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória Norma DNIT

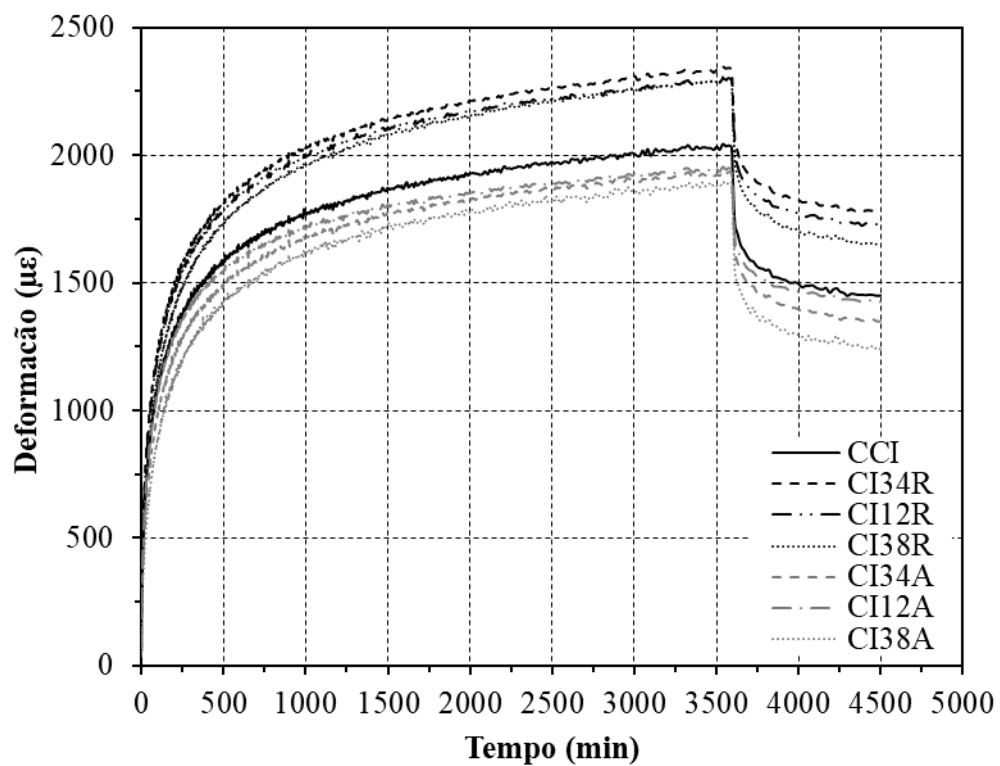


Figura 4-47 Resultados do ensaio de creep estático para compactação giratória Norma INVIAS

4.2.8.5. FADIGA

Os valores de K e n determinam a inclinação e o posicionamento das curvas de fadiga. Valores mais altos de K e menores valores absolutos de n indicam maior resistência à fadiga. Para as misturas DNIT, o controle MCD apresentou os maiores valores de K e n , indicando alta resistência à fadiga, especialmente em tensões mais baixas Tabela 4-39.

Tabela 4-39 Parâmetros das curvas de fadiga compactação Marshall

Mistura	K	n	R ²	Tensão de tração σ_6 (MPa)
DNIT				
MCD	173,79	-4,657	0,996	0,1558
MD12R	73,978	-4,026	0,9994	0,0941
MD38R	111,71	-3,72	1,00	0,0866
TERRAFIX 14				
MD12A	105,09	-3,787	0,9993	0,0890
MD38A	58,056	-4,088	0,9996	0,0919
INVIAS				
MCI	239,25	-4,38	0,9983	0,1490
MI34R	52,089	-4,044	0,9971	0,086
MI12R	45,78	-4,077	0,9976	0,0872
MI38R	137,67	-3,70	0,99	0,0904
TERRAFIX 14				
MI34A	197,09	-3,442	0,9995	0,0838
MI12A	275,56	-3,329	0,9974	0,0852
MI38A	733,39	-3,064	0,9983	0,9482

As misturas MD12R e MD38R (RCD) mostraram valores de K inferiores ao controle MCD e n menos negativos, sugerindo menor resistência à fadiga. A mistura MD38R, no entanto, apresentou um desempenho ligeiramente melhor que MD12R. As misturas com aditivo polimérico (MD12A e MD38A) apresentaram K e n intermediários entre o controle MCD e as misturas sem aditivo. MD12A mostrou uma leve melhora em comparação com MD12R, enquanto MD38A teve uma leve piora em comparação com MD38R.

A análise dos parâmetros K e n indica que, para as misturas DNIT Figura 4-48, o controle MCD apresentou a melhor resistência à fadiga. O uso de RCD sem aditivo (MD12R, MD38R) resultou em menor resistência à fadiga. O aditivo polimérico melhorou ligeiramente a resistência à fadiga em MD12A, mas não teve efeito significativo em MD38A. Para as misturas INVIAS, o controle MCI mostrou excelente resistência à fadiga, enquanto as misturas com RCD sem aditivo apresentaram desempenho inferior ao controle MCI. O aditivo polimérico melhorou significativamente a resistência à fadiga nas misturas MI34A, MI12A e MI38A.

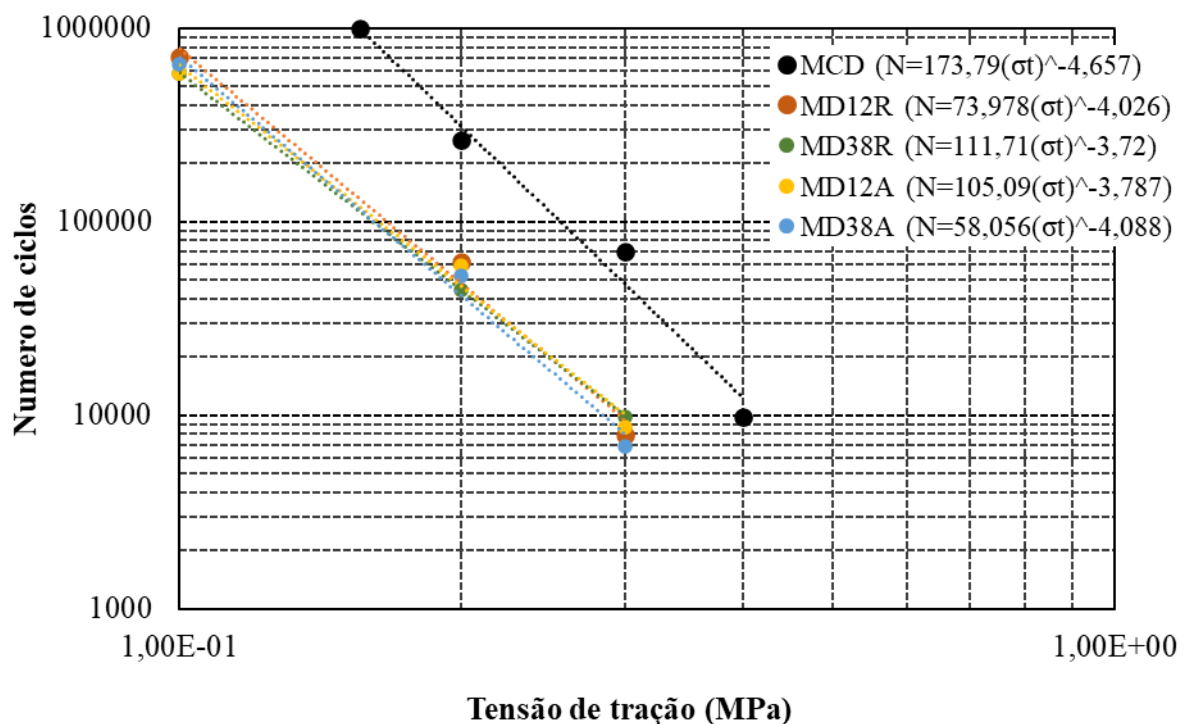


Figura 4-48 Curvas de fadiga para compactação Marshall DNIT

Para as misturas INVIAS Figura 4-49, o controle MCI apresentou os valores mais altos de K entre todas as misturas e um valor de n que sugere boa resistência à fadiga. As misturas MI34R, MI12R e MI38R (RCD) mostraram valores de K inferiores ao controle MCI, indicando resistência reduzida. Entre elas, MI38R apresentou o melhor desempenho. As misturas com aditivo polimérico apresentaram valores significativamente mais altos de K e menores valores absolutos de n em comparação com suas contrapartes sem aditivo. MI38A destacou-se com um K de 733,39, sugerindo uma melhora substancial na resistência à fadiga.

Em resumo, a adição de aditivo polimérico pode ser benéfica para melhorar a resistência à fadiga em misturas asfálticas com RCD, especialmente em misturas um tamanho de partícula maior. No entanto, para misturas com um tamanho de 12 mm, os benefícios do aditivo polimérico são menos evidentes, e a mistura de controle MCD continua a apresentar o melhor desempenho. Esta análise serve como um guia para a escolha de materiais e aditivos para otimizar a vida de fadiga de pavimentos asfálticos.

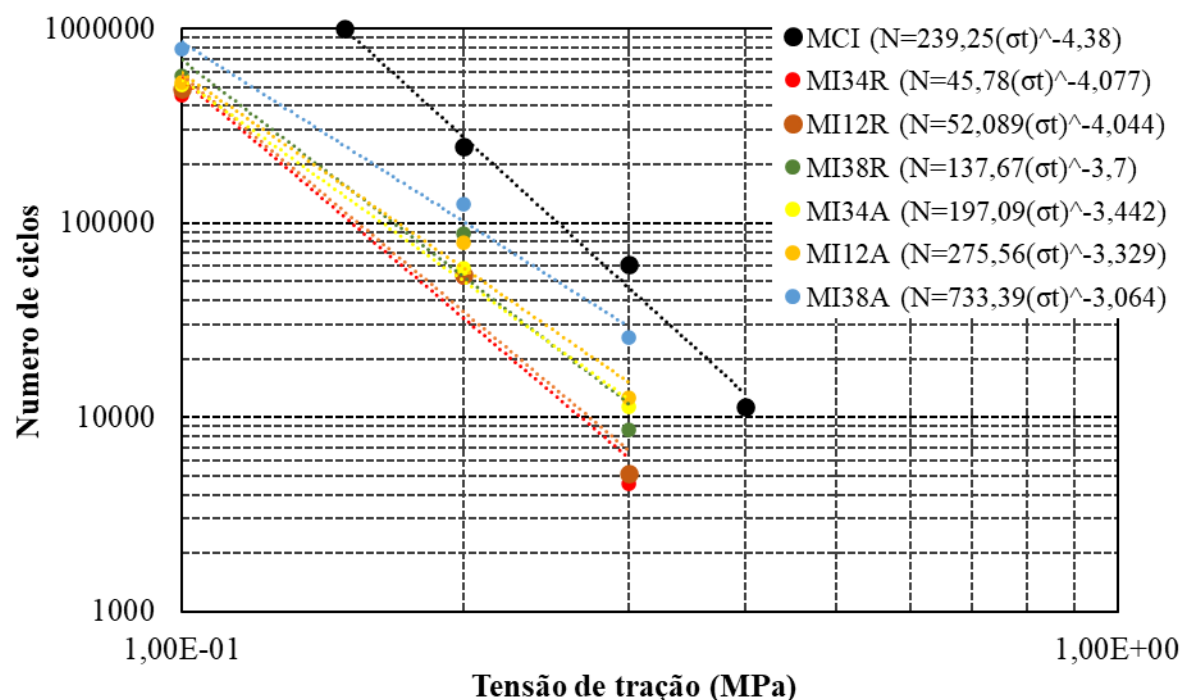


Figura 4-49 Curvas de fadiga para compactação Marshall INVIAS

Para as misturas DNIT de acordo com a Tabela 4-40, o controle CCD apresentou os maiores valores de K e n, indicando alta resistência à fadiga, especialmente em tensões mais baixas. As misturas CD12R e CD38R (RCD) mostraram valores de K inferiores ao controle CCD e n menos negativos, sugerindo menor resistência à fadiga. A mistura CD38R, no entanto, apresentou um desempenho ligeiramente melhor que CD12R. As misturas com aditivo polimérico (CD12A e CD38A) apresentaram K e n intermediários entre o controle CCD e as misturas sem aditivo. CD12A mostrou uma leve melhora em comparação com CD12R, enquanto CD38A teve uma leve piora em comparação com CD38R.

Tabela 4-40 Parâmetros das curvas de fadiga compactação giratório

Mistura	K	n	R²	Tensão de tração σ_6 (MPa)
DNIT				
CCD	572,33	-3,907	0,9954	0,1479
CD12R	52,18	-4,105	0,9998	0,0905
CD38R	68,01	-3,96	1,00	0,0886
TERRAFIX 14				
CD12A	198,66	-3,512	0,9997	0,0882
CD38A	221,41	-3,525	0,9992	0,0919
INVIAS				
CCI	654,81	-3,848	0,99	0,1488
CI34R	181,9	-3,591	0,9988	0,0908
CI12R	180,58	-3,599	0,9923	0,0911
CI38R	181,22	-3,59	0,99	0,0907
TERRAFIX 14				
CI34A	748,66	-3,096	0,9996	0,0978
CI12A	534,39	-3,193	0,9994	0,0944
CI38A	570,84	-3,197	0,9995	0,0967

A análise dos parâmetros K e n indica que, para as misturas DNIT Figura 4-50, o controle CCD apresentou a melhor resistência à fadiga. O uso de RCD sem aditivo (CD12R, CD38R) resultou em menor resistência à fadiga. O aditivo polimérico melhorou ligeiramente a resistência à fadiga em CD12A, mas não teve efeito significativo em CD38A. Para as misturas INVIAS, o controle CCI mostrou excelente resistência à fadiga, enquanto as misturas com RCD sem aditivo apresentaram desempenho inferior ao controle CCI. O aditivo polimérico melhorou significativamente a resistência à fadiga nas misturas CI34A, CI12A e CI38A.

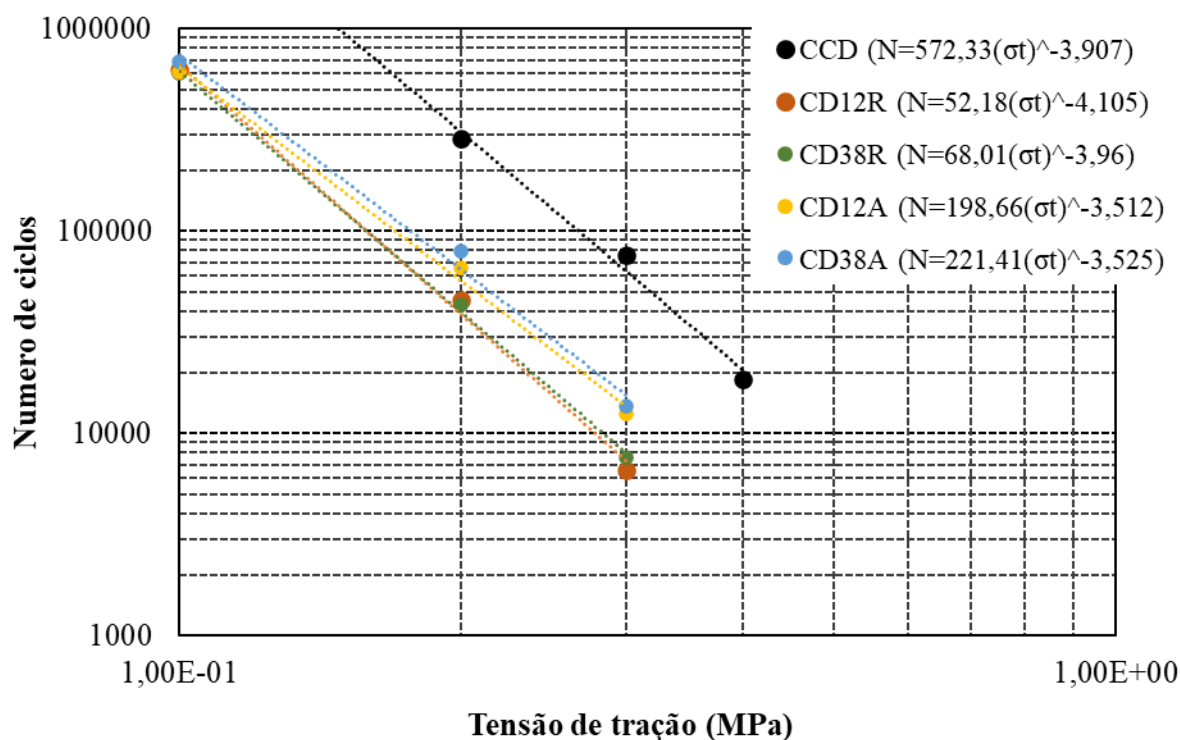


Figura 4-50 Curvas de fadiga para compactação giratório DNIT

Para as misturas INVIAS Figura 4-51, o controle CCI apresentou os valores mais altos de K entre todas as misturas e um valor de n que sugere boa resistência à fadiga. As misturas CI34R, CI12R e CI38R (RCD) mostraram valores de K inferiores ao controle CCI, indicando resistência reduzida. Entre elas, CI38R apresentou o melhor desempenho. As misturas com aditivo polimérico apresentaram valores significativamente mais altos de K e menores valores absolutos de n, em comparação com suas contrapartes sem aditivo. CI38A destacou-se com um K de 570,84, sugerindo uma melhora substancial na resistência à fadiga.

Ao comparar os resultados dos ensaios de fadiga das misturas asfálticas compactadas pelos métodos Marshall e Giratória, observam-se diferenças significativas nos parâmetros K e n, bem como no desempenho global das misturas. Para as misturas normatizadas pelo DNIT, o controle CCD (compactação giratória) apresentou valores de K e n muito semelhantes aos do controle MCD (compactação Marshall), indicando alta resistência à fadiga em ambos os métodos. No entanto, as misturas CD12R e CD38R, contendo RCD, tiveram um desempenho ligeiramente inferior em comparação com as misturas MD12R e MD38R. Isso sugere que a compactação giratória pode ter uma influência menos favorável sobre misturas contendo RCD.

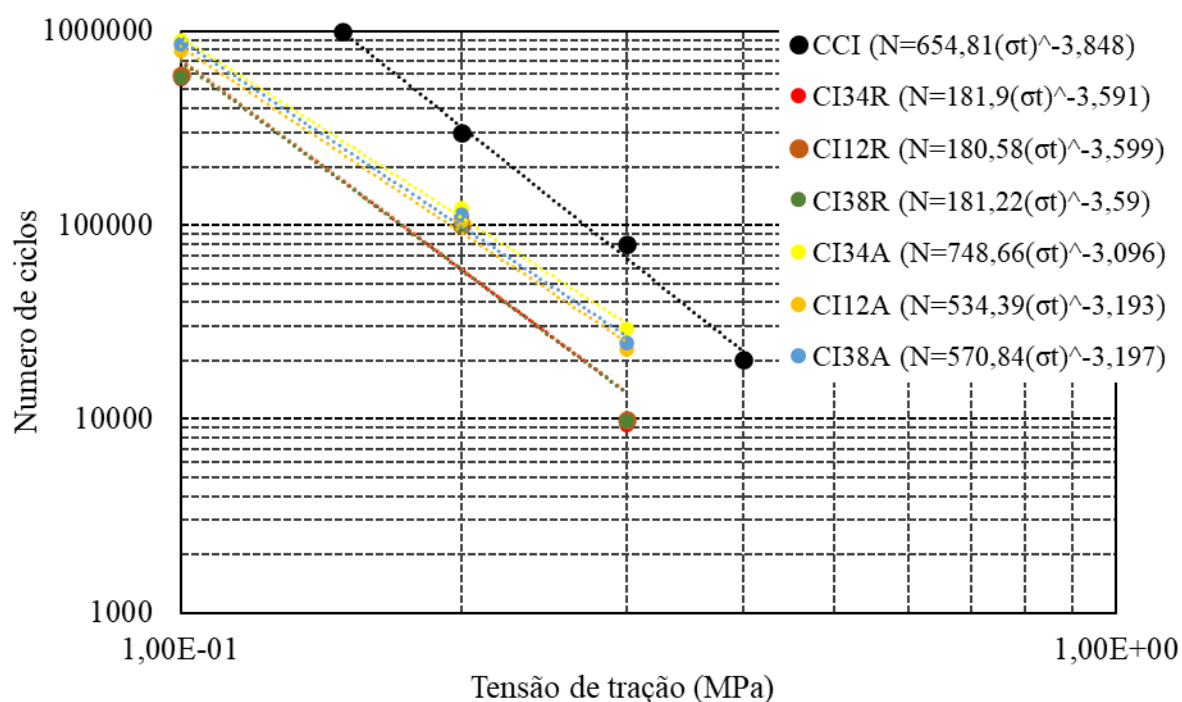


Figura 4-51 Curvas de fadiga para compactação giratório INVIAS

Por outro lado, as misturas com aditivo polimérico (CI12A e CI38A) sob compactação giratória mostraram uma melhora menor em comparação com suas contrapartes Marshall (MD12A e MD38A). A diferença nos parâmetros K e n sugere que a compactação giratória pode não potencializar tanto os benefícios do aditivo polimérico quanto a compactação Marshall. Para as misturas normatizadas pelo INVIAS, o controle CCI (compactação giratória) apresentou valores de K e n superiores ao controle MCI (compactação Marshall), indicando uma resistência à fadiga ligeiramente melhor com a compactação giratória. As misturas CI34R, CI12R e CI38R, contendo RCD, também mostraram uma tendência similar, com a compactação giratória resultando em melhores parâmetros K e n, em comparação com as misturas Marshall.

Além disso, as misturas com aditivo polimérico (CI34A, CI12A e CI38A) apresentaram uma melhora significativa nos parâmetros K e n sob compactação giratória em comparação com suas contrapartes Marshall. A mistura CI38A, em particular, destacou-se com um K muito alto, sugerindo uma resistência à fadiga significativamente melhorada.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, foram conduzidos ensaios laboratoriais detalhados com o objetivo de avaliar a viabilidade de utilizar RCD como substituto parcial ou total dos agregados tradicionais em misturas asfálticas, utilizando o aditivo polimérico TERRAFIX 14 para a melhoria das propriedades mecânicas. O estudo incluiu ensaios de caracterização física, química e mecânica, além de testes específicos para avaliar a influência do aditivo no desempenho das misturas.

Os ensaios realizados demonstraram que o uso de RCD como substituto parcial dos agregados graúdos nas frações de 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Os resultados indicam que o RCD não tratado tende a reduzir essas propriedades devido à sua composição heterogênea, presença de microfraturas, argamassa aderida e maior porosidade e absorção de água. Entretanto, o tratamento do RCD com o aditivo polimérico melhora substancialmente essas características.

A aplicação do aditivo polimérico nos RCD resultou em um aumento da densidade dos agregados, redução da porosidade e diminuição da absorção de água, o que consequentemente aumentou a resistência ao desgaste e a resistência de 10% de finos. Tais melhorias foram especialmente evidentes nos ensaios Marshall, de módulo resiliente, resistência à tração, creep estático e resistência à fadiga. As misturas contendo RCD tratados com o aditivo polimérico apresentaram desempenho superior em comparação com as misturas contendo apenas RCD e aquelas com agregados tradicionais, demonstrando maior estabilidade.

Adicionalmente, os resultados obtidos estão fortemente alinhados com a qualidade do RCD utilizado, proveniente de uma pedreira que segue procedimentos rigorosos de seleção e processamento, conforme as normas NBR 15116 e Resolução nº 307 (CONAMA, 2002). Assim, as conclusões deste estudo são específicas para o tipo de RCD utilizado, e os resultados podem variar com RCDs de diferentes origens e processos de tratamento. A análise detalhada do desempenho mecânico das misturas asfálticas com RCD tratados com o aditivo polimérico confirmou que a adição do aditivo é eficaz em melhorar as propriedades mecânicas das misturas, tornando-as uma alternativa viável e sustentável aos agregados tradicionais na construção de pavimentos.

Para os objetivos de analisar a caracterização do ligante asfáltico por meio de ensaios convencionais, conforme as especificações técnicas nacionais, e analisar a caracterização reológica do ligante asfáltico para compreender melhor suas propriedades e comportamento. Os ensaios convencionais de caracterização e a análise reológica do ligante asfáltico confirmaram que as propriedades do ligante atendem às especificações técnicas. Embora o aditivo polimérico tenha sido utilizado para modificar o RCD e não o ligante asfáltico, os resultados mostraram que esta modificação não comprometeu a aderência entre o ligante e o RCD. A boa aderência observada entre o ligante e o RCD tratado com o aditivo polimérico contribuiu significativamente para a estabilidade das misturas, assegurando um desempenho mecânico adequado.

Para o objetivo de estabelecer o processo mais eficiente para a adição de aditivo polimérico em RCD, foi desenvolvido um método inovador baseado na metodologia de Leite (2001). O processo envolveu a imersão do RCD em uma solução com concentração de 2% do aditivo por volume. Inicialmente, a amostra de RCD foi seca e resfriada, sendo posteriormente submersa na solução, com monitoramento contínuo da absorção de massa ao longo de 24 horas. A absorção foi calculada em intervalos regulares, demonstrando que a solução de 2% apresentou as melhores prestações. Este método inovador para misturas asfálticas assegurou uma distribuição uniforme do aditivo no RCD, resultando em melhorias significativas nas propriedades físicas do material. Especificamente, as melhorias nas propriedades físicas incluíram aumento na densidade, redução da porosidade e melhor aderência ao ligante asfáltico. Essas melhorias foram fundamentais para os resultados positivos observados no comportamento mecânico das misturas asfálticas, contribuindo para a estabilidade e resistência das misturas. A adoção deste método não só garantiu a eficiência na adição do aditivo polimérico, mas também proporcionou uma base sólida para futuras aplicações de RCD em misturas asfálticas, maximizando o desempenho e a sustentabilidade dos materiais utilizados na pavimentação.

Para o objetivo de determinar o teor ótimo de projeto utilizando compactadores Marshall e giratório para misturas de controle, foi empregada a metodologia Marshall para a dosificação das misturas. A partir dos valores volumétricos obtidos, foi possível determinar o número de giros necessários para a compactação giratória, mantendo o conteúdo ótimo de ligante e o volume de vazios. Os resultados indicaram que a adição de RCD sem tratamento tende a aumentar o Vv nas misturas. No entanto, o tratamento com o aditivo polimérico reduz este

efeito, melhorando a compactação e a distribuição do ligante asfáltico. As misturas modificadas com o aditivo polimérico apresentaram teores ótimos de asfalto ligeiramente inferiores em comparação com as misturas sem o aditivo. Isso sugere que o aditivo polimérico melhora a aderência e o preenchimento dos vazios com betume, diminuindo a necessidade de um maior teor de asfalto para alcançar uma mistura adequada. A análise volumétrica mostrou que as misturas com aditivo polimérico apresentaram valores de V_v mais baixos e valores de RBV mais altos em comparação com suas contrapartes não modificadas, confirmando a eficácia do aditivo em melhorar a compactação e a durabilidade das misturas asfálticas.

Em relação à energia de compactação das misturas, observou-se que as misturas contendo RCD sem tratamento requerem um maior número de giros no compactador giratório para alcançar a densidade desejada. Este aumento no número de giros indica uma maior demanda de energia para compactar a mistura de maneira eficiente. Por outro lado, as misturas contendo RCD tratado com o aditivo polimérico necessitaram de um menor número de giros para alcançar a mesma densidade, demonstrando uma melhoria na eficiência do processo de compactação. Isso se deve ao fato de que o tratamento com o aditivo polimérico resulta em uma melhor distribuição do ligante asfáltico e uma redução na porosidade do RCD, facilitando a compactação e resultando em uma mistura mais densa e homogênea com menor esforço.

Para o objetivo foi avaliar o desempenho das misturas asfálticas em diversas propriedades de engenharia, incluindo estabilidade Marshall, relação estabilidade/fluência, RTI, DUI, creep estático, MR e fadiga por tração direta uniaxial cíclica. Os resultados indicam que o desempenho das misturas asfálticas foi significativamente influenciado pelo uso do aditivo polimérico e pela incorporação de RCD. As misturas com aditivo polimérico apresentaram melhorias substanciais em diversas propriedades de engenharia. Houve um aumento significativo na estabilidade Marshall, na relação estabilidade/fluência, RTI, RTc e RRT. Isso demonstra que o aditivo polimérico é eficaz em aumentar a coesão interna e a resistência à umidade das misturas. Por outro lado, as misturas contendo RCD sem o aditivo polimérico mostraram uma redução nas propriedades mecânicas, atribuída à maior porosidade e menor aderência entre os componentes. Entretanto, a introdução do aditivo polimérico nas misturas com RCD compensou essas deficiências, resultando em misturas com desempenho comparável ou superior às misturas de controle.

A compactação giratória demonstrou ser mais eficiente do que a compactação Marshall na preservação da integridade dos agregados e na obtenção de misturas mais homogêneas. As misturas compactadas pelo método giratório apresentaram melhores resultados em RTI, RTc e RRT, especialmente quando combinadas com o uso do aditivo polimérico. Esses resultados indicam que a aplicação de métodos de compactação adequados, juntamente com a incorporação de aditivos, é crucial para otimizar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas, resultando em maior desempenho e durabilidade dos pavimentos.

O objetivo examinar a composição química do RCD para estabelecer sua influência nos resultados do comportamento das misturas asfálticas. A análise química do RCD identificou oxigênio, silício e cálcio como principais componentes, típicos de materiais de construção, que não afetam negativamente o desempenho das misturas asfálticas. Elementos menores como alumínio, magnésio e ferro, provenientes de argilas e aditivos no cimento e cerâmicas, podem acelerar o envelhecimento das misturas. A análise por DRX confirmou a presença de quartzo e carbonato de cálcio, que melhoram a aderência entre agregados e asfalto.

O uso do aditivo polimérico nos agregados RCD mostrou melhorias significativas, aumentando a densidade, reduzindo a porosidade e diminuindo a absorção de água, resultando em materiais mais robustos e resistentes ao desgaste. A análise por MEV destacou que o aditivo conferiu maior integridade estrutural às partículas de RCD, indicando melhor coesão e durabilidade. Esses achados sugerem que o aditivo polimérico melhora significativamente a durabilidade das misturas asfálticas e pode reduzir o consumo de asfalto, apoiando a viabilidade do uso de RCD tratados em misturas asfálticas.

O objetivo comparar o comportamento das misturas asfálticas com e sem adição de RCD (com e sem aditivo polimérico) com as misturas asfálticas densas produzidas com CAP 50/70 no Brasil, conforme a literatura existente. A compactação giratória demonstrou superioridade em termos de estabilidade, RTI, RTc e RRT, principalmente quando combinada com o aditivo polimérico. A compactação giratória preserva melhor a integridade dos agregados, resultando em misturas mais densas e resistentes.

As misturas com aditivo polimérico exibiram melhor resistência ao creep estático, aproximando seu desempenho ao das misturas de controle e, em alguns casos, superando-o. A recuperação elástica superior nas misturas com aditivo indicou uma maior capacidade de

retorno à forma original após cargas cíclicas. As misturas com aditivo polimérico apresentaram uma melhoria significativa na resistência à fadiga. Misturas contendo RCD sem aditivo polimérico tendem a ter menor resistência à fadiga devido à maior porosidade e menor coesão interna. No entanto, a adição do aditivo polimérico melhorou consideravelmente a resistência à fadiga das misturas com RCD, tornando-as comparáveis ou superiores às misturas de controle.

Por último o objetivo, desenvolver um catálogo detalhando a morfologia das partículas de RCD, visando apoiar modelos em futuras investigações, além de analisar se a variação na morfologia observada em escaneamento de partículas pode indicar degradação sofrida pelas partículas nos processos de lavagem, peneiração e adição de aditivo. O catálogo desenvolvido detalhando a morfologia das partículas de RCD oferece uma ferramenta valiosa para futuras pesquisas e simulações. A análise morfológica por meio de escaneamento 3D e processamento digital revelou perdas significativas de volume e área de superfície durante os processos de lavagem e peneiramento, o que altera a granulometria das misturas asfálticas e resulta em um maior consumo de ligante asfáltico. A criação deste catálogo, incluindo informações geométricas detalhadas, permitirá a geração de modelos virtuais 3D e o desenvolvimento de modelos de Monte Carlo para prever o comportamento das misturas asfálticas, otimizando a composição das misturas e melhorando a eficiência dos materiais reciclados.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para ampliar o conhecimento sobre a eficácia dos aditivos na melhoria da aderência e durabilidade dos agregados reciclados, recomenda-se que futuros estudos considerem diferentes porcentagens e métodos de dosificação de aditivos, além do aditivo polimérico utilizado nesta pesquisa. Avaliar suas interações químicas com diversos tipos de ligantes asfálticos é essencial. Ensaios em diferentes condições ambientais, incluindo variações de temperatura e umidade, são fundamentais para entender como esses fatores influenciam a aderência e a durabilidade dos agregados tratados. Adicionalmente, é importante realizar ensaios de fadiga e módulo resiliente sob diferentes frequências e temperaturas para obter uma compreensão mais detalhada do comportamento mecânico das misturas. Estender o tempo de imersão em água e avaliar os efeitos a longo prazo do descolamento do filme asfáltico sob diferentes condições de tráfego e clima também são áreas promissoras para investigação.

Embora a MEV tenha sido utilizada, outras técnicas de caracterização avançadas, como a espectroscopia de infravermelho (FTIR), podem fornecer uma análise ainda mais detalhada da interface entre o ligante e o agregado, ajudando a compreender melhor os mecanismos de adesão. Ensaios específicos para caracterizar o aditivo utilizado e a implementação de testes em condições reais de campo são cruciais para validar os resultados laboratoriais, considerando o desempenho dos pavimentos ao longo do tempo sob diferentes cargas de tráfego. Além disso, a avaliação do impacto ambiental dos aditivos utilizados, incluindo sua produção, aplicação e possíveis efeitos a longo prazo no meio ambiente, é necessária para assegurar a sustentabilidade das tecnologias aplicadas.

Dado que a heterogeneidade nas misturas com RCD influencia a precisão dos resultados, recomenda-se a caracterização detalhada das propriedades físicas e químicas dos RCD utilizados. Isso inclui uma análise mais profunda da porosidade, rugosidade e distribuição granulométrica dos RCD, bem como seu impacto na absorção do ligante asfáltico e no comportamento durante a compactação. Métodos para reduzir a variabilidade nas propriedades dos RCD, como tratamentos superficiais ou a seleção de fontes mais homogêneas de RCD, também devem ser investigados. A eficácia desses métodos pode proporcionar misturas de asfalto mais consistentes e previsíveis. Estudos comparativos entre diferentes tipos de aditivos podem determinar quais oferecem as melhores melhorias em termos de aderência, preenchimento de vazios e propriedades mecânicas. Testes a longo prazo para avaliar a

durabilidade e o desempenho das misturas modificadas com RCD e aditivos em condições reais de serviço forneceriam dados valiosos para a implementação prática dessas tecnologias.

É crucial que futuros estudos incluam testes com diferentes tipos de RCD, provenientes de diversas fontes e processos de produção, já que o RCD utilizado nesta pesquisa provém de uma pedreira com um processo de tratamento muito rigoroso e específico. Avaliar a eficácia do aditivo polimérico em RCD de outras origens permitirá uma compreensão mais ampla de sua aplicabilidade e potencial de melhoria. Além disso, explorar o uso de outros aditivos poliméricos em combinação com diferentes tipos de RCD poderá revelar novas formas de otimizar a durabilidade e as propriedades mecânicas das misturas asfálticas recicladas. Essas recomendações podem contribuir para um entendimento mais abrangente e detalhado sobre a aplicação de aditivos em agregados reciclados, promovendo avanços na tecnologia de pavimentação e na sustentabilidade da construção civil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (1996). Standard Specifications for Highway Bridges. Washington, USA, 16^a ed., 423 p.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (2008). M 145-91: Standard Specifications for Classification of Soil and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. Washington, USA, 9 p.

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (2012). Highway Subcommittee on Bridges and Structures. Design Specifications. Section: Abutments, Piers, and Walls. Washington, USA, 1661 p.

AASHTO – AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, USA, 9 ed., 1661 p.

ABASS, B. J., & ALBAYATI, A. H. (2020). Investigation of sustainable asphalt mixtures incorporating recycled materials. Cogent Engineering, 7(1), 1718822.

ABBASPOUR, A., TANYU, B. F., CETIN, B., & BROWN, M. C. (2016). Stockpiling recycled concrete aggregate: changes in physical properties and leachate characteristics due to carbonation and aging. In Geo-Chicago 2016 (pp. 73-82).

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2001). NBR NM 51: Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 13 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004). NBR 10004: Resíduos Sólidos- Classificação. Rio de Janeiro, 71 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004). NBR 15116: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil – Utilização em Pavimentação e Preparo de Concreto sem Função Estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 12 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009). NBR NM 26: Agregados: Amostragem. Rio de Janeiro, Brasil, 10 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2016b). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, Brasil, 12 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2018). NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, Brasil, 12 p.

ADAMS, M. P. (2012). Alkali-silica reaction in concrete containing recycled concrete aggregates. An Abstract of the Thesis. Oregon State University.

AFFONSO, F. J. A. (2005). Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para uso em camadas drenantes de aterros sanitários [Tese de Mestrado em

Ciências em Engenharia Civil]. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AGARWAL, A., RAMANA, G.V., DATTA, M., SONI, N.K. & SATYAKAM, R. (2023). Pullout Behaviour of Polymeric Strips Embedded in Mixed Recycled Aggregate (MRA) from Construction & Demolition (C&D) Waste – Effect of Type of Fill and Compaction, Geotextiles and Geomembranes, 51 (3): 405–417.

AGRELA, F., BARBUDO, A., RAMÍREZ, A., AYUSO, J., CARVAJAL, M. D., & JIMÉNEZ, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.003>

AHIMOUGHADAM, F., SANCHEZ, L. F. M., DE SOUZA, D. J., ANDRADE, G. P., NOËL, M., & DEMERS, A. (2020). Influence of the Recycled Concrete Aggregate Features on the Behavior of Eco-Efficient Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020252. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003323](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003323)

AKHTAR, A., & SARMAH, A. K. (2018). Generation of construction and demolition waste and its utilization in recycled construction materials: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, 186, 262-281.

ALBAYATI, A. H., & AL-MOSAWE, H. M. (2018). Influence of recycled materials on the performance of asphalt mixtures. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1-8.

ALBAYATI, A., WANG, Y., WANG, Y., & HAYNES, J. (2018). A sustainable pavement concrete using warm mix asphalt and hydrated lime treated recycled concrete aggregates. *Sustainable Materials and Technologies*, 18, e00081.

AL-BAYATI, H. K. A. & TIGHE, S. L. (2019). Effect of Recycled Concrete Aggregate on Rutting and Stiffness Characteristics of Asphalt Mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (10): 04019219. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002810](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002810)

AL-BAYATI, H. K. A., DAS, P. K., TIGHE, S. L., & BAAJ, H. (2016b). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 112, 284-298.

AL-BAYATI, H. K. A., TIGHE, S. L., BAAJ, H., & AL-BAYATI, H. K. A. (2016a). Effect of different treatment methods on the interfacial transition zone microstructure to coarse recycled concrete aggregate. In *Green Technol. Geotechnical Mater. Eng. Session*, 2016 Conference of the Transportation Association of Canada Toronto. Retrieved from https://www.tac-atc.ca/sites/default/files/conf_papers/al-bayati_.pdf.

AL-BAYATI, I. A., & AL-MASHAQBEH, I. A. (2016). Thermal treatment of recycled concrete aggregates: Effect on properties and durability. *Construction and Building Materials*, 124, 697-705.

ALBERTE, E. P. V., & HANDRO, J. B. (2021). Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. *Ambiente Construído*, 21, 305-320.

ALELVAN, G. M. (2022). Análise mecânica e microestrutural de rejeito de minério de ouro estabilizado com solução polimérica.

ALI, A. F., & ABD ALI, Z. T. (2020). Sustainable Use of Concrete Demolition Waste as Reactive Material in Permeable Barrier for Remediation of Groundwater: Batch and Continuous Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(7), 04020048. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001714](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001714)

ALJASSAR, A. H., AL-FADALA, K. B., & ALI, M. A. (2005). Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: A case study in Kuwait. *Waste Management*, 25(1), 71-77.

AL-QADI, I. L., & CHIU, C. (2012). Performance evaluation of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(2), 101-112.

ÁLVAREZ, D. A., AENLLE, A. A., TENZA-ABRIL, A. J., & IVORRA, S. (2019). Influence of partial coarse fraction substitution of natural aggregate by recycled concrete aggregate in hot asphalt mixtures. *Sustainability*, 12(1), 250. <https://doi.org/10.3390/su12010250>

AMORIM, E. (2013). Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT. Tese (Doutorado), Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, D.F., Brasil, 151p.

AMORIM, E. F., RIBEIRO, L. F. M., & DA COSTA, J. S. Evaluación del módulo de resiliencia en mezclas de suelo y RCD aplicado en obras de pavimentación.

ÂNGULO, S. C., & FIGUEIREDO, A. D. (2011). Concreto com agregados reciclados. ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa.

ARABANI, M., & AZARHOOSH, A. R. (2012). The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 35, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>

ARABANI, M., & AZARHOOSH, M. (2012). Influence of recycled concrete aggregates on the performance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 108-117.

ARABANI, M., & MOGHADAS NEJAD, F. (2013). Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 531–539.

ARABANI, M., AZARHOOSH, A. R., & HAMED, G. H. (2013a). Laboratory evaluation of recycled concrete aggregate for asphalt mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(4), 374–383.

ARABANI, M., MIRABDOLAZIMI, S. M., & FERDOWSI, B. (2012). Modeling the fatigue behaviors of asphalt mixtures. *Scientia Iranica*, 19(3), 341-345.

ARABANI, M., NEJAD, F. M., & AZARHOOSH, A. R. (2013). Laboratory evaluation of recycled waste concrete into asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 14(6), 531-539.

ARABANI, M., SHAFABAKHSH, G., & AZARHOOSH, M. (2013). The effect of recycled concrete aggregate on the mechanical properties of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(4), 510-517.

ARBABPOUR BIDGOLI, M., NADERI, K., & MOGHADAS NEJAD, F. (2019). Effect of Filler Type on Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using Mechanical and Thermodynamic Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(4), 04019024. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002648](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002648)

ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., BO, M. W., & SIVAKUGAN, N. (2012). Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(7), 796-811.

ARULRAJAH, A., PIRATHEEPAN, J., DISFANI, M. M., BO, M. W., & ASCE, M. (2013). Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 1077-1088. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)

ASLAM, M. S., & SINGH, B. (2020). Recycled concrete aggregate in asphalt mixes: A review of performance and environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104918.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. (2003). UNE EN 13139: Áridos para morteros. Madrid.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004a). NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação: Procedimentos. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2004b). NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos. Rio de Janeiro.

ASSUNÇÃO, H. C. DE S. (2021). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará. Recuperado de <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/67598>

AZAM, A., & CAMERON, D. (2013). Laboratory evaluation of recycled concrete aggregate and recycled clay masonry blends in pavement applications. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2(1), 328-346.

AZARHOOSH, A., MOGHADAS NEJAD, F., & SADEGHINEJAD, M. (2021). Waste plastic bottles for recycled concrete aggregate treatment: Structural and performance improvements. *Construction and Building Materials*, 272, 121863.

AZARHOOSH, A., KOOHMISHI, M., & MOGHADAS NEJAD, F. (2021). Evaluation of fatigue cracking of hot-mix asphalts containing recycled concrete aggregates coated with waste plastic bottles using thermodynamic parameters. *Journal of Adhesion*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1875826>

BAI, M., XIAO, J., GAO, Y., & DING, T. (2023). Pore structure characteristics and mechanical property of engineered cementitious composites (ECC) incorporating recycled sand. *Construction and Building Materials*, 408, 133721.

BALLISTA, L. P. Z., & MACHADO JUNIOR, E. F. (2000). Concreto com agregado reciclado modificado com látex estireno-butadieno: determinação da condição ótima de cura [CD-ROM]. Memoerias.

BARKSDALE, R. D. (1992). Evaluation of Effects of Aggregates on Rutting and Fatigue of Asphalt. Technical Report FHWA-GA-92-8812. Atlanta, Georgia: Georgia Department of Transportation.

BARRETO, T. M., REPSOLD, L. L., & CASAGRANDE, M. D. T. (2018). Melhoramento de solos arenosos com polímeros. 19º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, Bahia, Brasil.

BASTIDAS MARTÍNEZ, J. G., SÁNCHEZ LOSADA, J. M., & RONDÓN QUINTANA, H. A. (2022a). Evaluación de una mezcla asfáltica con incorporación de agregados reciclados de concreto tratados superficialmente con una solución química de sulfato de magnesio. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 32(1), 9-23.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., REYES-LIZCANO, F. A., & RONDÓN-QUINTANA, H. A. (2022b). Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 725-741.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., & CONTRERAS-ZARTHA, L. (2021). Evaluation of hot mix asphalt with incorporation of recycled concrete aggregates. *Revista UIS Ingenierías*, 20(2), 75-84.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., & ZAFRA-MEJÍA, C. A. (2022c). Estudio de mezclas asfálticas calientes con incorporación de agregados reciclados de concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1), 65-76.

BASTIDAS-MARTÍNEZ, J. G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., & ZAFRA-MEJÍA, C. A. (2019). Study of hot mix asphalt containing recycled concrete aggregates that were mechanically treated with a Los Ángeles machine. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCET)*, 10(10), 226-243.

BEJA, I. A., MOTTA, R., & BERNUCCI, L. B. (2020). Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. *Construction and Building Materials*, 258, Article 119520. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119520>

BELL, N. (2003). WASTE MINIMISATION AND RESOURCE RECOVERY: Some new strategies. *Environment Design Guide*, 1-7.

BHASIN, A., & SUNDERESAN, V. (2018). Performance analysis of asphalt mixtures incorporating recycled concrete aggregates. *Transportation Research Record*, 2672(16), 1-11.

BHUSAL, S., & WEN, H. (2013). Evaluating recycled concrete aggregate as hot mix asphalt aggregate. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2(1), 252-265.

BHUSAL, S., LI, X., & WEN, H. (2011). Evaluation of effects of recycled concrete aggregate on volumetrics of hot-mix asphalt. *Transportation Research Record*, 2205(3), 36–39.

BIANCHINI, G., IGOR, R., IGOR, M., ALOJZ, Z., CLAUDIO, N., GIAN MARCO, S., ... & BROMBIN, V. (2020, May). Construction and demolition waste in Macedonia, a study financed by the know-how exchange program SAMCODE promoted by the Central European Initiative. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 10568).

BRANDÓN BASDEDIÓS, Ó. (2016). Estudio de la sensibilidad al agua de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con residuos de construcción y demolición: proyecto técnico.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. (2006). BS 8500-2: Concrete: Complementary British Standard to BS EN 206-1: Specification for constituent materials and concrete. London.

BROOKS, R. M., & CETIN, M. (2012). *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 12, 375.

BROWN, E. R., KANDHAL, P. S., & ROBERTS, F. L. (2011). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*. Lanham: NAPA Research and Education Foundation.

BUILDING CONTRACTORS SOCIETY OF JAPAN. (1977). Proposed standard for the use of recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Tokyo.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. (1998). BRE Digest 433: Recycled aggregates. London.

BUTLER, L., WEST, J. S., & TIGHE, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1037–1049. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.004>

ÇAKIR, Ö. (2014). Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives. *Construction and Building Materials*, 68, 17-25.

CANTERO, B., BRAVO, M., DE BRITO, J., SÁEZ DEL BOSQUE, I.F. & MEDINA, C. (2020). Mechanical Behaviour of Structural Concrete with Ground Recycled Concrete Cement and Mixed Recycled Aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 275: 122913.

CARDOSO, R., SILVA, R., BRITO, V. R., & DHIR, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, 49, 131-145. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.021>

CEDEX. (2014). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Catálogo de residuos utilizables en construcción.

CENTENO, P. E. M., SALAZAR, R. A. R., URREGO, Y. F. S., JARAMILLO, N. A. Á., & ARJONA, S. D. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción. *Informador Técnico*, 78(2), 121-127.

CHAKRADHARA RAO, M., BHATTACHARYYA, S. K., & BARAI, S. V. (2011). Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Materials and*

Structures/Materiaux et Constructions, 44(1), 205–220. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9620-x>

CHAKRAVARTHI, S., RAJKUMAR, G., & SHANKAR, S. (2023). Evaluation of cold emulsified bitumen mixes using recycled concrete aggregates as a base course. *Revista de la construcción*, 22(2), 523-537.

CHEN, H., WANG, Y., & XU, M. (2011a). Effects of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt concrete. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 29(2), 72-80.

CHEN, M., & WONG, Y. D. (2013). Porous asphalt mixture with 100% recycled concrete aggregate. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 695-703.

CHEN, M., LIN, J., & WU, S. (2011b). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909–3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>

CHEN, M., LIN, J., & WU, S. (2011c). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25, 3909–3914.

CHEN, R., WEI, W., JIN, L., XU, Y., WANATOWSKI, D., LI, B., YAN, Z., & PAN, Z. (2019). Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. *Construction and Building Materials*, 218, 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>

CHEN, W., YANG, W., LIU, J., & XU, Y. (2021a). Calcium hydroxide soaking of recycled concrete aggregates: Effects on density and adhesion. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124872.

CHEN, W., ZHANG, L., ZHANG, J., & LI, J. (2011d). Acidic treatment of recycled concrete aggregates: Influence on porosity and water absorption. *Construction and Building Materials*, 25(10), 4013-4020.

CHEN, W., ZHANG, L., ZHANG, J., & LI, J. (2011e). Organic silicone resin treatment of recycled concrete aggregates: Performance improvements. *Materials and Structures*, 44(5), 1059-1068.

CHEN, Y., HOU, Y., JI, X., ZOU, H., DAI, C., & CHEN, B. (2021b). Characterization of surface mechanical properties of various aggregates from micro scale using AFM. *Construction and Building Materials*, 286, 122847. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122847>

CHENG, G. Y. (2005). Experimental Study on the Basic Performance of Recycled Aggregate Concrete with Different Displacement Ratio. *Chinese Concrete*, 11, 67-70.

CHIDOZIE, M. N., POH YAP, S., CHUEN ONN, C., WAH YUEN, C., & IBRAHIM, H. A. (2020). Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications: A review. *Construction and Building Materials*, 235, 117444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117444>

CHO, Y. H., YUN, T., KIM, I. T., & CHOI, N. R. (2011). The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(3), 473–478. <https://doi.org/10.1007/s12205-011-1155-3>

CHURCH, J., KANNAN, H., AN, J., LEE, W. H., SANTRA, S., & NAM, B. H. (2017). Recycled concrete aggregate coated with quaternary ammonium compounds for water disinfection. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 543-552.

COCHRAN, K. M., & TOWNSEND, T. G. (2010). Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach. *Waste management*, 30(11), 2247-2254.

COMISIÓN BRUNDTLAND. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro Futuro Común. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de <http://www.undocuments.net/wced-ocf.htm>

CONSEJO MUNDIAL EMPRESARIAL PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. (2009). Iniciativa por la Sostenibilidad del Cemento. *Reciclando Concreto* (42) [En línea, 15/11/2022]. Disponible en: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://docs.wbcsd.org/2009/06/e-CSI_Recycling_Concrete_Spanish.pdf](https://docs.wbcsd.org/2009/06/e-CSI_Recycling_Concrete_Spanish.pdf)

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. (2002). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. *Diário Oficial da União*, seção I, p. 17.241. Brasília, 30 de agosto de 2002.

CONTRERAS, M., TEIXEIRA, S. R., LUCAS, M. C., LIMA, L. C. N., CARDOSO, D. S. L., DA SILVA, G. A. C., ... & DOS SANTOS, A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Construction and Building Materials*, 123, 594-600.

CUNHA, N. A. (2007). Resíduos da construção civil: Análise de usinas de reciclagem [Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Civil Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas]. Campinas.

CUPO-PAGANO, M., D'ANDREA, A., GIAVARINI, C., & MARRO, C. (1994, Novembro). Use of building demolition waste for asphalt mixes: first results. Em *Energy, Environment and Technological Innovation, Proceedings of the III International Congress of Energy, Environment and Technological Innovation* (pp. 203-208).

DAMASCENO, I. I. R., LIMA, L. R. F., MORAES, R. F., FERREIRA, M. DE P., & OLIVEIRA, M. H. (2023). Influência da substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto nas propriedades mecânicas do concreto. *ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO*, 8(00), 1–7.

DE JUAN, M. S., & GUTIÉRREZ, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23, 872–877.

DE SOUZA, N. A. B., CASAGRANDE, M. D. T., DE ARAÚJO CARNEIRO, A., & DE VASCONCELOS, N. F. Estabilização de um Solo Arenoso Utilizando um Copolímero.

DENG, Z. C., SHE, X. J., LIU, H., & WEI, Z. X. (2010). Road performance of recycled concrete aggregate applied to asphalt pavement. *Journal of Beijing University of Technology*, 36(11), 1471–1476.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. (2002). DIN 4226-100 E: Aggregates for concrete and mortar: Part 100: Recycled aggregates. Berlin.

DHAKAL, R. P., & NEUPANE, D. (2021). Evaluating the impact of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt mixtures. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 14(4), 326-335.

DHIR, R. K., NEWLANDS, M. D., & HEWLETT, P. C. (2019). Performance of asphalt mixtures with recycled concrete aggregate. *Journal of Asphalt Paving Technology*, 88(3), 222-237.

DI BENEDETTO, H. y DE LA ROCHE, C. (2005). State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures. Report RILEM No. 17 Bituminous Binders and Mixes: State of the Art and Interlaboratory Test on Mechanical Behavior and Mix Design. L. Francken (ed.). E y FN Spon, 97-123.

DIAS, L. E. R. (2023). Destinação final de resíduos sólidos: uma síntese de evidências sobre opções de política.

DILBAS, H., ÇAKIR, Ö., & YILDIRIM, H. (2020). An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method. *Construction and Building Materials*, 252, 119118.

EBBERTS, A. R. (1942). Oxidation of Asphalt in Thin Films. *Industrial & Engineering Chemistry*, 34 (9): 1048–1051. <https://doi.org/10.1021/ie50393a007>

EISA, M. (2018). Evaluation of hot mix asphalt made with recycled aggregates from demolition waste (RADW) coated with bitumen emulsion. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 1-12.

EKTAS, S., & KARACASU, M. (2012). Use of recycled concrete in hot mix asphalt and an ANN model for prediction of resilient modulus. *Ekoloji*, 21(83), 53–60.

EL-TAHAN, M., KASSEM, E., & LIANG, R. (2018). Characterization of hot mix asphalt with recycled concrete aggregates for local roads. *Construction and Building Materials*, 189, 635-643.

ESA, M. R., HALOG, A., & RIGAMONTI, L. (2017). Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19, 1144-1154.

EUROSTAT, S. E. (2018). Waste statistics.

FALESCHINI, F., ZANINI, M. A., BRUNELLI, K., PASETTO, M., & PELLEGRINO, C. (2016). Sustainable management and supply of natural and recycled aggregates in a developing context. *Waste Management*, 49, 12-22.

FARRAJI, H., ZAMAN, N. Q., VAKILI, M., & FARAJI, H. (2016). Overpopulation and sustainable waste management. *International Journal of Sustainable Economies Management (IJSEM)*, 5(3), 13–36. <https://doi.org/10.4018 / IJSEM.2016070102>.

FATEMI, M., & IMANINASAB, M. (2016a). Evaluation of the mechanical properties of asphalt concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 114, 670-678.

FATEMI, S., & IMANINASAB, R. (2016b). Moisture sensitivity of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 121, 418-425.

FHWA. (n.d.). Asphalt Pavement Design Guide. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov>

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (2017). Standard specifications for construction of roads and bridges. Flórida.

FRANCO, F. A. C. P., & MOTTA, L. D. (2020). Execução de estudos e pesquisa para elaboração de método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos. Manual de utilização do programa MeDiNa.

GALAN, I., SILVA, H., PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2020). Asphalt mixtures with different waste materials as alternative aggregates: A comparative laboratory study. *Construction and Building Materials*, 232, 117223.

GALAN, J. J., SILVA, L. M., PÉREZ, I., & PASANDÍN, A. R.. (2019). Mechanical behavior of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates from construction and demolition waste: a design of experiments approach. *Sustainability*, 11(13), 3730.

GEDIK, A. (2020). A review on the evaluation of the potential utilization of construction and demolition waste in hot mix asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 161(May), 104956. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104956>.

GHISELLINI, P., RIPA, M., & ULGIATI, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618-643.

GHORBANI, B., ARULRAJAH, A., NARSILIO, G., HORPIBULSUK, S., & BO, M. W. (2021). Thermal and mechanical properties of demolition wastes in geothermal pavements by experimental and machine learning techniques. *Construction and Building Materials*, 280, 122499.

GIRI, J. P., PANDA, M., & SAHOO, U. C. (2018a). Performance of bituminous mixes containing treated recycled concrete aggregates and modified by waste polyethylene. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(8), 04018184.

GIRI, J. P., PANDA, M., & SAHOO, U. C. (2018b). Use of waste polyethylene for modification of bituminous paving mixes containing recycled concrete aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 21(2), 289-309.

GIRI, S. K., & KUMAR, S. (2020). Impact of recycled concrete aggregate on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 238, 117735.

- GIRI, S. K., SASMAL, S., & KUMAR, S. (2018c). Impact of recycled concrete aggregate on asphalt mixture properties. *Journal of Construction and Building Materials*, 163, 174-182.
- GIRI, S. K., SASMAL, S., & KUMAR, S. (2018d). Performance analysis of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregate. *Materials & Structures*, 51(2), 74-85.
- GIRI, S., GHOSH, S., & DEY, A. (2020). Use of plastic waste as a coating for recycled concrete aggregates: Performance improvements. *Construction and Building Materials*, 245, 118382.
- GOH, S. H., & YOU, Z. (2012). Evaluation of the dynamic modulus of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Journal of the Transportation Research Board*, 2319, 72-80.
- GÓMEZ MEIJIDE, B. (2015). Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío.
- GÓMEZ, B. (2015). Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío.
- GÓMEZ-MEIJIDE, B., PÉREZ, I., & PASANDÍN, A. R. (2016). Recycled construction and demolition waste in Cold Asphalt Mixtures: Evolutionary properties. *Journal of Cleaner Production*, 112, 588–598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.038>.
- GÓMEZ-MEIJIDE, B., PÉREZ, I., AIREY, G., & THOM, N. (2015). Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 77, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.045>.
- GOPALAM, J., GIRI, J. P., & PANDA, M. (2020a). Effect of filler on bituminous base layer containing recycled concrete aggregates. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9(3), 239-248.
- GOPALAM, J., GIRI, J. P., & PANDA, M. (2020b). Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1299-1305.
- GRUBBA, D. C. R. P. (2009). Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- GUL, W. A. (2008). Effect of recycled cement concrete content on rutting behaviour of asphalt concrete. Doctoral Thesis, Middle East Technical University, Ankara.
- GUL, W. A., & GULER, M. (2014). Rutting susceptibility of asphalt concrete with recycled concrete aggregate using revised Marshall procedure. *Construction and Building Materials*, 55, 341–349.
- GUO, B., & GUO, J. J. (2011). Patterns of technological learning within the knowledge systems of industrial clusters in emerging economies: Evidence from China. *Technovation*, 31(2–3), 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2010.10.006>.

HAIDER, I., CETIN, B., KAYA, Z., HATİPOĞLU, M., CETIN, A., & AHMET, H. A. (2014). Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers. *Geo-Congress 2014 American. Soc. Civil Eng.*

HAIDER, M. M., & KHAN, M. I. (2017). Assessment of recycled concrete aggregate for use in asphalt mixtures. *Journal of Construction and Building Materials*, 145, 420-429.

HAO, Y. M., CHEN, F., & ZHONG, X. L. (2018). Research on performance of recycled aggregate asphalt mixture. *Northern Communications*, 01, 76-79. <https://doi.org/10.15996/j.cnki.bfjt.2018.01.021>

HARRIGAN, M. E., BENSON, F. J., & MEARS, R. C. (1989). Evaluation of the use of large aggregate in asphalt mixtures for pavement applications. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*.

HE, Z., TANG, S. W., ZHAO, G. S. & CHEN, E. (2016). Comparison of three and one dimensional attacks of freeze-thaw and carbonation for concrete samples. *Construction and Building Materials*, 127: 596-606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.069>

HEERALAL, S., RAVI SHANKAR, A. U., & PAUL, K. K. (2009). Laboratory performance evaluation of bituminous concrete mixtures containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2937-2942.

HEITZMAN, M. A. (2005). Development of new film thickness models for hot mix asphalt. Ph.D. dissertation, Civil Engineering Program, Iowa State Univ.

HENDRIKS, C. F., & PIETERSEN, H. S. (1998). Concrete: Durable, but also sustainable?. In *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, London, UK on 11-12 November 1998*.

HEROLD, M., ROBERTS, D., NORONHA, V. & SMADI, O. (2008). Imaging spectrometry and asphalt road surveys. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16 (2): 153-166. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.07.001>

HESAMI, S., ROSHANI, H., HAMED, G. H. & AZARHOOSH, A. (2013). Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 47: 935-941. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.079>

HOU, L., WANG, X., & WU, S. (2014). Silane coupling agent for recycled concrete aggregates: Effects on adhesion and water absorption. *Materials and Structures*, 47(5), 743-754.

HOU, T., WU, S., LI, Y., & XU, H. (2014). Evaluation of the performance of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement with different rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 64, 83-88.

HOU, Y., JI, X., LI, J., & LI, X. (2018). Adhesion between asphalt and recycled concrete aggregate and its impact on the properties of asphalt mixture. *Materials*, 11(12), 2528. <https://doi.org/10.3390/ma11122528>

HUANG, J., LI, W., MA, Y., JIN, M., LI, Z., MANZANO, H., & LIU, J. (2023). Multiscale deterioration of recycled aggregate gel network via solar irradiation: Reaction molecular dynamics and experiments. *Journal of Cleaner Production*, 139084.

HUANG, Q., QIAN, Z., HU, J., & YU, J. (2021). Investigation on the properties of aggregate-mastic interfacial transition zones (ITZs) in asphalt mixture containing recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 269, Article 121257.

IMMELMAN, D. W. (2013). The influence of percentage replacement on the aggregate and concrete properties from commercially produced coarse recycled concrete aggregate (Tese de doutorado, Stellenbosch University).

JAIN, S., & SINGH, B. (2022). Recycled concrete aggregate incorporated cold bituminous emulsion mixture: Mechanical, environmental and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135026.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. (2006). JIS A 5021: Recycled aggregate for concrete-Class L. Tokyo.

JAYAWICKRAMA, K., & AL-AHMADI, M. (2019). Recycled concrete aggregate in asphalt mixtures: Implications for performance and sustainability. *Materials*, 12(5), 751.

JITSANGIAM, P., TAI, P. C., & TAN, Y. (2021). Thermomechanical treatment of recycled concrete aggregates: Effects on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 269, 121425.

JUNKES, V.H. (2023). Produção de Blocos de Concreto com Adição de Resíduos da Construção Civil e Industria Química. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 93 p.

KANDHAL, P., & PARKER, F. (1998). Aggregate Tests Related to Asphalt Concrete Performance in Pavements. National Cooperative Highway Research Program. Washington, D.C.: TRB, National Research Council.

KAPOOR, K., & BOHROO, A. U. R. (2019). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Sustainable Engineering: Proceedings of EGRWSE 2018*, 337-347.

KAREEM, A. I., HAMID, N., & ASADI, H. (2019). Performance of hot-mix asphalt produced with double coated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 205, 425-433.

KAREEM, A. I., NIKRAZ, H. & ASADI, H. (2018a). Evaluation of the double coated recycled concrete aggregates for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 172: 544–552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.158>

KAREEM, A. I., NIKRAZ, H., & ASADI, H. (2019a). Application of double-coated recycled concrete aggregates for hot-mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019036. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002716](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002716).

KAREEM, A. I., NIKRAZ, H., & ASADI, H. (2020). Characterization of Asphalt Mixtures Containing Double-Coated Recycled Concrete Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(2), 04019359. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003028](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003028).

KAREEM, S., HADIWARDAYA, B., HAMID, R., & ASADI, H. (2018b). Cement slurry and double coating technology for recycled concrete aggregates: Performance evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 189, 488-497.

KAREEM, S., HADIWARDAYA, B., HAMID, R., & ASADI, H. (2019). Dual coating technology for recycled concrete aggregates: Application and performance. *Materials and Structures*, 52(1), 26.

KAREEM, S., HADIWARDAYA, B., HAMID, R., & ASADI, H. (2020). Double coating technology in recycled concrete aggregates: Evaluation and improvement. *Construction and Building Materials*, 262, 120331.

KAREM, A. I., NIKRAZ, H., & ASADI, H. (2019b). Performance of hot-mix asphalt produced with double coated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 205, 425–433.

KAVUSSI, A., HASSANI, A., KAZEMIAN, F., & TAGHIPOOR, M. (2019). Laboratory evaluation of treated recycled concrete aggregate in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 12(1), 26-32.

KAZEMIAN, F., ROOHOLAMINI, H., & HASSANI, A. (2019). Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 209, 690-700.

KHATRI, A., & KHEDHER, N. B. (2020). Performance evaluation of asphalt mixtures with different levels of recycled concrete aggregate. *Journal of Materials Science*, 55(22), 10832-10847.

KIRTHIKA, S. K., SINGH, S. K., & CHOURASIA, A. (2020). Performance of Recycled Fine-Aggregate Concrete Using Novel Mix-Proportioning Method. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(8), 04020216. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003289](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003289).

KONATÉ, Y., ZIYANI, L., DONY, A., POIRIER, J. E., KONIN, A., & CHATEAU, X. (2022). Effects of surfactants on the formulation, cohesion build-up and moisture resistance of virgin and recycled cold bituminous mixtures and relationship to emulsion breakup.

LAM, C., & JEFFERIS, S. A. (2018). Introduction to polymers and polymers fluids. In *Polymer support fluids in civil engineering* (pp. 29-53). ICE Publishing. ISBN: 978-0-7277-5786-9.

LEE, C. H., DU, J. C., & SHEN, D. H. (2012). Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Constr. Build. Mater.*, 28, 66e71.

LEE, C. H., DU, J. C., & SHEN, D. H. (2012). Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 28, 66-71.

LEE, C. H., DU, J. C., & SHEN, D. H. (2012). Effects of slag cement on the performance of recycled concrete aggregates. *Materials and Structures*, 45(1), 69-76.

- LEE, M., KIM, S. & KIM, K. W. (2012). Estimation of Optimum Compaction Temperature for PMA and WMA Mixtures by Volumetric Property Evaluation. *Journal of Testing and Evaluation*, 40 (3): [página]. <https://doi.org/10.1520/JTE103943>
- LEITE, M. B. (2001). Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.
- LEVY, S. M., & HELENE, P. R. (1997). Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos. São Paulo, 145.
- LEVY, S. M., & HELENE, P. R. (2002). Evolução histórica da utilização do concreto como material de construção.
- LI, J., XIAO, F., ZHANG, L., & AMIRKHANIAN, S. N. (2019). Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1182-1206. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.
- LIANG, C., PAN, B., MA, Z., HE, Z., & DUAN, Z. (2020). Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. *Cement and concrete composites*, 105, 103446.
- LIE, S., WU, S., & ZHANG, Y. (2019). Performance of recycled concrete aggregates treated with organic silicone resin. *Construction and Building Materials*, 205, 587-595.
- LIMA, J. A. R. (2000, Novembro). Aggregate. Obtained from C&D Waste. Recycling. In Proposition of specification for use in concrete. CIB SYMPOSIUM IN CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT: THEORY INTO PRACTICE.
- LIMA, N. D. (2023). Comportamento geotécnico de mistura RCC-Solo arenoso sob diferentes graus de compactação.
- LIU, A. A. (2020). Experimental study on performance of asphalt mixture strengthened by coarse recycled concrete aggregate. Doctoral thesis, Yangzhou University.
- LIU, W. (2020). Nano-SiO₂ treatment effects on recycled concrete aggregates: Performance and durability. *Construction and Building Materials*, 261, 120053.
- LIU, W. (2020). Thermomechanical treatment of recycled aggregates: An investigation into process and performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020062.
- LIU, X., ZHANG, Z., & CHEN, S. (2022). Effects of recycled concrete aggregate on the properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 325, 126574.
- LOPES, I. (2018). Estudo dos resíduos de construção e demolição e suas aplicações na produção de blocos de concreto.
- LOVATO, P. S. (2007). Verificação dos parâmetros de controle dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

LU, C., CHEN, J., GU, C., WANG, J., CAI, Y., & ZHANG, T. (2021). Resilient and permanent deformation behaviors of construction and demolition wastes in unbound pavement base and subbase applications. *Transportation Geotechnics*, 28, 100541.

LUTCHMINARIAN, R., & MOSTAFA, M. M. H. (2023). Advancing asphalt mixtures in south africa: uncovering suitable non-conventional materials and design methodologies/procedures. *Southern African Transport Conference*.

MA, J., SUN, D., PANG, Q., SUN, G., HU, M., & LU, T. (2019). Potential of recycled concrete aggregate pretreated with waste cooking oil residue for hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 221, 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.256>

MA, Y., HUANG, Z., ZHANG, L., & LI, J. (2019). Waste cooking oil as a treatment for recycled concrete aggregates: Effects on asphalt mixture performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(6), 04019070.

MÁLIA, M., DE BRITO, J., PINHEIRO, M. D., & BRAVO, M. (2013). Construction and demolition waste indicators. *Waste Management & Research*, 31(3), 241-255.

MARASTEANU, M., & NAIR, K. (2020). Performance of asphalt mixtures with recycled concrete aggregate: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(1), 72-81.

MARTINEZ-ARGUELLES, G., COLL, M. D., FUENTES, L. G., SÁNCHEZ-COTTE, E., RONDÓN-QUINTANA, H. A., PACHECO, C. A., YEPES-MARTÍNEZ, J. & LAGARES-ESPINOZA, R. (2019). Characterization of Recycled Concrete Aggregate as Potential Replacement of Natural Aggregate in Asphalt Pavement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 471 (10): 102045. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/10/102045>

MARTINHO, F. C. G., DE OLIVEIRA, L. P., & FERREIRA, S. R. (2018). Influence of recycled aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 190, 128-134.

MCGENNIS, R. A. (1995). Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis. Final Report No. FHWA-SA-95-003. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

MELBOUCI, B. (2009). Compaction and shearing behavior study of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2723-2730.

MENEGAKI, M., & DAMIGOS, D. (2018). A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>.

MICHIGAN DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. (2012). Standard specifications for construction. Michigan.

MIKHAILENKO, P., KOUCHAKI, S., & WISTUBA, M. P. (2020). Durability of recycled concrete aggregates in hot-mix asphalt: Water sensitivity and freeze-thaw resistance. *Construction and Building Materials*, 245, 118443.

MIKHAILENKO, P., PIAO, Z., OLIVEIRA, J. R. M., KRINGOS, N., & SCARPAS, T. (2020). Influence of recycled concrete aggregates on the dynamic modulus of asphalt concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020108.

MIKHAILENKO, P., RAFIQ KAKAR, M., PIAO, Z., & POULIKAKOS, L. (2020). Incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) fractions in semi-dense asphalt (SDA) pavements: volumetrics, durability and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 264, Article 120166.

MILLS-BEALE, J., & YOU, Z. (2010). Evaluating the effect of recycled concrete aggregates on the performance of asphalt concrete. *Transportation Research Record*, 2191, 77-85.

MILLS-BEALE, J., & YOU, Z. (2010). The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(3), 230-235.

MITCHELL, J. K DE OLIVEIRA MARQUES, G. L. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS A QUENTE DOSADAS PELA METODOLOGIA MARSHALL E COMPACTADAS NO COMPACTADOR MARSHALL E NO CGS (COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE) PAULO ROBERTO BORGES., & SOGA, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.

MOGHADDAM, N., & RAHMAN, M. (2018). Effects of recycled concrete aggregates on the mechanical performance of asphalt mixtures. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 9(6), 54-63.

MOHAMMADINIA, A., ARULRAJAH, A., DISFANI, M. M., & DARMAWAN, S. (2019). Small-Strain Behavior of Cement-Stabilized Recycled Concrete Aggregate in Pavement Base Layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(5), 04019044. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002671](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002671).

MONU, B., YADAV, K., & VERMA, S. (2020). Sustainable approach for using recycled concrete aggregate in asphalt mixtures: A review. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120258.

MONU, E., ZHANG, J., & WANG, M. (2020). Influence of recycled concrete aggregates on the dynamic modulus of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(3), 230-241.

MORAFSA, S. H., SAESEI, A. H., GOHARI, O. M., & AFSHAR, M. J. H. (2017). An experimental investigation on applying the recycled aggregates obtained from oil contaminated concrete exposed to seawater as road unbound pavement materials. *Construction and building materials*, 157, 292-299.

MORALES, M. M. (2020). Economía circular y los residuos de construcción y demolición. Revisión sistemática de la literatura y mapeo científico. Universidad de Granada - Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Recuperado de archivo PDF.

MOSCHOPEDIS, S. E. & SPEIGHT, J. G. (1978). Influence of metal salts on bitumen oxidation. *Fuel Sciences Division, Alberta Research Council*, 57 (4): 235–240.

MOSSMANN, L. M. (2023). Substituição parcial de cimento Portland por resíduos de tijolos e carvão vegetal em formulações de argamassa.

MOTTER, J. C., PASANDÍN, A. R., PÉREZ, I., & PASANDIN, A. R. (2015). Performance of asphalt mixtures made with reclaimed concrete aggregates and crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 94, 512-519.

MOTTER, J. S., MIRANDA, L. F. R., & BERNUCCI, L. L. B. (2015). Performance of hot mix asphalt concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(11), 04015022. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001284](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001284)

MOTTER, J., REZENDE, L. R., OLIVEIRA, L. S., & DE REZENDE, L. R. (2015). Laboratory evaluation of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 96, 421-429.

MUNIZ DE FARIAS, M., QUIÑONES SINISTERRA, F., GÓMEZ JIMÉNEZ, A. M., RIBEIRO E SOUZA, M. V., & FARIAS FALCÃO, P. R. (2012). Influence of Asphalt Rubber on the Crushing of Recycled Aggregates Used in Dense HMA. In *Proceedings of Asphalt Rubber*, Munich.

MUNIZ DE FARIAS, M., QUIÑONEZ SINISTERRA, F., & RONDÓN QUINTANA, H. A. (2019). Behavior of a hot mix asphalt made with recycled concrete aggregate and crumb rubber. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 46(6), 544-551.

MUNIZ, M., FERNEY, D. F., SINISTERRA, Q., MARÍA, A., JIMÉNEZ, G., VINICIUS, M., PAULO, S. & FARIAS, R. (2012). Influence of asphalt rubber on the crushing of recycled aggregates used in dense HMA. *Proceedings of Asphalt Rubber*, Munich.

NANDKUMAR, N., & STOKOE, K. (2021). Recycled concrete aggregate in asphalt: A review of its effect on performance and durability. *Journal of Environmental Management*, 293, 112872.

NICOLAU, C. O., & BARBOSA, F. M. D. R. (2023). Análise do Comportamento do Solo com Adição de Resíduo de Construção e Demolição (RCD). *Research, Society and Development*, 12(7).

NWAKAIRE, C. M., YAP, S. P., YUEN, C. W., AHMAD, Z. A., & HAMID, N. (2020). Laboratory study on recycled concrete aggregate-based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing. *Journal of Cleaner Production*, 262, Article 121462.

NWAKAIRE, C. O., EZEOKONKWO, N. C., & OKORO, S. A. (2020). The effect of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 259, 119838.

OLSSON, J., & SUNDQUIST, E. (2019). The effect of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(5), 485-495.

ORGANISME IMPARTIAL DE CONTRÔLE DE PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION. (2016). *Prescriptions Techniques PTV 406: Granulats de debris de demolition et de construction recyclé*. Bruxelles.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. (1992). Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Recuperado de http://www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish/res_riodecl.shtml.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. (2005). Documento Final de la Cumbre Mundial 2005. Recuperado de http://www.un.org/spanish/summit2005/fact_sheet.html.

OSSA, A., GARCÍA, J. L., & BOTERO, E. (2016). Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*, 135, 379-386.

OSSA, A., GARCÍA, J. L., & BOTERO, E. (2016). Use of recycled concrete aggregates in hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 128, 173-180.

OSSA, A., GARCÍA, J. L., & BOTERO, E. (2016). Use of recycled construction and demolition waste aggregates in hot mix asphalt for road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 327–335.

PALMEIRA, E. M. (2018). Introdução aos polímeros. In *Geossintéticos em geotecnia e meio ambiente* (pp. 17-25). Oficina de Textos.

PAN, H., ZHANG, Y., & WANG, J. (2015). Microbial carbonate precipitation for recycled concrete aggregates: Performance enhancement. *Journal of Cleaner Production*, 95, 234-242.

PANDA, R. P., DAS, S. S., & SAHOO, P. K. (2016). An empirical method for estimating surface area of aggregates in hot mix asphalt. *J. Traffic Transp. Eng.*, 3(2), 127-136. <https://doi-org.ezproxy.umng.edu.co/10.1016/j.jtte.2015.10.007>.

PANDURANGAN, K., DAYANITHY, A., & PRAKASH, S. O. (2016). Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 120, 212-221.

PARANAVITHANA, S. & MOHAJERANI, A. (2006). Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 48: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.12.009>

PARANAVITHANA, S., & MOHAJERANI, A. (2006). Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 48(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.04.001>.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2013). Influence of thermal treatment on the performance of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 38, 759-767.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2013). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*, 43, 497-505.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2014). Bituminous emulsion treatment for enhancing the performance of recycled concrete aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, 140(2), 04013014.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2014). Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion. *Construction and Building Materials*, 55, 350–358.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2014). Moisture susceptibility and fatigue resistance of warm mix asphalt with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 52, 107-115.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2015). Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. *Construction and Building Materials*, 157, 26-33.

PASANDIN, A. R., & PEREZ, I. (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 74, 151-161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.033>.

PASANDÍN, A. R., & PÉREZ, I. (2015). Performance of hot-mix asphalt involving recycled concrete aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(4), 314-325.

PASANDÍN, A. R., GÓMEZ, I., & CASTILLO, A. (2018). Impact of recycled concrete aggregates on the performance of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 182, 745-755.

PASANDÍN, A. R., PÉREZ, I., CAAMAÑO, L., PÉREZ-BARGE, N., & GÓMEZ-MEIJIDE, B. (2018). Mechanical performance of hot-mix asphalt with recycled concrete aggregates: A case study. *Materials and Structures*, 51(5), 1-13.

PASANDÍN, A. R., PÉREZ, I., GÓMEZ-MEIJIDE, B., & PÉREZ-BARGE, N. (2015). The effect of hydrated lime on the bond between asphalt and recycled concrete aggregates. *Petroleum Science and Technology*, 33(10), 1141-1148.

PASANDÍN, A.R., & PÉREZ, I. (2020). Performance of hot-mix asphalt involving recycled concrete aggregates. *International Journal of Pavement Engineering*, 21 (9), pp. 1044-1056.

PATTO, A. L. D. B. (2006). Minimização de impactos ambientais com a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como agregados na fabricação de blocos de concreto.

PEDERNEIRAS, C. M., DURANTE, M. D. P., AMORIM, Ê. F., & FERREIRA, R. L. DA S. (2020). Incorporation of recycled aggregates from construction and demolition waste in paver blocks. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 13(4), 1–13. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952020000400005>.

PENG, C. J. (2017). Study on the performance of recycled coarse aggregate asphalt concrete. *South China University of Technology*.

PÉREZ PÉREZ, I., TOLEDANO, M., GALLEGO MEDINA, J., & TAIBO POSE, J. (2007). Propiedades mecánicas de mezclas bituminosas en caliente fabricadas con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición. *Materiales de Construcción*, 57(285), 17-29.

PÉREZ, I., & PASANDÍN, A. R. (2017). Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.162>.

PÉREZ, I., GALLEGÓ, J., TOLEDANO, M., & TAIBO, J. (2010). Asphalt mixtures with construction and demolition debris. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Transport*, 163, 165–174.

PEREZ, I., PASANDIN, A. R. & GALLEGÓ, J. (2012). Stripping in hot mix asphalt produced by aggregates from construction and demolition waste. *Waste Management & Research*, 30 (1): 3–11. <https://doi.org/10.1177/0734242X10375747>

PÉREZ, I., PASANDÍN, A. R., & MEDINA, L. (2007). Asphalt mixtures with construction and demolition debris. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, 160(3), 121–128.

PÉREZ, I., PASANDÍN, A. R., & MEDINA, L. (2012). Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials and Design*, 36, 840–846. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.058>.

PÉREZ, I., PASANDÍN, A. R., & MEDINA, L. (2012). Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. *Materials and Design*, 36, 840–846.

PÉREZ, I., TOLEDANO, M., GALLEGÓ, J. & TAIBO, J. (2007). Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris. *Materiales de Construcción*, 57 (285): 17–29. <https://doi.org/10.3989/mc.2007.v57.i285.36>

PICKIN, J., RANDELL, P., TRINH, J., & GRANT, B. (2018). National waste report 2018. Department of the Environment and Energy Blue Environment Pty Ltd.

PIETERSEN, H. S., & FRAAY, A. L. A. (1998, Junho). Performance of concrete with recycled aggregates.

PINTO, T. D. P., & PETRONI, L. (1986). Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas.

POMPONI, F., & MONCASTER, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of cleaner production*, 143, 710-718.

POON, C. S., & CHAN, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*, 20(8), 578-585.

POURTAHMASB, M., KHOSRAVI, H., & KHADEMI, M. (2015). The effect of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014277.

POURTAHMASB, S., & KARIM, M. R. (2014). Performance evaluation of stone mastic asphalt and hot mix asphalt mixtures incorporating recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 83, 187-194.

QASRAWI, H., & ASI, I. (2016). Effect of bitumen grade and plastic fines on properties of recycled aggregate concrete for pavement construction. *Construction and Building Materials*, 128, 287-297.

QASRAWI, H., & ASI, I. (2016). Performance of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates. *Journal of the Transportation Research Board*, 2545, 59-68.

QUEBAUD, M. (1996). Caractérisation des granulats recyclés, étude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats (Doctoral dissertation, Artois).

QUIÑONES SINISTERRA, F. (2014). Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas (Tese de Doutorado em Geotecnia). Universidade de Brasília.

RADEVIĆ, A., ĐUREKOVIĆ, A., ZAKIĆ, D., & MLADENović, G. (2017). Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 386–393. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.043>

RADEVIĆ, M., MILOVIĆ, J., & MLADENović, A. (2017). Mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregate. *Materials and Structures*, 50(2), 23-31.

RAFI, J., TAREFDER, R., & ZAMAN, M. (2013). Rutting performance of recycled concrete aggregate and reclaimed asphalt pavement based hot mix asphalt in Oklahoma. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(2), 154–159.

RAFI, M. M., QADIR, A. & SIDDIQUI, H. (2011). Experimental testing of hot mix asphalt mixture made of recycled aggregates. *Waste Management & Research*. <https://doi.org/10.1177/0734242X10370379>

RAHMAN, M. A., IMTEAZ, M., ARULRAJAH, A., & DISFANI, M. M. (2014). Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials. *Journal of Cleaner Production*, 66, 75-84.

RAMAN, J. V. M., & RAMASAMY, V. (2020). Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>.

RATCLIFFE, S. (2016). The use of crushed recycled concrete as an alternative concrete aggregate.

RAZZAQ, A. (2016). The effect of recycled concrete aggregate properties on the performance of asphalt mixes. *Journal of Cleaner Production*, 113, 499-508.

RAZZAQ, A. K. (2016). Possibility of utilizing recycled concrete aggregates in HMA mixture. *Kufa Journal of Engineering*, 7(3), 96-109.

REDA, M., ELSHIKH, M. Y., & DAWOOD, M. (2021). Selection of Sustainable Construction Method Using Analytical Hierarchy Process. *MEJ-Mansoura Engineering Journal*, 42(2), 1-9.

RILEM. (1994). TC 121-DRG: Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, 27(173), 557-559.

RONDÓN-QUINTANA, H. A., RUGE-CÁRDENAS, J. C., & FARIAS, M. M. D. (2019). Behavior of hot-mix asphalt containing blast furnace slag as aggregate: Evaluation by mass and volume substitution. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(2), 04018364.

ROYAL NETHERLANDS STANDARDIZATION INSTITUTE. (2005). NEN 5905: Dutch supplement to NEN-EN 12620 "Aggregates for concrete". Delft.

RYU, J. S. (2002). An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 54(1), 7–12.

SAA ZAMORANO, D. J. (2021). Análisis de la industria 4.0 en Latinoamérica y países desarrollados. Universidad Cooperativa de Colombia Facultad.

SAEED, A., HAMMONS, M. I., & REED, J. L. (2007). Comprehensive Evaluation, Design, and Construction Techniques for Airfield Recycled Concrete Aggregate as Unbound Base (No. 07-3263).

SAMANTA, B., & KUMAR, R. (2022). A study on the use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures: Performance and environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106321.

SANCHEZ-COTTE, E. H., FUENTES, L., MARTINEZ-ARGUELLES, G., RONDÓN-QUINTANA, H. A., WALUBITA, L. F. & CANTERO-DURANGO, J. M. (2020). Influence of recycled concrete aggregates from different sources in hot mix asphalt design. *Construction and Building Materials*, 259: 120427. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120427>

SANCHEZ-COTTE, E., POMARES, V., & OLIVARES, L. (2020). Quality assessment of recycled concrete aggregate for asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 239, 117798.

SANDLER, K., & SWINGLE, P. (2006). OSWER Innovations Pilot: Building Deconstruction and Reuse. Recuperado de <http://www.epa.gov/oswer/>.

SANTOS, J. (2022). Estudo da viabilidade do uso dos resíduos de construção civil (RCC) no sistema de cobertura dos aterros sanitários: uma revisão bibliográfica.

SANTOS, R.P. & TUBINO, R. (2021). Potential Evaluation of the Use of Construction and Demolition Waste (CDW) in the Recovery of Degraded Soils by Mining in Brazil. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 12: 200060.

SARAVANAKUMAR, P., ABHIRAM, K., & MANOJ, B. (2016). Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*, 111, 611-617.

SHAYAN, A., & XU, A. (2003). Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, 100(5), 371-380.

SHEN, D., & DU, J. (2004). Evaluation of building materials recycling on HMA permanent deformation. *Construction and Building Materials*, 18, 391–397.

SHEN, D., & DU, J. (2005). Application of gray relational analysis to evaluate HMA with reclaimed building materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 400-406.

SHEN, D., & DU, J. (2005). Damage-induced modeling of asphalt mixtures through computational micromechanics and cohesive zone fracture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 477-484.

- SHEN, D., & YU, X. (2006). Effects of aggregate size on rutting in asphalt concrete pavements. *Journal of Transportation Engineering*, EISA, M.S. (2018). Evaluation of hot mix asphalt made with recycled aggregates from demolition waste (RADW) coated with bitumen emulsion. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3 (1), pp. 1-12.
- SIKA AUSTRALIA PTY. (2010). SikaTite-BE acrylic based bitumen waterproofing membrane. Perth, Australia: Sika Australia Pty.
- SILVA, H. M. R. D. (2009). Performance assessment of warm-mix recycled asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2095(1), 135–143.
- SILVA, N. A. B. D. S. (2020). Desempenho de um compósito solo-polímero para aplicabilidade em obras geotécnicas e de pavimentação.
- SILVA, R. V., DE BRITO, J., & DHIR, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY, & AIOSANRA. (2013). South African Pavement Engineering Manual. LTD.
- SOUZA, MARCUS VINÍCIUS RIBEIRO E. (2015). Comportamento mecânico de um agregado reciclado como base de pavimento flexível a partir de um modelo físico. Tese de doutorado, Universidade de Brasília.
- SPAETH, V., & TEGGUER, A. D. (2013). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 143-152.
- STRIEDER, H. L., SCHREINERT, G. G., MATUELLA, M. F., FEDRIGO, W., DELONGUI, L., RUTZEN, D., & NÚÑEZ, W. P. (2023). Mechanical behavior of construction and demolition waste as pavement materials: Influence of mix composition and compaction conditions. *Construction and Building Materials*, 133698.
- SUI, H., JIN, L., & ZHANG, Z. (2012). Influence of thermal treatment on the properties of recycled concrete aggregates. *Materials and Structures*, 45(1), 73-85.
- SUOCHENG, D., TONG, K. W., & YUPING, W. (2001). Municipal solid waste management in China: using commercial management to solve a growing problem. *Utilities policy*, 10(1), 7-11.
- SURESH, M., PAL, M., & SARKAR, D. (2021). *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, 142-156.
- TAHMOORIAN, F., & SAMALI, B. (2018). Laboratory investigations on the utilization of RCA in asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (6), pp. 627-638.
- TAHMOORIAN, F., SAMALI, B., & MIRZABABAEI, M. (2017). Evaluation of mechanical properties of recycled material for utilization in asphalt mixtures. *Applied Sciences*, 7(8), 763. <https://doi.org/10.3390/app7080763>

TAHMOORIAN, F., ZANGANEH, H., & NEJAD, F. M. (2020). Laboratory evaluation of moisture sensitivity of asphalt concrete mixtures containing different percentages of RAP. *Construction and Building Materials*, 252, 119097.

TAIBO, J., PÉREZ, I., GALLEGU, J., & TOLEDANO, M. (2010). Asphalt mixtures with construction and demolition debris. *Proceedings of the ICE - Transport*, 163(4), 165–174. <https://doi.org/10.1680/tran.2010.163.4.165>

TAM, C. M., TAM, V. W. Y., & LE, K. N. (2007). Acid treatment of recycled concrete aggregates: Effects on properties and performance. *Construction and Building Materials*, 21(8), 1630-1639.

TAM, V. W. Y., SOOMRO, M., & EVANGELISTA, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregates in concrete applications (2000-2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>

TAM, V. W., BUTERA, A., LE, K. N., & LI, W. (2020). Utilising CO2 technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 250, 118903.

TAM, V. W., SOOMRO, M., & EVANGELISTA, A. C. J. (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*, 172, 272-292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>.

TAM, V. W., TAM, C. M., & LE, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82-101.

TAN, J., CIZER, Ö., DE VLIÉGER, J., DAN, H., & LI, J. (2022). Impacts of milling duration on construction and demolition waste (CDW) based precursor and resulting geopolymer: Reactivity, geopolymerization and sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, 184, 106433.

TANTY, L., SHOLAR, G. A., MUSSER, T. J., & HUBER, G. (2018). Performance evaluation of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates in Florida. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(5), 04018064.

TOPAL, A., SENGÖZ, B., & TOPAL, A. (2006). Evaluation of the mechanical performance of recycled concrete aggregates used in highway base layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(1), 29-38.

UPSHAW, M., & CAI, C. S. (2020). Critical review of recycled aggregate concrete properties, improvements, and numerical models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11), 03120005.

VAN LOO, W. (1998). Closing the concrete loop—from reuse to recycling. In *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate: Proceedings of the International Symposium organised by the Concrete Technology Unit, University of Dundee and held at the Department of Trade and Industry Conference Centre, London, UK on 11–12 November 1998* (pp. 83-97). Thomas Telford Publishing.

VEGA, A., GARCÍA, A., & MARTÍNEZ, J. (2020). Recycled concrete aggregate in asphalt mixtures: Effects on performance and durability. *Journal of Construction and Building Materials*, 248, 118605.

VELASQUEZ, R., CUCINIELLO, G., SWIERTZ, D., BONAQUIST, R. & BAHIA, H. (2012). Methods to Evaluate Aggregate Coating for Asphalt Mixtures Produced at WMA Temperatures. *CTAA Annual Conference Proceedings-Canadian Technical Asphalt Association*, 57: 225.

VERNEI, L. G. (2016). Gestão de resíduos da construção civil: análise do cenário nacional quanto à destinação e tratamento dos resíduos sólidos da construção civil. Monografia de especialização, Escola de Engenharia UFMG, Rio de Janeiro.

VIEIRA, C. S., & PEREIRA, P. M. (2015). Use of recycled construction and demolition materials in geotechnical applications: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 192-204. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.023>.

VIEIRA, J. P. B., CORREIA, J. R., & DE BRITO, J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41(5), 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002>.

VYNCKE, J., & VRIJERS, J. (2010, Junho). Recycling of C&D waste in Belgium: state-of-the-art and opportunities for technology transfer. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE CONSTRUCTION MATERIALS AND TECHNOLOGIES (Vol. 2)*.

WALUBITA, L. F., FARUK, A. N., KOOHI, S., et al. (2013). Performance evaluation of thin overlays as a pavement preservation treatment: Field experience and lessons learned. *Construction and Building Materials*, 40, 808-816.

WALUBITA, L. F., SCULLY, T., & TASHMAN, L. (2011). Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking and Overlay Tester as rutting and cracking performance indicators for asphalt mixtures. *Journal of the Transportation Research Board*, 2208(1), 26-34.

WANG, H. X. (2018). Study on the design method and pavement performance of recycled aggregate emulsified asphalt mixture. South China University of Technology.

WANG, J. (2018). Mechanical wear treatment of recycled concrete aggregates: Effects on water absorption and surface morphology. *Journal of Cleaner Production*, 193, 355-363.

WANG, J., ZHANG, J., CAO, D., DANG, H., & DING, B. (2020). Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 234, 117366.

WANG, R., YU, N., & LI, Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 242, 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>.

WEI, W. (2020). Research on application of building waste in asphalt treated base. Wuhan University of Technology.

WEN, H., & BHUSAL, S. (2011). Evaluate recycled concrete as hot mix asphalt aggregate. *Transportation Northwest (TRANSNOW)*, University of Washington.

WONG, K., TSANG, D. C., & POON, C. S. (2007). Effect of thermal treatment on the performance of recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 15(1), 40-47.

WONG, Y. D., SUN, D. D. & LAI, D. (2007). Value-added utilisation of recycled concrete in hot-mix asphalt. *Waste Management*, 27 (2): 294–301.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.02.001>

WONG, Y. D., SUN, D. D., & LAI, D. (2007). Value-added utilization of recycled concrete in hot-mix asphalt. *Waste Management*, 27, 294–301.

WU, H., ZUO, J., YUAN, H., ZILLANTE, G., & WANG, J. (2020). Cross-regional mobility of construction and demolition waste in Australia: An exploratory study. *Resources, Conservation and Recycling*, 156(November 2019), 104710.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104710>.

WU, S., XUE, Y., YE, Q., & CHEN, Y. (2013). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580–2585.

WU, S., YE, Q., & LI, N. (2003). Investigation of rheological and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 17(8), 550-556.

WU, S., ZHONG, J., ZHU, J., & WANG, D. (2013). Influence of aging on mechanical properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 47, 1-8.

WU, S., ZHONG, J., ZHU, J., & WANG, D. (2013). Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 679-688.

WU, S., ZHONG, J., ZHU, J., & WANG, D. (2013). Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture. *Road Materials and Pavement Design*, 14(3), 679–688.

XIAO, J. (2018). Recycled aggregate concrete (pp. 65-98). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-53908-8_3.

XIAO, J., LI, J., & ZHANG, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187–1194.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>.

XIE, J., & WU, Z. (2020). Emulsified asphalt treatment of recycled concrete aggregates for improved performance. *Construction and Building Materials*, 242, 118124.

XIE, T., GHOLAMPOUR, A., & OZBAKKALOGLU, T. (2018). Toward the development of sustainable concretes with recycled concrete aggregates: comprehensive review of studies on mechanical properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018211.

XU, D., SUN, J., & XU, B. (2018). Research on Resource Recycling Technology of Construction Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 392(4).
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/392/4/042047>.

- XU, S., XIAO, F., AMIRKHANIAN, S. & SINGH, D. (2017). Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies – A review. *Construction and Building Materials*, 142: 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>
- XUAN, D., ZHAN, B., & POON, C. S. (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>.
- YANG, J. (2016). Mechanical abrasion of recycled concrete aggregates: Impact on properties and performance. *Materials and Structures*, 49(3), 885-897.
- YANG, J. (2020). Nano-SiO₂ treatment of recycled concrete aggregates: Structural and water resistance improvements. *Materials and Structures*, 53(3), 92.
- YANG, J. (2020). Silicate of sodium treatment for recycled concrete aggregates: Effects on performance and durability. *Construction and Building Materials*, 248, 118631.
- YAOVARAT, T., HORPIBULSUK, S., ARULRAJAH, A., MOHAMMADINIA, A., & CHINKULKIJNIWAT, A. (2019). Recycled concrete aggregate modified with polyvinyl alcohol and fly ash for concrete pavement applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(7), 04019103. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002767](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002767).
- YASREEN, S. G., MADZLAN, N. B., & IBRAHIM, K. (2011). The effect of fine aggregate properties on the fatigue behavior of the conventional and polymer modified bituminous mixtures using two types of sand as fine aggregate. *Int. J. Civ. Environ. Eng.*, 5(10), 458-463.
- YAZDANI, M., KABIRIFAR, K., FRIMPONG, B. E., SHARIATI, M., MIRMOZAFFARI, M., & BOSKABADI, A. (2021). Improving construction and demolition waste collection service in an urban area using a simheuristic approach: A case study in Sydney, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124138. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124138>.
- YE, J. (2020). Calcium hydroxide treatment for recycled concrete aggregates: Impact on adhesion and density. *Construction and Building Materials*, 262, 120685.
- YE, Q., YU, K. & ZHANG, Z. (2015). Expansion of ordinary Portland cement paste varied with nano-MgO. *Construction and Building Materials*, 78: 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.113>
- ZHANG, H., ZHAO, Y., MENG, T. & SHAH, S. P. (2016). Surface Treatment on Recycled Coarse Aggregates with Nanomaterials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (2): 04015094. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001368](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001368)
- ZHANG, J., WU, S., & LI, N. (2016). Silane coupling agent treatment of recycled concrete aggregates: Performance evaluation. *Construction and Building Materials*, 113, 107-117.
- ZHANG, J., WU, S., & ZHU, J. (2016). Performance evaluation of warm-mix asphalt containing reclaimed asphalt pavement and ground tire rubber. *Construction and Building Materials*, 124, 10–17.
- ZHANG, J., XIAO, Y., & LUO, H. (2016). Evaluation of moisture damage of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 111, 275-280.

- ZHANG, L. S. (2016). Study on the design method and pavement performance of recycled aggregate emulsified asphalt mixture. South China University of Technology.
- ZHANG, X., LI, S., & WANG, L. (2016). Performance of asphalt concrete with recycled concrete aggregates. *Materials Science and Engineering*, 681, 051027.
- ZHANG, Y. (2016). Cement slurry coating for recycled concrete aggregates: Effects on properties and durability. *Materials and Structures*, 49(1), 233-246.
- ZHANG, Y. (2016). Sodium silicate treatment for recycled concrete aggregates: Performance and structural improvements. *Materials and Structures*, 49(4), 1475-1487.
- ZHANG, Y., ZHOU, J., & LIU, X. (2020). Effects of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt concrete mixtures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(1), 45-56.
- ZHANG, Z., WANG, K., LIU, H., & DENG, Z. (2016). Key performance properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregate from low strength concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 711-719. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.009>
- ZHAO, J. (2020). Investigating the effect of recycled concrete aggregate on the performance of asphalt mixtures. *Journal of Construction and Building Materials*, 113, 318-327.
- ZHAO, Z. Y. (2020). Application of recycled aggregate from construction waste concrete in asphalt mixture. Hebei University of Architecture.
- ZHENG, L., WU, H., ZHANG, H., DUAN, H., WANG, J., JIANG, W., DONG, B., LIU, G., ZUO, J., & SONG, Q. (2017). Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construction and Building Materials*, 136, 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055>.
- ZHOU, J. H., HE, H. J., MENG, X. H., & YANG, Y. (2010). Basic mechanical properties of recycled concrete: A experimental study. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 26(3), 464-468.
- ZHOU, J., ZENG, M., CHEN, Y., & ZHONG, M. (2019). Evaluation of cement stabilized recycled concrete aggregates treated with waste oil and asphalt emulsion. *Construction and Building Materials*, 199, 143-153.
- ZHU, H., WANG, D., WANG, X., & WANG, Z. (2012). Application of silicone resin for improving recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 299-307.
- ZHU, H., WANG, D., WANG, X., & WANG, Z. (2012). Silicon resin coating for recycled concrete aggregates: Performance and adhesion improvements. *Journal of Cleaner Production*, 29, 292-299.
- ZHU, J., WU, S., ZHONG, J., & WANG, D. (2012). Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. *Construction and Building Materials*, 29, 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.023>.

ZHU, J., WU, S., ZHONG, J., & WANG, X. (2011). Effect of recycled aggregate on mechanical performance of asphalt mixture. *Journal of Transportation Engineering*, 137(8), 582–588.

ZHU, J., ZHANG, X., WANG, D., & ZHAO, H. (2012). Study on the performance of recycled concrete aggregate in asphalt mixtures. *Materials and Design*, 34, 141-147.

ZOU, S., WANG, X., & ZHANG, X. (2020a). Performance evaluation of asphalt mixtures containing recycled concrete aggregates and reclaimed asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123499.

ZOU, S., ZHANG, X., & WANG, X. (2020b). Sustainable asphalt mixture design incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 261, 120510.

ZULKATI, A., WONG, Y. D., & SUN, D. D. (2013). Mechanistic performance of asphalt-concrete mixtures incorporating recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 44, 81-88.

ZULKATI, A., WONG, Y., & SUN, D. (2013). Mechanistic performance of asphalt-concrete mixture incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(9), 1299-1305.

ZULKATI, F. A., MOHAMAD, M. A., & HUSSIN, M. H. (2013). Recycled concrete aggregate as filler for asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), 2201-2207.

APÊNDICES

APÊNDICES A: ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Tabela A.1. Granulometria material RCD sem lavar por tempo

Tempo		5 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Peneira	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"	25,4	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,10%	84,00%	83,60%	83,10%	87,62%	82,58%	85,90%	87,73%	85,71%	84,46%	86,76%	85,65%	85,18%
1/2"	12,5	32,50%	35,37%	37,03%	33,12%	35,60%	38,66%	33,91%	31,44%	35,52%	34,39%	34,73%	35,06%	34,78%
3/8"	9,5	9,94%	13,81%	14,23%	11,08%	10,12%	11,81%	7,22%	9,77%	10,54%	10,87%	8,63%	12,79%	10,90%
Nº 4	4,75	1,02%	0,96%	1,04%	1,00%	0,75%	1,10%	0,89%	1,10%	0,90%	1,05%	0,77%	1,10%	0,97%
Nº 10	2	0,97%	0,90%	0,91%	0,89%	0,69%	1,00%	0,79%	0,95%	0,80%	0,94%	0,69%	0,98%	0,88%
Nº 40	0,425	0,86%	0,77%	0,80%	0,76%	0,63%	0,86%	0,70%	0,85%	0,71%	0,82%	0,61%	0,86%	0,77%
Nº 80	0,18	0,70%	0,62%	0,65%	0,58%	0,53%	0,66%	0,58%	0,69%	0,59%	0,65%	0,50%	0,68%	0,62%
Nº 200	0,075	0,39%	0,39%	0,38%	0,34%	0,30%	0,41%	0,31%	0,44%	0,33%	0,40%	0,25%	0,43%	0,36%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	9,51	7,73	7,61	8,82	9,41	8,45	9,78	9,53	9,14	8,93	10,72	8,05	8,92
	D30	12,13	11,67	11,49	12,02	11,77	11,44	12,01	12,27	11,77	11,88	11,89	11,74	11,83
	D60	15,56	15,45	15,37	15,66	15,21	15,32	15,42	15,46	15,33	15,49	15,32	15,37	15,41
	Cc	0,99	1,14	1,13	1,05	0,97	1,01	0,96	1,02	0,99	1,02	0,86	1,12	1,02
	Cu	1,64	2,00	2,02	1,78	1,62	1,81	1,58	1,62	1,68	1,73	1,43	1,91	1,73

Tempo		10 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,12%	85,21%	83,61%	83,51%	87,66%	84,61%	86,05%	87,77%	85,72%	85,48%	86,77%	85,67%	85,60%
1/2"	12,5	33,75%	36,35%	37,33%	33,95%	37,11%	38,88%	35,01%	32,58%	36,29%	35,50%	35,19%	36,15%	35,67%
3/8"	9,5	10,42%	14,75%	14,70%	11,70%	10,74%	12,37%	7,66%	10,38%	11,00%	11,57%	8,96%	13,40%	11,47%
Nº 4	4,75	1,48%	1,58%	1,43%	1,48%	1,42%	1,50%	1,31%	1,56%	1,32%	1,59%	1,19%	1,61%	1,46%
Nº 10	2	1,42%	1,48%	1,28%	1,35%	1,32%	1,39%	1,18%	1,40%	1,21%	1,46%	1,15%	1,46%	1,34%
Nº 40	0,425	1,25%	1,28%	1,14%	1,17%	1,19%	1,19%	1,03%	1,26%	1,07%	1,27%	1,05%	1,27%	1,18%
Nº 80	0,18	1,05%	1,04%	0,96%	0,94%	1,02%	0,91%	0,84%	1,02%	0,92%	1,03%	0,91%	1,00%	0,97%
Nº 200	0,075	0,60%	0,65%	0,58%	0,56%	0,55%	0,56%	0,43%	0,67%	0,53%	0,63%	0,49%	0,58%	0,57%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	9,19	7,40	7,43	8,47	8,99	8,17	9,73	9,22	8,84	8,52	9,60	7,78	8,58
	D30	11,96	11,53	11,44	11,91	11,61	11,40	11,89	12,11	11,68	11,74	11,84	11,61	11,72
	D60	15,48	15,31	15,35	15,58	15,11	15,17	15,34	15,39	15,28	15,35	15,29	15,29	15,33
	Cc	1,01	1,17	1,15	1,07	0,99	1,05	0,95	1,03	1,01	1,05	0,95	1,13	1,04
	Cu	1,68	2,07	2,06	1,84	1,68	1,86	1,58	1,67	1,73	1,80	1,59	1,97	1,79

Tempo		15 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,15%	86,10%	83,62%	83,82%	89,05%	85,42%	86,16%	87,81%	85,75%	85,54%	87,53%	85,74%	85,97%
1/2"	12,5	34,77%	37,10%	38,07%	34,80%	37,82%	40,09%	35,92%	33,27%	37,17%	36,38%	35,92%	36,74%	36,50%
3/8"	9,5	11,45%	15,32%	15,23%	12,42%	11,66%	13,15%	8,20%	10,86%	11,79%	12,36%	9,63%	14,08%	12,18%
Nº 4	4,75	1,96%	1,82%	1,82%	1,86%	1,92%	2,02%	1,74%	1,96%	1,77%	1,94%	1,56%	2,25%	1,89%
Nº 10	2	1,86%	1,71%	1,64%	1,70%	1,82%	1,74%	1,56%	1,80%	1,62%	1,78%	1,51%	2,00%	1,73%
Nº 40	0,42 5	1,64%	1,49%	1,46%	1,48%	1,65%	1,46%	1,36%	1,62%	1,43%	1,56%	1,38%	1,74%	1,52%
Nº 80	0,18	1,39%	1,21%	1,25%	1,21%	1,43%	1,08%	1,11%	1,32%	1,24%	1,28%	1,20%	1,37%	1,26%
Nº 200	0,07 5	0,78%	0,77%	0,73%	0,71%	0,78%	0,63%	0,57%	0,87%	0,70%	0,78%	0,66%	0,80%	0,73%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,54	7,23	7,25	8,11	8,44	7,81	9,67	8,89	8,39	8,12	9,54	7,48	8,20
	D30	11,82	11,43	11,35	11,79	11,52	11,28	11,79	12,01	11,57	11,62	11,75	11,52	11,62
	D60	15,42	15,20	15,29	15,50	14,98	15,02	15,28	15,35	15,22	15,29	15,20	15,25	15,25
	Cc	1,06	1,19	1,16	1,11	1,05	1,08	0,94	1,06	1,05	1,09	0,95	1,16	1,08
	Cu	1,80	2,10	2,11	1,91	1,77	1,92	1,58	1,73	1,81	1,88	1,59	2,04	1,86

Tempo		20 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	86,41%	87,11%	83,63%	84,58%	89,09%	85,48%	88,36%	87,85%	86,89%	86,67%	87,58%	85,78%	86,62%
1/2"	12,5	34,98%	37,66%	38,36%	35,15%	39,25%	40,22%	36,51%	33,79%	37,44%	36,77%	36,60%	37,29%	37,00%
3/8"	9,5	12,34%	15,89%	15,86%	13,11%	12,31%	13,45%	8,68%	11,34%	12,56%	13,10%	10,25%	14,79%	12,81%
Nº 4	4,75	2,33%	2,26%	2,08%	2,22%	2,37%	2,25%	2,15%	2,37%	2,10%	2,35%	1,95%	3,02%	2,29%
Nº 10	2	2,20%	2,12%	1,88%	2,03%	2,24%	2,04%	1,96%	2,19%	1,92%	2,16%	1,87%	2,78%	2,12%
Nº 40	0,42 5	1,94%	1,84%	1,68%	1,77%	2,02%	1,71%	1,71%	1,97%	1,70%	1,89%	1,70%	2,47%	1,87%
Nº 80	0,18	1,67%	1,50%	1,46%	1,47%	1,76%	1,27%	1,41%	1,62%	1,49%	1,57%	1,48%	2,02%	1,56%
Nº 200	0,07 5	0,94%	0,96%	0,86%	0,87%	0,97%	0,75%	0,75%	1,07%	0,85%	0,96%	0,83%	1,32%	0,93%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,08	7,04	7,07	7,79	8,09	7,67	9,62	8,57	8,02	7,78	9,30	7,16	7,90
	D30	11,77	11,35	11,29	11,72	11,38	11,26	11,72	11,93	11,51	11,56	11,67	11,44	11,55
	D60	15,32	15,10	15,27	15,43	14,88	15,01	15,11	15,31	15,13	15,19	15,15	15,21	15,18
	Cc	1,12	1,21	1,18	1,14	1,08	1,10	0,94	1,09	1,09	1,13	0,97	1,20	1,11
	Cu	1,90	2,14	2,16	1,98	1,84	1,96	1,57	1,79	1,89	1,95	1,63	2,12	1,92

Tempo		25 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	86,44%	87,14%	84,76%	84,97%	89,11%	85,53%	88,41%	87,89%	86,96%	86,70%	87,67%	86,93%	86,88%

1/2"	12,5	35,20%	37,81%	38,57%	35,34%	39,57%	40,35%	37,10%	34,47%	37,66%	36,95%	36,72%	37,39%	37,26%
3/8"	9,5	13,02%	16,06%	16,26%	13,52%	12,47%	13,76%	9,10%	11,62%	13,11%	13,52%	10,50%	15,47%	13,20%
Nº 4	4,75	2,71%	2,47%	2,34%	2,49%	2,59%	2,48%	2,59%	2,69%	2,42%	2,64%	2,19%	3,67%	2,61%
Nº 10	2	2,55%	2,29%	2,14%	2,28%	2,45%	2,34%	2,38%	2,51%	2,23%	2,42%	2,09%	3,44%	2,43%
Nº 40	0,42 5	2,25%	1,98%	1,92%	1,99%	2,22%	1,96%	2,08%	2,26%	1,98%	2,12%	1,90%	3,08%	2,15%
Nº 80	0,18	1,95%	1,62%	1,68%	1,67%	1,94%	1,46%	1,74%	1,86%	1,74%	1,77%	1,66%	2,56%	1,81%
Nº 200	0,07 5	1,10%	1,04%	0,99%	0,99%	1,08%	0,87%	0,94%	1,24%	0,99%	1,08%	0,94%	1,74%	1,08%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	7,75	6,97	6,96	7,62	7,99	7,54	9,58	8,38	7,77	7,59	9,11	6,89	7,71
	D30	11,72	11,33	11,25	11,69	11,35	11,23	11,66	11,85	11,47	11,52	11,65	11,40	11,51
	D60	15,31	15,09	15,18	15,39	14,86	15,00	15,07	15,27	15,11	15,18	15,14	15,13	15,14
	Cc	1,16	1,22	1,20	1,17	1,08	1,12	0,94	1,10	1,12	1,15	0,98	1,25	1,13
	Cu	1,97	2,16	2,18	2,02	1,86	1,99	1,57	1,82	1,95	2,00	1,66	2,20	1,97

Tempo		30 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	86,47%	87,17%	84,76%	85,00%	89,13%	85,78%	88,43%	88,92%	86,99%	86,74%	87,69%	86,96%	87,00%
1/2"	12,5	36,31%	38,44%	39,16%	36,11%	40,04%	40,68%	37,59%	34,54%	38,50%	37,83%	37,27%	38,23%	37,89%
3/8"	9,5	13,41%	16,33%	16,56%	13,84%	12,72%	14,15%	9,52%	11,85%	13,45%	13,85%	10,77%	16,00%	13,54%
Nº 4	4,75	3,12%	2,63%	2,61%	2,77%	2,88%	2,74%	2,85%	2,84%	2,76%	2,93%	2,43%	4,12%	2,89%
Nº 10	2	2,94%	2,43%	2,40%	2,54%	2,72%	2,59%	2,60%	2,64%	2,55%	2,69%	2,31%	3,89%	2,69%
Nº 40	0,42 5	2,59%	2,10%	2,16%	2,22%	2,46%	2,17%	2,28%	2,38%	2,27%	2,35%	2,10%	3,50%	2,38%
Nº 80	0,18	2,26%	1,72%	1,91%	1,88%	2,17%	1,62%	1,91%	1,96%	2,01%	1,97%	1,84%	2,93%	2,02%
Nº 200	0,07 5	1,27%	1,11%	1,14%	1,12%	1,20%	0,97%	1,03%	1,31%	1,15%	1,20%	1,05%	2,04%	1,22%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	7,55	6,90	6,86	7,47	7,84	7,38	9,54	8,24	7,59	7,44	8,91	6,69	7,55
	D30	11,59	11,26	11,18	11,59	11,30	11,19	11,61	11,83	11,39	11,43	11,59	11,29	11,44
	D60	15,23	15,04	15,14	15,34	14,82	14,96	15,03	15,21	15,05	15,11	15,10	15,07	15,09
	Cc	1,17	1,22	1,21	1,17	1,10	1,13	0,94	1,12	1,13	1,16	1,00	1,26	1,15
	Cu	2,02	2,18	2,21	2,05	1,89	2,03	1,58	1,85	1,98	2,03	1,69	2,25	2,00

Tempo		40 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	86,49%	87,25%	84,78%	85,03%	89,16%	85,91%	88,46%	88,95%	87,00%	86,79%	87,73%	86,98%	87,04%
1/2"	12,5	36,70%	38,66%	39,85%	36,55%	40,44%	41,17%	38,40%	34,72%	39,04%	38,15%	37,72%	39,11%	38,38%
3/8"	9,5	14,08%	16,64%	16,74%	14,23%	13,11%	15,26%	9,93%	12,25%	13,88%	14,35%	11,07%	16,81%	14,03%
Nº 4	4,75	3,39%	3,00%	2,86%	3,07%	3,16%	3,14%	3,10%	3,14%	3,00%	3,25%	2,73%	4,56%	3,20%
Nº 10	2	3,21%	2,78%	2,62%	2,82%	2,99%	2,98%	2,86%	2,92%	2,78%	3,00%	2,59%	4,31%	2,99%
Nº 40	0,42 5	2,82%	2,40%	2,37%	2,47%	2,70%	2,50%	2,51%	2,62%	2,48%	2,62%	2,35%	3,86%	2,64%
Nº 80	0,18	2,49%	1,97%	2,11%	2,11%	2,39%	1,88%	2,12%	2,15%	2,22%	2,21%	2,07%	3,23%	2,25%

Nº 200	0,07 5	1,41%	1,28%	1,28%	1,27%	1,32%	1,16%	1,15%	1,44%	1,29%	1,36%	1,19%	2,23%	1,37%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	7,29	6,78	6,79	7,30	7,65	7,03	9,51	8,01	7,42	7,24	8,69	6,46	7,34
	D30	11,52	11,22	11,12	11,53	11,26	11,11	11,53	11,80	11,33	11,38	11,54	11,17	11,37
	D60	15,21	15,02	15,08	15,31	14,79	14,91	14,98	15,19	15,01	15,09	15,06	15,01	15,06
	Cc	1,20	1,24	1,21	1,19	1,12	1,18	0,93	1,14	1,15	1,19	1,02	1,29	1,17
	Cu	2,09	2,22	2,22	2,10	1,93	2,12	1,58	1,90	2,02	2,08	1,73	2,32	2,05

Tempo		50 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	86,51%	87,82%	84,79%	85,23%	89,20%	86,00%	88,48%	89,79%	87,02%	86,81%	87,94%	87,00%	87,22%
1/2"	12,5	36,83%	39,37%	39,89%	36,84%	40,56%	41,69%	38,62%	34,77%	39,13%	38,47%	38,02%	39,33%	38,63%
3/8"	9,5	14,51%	16,87%	16,86%	14,49%	13,42%	16,00%	10,43%	12,65%	14,15%	14,60%	11,31%	17,31%	14,38%
Nº 4	4,75	3,68%	3,28%	3,02%	3,31%	3,45%	3,56%	3,40%	3,24%	3,23%	3,45%	3,00%	5,00%	3,47%
Nº 10	2	3,47%	3,05%	2,78%	3,05%	3,29%	3,38%	3,15%	3,03%	2,99%	3,18%	2,86%	4,73%	3,25%
Nº 40	0,42 5	3,07%	2,63%	2,51%	2,67%	2,98%	2,86%	2,77%	2,72%	2,67%	2,77%	2,59%	4,25%	2,87%
Nº 80	0,18	2,71%	2,16%	2,23%	2,28%	2,67%	2,18%	2,36%	2,23%	2,39%	2,33%	2,29%	3,58%	2,45%
Nº 200	0,07 5	1,53%	1,41%	1,34%	1,37%	1,49%	1,39%	1,29%	1,50%	1,38%	1,40%	1,34%	2,52%	1,50%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	7,12	6,69	6,74	7,19	7,49	6,80	9,10	7,82	7,30	7,14	8,52	6,29	7,19
	D30	11,49	11,15	11,11	11,49	11,23	11,03	11,49	11,78	11,31	11,34	11,51	11,13	11,34
	D60	15,20	14,94	15,08	15,27	14,78	14,86	14,96	15,15	15,00	15,06	15,03	14,99	15,03
	Cc	1,22	1,24	1,21	1,20	1,14	1,20	0,97	1,17	1,17	1,20	1,04	1,31	1,19
	Cu	2,13	2,23	2,24	2,12	1,97	2,19	1,64	1,94	2,06	2,11	1,76	2,38	2,09

Tempo		60 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	87,68%	87,89%	84,80%	85,65%	90,08%	87,05%	88,50%	89,81%	87,11%	86,83%	87,96%	88,09%	87,62%
1/2"	12,5	36,92%	39,86%	39,96%	37,06%	40,66%	41,82%	38,70%	34,85%	39,22%	38,78%	38,14%	39,56%	38,80%
3/8"	9,5	14,67%	17,16%	17,45%	14,84%	14,00%	16,18%	10,55%	12,77%	14,54%	14,83%	11,79%	17,71%	14,71%
Nº 4	4,75	3,88%	3,62%	3,21%	3,56%	3,71%	3,77%	3,52%	3,38%	3,44%	3,75%	3,26%	5,40%	3,71%
Nº 10	2	3,66%	3,38%	2,94%	3,28%	3,53%	3,59%	3,27%	3,17%	3,18%	3,47%	3,10%	5,12%	3,47%
Nº 40	0,42 5	3,24%	2,91%	2,65%	2,87%	3,20%	3,03%	2,87%	2,85%	2,84%	3,02%	2,80%	4,62%	3,07%
Nº 80	0,18	2,89%	2,39%	2,38%	2,46%	2,88%	2,31%	2,44%	2,35%	2,55%	2,55%	2,48%	3,91%	2,63%
Nº 200	0,07 5	1,63%	1,56%	1,42%	1,48%	1,62%	1,48%	1,30%	1,59%	1,47%	1,54%	1,46%	2,78%	1,61%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	7,04	6,58	6,61	7,06	7,26	6,73	9,00	7,74	7,16	7,02	8,21	6,15	7,06
	D30	11,48	11,10	11,07	11,46	11,20	11,01	11,48	11,77	11,28	11,30	11,48	11,09	11,31
	D60	15,12	14,90	15,07	15,23	14,73	14,79	14,95	15,14	14,99	15,04	15,02	14,91	14,99
	Cc	1,24	1,25	1,23	1,22	1,17	1,22	0,98	1,18	1,19	1,21	1,07	1,34	1,21

Cu	2,15	2,26	2,28	2,16	2,03	2,20	1,66	1,96	2,09	2,14	1,83	2,42	2,12
-----------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabela A.2. Granulometria material RCD lavado por tempo

Tempo		5 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Peneir a	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"	25,4	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,05%	85,45%	85,36%	86,03%	86,83%	84,76%	81,24%	85,88%	85,05%	85,36%	84,60%	85,09%	85,06%
1/2"	12,5	41,08%	41,15%	34,33%	39,56%	39,30%	40,44%	31,94%	37,75%	36,35%	39,84%	36,70%	37,90%	38,03%
3/8"	9,5	15,49%	15,73%	14,03%	13,94%	14,43%	14,19%	13,82%	14,38%	14,66%	14,67%	14,44%	11,97%	14,31%
Nº 4	4,75	2,71%	3,01%	2,76%	2,46%	2,97%	2,73%	3,21%	2,91%	3,15%	3,15%	2,85%	0,35%	2,69%
Nº 10	2	2,68%	2,97%	2,71%	2,39%	2,88%	2,64%	3,16%	2,83%	3,08%	3,07%	2,80%	0,28%	2,62%
Nº 40	0,42 5	2,63%	2,93%	2,70%	2,34%	2,86%	2,59%	3,13%	2,80%	3,07%	3,05%	2,78%	0,27%	2,60%
Nº 80	0,18	2,56%	2,86%	2,65%	2,27%	2,81%	2,52%	3,09%	2,75%	3,03%	3,00%	2,74%	0,22%	2,54%
Nº 200	0,07 5	2,48%	2,84%	2,57%	2,18%	2,75%	2,47%	3,02%	2,74%	2,87%	2,96%	2,68%	0,18%	2,48%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,96	6,95	7,41	7,49	7,27	7,37	8,97	9,02	7,18	7,17	7,28	8,45	7,35
	D30	11,10	11,08	11,79	11,28	11,28	11,21	12,14	11,41	11,54	11,23	11,51	11,50	11,39
	D60	14,97	14,94	15,43	15,03	15,00	15,04	15,86	15,17	15,32	15,05	15,32	15,21	15,20
	Cc	0,92	1,18	1,21	1,13	1,17	1,13	1,04	0,95	1,21	1,17	1,19	1,03	1,16
	Cu	1,67	2,15	2,08	2,01	2,06	2,04	1,77	1,68	2,13	2,10	2,10	1,80	2,07

Tempo		10 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,11%	86,34%	85,39%	87,76%	86,86%	84,78%	82,97%	85,89%	85,07%	85,45%	84,63%	85,11%	85,45%
1/2"	12,5	41,76%	41,58%	35,51%	40,74%	41,11%	40,73%	33,65%	38,51%	36,72%	40,10%	37,10%	38,32%	38,82%
3/8"	9,5	16,17%	16,28%	14,84%	14,85%	15,54%	14,50%	14,82%	15,86%	15,02%	15,07%	14,69%	12,69%	15,03%
Nº 4	4,75	3,10%	3,25%	3,14%	2,68%	3,54%	2,88%	3,61%	3,28%	3,39%	3,40%	3,06%	0,62%	3,00%
Nº 10	2	3,03%	3,14%	3,05%	2,61%	3,43%	2,79%	3,50%	3,16%	3,29%	3,31%	2,99%	0,54%	2,90%
Nº 40	0,425	2,93%	3,09%	3,00%	2,53%	3,35%	2,74%	3,42%	3,07%	3,23%	3,26%	2,95%	0,50%	2,84%
Nº 80	0,18	2,86%	3,00%	2,95%	2,43%	3,27%	2,66%	3,36%	2,96%	3,17%	3,17%	2,91%	0,45%	2,77%
Nº 200	0,075	2,64%	2,92%	2,70%	2,29%	2,95%	2,56%	3,15%	2,87%	2,92%	3,07%	2,76%	0,33%	2,60%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,89	6,80	7,13	7,21	6,90	7,26	8,86	8,85	7,04	7,03	7,18	8,14	7,11
	D30	11,02	11,02	11,62	11,15	11,10	11,17	11,85	11,28	11,48	11,19	11,46	11,43	11,29
	D60	14,91	14,85	15,35	14,84	14,86	15,01	15,63	15,11	15,29	15,02	15,29	15,18	15,12
	Cc	0,92	1,20	1,23	1,16	1,20	1,14	1,01	0,95	1,22	1,19	1,20	1,06	1,19
	Cu	1,68	2,18	2,15	2,06	2,15	2,07	1,77	1,71	2,17	2,14	2,13	1,86	2,13

Tempo		15 min											
-------	--	--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,14%	88,41%	85,40%	87,77%	86,88%	84,81%	83,00%	85,90%	85,09%	85,45%	84,65%	85,13%	85,64%
1/2"	12,5	42,74%	41,96%	37,02%	41,17%	41,68%	41,27%	34,17%	38,92%	37,60%	40,59%	37,81%	38,45%	39,45%
3/8"	9,5	17,49%	17,04%	15,60%	15,98%	16,02%	15,10%	15,34%	16,35%	15,62%	15,83%	15,25%	13,14%	15,73%
Nº 4	4,75	3,43%	3,48%	3,32%	2,86%	3,93%	3,14%	3,88%	3,63%	3,68%	3,67%	3,34%	0,91%	3,27%
Nº 10	2	3,35%	3,36%	3,21%	2,77%	3,80%	3,04%	3,74%	3,49%	3,55%	3,56%	3,24%	0,81%	3,16%
Nº 40	0,42 5	3,21%	3,27%	3,16%	2,67%	3,68%	2,96%	3,63%	3,35%	3,46%	3,47%	3,17%	0,75%	3,06%
Nº 80	0,18 0,07	3,14%	3,15%	3,12%	2,54%	3,60%	2,84%	3,58%	3,17%	3,41%	3,34%	3,14%	0,68%	2,98%
Nº 200	5	2,78%	3,01%	2,79%	2,37%	3,08%	2,69%	3,26%	3,01%	3,03%	3,19%	2,87%	0,45%	2,71%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,76	6,63	6,93	6,93	6,73	7,07	8,79	8,79	6,86	6,81	7,00	7,95	6,91
	D30	10,88	10,96	11,42	11,07	11,03	11,11	11,76	11,21	11,37	11,12	11,37	11,41	11,21
	D60	14,82	14,71	15,25	14,80	14,81	14,97	15,60	15,08	15,23	14,98	15,24	15,17	15,06
	Cc	0,91	1,23	1,24	1,19	1,22	1,17	1,01	0,95	1,24	1,21	1,21	1,08	1,21
	Cu	1,69	2,22	2,20	2,14	2,20	2,12	1,78	1,72	2,22	2,20	2,18	1,91	2,18

Tempo		20 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,84%	88,45%	85,41%	87,78%	86,91%	84,82%	83,05%	85,91%	85,11%	87,31%	84,69%	86,19%	85,96%
1/2"	12,5	43,20%	42,79%	37,19%	41,27%	42,36%	41,37%	34,71%	40,09%	38,06%	42,14%	38,32%	38,53%	40,00%
3/8"	9,5	17,76%	17,78%	16,11%	16,17%	16,46%	15,49%	15,74%	16,66%	16,07%	16,62%	15,68%	13,37%	16,16%
Nº 4	4,75	3,77%	3,86%	3,66%	3,15%	4,27%	3,36%	4,17%	3,88%	4,00%	3,92%	3,65%	1,07%	3,56%
Nº 10	2	3,63%	3,72%	3,52%	3,01%	4,13%	3,26%	4,00%	3,72%	3,85%	3,78%	3,52%	0,94%	3,42%
Nº 40	0,42 5	3,44%	3,59%	3,44%	2,87%	3,98%	3,17%	3,86%	3,55%	3,73%	3,67%	3,42%	0,87%	3,30%
Nº 80	0,18 0,07	3,37%	3,41%	3,38%	2,70%	3,87%	3,02%	3,81%	3,33%	3,67%	3,50%	3,39%	0,78%	3,19%
Nº 200	5	2,88%	3,18%	2,95%	2,48%	3,22%	2,82%	3,37%	3,12%	3,17%	3,30%	3,00%	0,52%	2,83%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,74	6,45	6,76	6,84	6,58	6,94	8,74	8,79	6,70	6,62	6,85	7,86	6,77
	D30	10,84	10,86	11,38	11,05	10,97	11,08	11,68	11,11	11,30	10,97	11,30	11,39	11,14
	D60	14,74	14,64	15,24	14,80	14,75	14,96	15,56	14,99	15,19	14,75	15,20	15,10	15,00
	Cc	0,91	1,25	1,26	1,21	1,24	1,18	1,00	0,94	1,25	1,23	1,23	1,09	1,22
	Cu	1,69	2,27	2,25	2,16	2,24	2,15	1,78	1,71	2,27	2,23	2,22	1,92	2,22

Tempo		25 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,88%	88,47%	85,42%	87,80%	88,50%	84,84%	83,09%	85,92%	86,91%	87,37%	84,70%	87,61%	86,38%
1/2"	12,5	43,35%	43,18%	38,03%	41,31%	43,37%	41,48%	34,87%	40,20%	39,54%	42,25%	38,43%	39,25%	40,44%
3/8"	9,5	18,57%	17,93%	16,49%	16,49%	16,88%	15,69%	16,35%	17,06%	16,54%	16,95%	16,08%	14,32%	16,61%

Nº 4	4,75	4,05%	4,07%	3,80%	3,35%	4,56%	3,61%	4,37%	4,20%	4,21%	4,19%	3,97%	1,58%	3,83%
Nº 10	2	3,89%	3,92%	3,67%	3,22%	4,41%	3,49%	4,19%	4,02%	4,06%	4,05%	3,82%	1,46%	3,68%
Nº 40	0,42 5	3,68%	3,77%	3,58%	3,06%	4,23%	3,38%	4,03%	3,79%	3,92%	3,90%	3,66%	1,34%	3,53%
Nº 80	0,18	3,63%	3,55%	3,55%	2,85%	4,12%	3,21%	3,99%	3,52%	3,87%	3,69%	3,58%	1,20%	3,40%
Nº 200	0,07 5	3,08%	3,28%	3,03%	2,59%	3,34%	2,95%	3,46%	3,25%	3,27%	3,43%	3,13%	0,76%	2,96%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,64	6,39	6,66	6,75	6,45	6,85	8,65	8,74	6,58	6,51	6,71	7,51	6,64
	D30	10,78	10,83	11,28	11,03	10,88	11,06	11,63	11,08	11,16	10,94	11,27	11,29	11,08
	D60	14,73	14,60	15,18	14,79	14,59	14,95	15,55	14,99	14,98	14,74	15,19	14,96	14,94
	Cc	0,91	1,26	1,26	1,22	1,26	1,19	1,01	0,94	1,26	1,25	1,25	1,13	1,24
	Cu	1,70	2,29	2,28	2,19	2,26	2,18	1,80	1,72	2,28	2,26	2,27	1,99	2,25

Tempo		30 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,90%	88,48%	85,42%	87,80%	88,73%	84,85%	83,10%	85,93%	86,99%	87,38%	84,75%	87,63%	86,41%
1/2"	12,5	43,79%	43,29%	38,82%	41,40%	43,79%	41,51%	35,28%	40,25%	40,07%	42,29%	38,90%	39,58%	40,75%
3/8"	9,5	18,75%	18,17%	16,71%	16,79%	17,14%	15,91%	16,46%	17,26%	16,73%	17,17%	16,23%	14,71%	16,84%
Nº 4	4,75	4,19%	4,33%	4,03%	3,49%	4,81%	3,70%	4,50%	4,37%	4,41%	4,31%	4,13%	1,80%	4,00%
Nº 10	2	4,04%	4,13%	3,90%	3,35%	4,62%	3,59%	4,31%	4,16%	4,24%	4,16%	3,97%	1,65%	3,84%
Nº 40	0,42 5	3,83%	3,96%	3,78%	3,17%	4,43%	3,48%	4,14%	3,92%	4,09%	4,00%	3,80%	1,51%	3,68%
Nº 80	0,18	3,78%	3,70%	3,74%	2,94%	4,31%	3,29%	4,10%	3,62%	4,03%	3,77%	3,72%	1,33%	3,53%
Nº 200	0,07 5	3,18%	3,38%	3,14%	2,65%	3,42%	3,02%	3,51%	3,32%	3,35%	3,49%	3,20%	0,84%	3,04%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,63	6,31	6,58	6,67	6,36	6,79	8,65	8,71	6,51	6,45	6,65	7,38	6,57
	D30	10,75	10,81	11,20	11,01	10,85	11,05	11,57	11,06	11,10	10,93	11,22	11,25	11,05
	D60	14,69	14,59	15,12	14,78	14,54	14,94	15,52	14,98	14,93	14,73	15,16	14,93	14,91
	Cc	0,91	1,27	1,26	1,23	1,27	1,20	1,00	0,94	1,27	1,26	1,25	1,15	1,25
	Cu	1,70	2,31	2,30	2,22	2,29	2,20	1,80	1,72	2,30	2,28	2,28	2,02	2,27

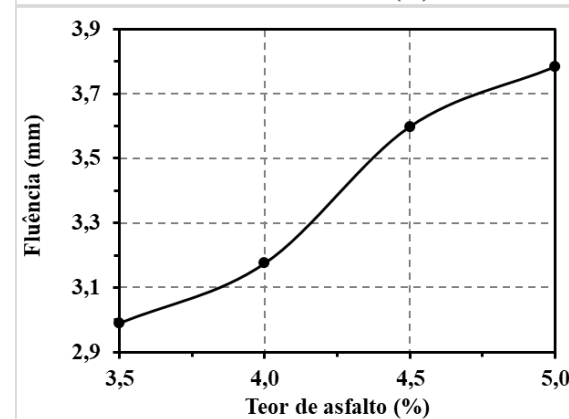
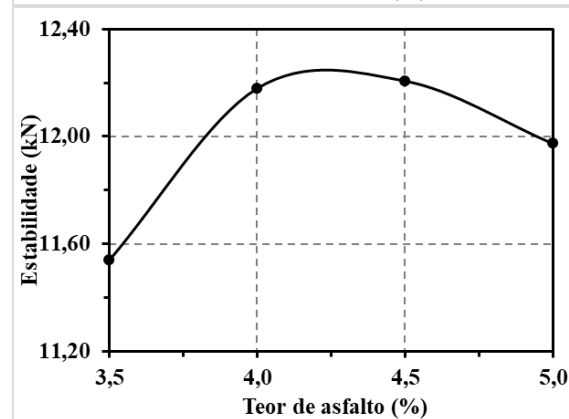
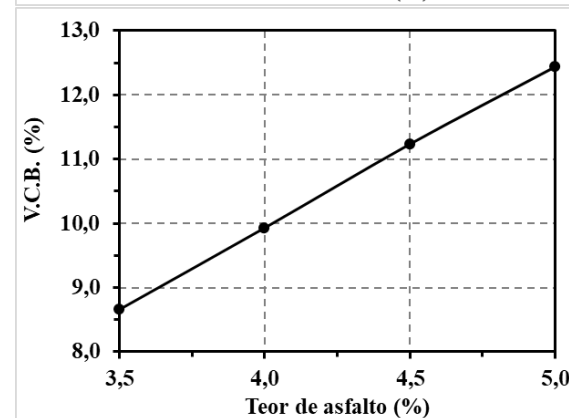
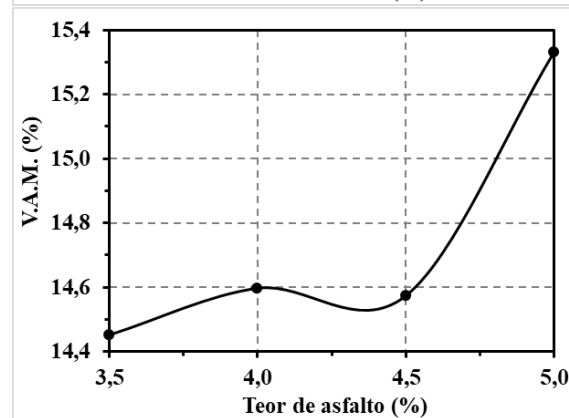
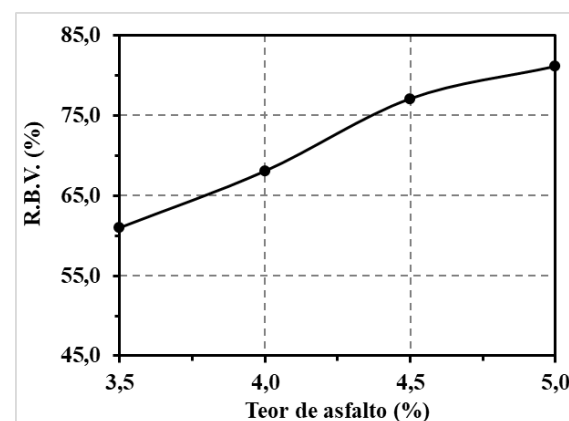
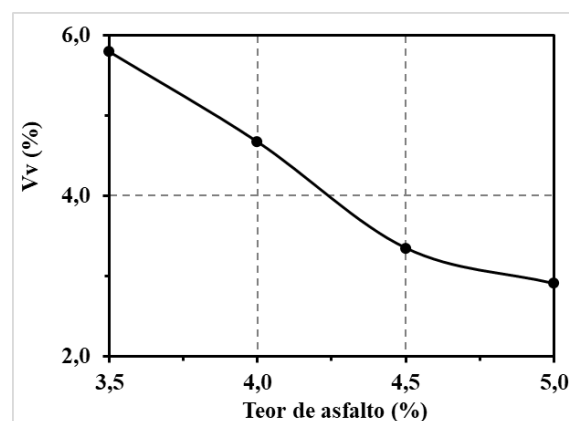
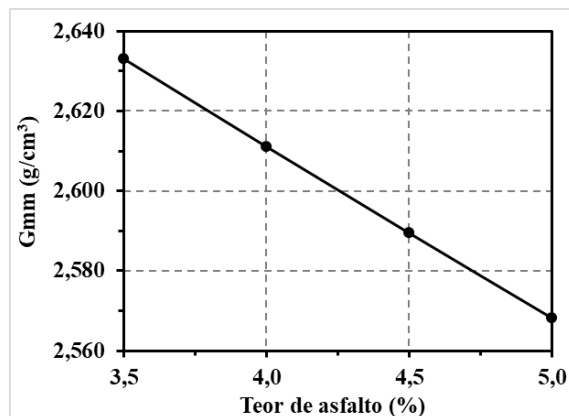
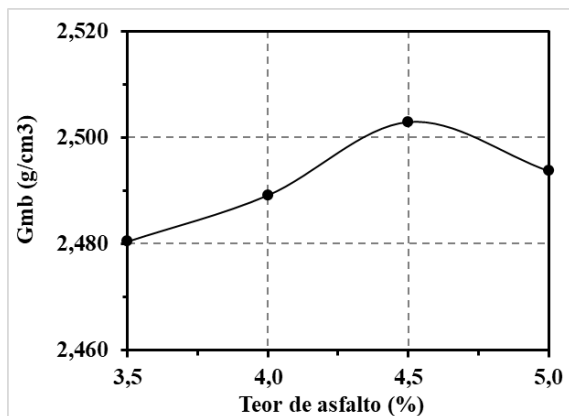
Tempo		40 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,91%	88,49%	85,42%	87,81%	88,75%	84,86%	83,12%	85,93%	87,00%	87,39%	84,76%	87,64%	86,42%
1/2"	12,5	43,86%	43,37%	39,81%	41,44%	44,24%	41,56%	35,34%	40,31%	40,36%	42,33%	39,10%	39,77%	40,96%
3/8"	9,5	18,89%	18,51%	17,04%	16,90%	17,40%	15,99%	16,59%	17,65%	16,96%	17,36%	16,42%	15,03%	17,06%
Nº 4	4,75	4,36%	4,49%	4,18%	3,64%	5,15%	3,81%	4,64%	4,51%	4,61%	4,44%	4,31%	1,99%	4,18%
Nº 10	2	4,18%	4,28%	4,03%	3,49%	4,88%	3,70%	4,45%	4,29%	4,41%	4,28%	4,13%	1,83%	3,99%
Nº 40	0,42 5	3,95%	4,10%	3,90%	3,30%	4,66%	3,59%	4,26%	4,03%	4,24%	4,11%	3,94%	1,67%	3,81%
Nº 80	0,18	3,91%	3,82%	3,85%	3,04%	4,54%	3,38%	4,22%	3,71%	4,18%	3,86%	3,86%	1,47%	3,65%
Nº 200	0,07 5	3,23%	3,47%	3,21%	2,73%	3,51%	3,09%	3,58%	3,38%	3,42%	3,56%	3,27%	0,94%	3,12%
Fondo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

D10	8,62	6,24	6,50	6,62	6,25	6,76	8,63	8,66	6,43	6,40	6,58	7,27	6,50
D30	10,73	10,78	11,11	11,00	10,81	11,04	11,56	11,03	11,07	10,92	11,20	11,22	11,02
D60	14,68	14,59	15,05	14,78	14,50	14,94	15,52	14,98	14,91	14,73	15,14	14,92	14,90
Cc	0,91	1,28	1,26	1,24	1,29	1,21	1,00	0,94	1,28	1,26	1,26	1,16	1,26
Cu	1,70	2,34	2,31	2,23	2,32	2,21	1,80	1,73	2,32	2,30	2,30	2,05	2,29

Tempo		50 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,94%	88,50%	86,39%	87,80%	88,83%	84,87%	83,14%	85,93%	87,05%	87,40%	86,01%	87,65%	86,63%
1/2"	12,5	44,15%	43,42%	40,13%	41,51%	44,90%	41,99%	35,69%	40,34%	40,52%	42,52%	39,96%	39,84%	41,25%
3/8"	9,5	19,22%	18,62%	17,21%	17,37%	17,62%	16,14%	16,76%	17,90%	17,16%	17,66%	16,89%	15,28%	17,32%
Nº 4	4,75	4,52%	4,66%	4,37%	3,80%	5,47%	3,98%	4,73%	4,61%	4,82%	4,59%	4,52%	2,18%	4,35%
Nº 10	2	4,33%	4,42%	4,20%	3,64%	5,22%	3,85%	4,54%	4,39%	4,62%	4,42%	4,34%	2,00%	4,16%
Nº 40	0,42 5	4,08%	4,23%	4,05%	3,43%	4,97%	3,73%	4,34%	4,11%	4,43%	4,24%	4,13%	1,84%	3,96%
Nº 80	0,18 0,07	4,04%	3,92%	4,00%	3,16%	4,82%	3,50%	4,30%	3,77%	4,36%	3,97%	4,06%	1,60%	3,79%
Nº 200	5	3,28%	3,55%	3,30%	2,82%	3,66%	3,18%	3,62%	3,42%	3,52%	3,64%	3,37%	1,05%	3,20%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,58	6,19	6,44	6,52	6,15	6,69	8,61	8,63	6,35	6,33	6,46	7,18	6,42
	D30	10,70	10,77	11,07	10,97	10,76	11,01	11,51	11,02	11,05	10,89	11,10	11,20	10,99
	D60	14,65	14,58	14,96	14,78	14,43	14,90	15,49	14,97	14,89	14,71	15,00	14,91	14,86
	Cc	0,91	1,29	1,27	1,25	1,30	1,21	0,99	0,94	1,29	1,27	1,27	1,17	1,26
	Cu	1,71	2,35	2,32	2,27	2,35	2,23	1,80	1,74	2,34	2,33	2,32	2,08	2,31

Tempo		60 min												
Amostra		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Meia
Tamiz	mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"		100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19	85,95%	88,51%	86,40%	87,84%	88,85%	84,88%	83,96%	85,93%	87,16%	87,40%	86,05%	87,66%	86,72%
1/2"	12,5	44,29%	43,44%	40,24%	41,88%	45,01%	42,03%	35,81%	40,96%	40,59%	42,80%	40,22%	39,97%	41,44%
3/8"	9,5	19,49%	18,87%	17,54%	17,69%	17,92%	16,52%	16,91%	17,99%	17,41%	17,93%	17,09%	15,54%	17,58%
Nº 4	4,75	4,70%	4,81%	4,59%	3,92%	5,72%	4,13%	4,89%	4,76%	5,02%	4,73%	4,68%	2,31%	4,52%
Nº 10	2	4,49%	4,55%	4,40%	3,78%	5,42%	3,98%	4,68%	4,55%	4,79%	4,56%	4,50%	2,14%	4,32%
Nº 40	0,42 5	4,22%	4,35%	4,24%	3,56%	5,15%	3,85%	4,46%	4,25%	4,58%	4,36%	4,27%	1,95%	4,10%
Nº 80	0,18 0,07	4,14%	4,02%	4,20%	3,26%	5,00%	3,59%	4,42%	3,88%	4,51%	4,06%	4,19%	1,69%	3,91%
Nº 200	5	3,31%	3,62%	3,41%	2,89%	3,75%	3,25%	3,69%	3,51%	3,61%	3,71%	3,44%	1,12%	3,28%
Fundo		0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	D10	8,55	6,14	6,35	6,45	6,06	6,60	8,59	8,63	6,28	6,26	6,39	7,11	6,35
	D30	10,67	10,76	11,04	10,92	10,74	10,98	11,49	10,97	11,03	10,85	11,07	11,18	10,96
	D60	14,64	14,58	14,95	14,74	14,42	14,90	15,43	14,92	14,88	14,69	14,98	14,90	14,84
	Cc	0,91	1,29	1,29	1,25	1,32	1,23	1,00	0,93	1,30	1,28	1,28	1,18	1,27
	Cu	1,71	2,38	2,36	2,29	2,38	2,26	1,80	1,73	2,37	2,35	2,34	2,10	2,34

APÊNDICES B: ENSAIOS MARSHALL



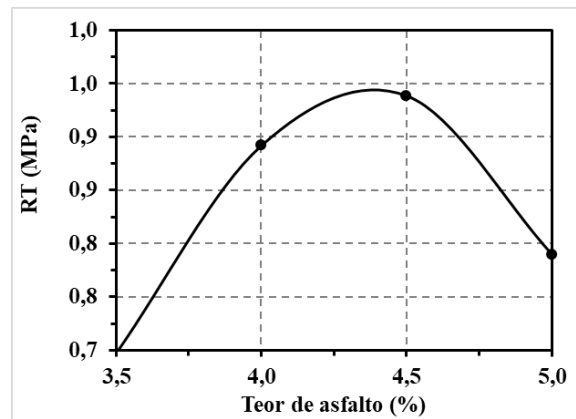
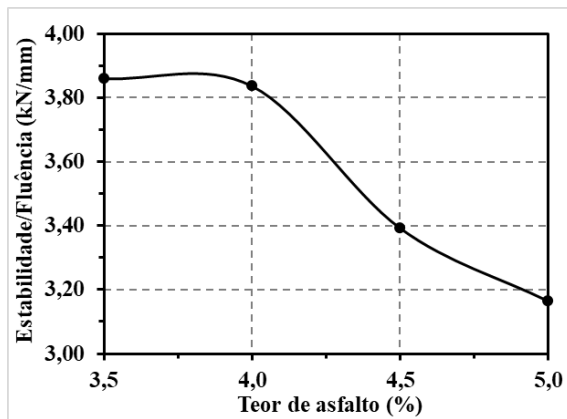
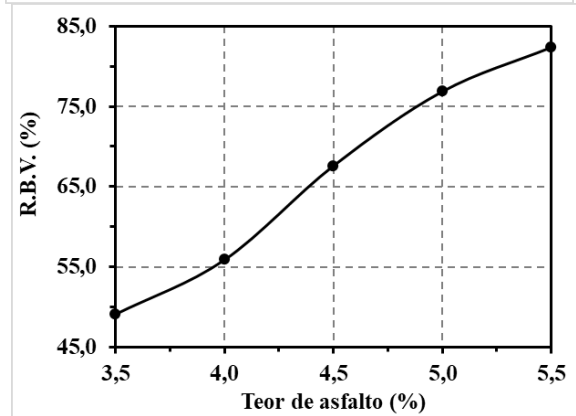
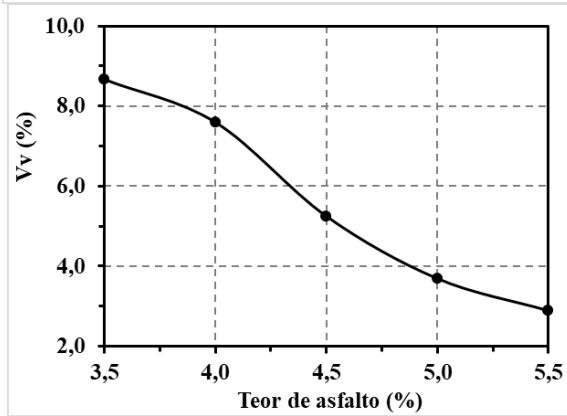
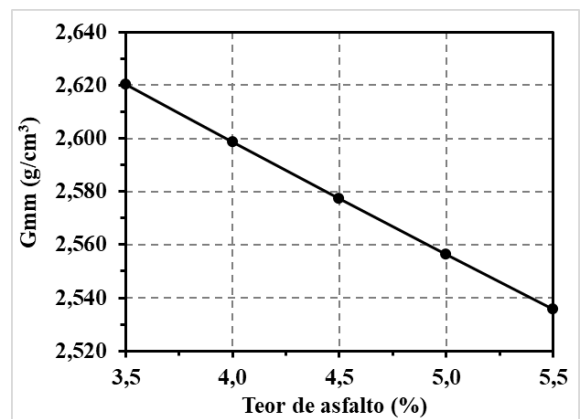
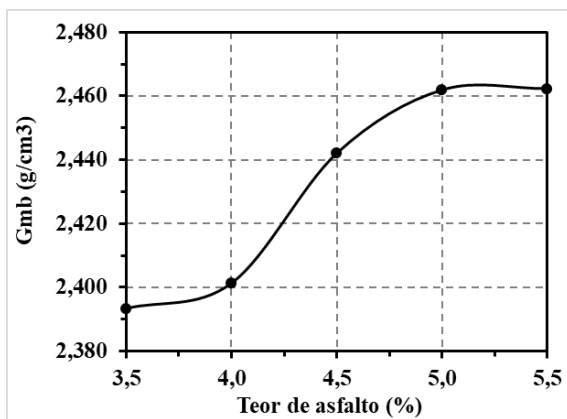


Figura B- 1 Ensaio Marshall da amostra MCD



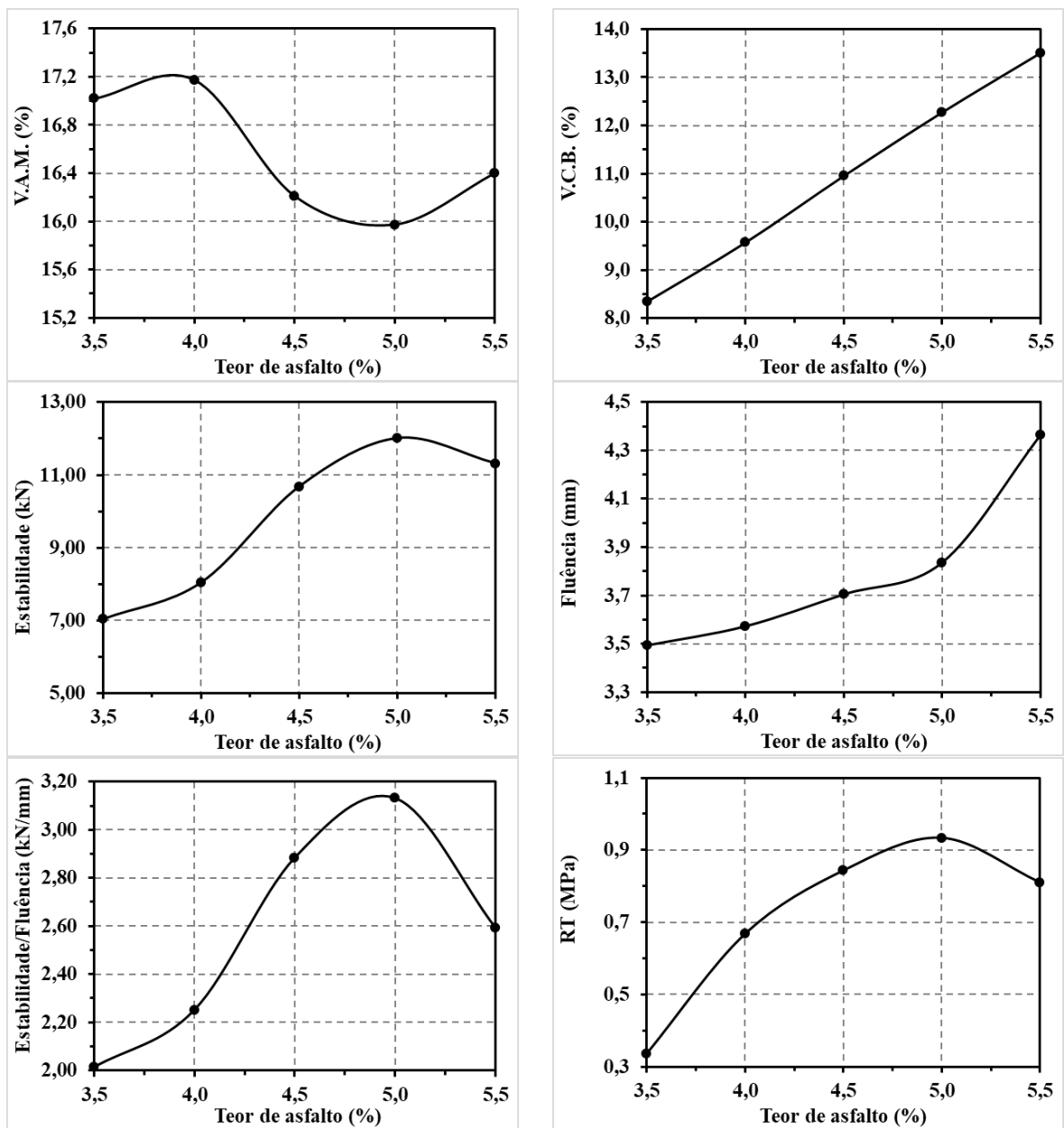
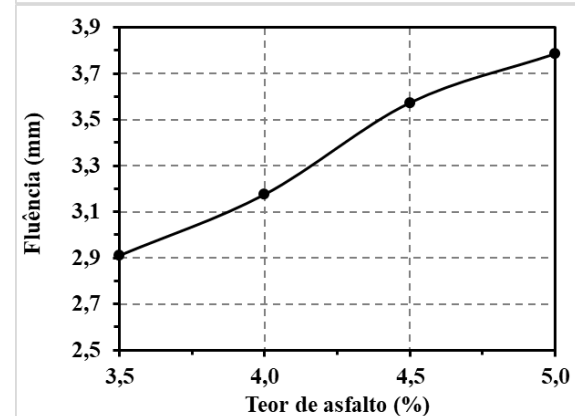
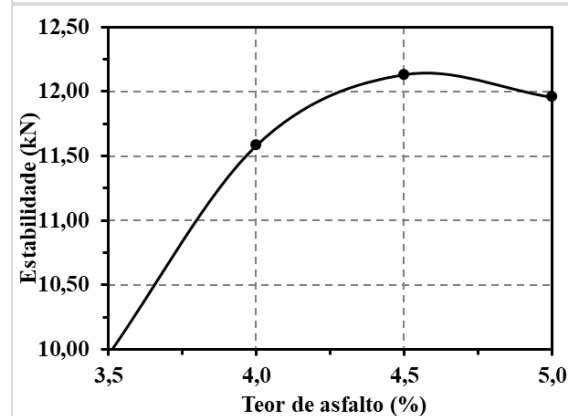
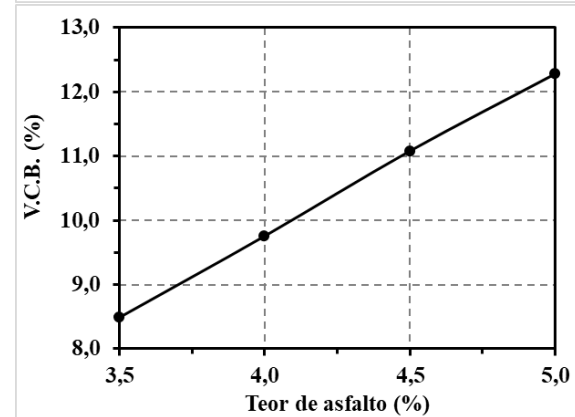
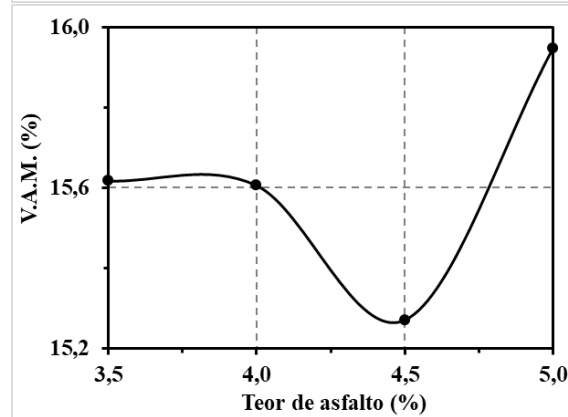
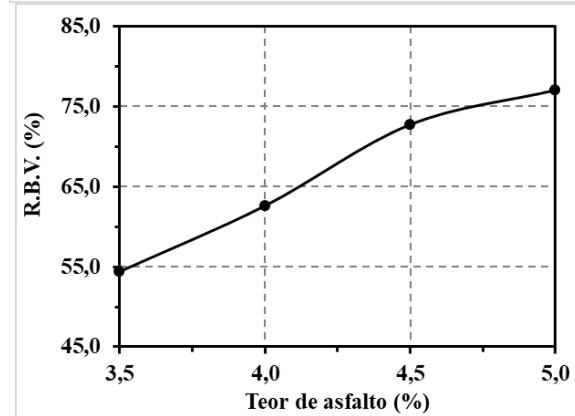
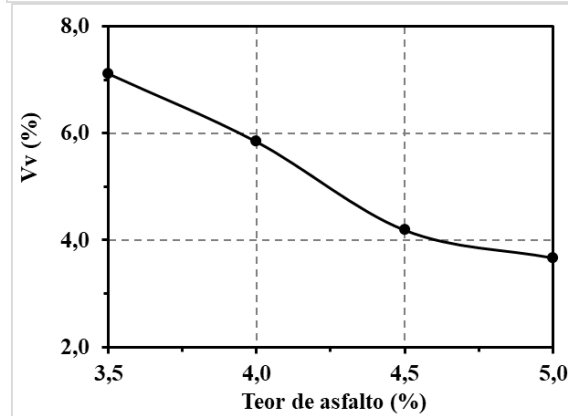
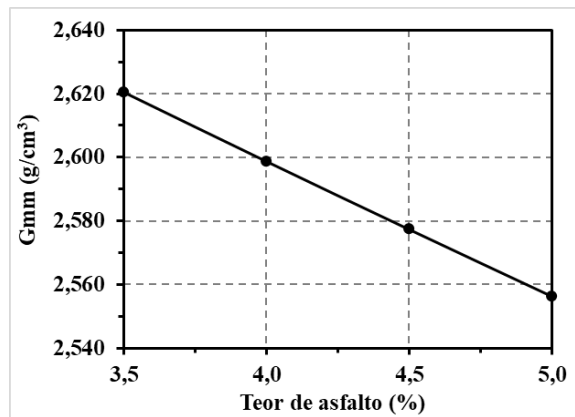
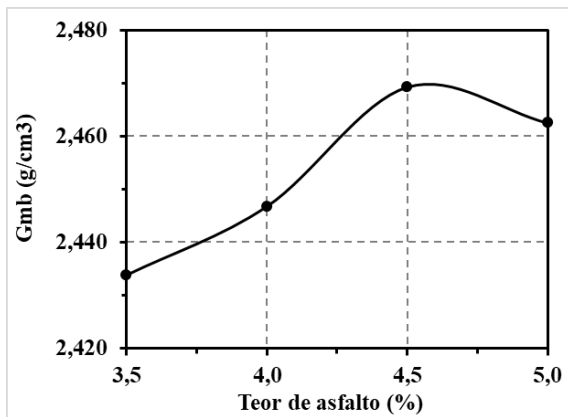


Figura B- 2 Ensaio Marshall da amostra MD12R



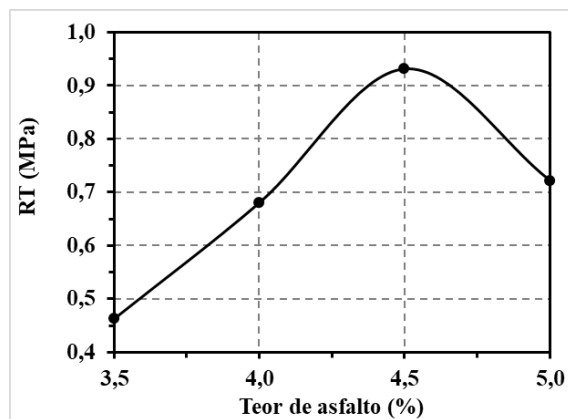
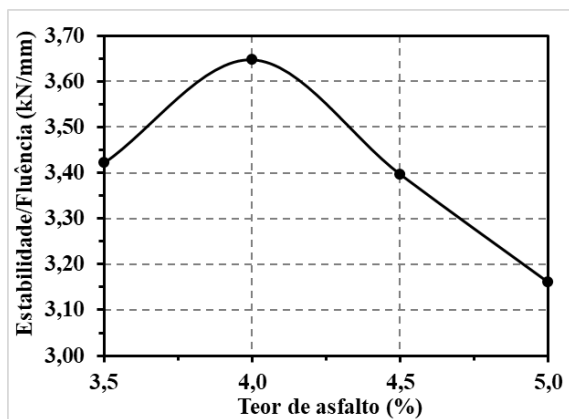
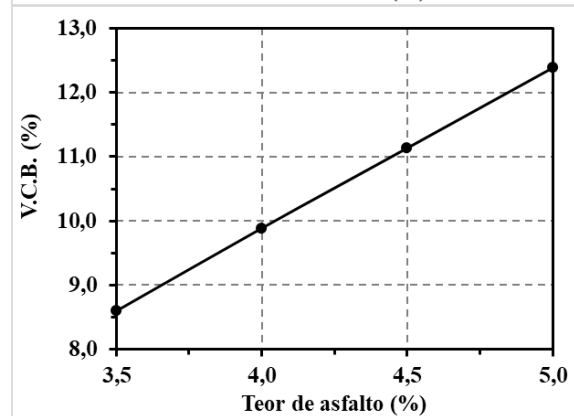
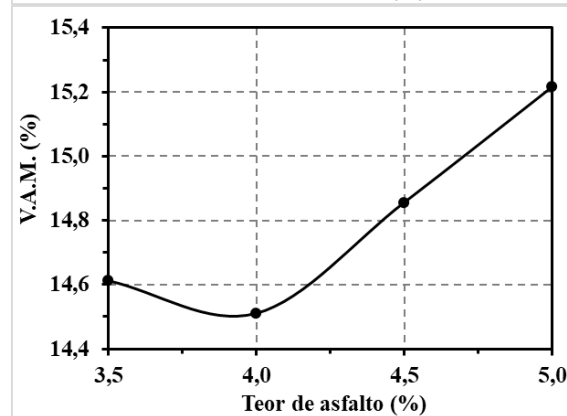
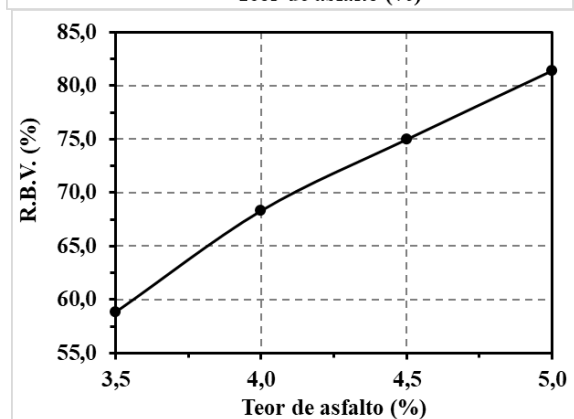
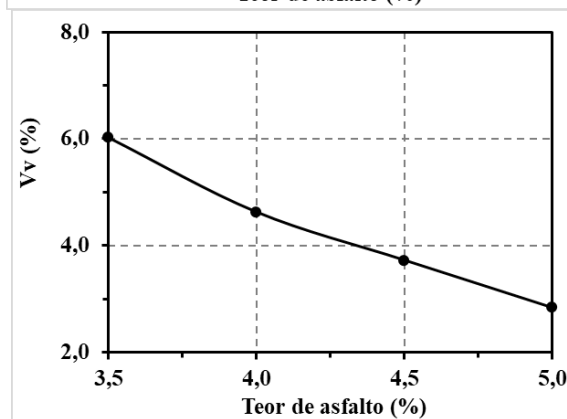
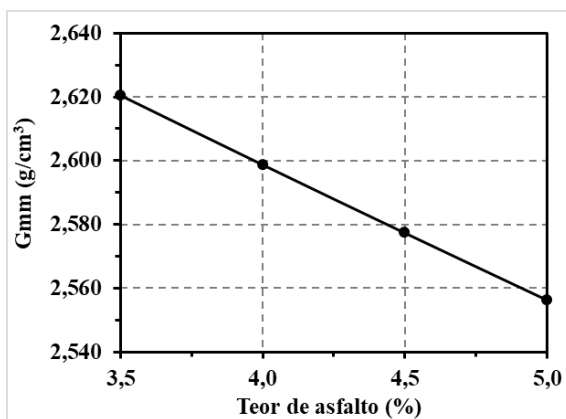
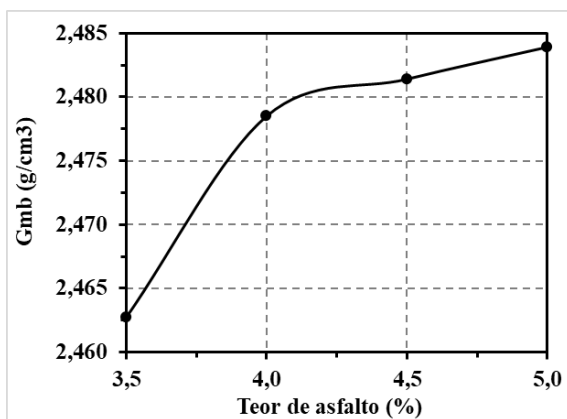


Figura B- 3 Ensaio Marshall da amostra MD38R



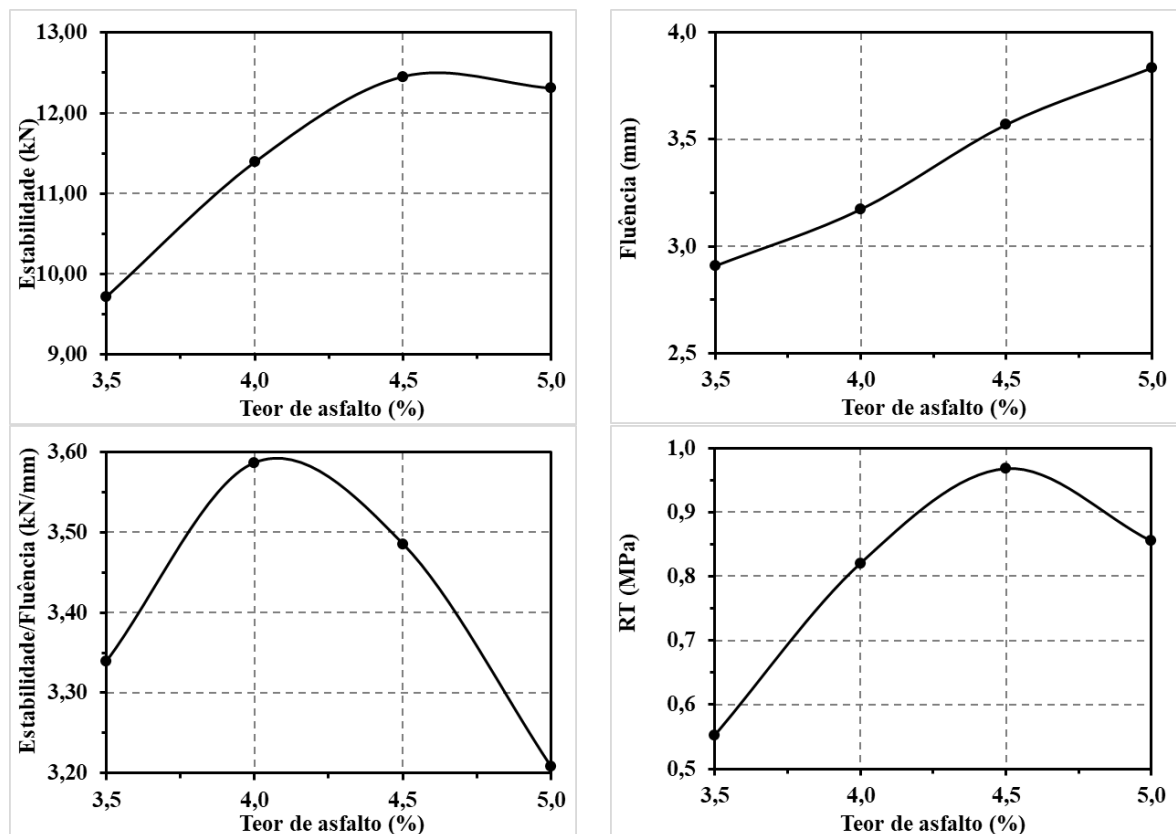
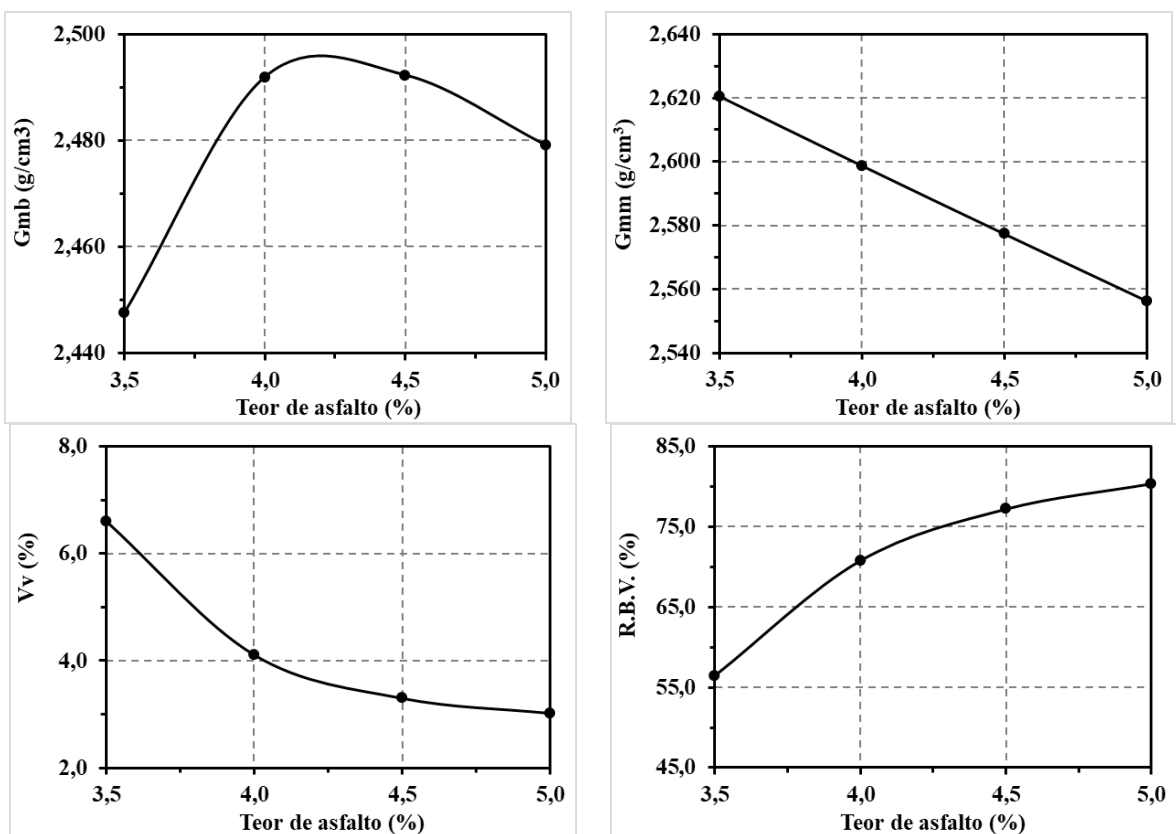


Figura B- 4 Ensaio Marshall da amostra MD12A



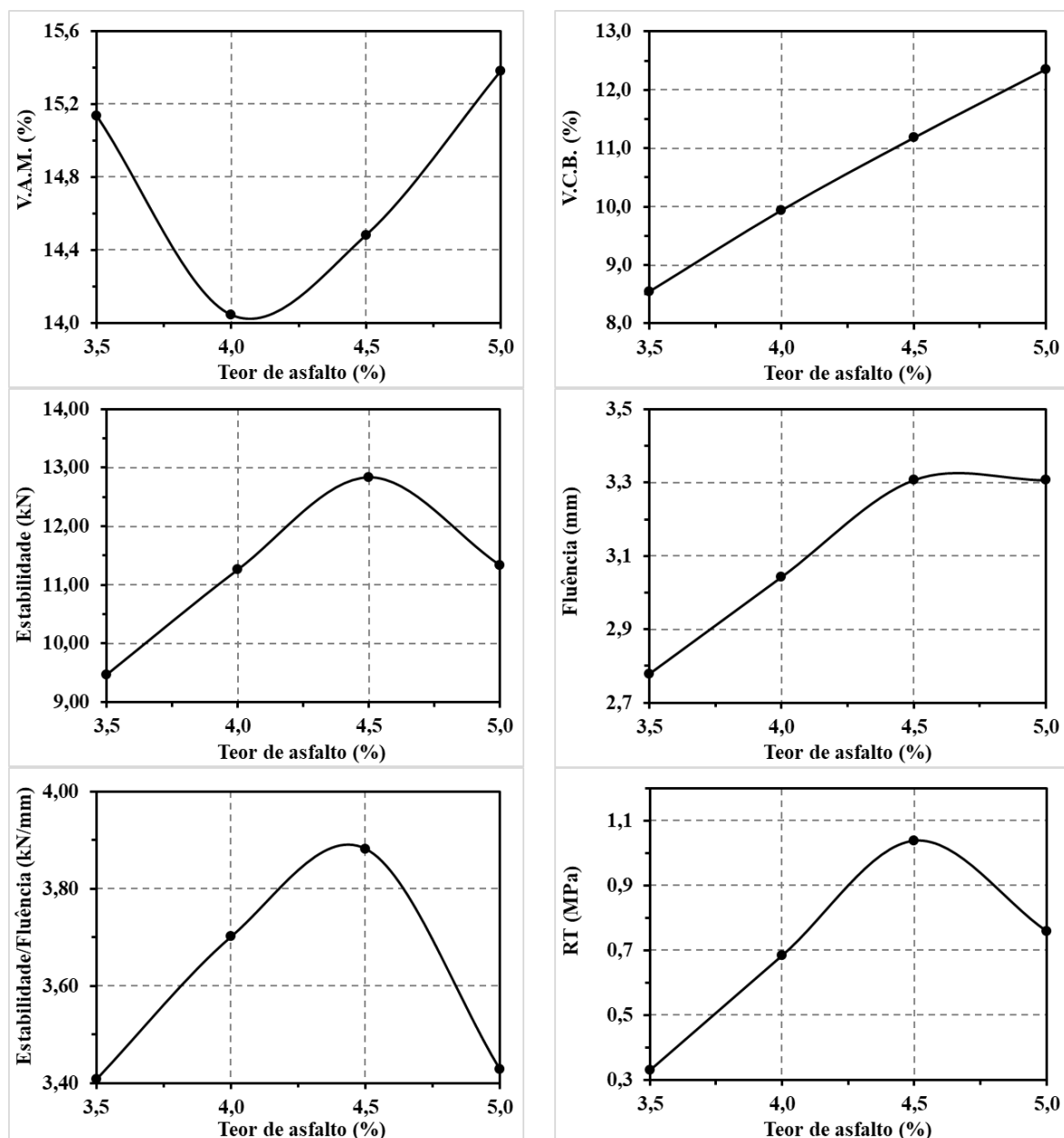
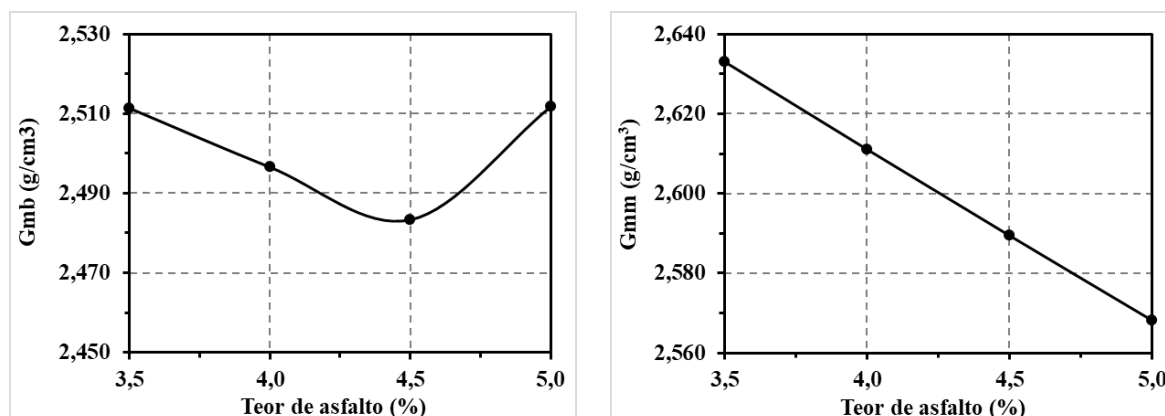


Figura B- 4 Ensaio Marshall da amostra MD38A



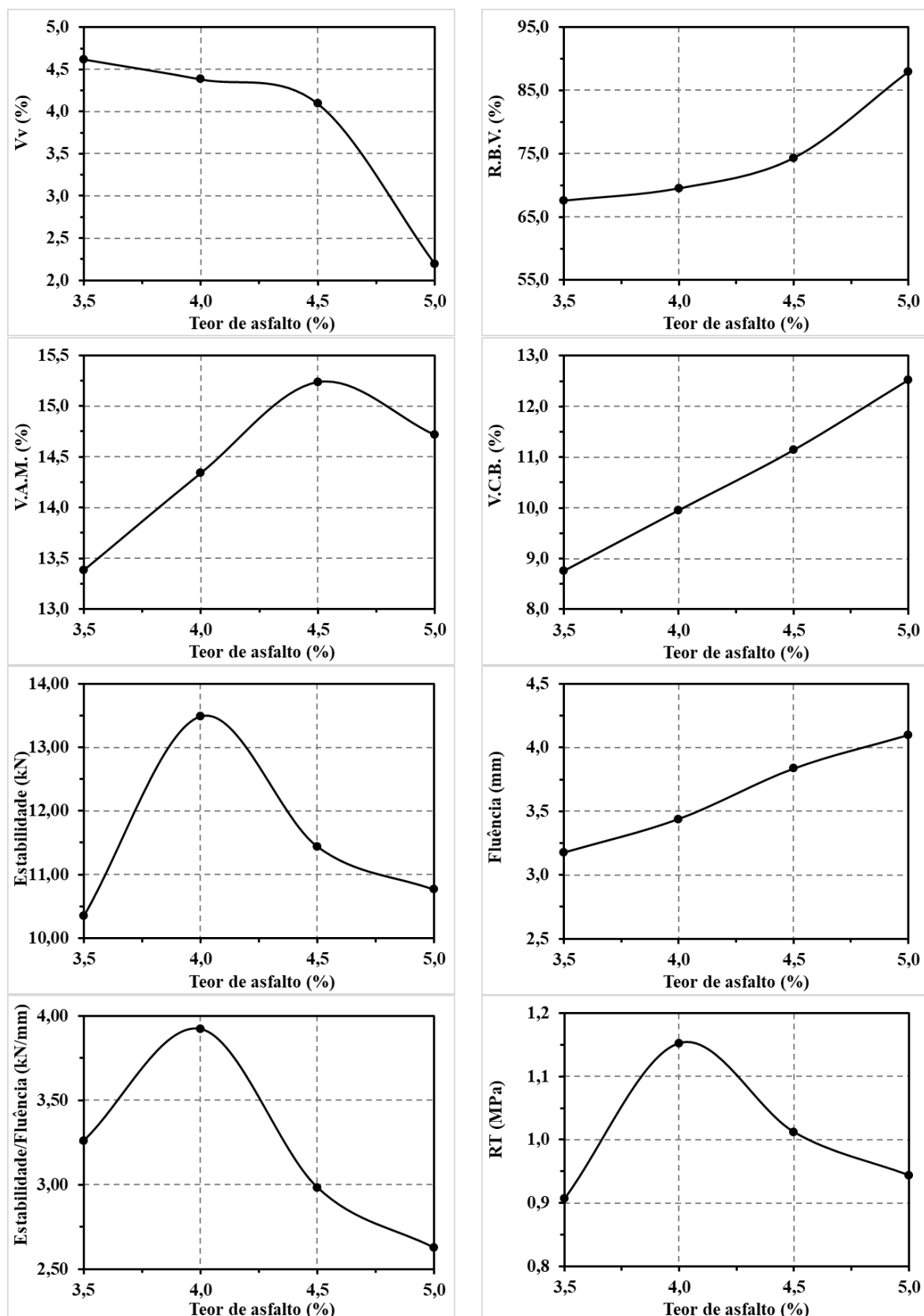
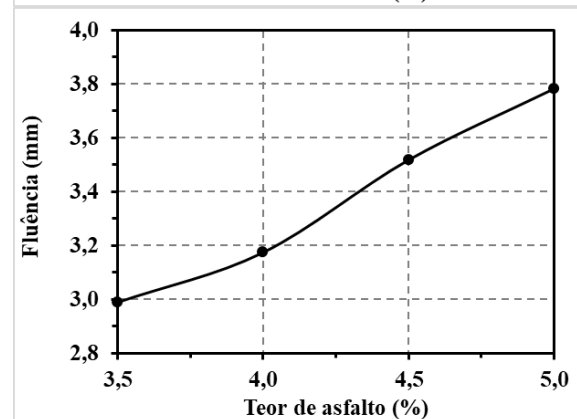
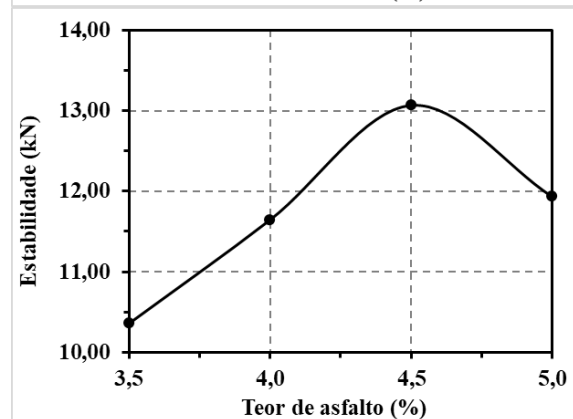
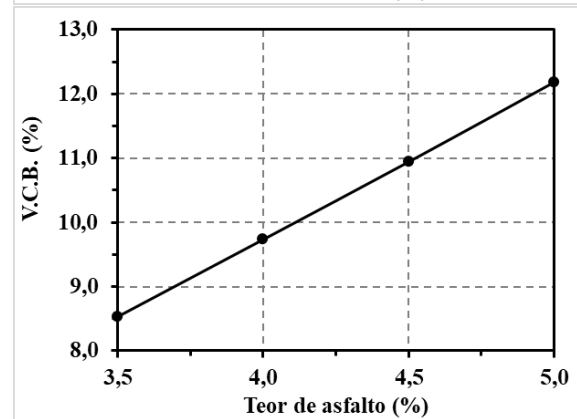
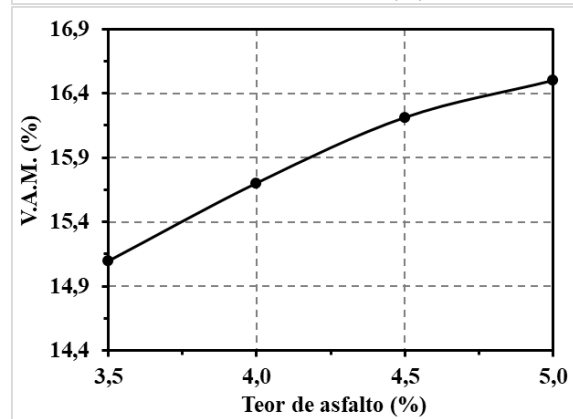
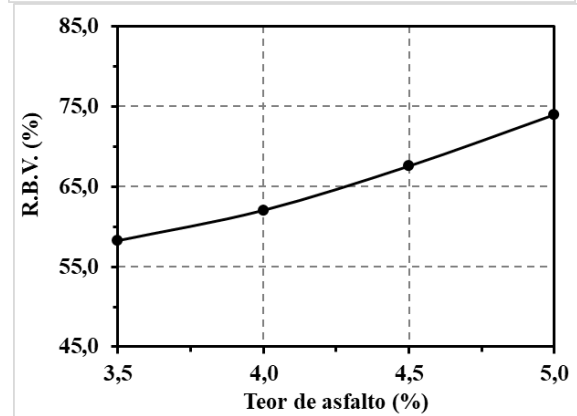
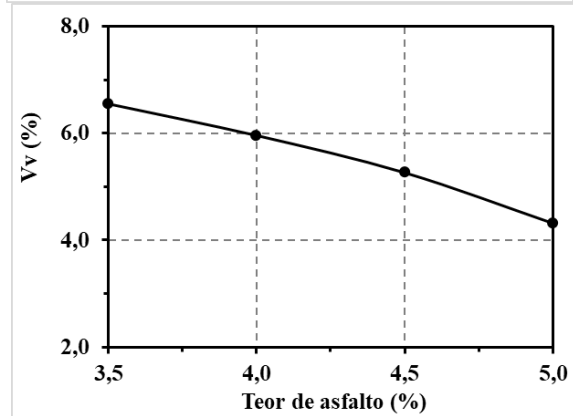
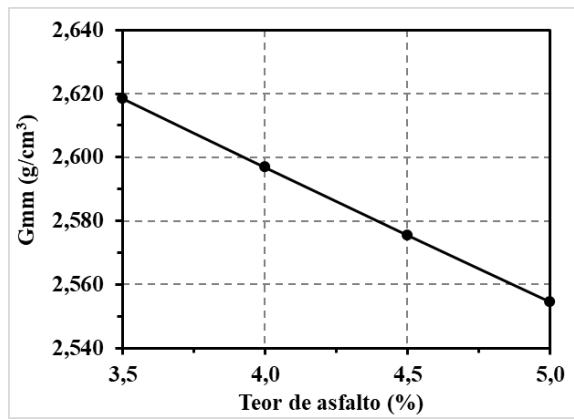
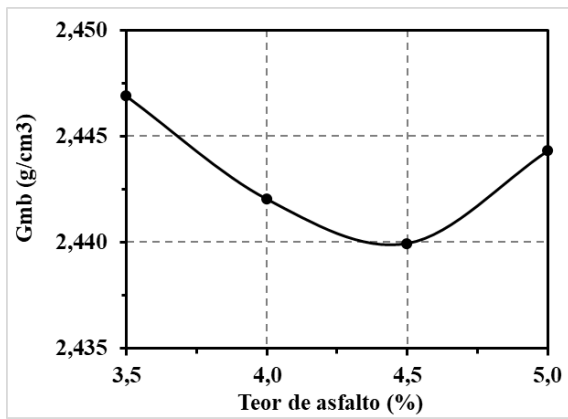


Figura B- 5 Ensaio Marshall da amostra MCI



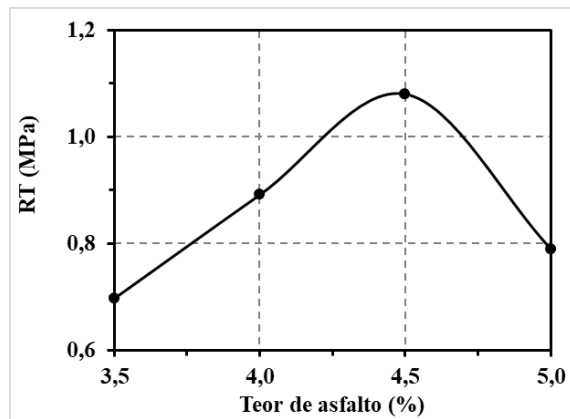
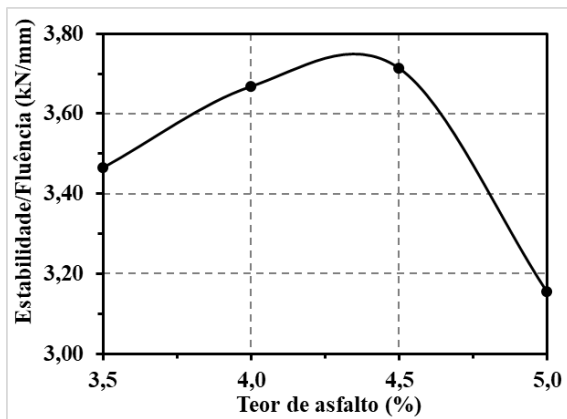
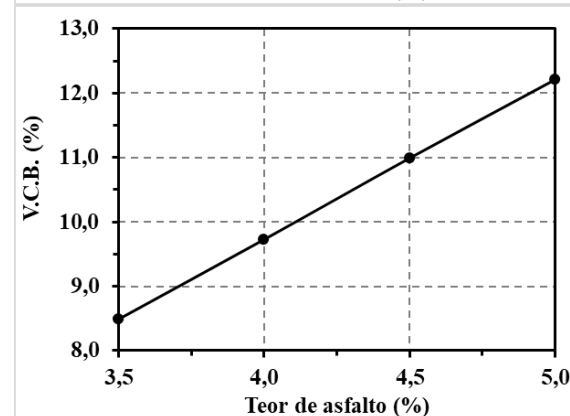
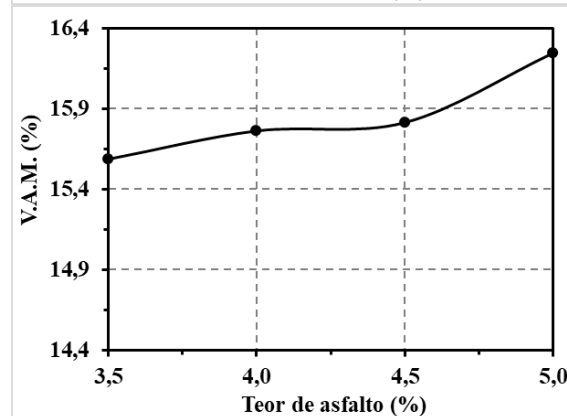
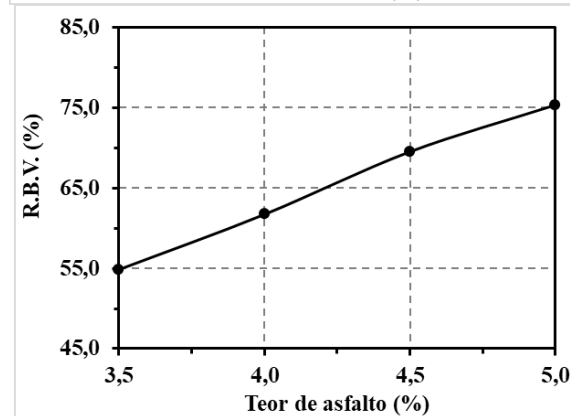
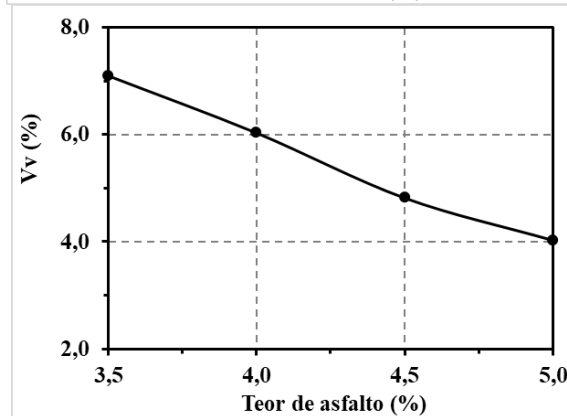
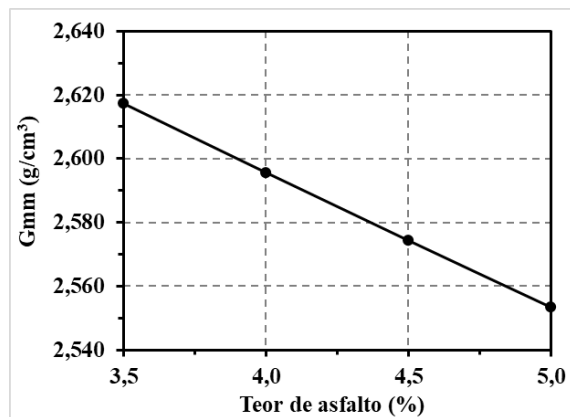
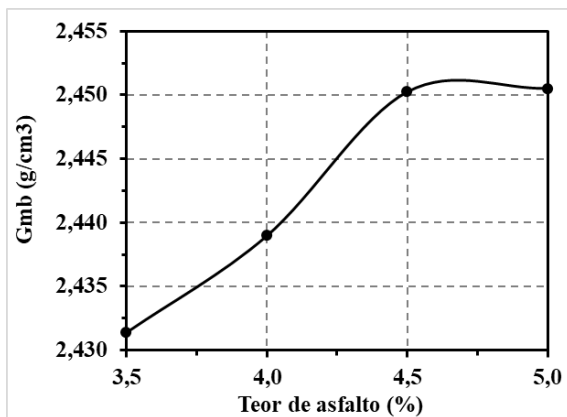


Figura B- 6 Ensaio Marshall da amostra MI34R



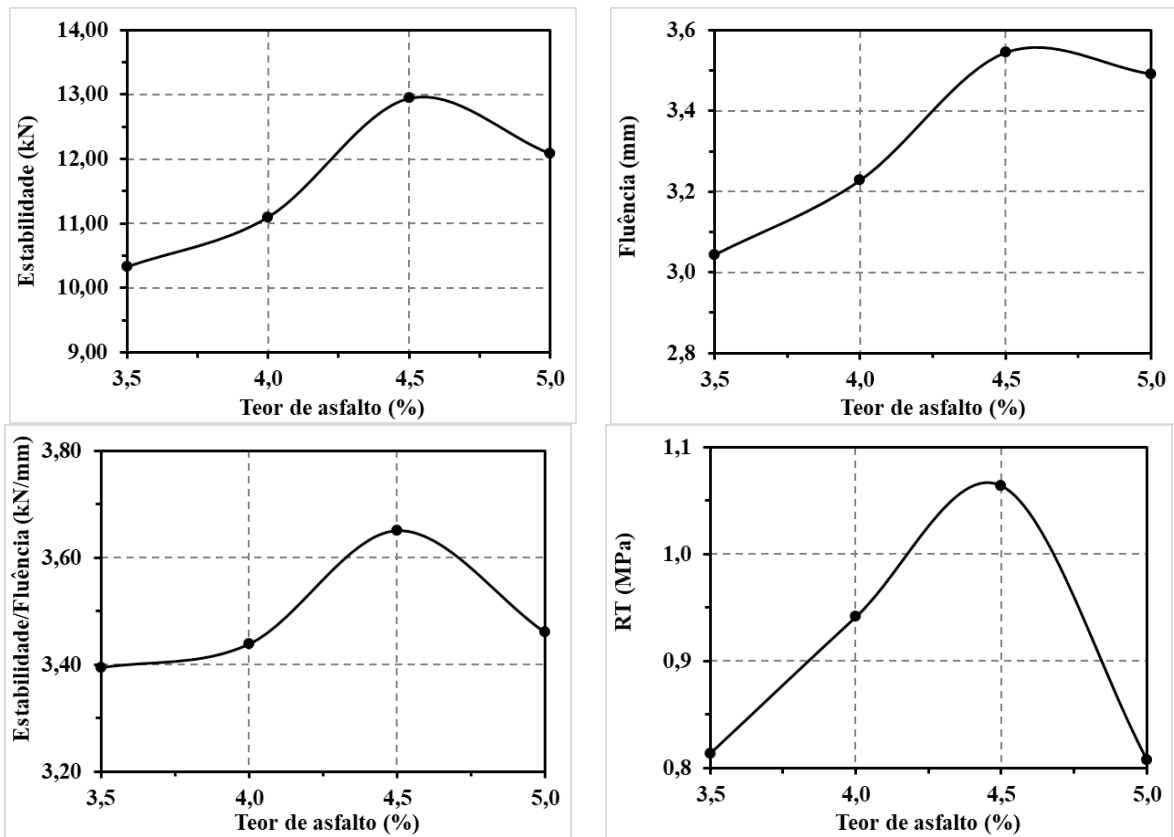
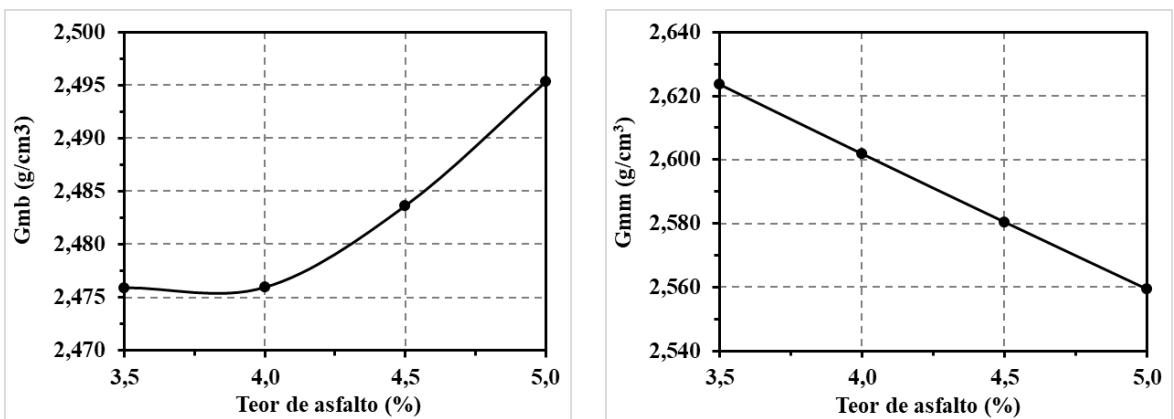


Figura B- 5 Ensaio Marshall da amostra MI12R



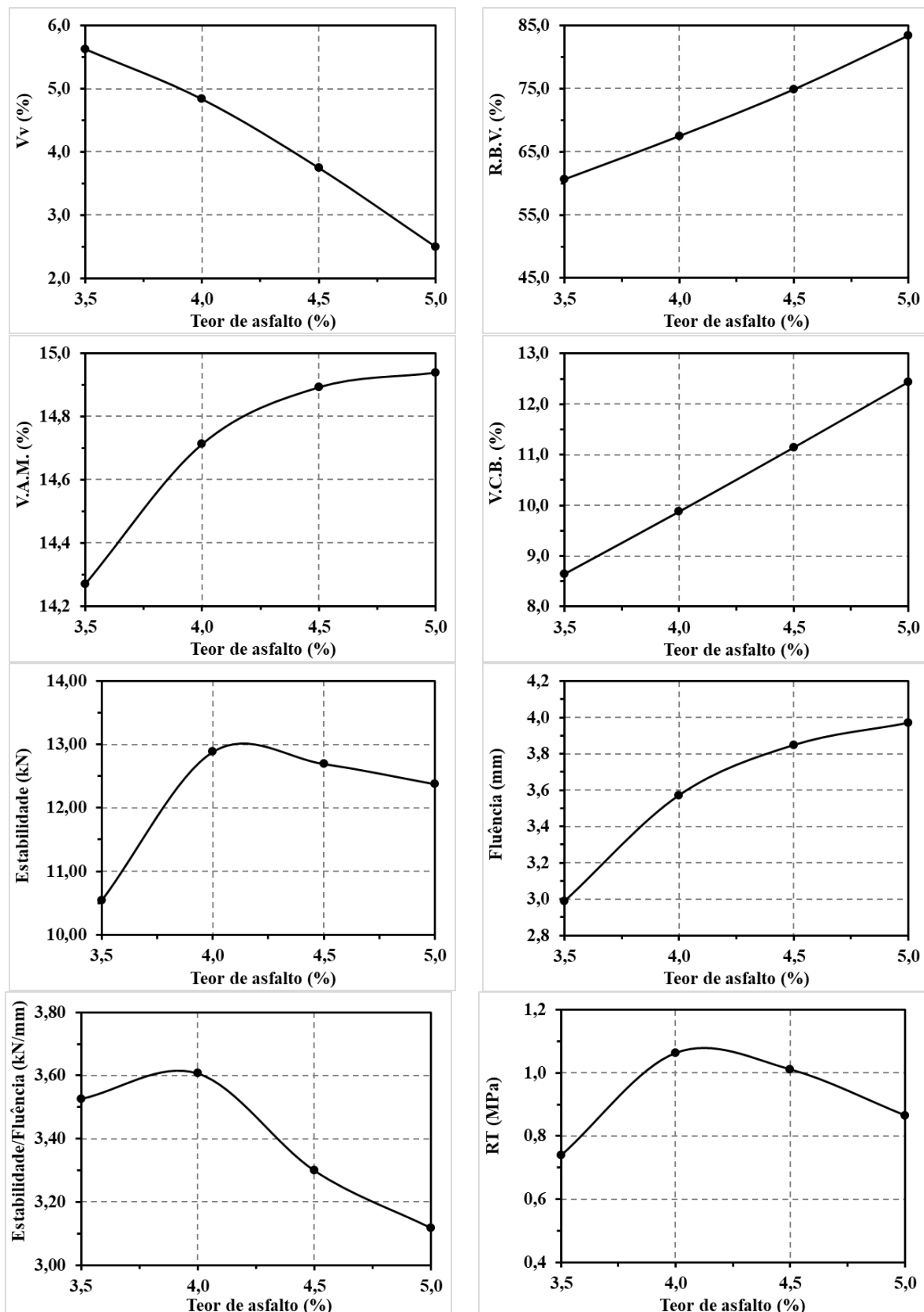
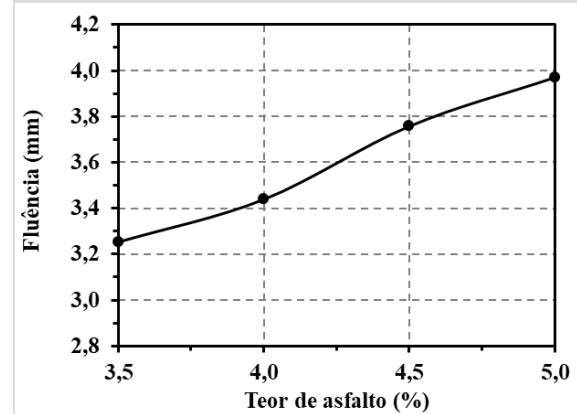
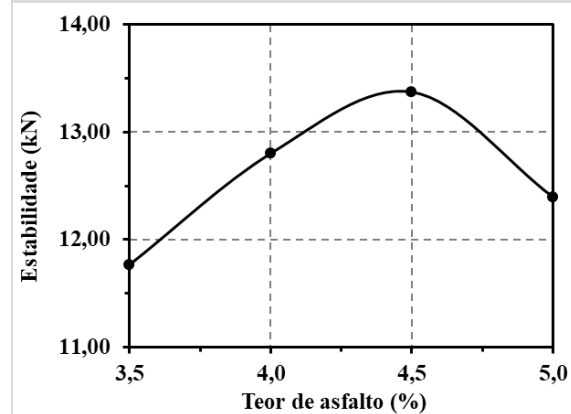
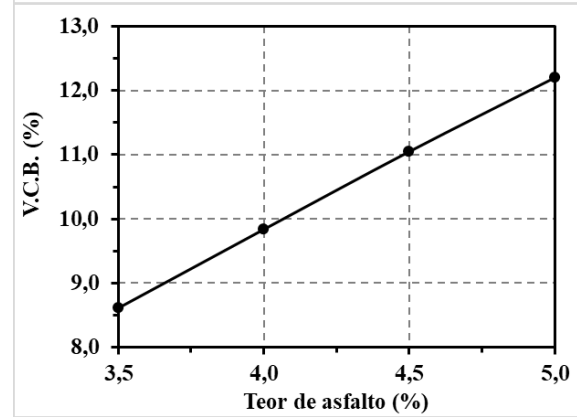
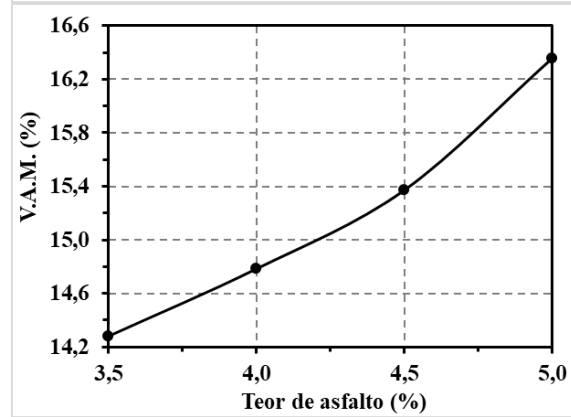
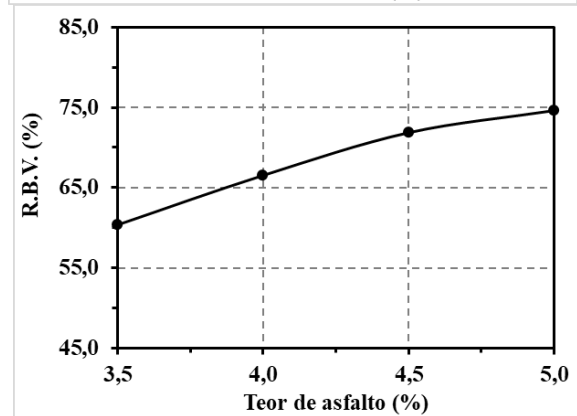
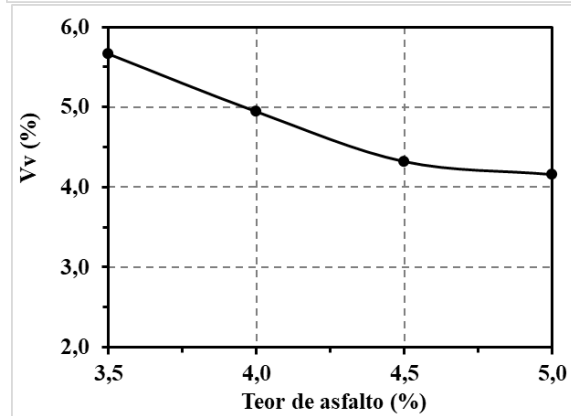
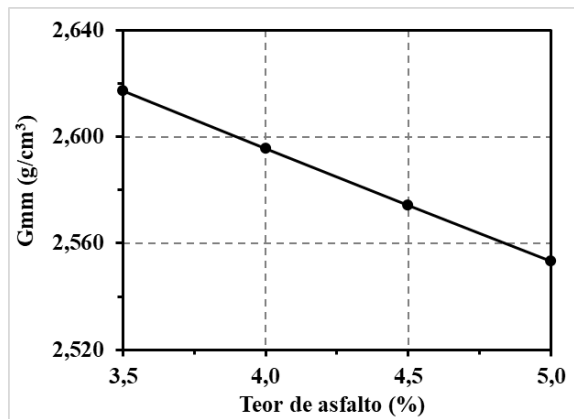
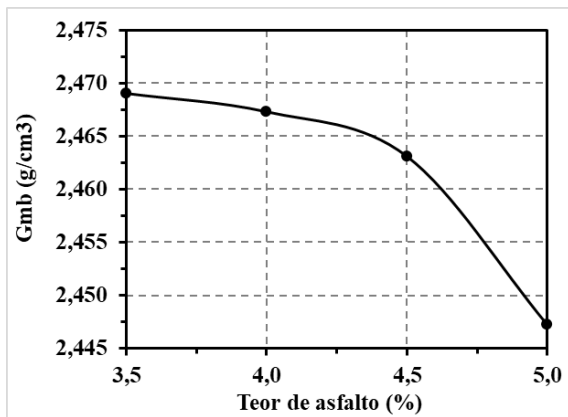


Figura B- 7 Ensaio Marshall da amostra MI38R



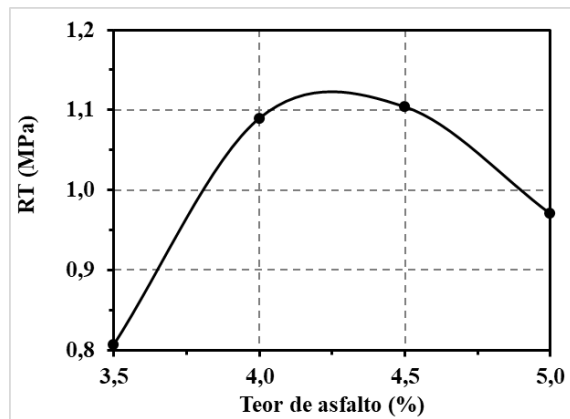
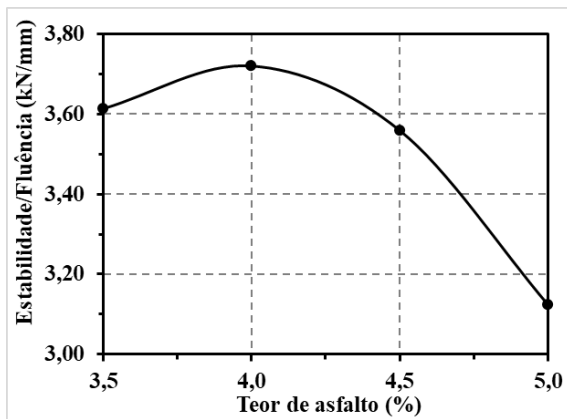
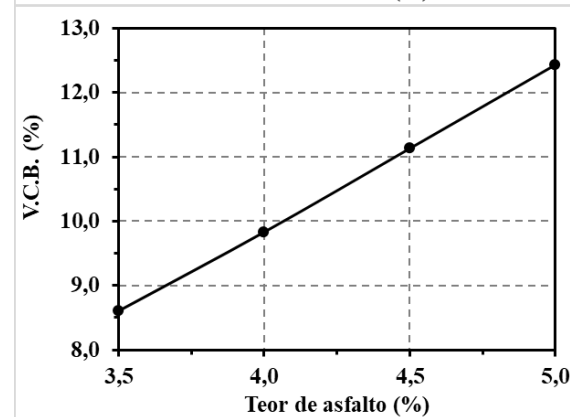
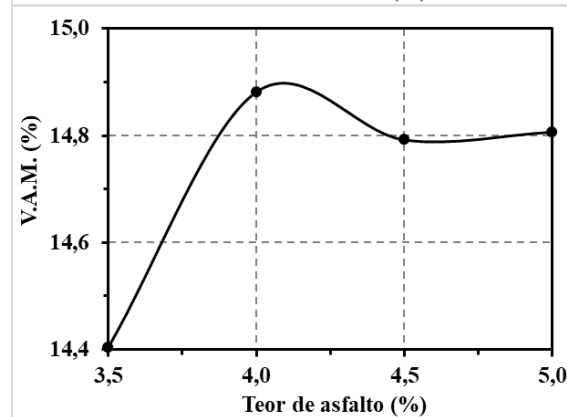
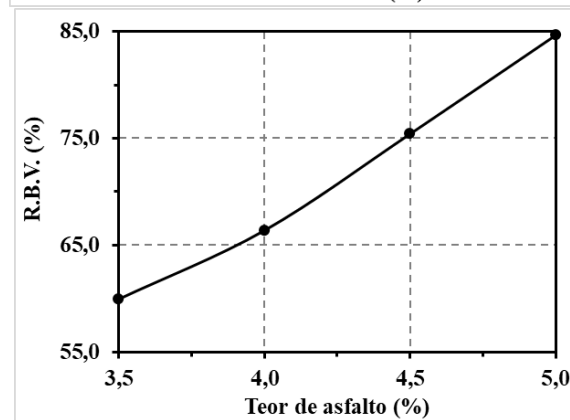
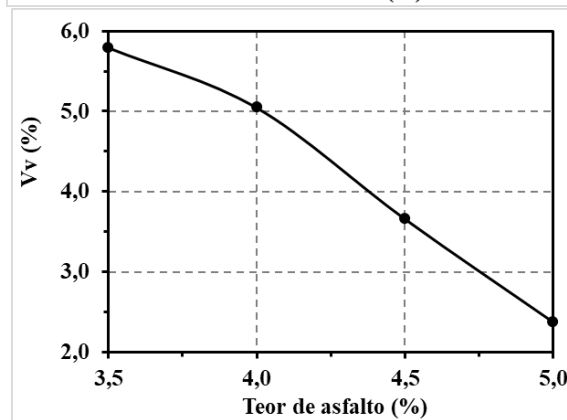
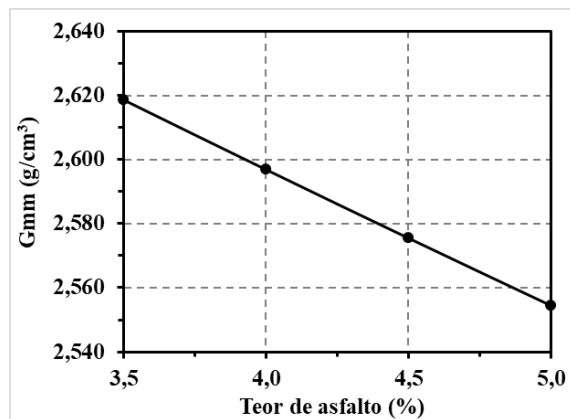
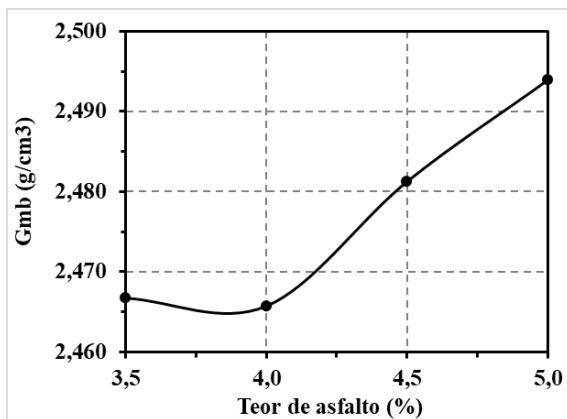


Figura B- 8 Ensaio Marshall da amostra MI34A



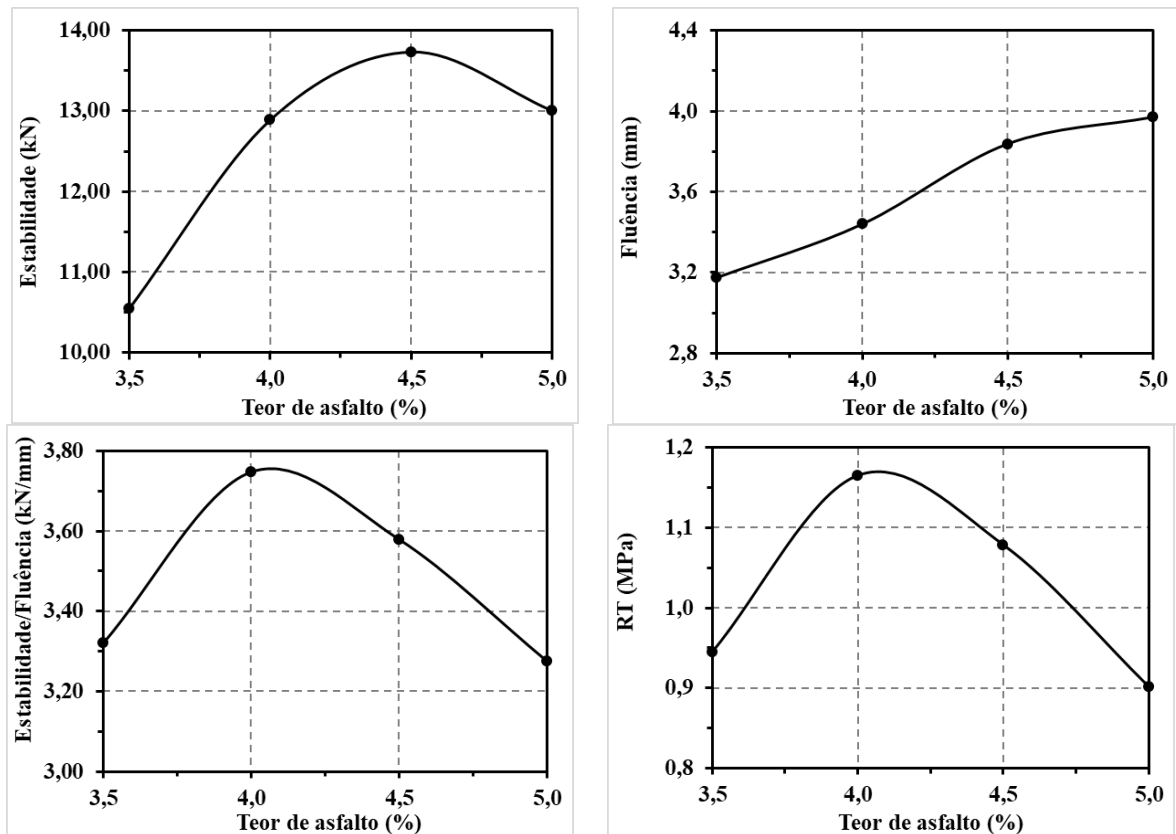
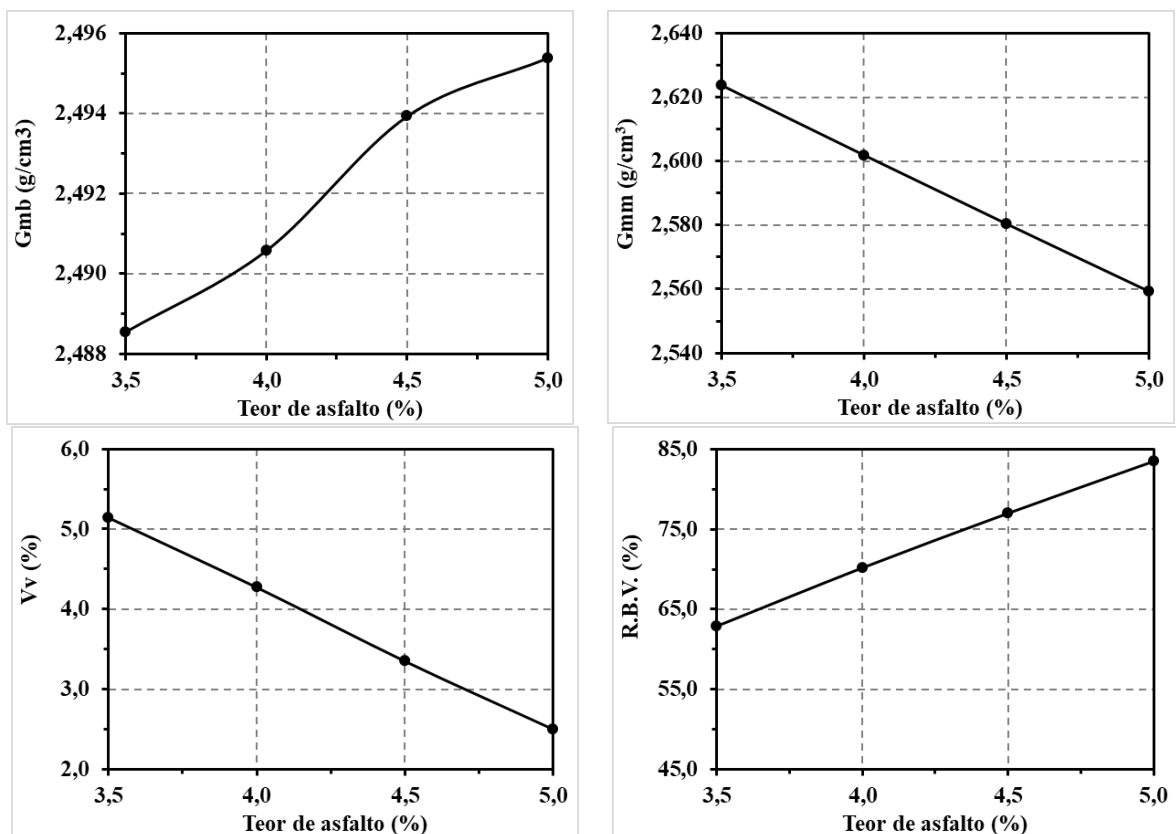


Figura B- 9 Ensaio Marshall da amostra MI12A



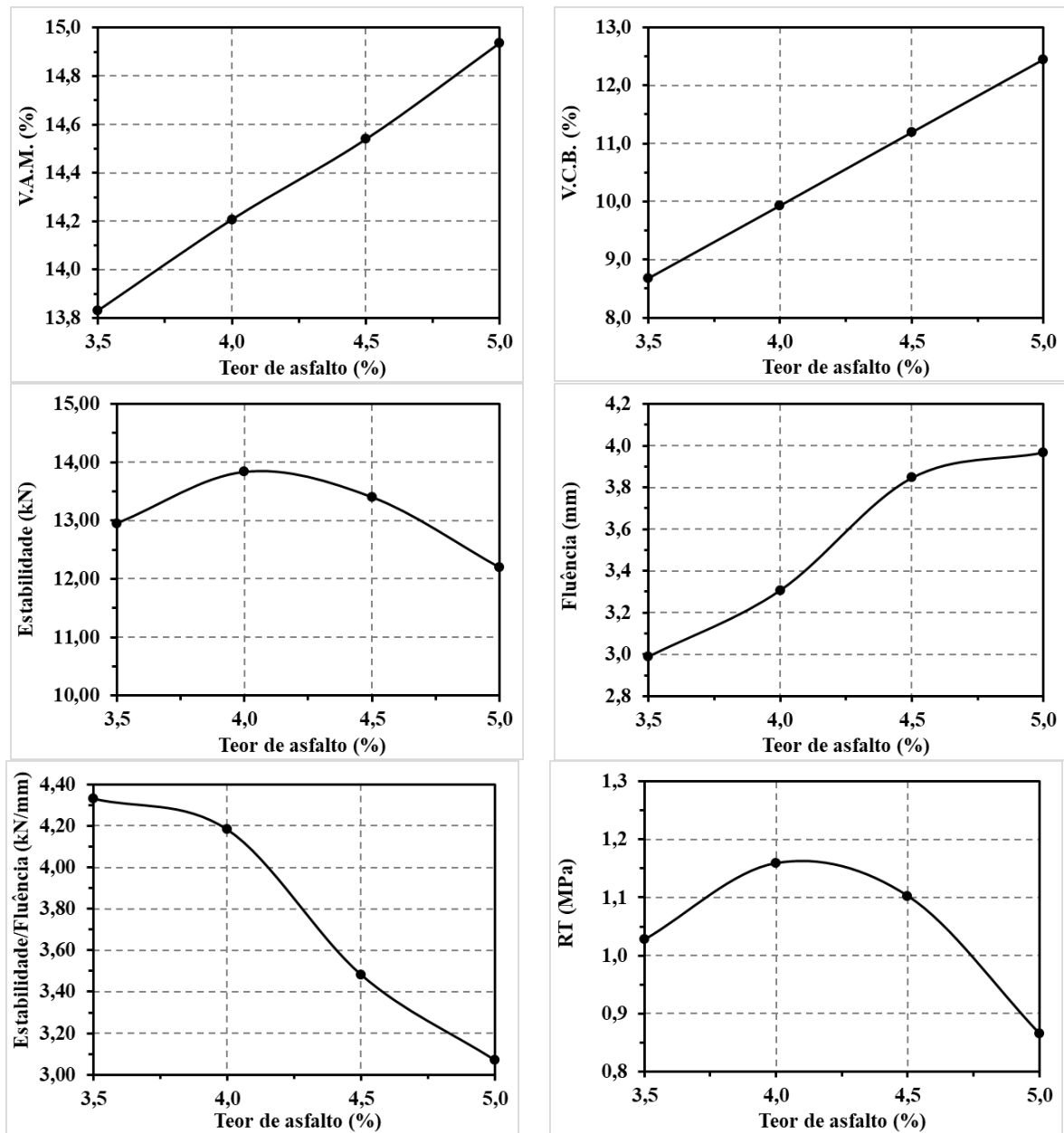


Figura B- 7 Ensaio Marshall da amostra MI38A

APÊNDICES C: COMPARAÇÃO DAS DISTÂNCIAS ENTRE AS AMOSTRAS

Tabela C.1. Comparação das Distâncias entre as Amostras Lavadas e Não Lavadas

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	1-2	1	0,00000175	0,01778016	0,15667093	0,01572175	0,00024717
1	1-2	2	0,00000146	0,03202871	0,59219852	0,04366308	0,00190646
1	1-2	3	0,00000008	0,0162295	0,24723927	0,01748669	0,00030578
1	1-2	4	0,00000066	0,02534489	0,15539742	0,01938797	0,00037589
1	1-2	5	0,00000123	0,02447886	0,79096504	0,05136428	0,00263829
1	1-2	6	0,00000076	0,02951113	0,28979439	0,02675617	0,00071589
1	1-2	7	0,00000224	0,03362584	0,25340695	0,01967162	0,00038697
1	1-2	8	0,00000734	0,03388546	0,34585606	0,02273587	0,00051692
1	1-2	9	0,00000228	0,0254835	0,1848855	0,0165808	0,00027492
1	1-2	10	0,00000391	0,03002174	0,18619107	0,0226856	0,00051464
1	1-2	11	0,00000028	0,02985632	0,23183484	0,02328337	0,00054212
1	1-2	12	0,00000086	0,02203144	0,25048389	0,02287841	0,00052342
1	1-2	13	0,00000031	0,01375046	0,22345468	0,01640235	0,00026904
1	1-2	14	0,00000017	0,0377529	0,35761219	0,0408648	0,00166993
1	1-2	15	0,00000063	0,01951462	0,45854807	0,03008419	0,00090506
1	1-2	16	0,00000404	0,04207284	0,19098097	0,02262561	0,00051192
1	1-2	17	0,00000125	0,05372971	0,5502945	0,04604353	0,00212001
1	1-2	18	0,00000187	0,05047635	0,39486747	0,03453068	0,00119237
1	1-2	19	0,00000263	0,02074202	0,17487699	0,01485243	0,00022059
1	1-2	20	0,00000035	0,01439016	0,11448012	0,01168492	0,00013654
1	1-2	21	0	0,01882193	0,13385491	0,01438877	0,00020704
1	1-2	22	0,00000005	0,03002247	0,15543719	0,02008506	0,00040341
1	1-2	23	0,00000049	0,0200627	0,14825478	0,01448149	0,00020971
1	1-2	24	0,00001791	0,06013472	0,53146618	0,03684501	0,00135755
1	1-2	25	0,00000739	0,05253089	0,27769547	0,02749028	0,00075572
1	1-2	26	0,00000109	0,02713622	0,16742938	0,0203137	0,00041265
1	1-2	27	0,00000113	0,02245889	0,19078033	0,01904421	0,00036268
1	1-2	28	0,00000597	0,03371487	0,38005056	0,02867761	0,00082241
1	1-2	29	0,00000063	0,0218217	0,13559627	0,01944609	0,00037815
1	1-2	30	0,0000016	0,01828303	0,15100284	0,01680935	0,00028255
1	1-2	31	0,00000052	0,01727467	0,33817868	0,01730704	0,00029953
1	1-2	32	0,00000012	0,01935724	0,1229678	0,01532265	0,00023478
1	1-2	33	0,00000016	0,02886942	0,26071422	0,0230353	0,00053063
1	1-2	34	0,00000064	0,02744163	0,34400259	0,02475671	0,00061289
1	1-2	35	0,0000048	0,01863442	0,11343106	0,01406629	0,00019786
1	3-4	1	0,00000062	0,01862095	0,42816773	0,02274023	0,00051712
1	3-4	2	0,00000009	0,02793418	0,30430325	0,02326983	0,00054149
1	3-4	3	0,00000024	0,01552525	0,27548068	0,01582839	0,00025054
1	3-4	4	0,00000028	0,04555984	0,59686906	0,04016622	0,00161333

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	3-4	5	0,00000072	0,03967652	0,15026614	0,01948422	0,00037963
1	3-4	6	0,00000111	0,03847308	0,270291	0,02389249	0,00057085
1	3-4	7	0,00000175	0,04086006	0,55278548	0,04216374	0,00177778
1	3-4	8	0,00000435	0,06183015	0,69919165	0,04124802	0,0017014
1	3-4	9	0,00000428	0,08652664	0,78796959	0,04715146	0,00222326
1	3-4	10	0,00000064	0,0338047	0,32128734	0,03144191	0,00098859
1	3-4	11	0,00000045	0,05000278	0,50305701	0,04125324	0,00170183
1	3-4	12	0,00000557	0,04966889	0,4420503	0,03818805	0,00145833
1	3-4	13	0,00000269	0,07152797	0,59315886	0,05965124	0,00355827
1	3-4	14	0,00000138	0,05277888	0,59661237	0,04605808	0,00212135
1	3-4	15	0,00000002	0,06450941	0,6153684	0,05836471	0,00340644
1	3-4	16	0,00000239	0,02455562	0,44431261	0,02296848	0,00052755
1	3-4	17	0,00000394	0,03946729	0,44672184	0,03149309	0,00099181
1	3-4	18	0,00000192	0,04591842	0,58065481	0,02971278	0,00088285
1	3-4	19	0,00000152	0,05609557	0,43599812	0,03387242	0,00114734
1	3-4	20	0,00000181	0,02457849	0,22949822	0,01715209	0,00029419
1	3-4	21	0,00000009	0,04396658	0,5839209	0,03601512	0,00129709
1	3-4	22	0,00000017	0,03197474	0,41137167	0,0296908	0,00088154
1	3-4	23	0,00000793	0,04441012	0,34190286	0,03157184	0,00099678
1	3-4	24	0,00000162	0,02398325	0,28331886	0,01899231	0,00036071
1	3-4	25	0,00000246	0,04715165	0,5798142	0,04725461	0,002233
1	3-4	26	0,00000217	0,04147407	0,36332407	0,03810496	0,00145199
1	3-4	27	0,00000026	0,02294309	0,46804235	0,03132202	0,00098107
1	3-4	28	0,00000166	0,0262246	0,31518909	0,02637486	0,00069563
1	3-4	29	0,00000007	0,01400027	0,11465399	0,01146885	0,00013153
1	3-4	30	0,00000073	0,03058964	0,42714598	0,02907789	0,00084552
1	3-4	31	0,00000035	0,01875808	0,31002084	0,01729743	0,0002992
1	3-4	32	0,00000025	0,02151643	0,41842648	0,02890919	0,00083574
1	3-4	33	0,00000069	0,03092043	0,55376155	0,02923325	0,00085458
1	3-4	34	0,00000028	0,01904862	0,38217377	0,02393164	0,00057272
1	3-4	35	0,00000083	0,03119473	0,4166203	0,03557512	0,00126559
1	3-8	1	0,00004706	0,09473395	0,33429638	0,04827516	0,00233049
1	3-8	2	0,00001202	0,05282028	0,22662091	0,02461872	0,00060608
1	3-8	3	0,00000983	0,03546573	0,40115437	0,03316726	0,00110007
1	3-8	4	0,00004888	0,04609952	0,15136047	0,02000444	0,00040018
1	3-8	5	0,00000401	0,02571169	0,13580131	0,02022118	0,0004089
1	3-8	6	0,00000075	0,0244488	0,27510661	0,02498733	0,00062437
1	3-8	7	0,00000009	0,01912718	0,14476729	0,01559544	0,00024322
1	3-8	8	0,00001462	0,03869281	0,18814519	0,02461115	0,00060571
1	3-8	9	0,00000193	0,0206923	0,17153762	0,01851749	0,0003429
1	3-8	10	0,00000032	0,02414273	0,51916629	0,04438056	0,00196963
1	3-8	11	0,00000058	0,0255091	0,40176212	0,02981004	0,00088864
1	3-8	12	0,00000104	0,05084932	0,28510255	0,04194357	0,00175926
1	3-8	13	0,00000132	0,02165875	0,12551992	0,0173907	0,00030244

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	3-8	14	0,00000004	0,01356773	0,10252338	0,01351917	0,00018277
1	3-8	15	0,00000051	0,01734732	0,19809186	0,01528751	0,00023371
1	3-8	16	0,000001	0,02186632	0,18506692	0,0192623	0,00037104
1	3-8	17	0,00002905	0,06343446	0,33479187	0,03108014	0,00096598
1	3-8	18	0,00045484	0,07048574	0,21574241	0,02426644	0,00058886
1	3-8	19	0,00000023	0,04356644	0,65041109	0,05832708	0,00340205
1	3-8	20	0,00000067	0,02989174	0,18486206	0,02271978	0,00051619
1	3-8	21	0,00000504	0,03160602	0,35406652	0,02583629	0,00066751
1	3-8	22	0,00000091	0,02111062	0,30926252	0,01866436	0,00034836
1	3-8	23	0,00000819	0,03819985	0,1642874	0,02396632	0,00057438
1	3-8	24	0,00000374	0,02535063	0,23052741	0,02576595	0,00066388
1	3-8	25	0,00000005	0,01431942	0,08176549	0,01162783	0,00013521
1	3-8	26	0,00000535	0,02060361	0,10317703	0,01440773	0,00020758
1	3-8	27	0,00000161	0,04532231	0,44287386	0,04190954	0,00175641
1	3-8	28	0,00000554	0,04628621	0,31584123	0,03277418	0,00107415
1	3-8	29	0,00000058	0,02704204	0,44193447	0,02660313	0,00070773
1	3-8	30	0,00000981	0,05389747	1,40929155	0,13679091	0,01871175
1	3-8	31	0,00000872	0,06301513	0,53163722	0,0425353	0,00180925
1	3-8	32	0,00000062	0,04353574	0,24347116	0,03177111	0,0010094
1	3-8	33	0,00000697	0,02516834	0,31903578	0,0218216	0,00047618
1	3-8	34	0,00000432	0,03764112	0,26967769	0,02580523	0,00066591
1	3-8	35	0,00001759	0,06734154	0,32437965	0,02711556	0,00073525

Tabela C.2. Comparação das Distâncias entre as Amostras Peneiradas e Lavadas

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	1-2	1	0,00000125	0,02317901	0,22289872	0,01760749	0,00031002
1	1-2	2	0,00004187	0,44429073	1,75198291	0,35370104	0,12510443
1	1-2	3	0,00000073	0,0210252	0,49540259	0,03445473	0,00118713
1	1-2	4	0,00000186	0,01989656	0,6349998	0,02999748	0,00089985
1	1-2	5	0,00000124	0,01154487	0,35430254	0,01480101	0,00021907
1	1-2	6	0,00000341	0,02485314	0,22286297	0,02701262	0,00072968
1	1-2	7	0,00000013	0,02138406	0,31284622	0,02495434	0,00062272
1	1-2	8	0,00000016	0,01660765	0,35684411	0,01828277	0,00033426
1	1-2	9	0,00000775	0,03805227	0,51732076	0,04796067	0,00230023
1	1-2	10	0,00000019	0,03150415	0,2105815	0,02568934	0,00065994
1	1-2	11	0,00000088	0,09885046	0,5693354	0,09402749	0,00884117
1	1-2	12	0,00000018	0,01373183	0,29255054	0,01565273	0,00024501
1	1-2	13	0,00000013	0,08725311	0,3924573	0,07979631	0,00636745
1	1-2	14	0,00000052	0,04612361	1,26511583	0,07998159	0,00639706
1	1-2	15	0,00000149	0,0161661	0,31343398	0,02170733	0,00047121
1	1-2	16	0,00000006	0,01932606	0,15438875	0,01863039	0,00034709

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	1-2	17	0,00000009	0,01379349	0,30765737	0,01513366	0,00022903
1	1-2	18	0,00000044	0,01495451	0,14669546	0,01318478	0,00017384
1	1-2	19	0,00000052	0,01596584	0,19700375	0,01562736	0,00024421
1	1-2	20	0,00000015	0,0125579	0,1169745	0,01340463	0,00017968
1	1-2	21	0,00000359	0,01873739	0,51302637	0,03191974	0,00101887
1	1-2	22	0,00000388	0,02033831	0,2503555	0,02239939	0,00050173
1	1-2	23	0,00000181	0,01712341	0,21760672	0,01768794	0,00031286
1	1-2	24	0,00000058	0,05415421	0,58479859	0,06118702	0,00374385
1	1-2	25	0,00000074	0,04477175	0,54892566	0,04981519	0,00248155
1	1-2	26	0,00000218	0,02314057	0,27633612	0,02364332	0,00055901
1	1-2	27	0,00000191	0,02089969	0,52304351	0,02676594	0,00071642
1	1-2	28	0,00000106	0,02251812	0,2117328	0,02086479	0,00043534
1	1-2	29	0,00000082	0,01962088	0,23239292	0,01939236	0,00037606
1	1-2	30	0,00000231	0,01923999	0,19454433	0,01715499	0,00029429
1	1-2	31	0,00000007	0,02746414	0,37899537	0,01696025	0,00028765
1	1-2	32	0,00000021	0,01775337	0,22313481	0,01587529	0,00025202
1	1-2	33	0,00000123	0,0295844	0,58712709	0,03476548	0,00120864
1	1-2	34	0,00000215	0,0235873	0,95471337	0,04493466	0,00201912
1	1-2	35	0,00000002	0,02292675	0,18899512	0,01777035	0,00031579
1	3-4	1	0,00000087	0,02720928	0,4585461	0,0319831	0,00102292
1	3-4	2	0,00000091	0,05368566	0,79843915	0,06904232	0,00476684
1	3-4	3	0,00000123	0,02122522	0,26681942	0,01767205	0,0003123
1	3-4	4	0,00000072	0,03884682	1,1665601	0,07043587	0,00496121
1	3-4	5	0,00000025	0,04911758	2,23858874	0,14722552	0,02167535
1	3-4	6	0,00000001	0,02728422	1,56416444	0,06740623	0,0045436
1	3-4	7	0,00000766	0,46150548	4,45086397	0,61394793	0,37693206
1	3-4	8	0,00000021	0,04038177	1,50334659	0,07408705	0,00548889
1	3-4	9	0,0000173	0,39151343	1,89467849	0,3616909	0,13082031
1	3-4	10	0,00000047	0,04947079	0,34186253	0,03714683	0,00137989
1	3-4	11	0,00000097	0,02534557	0,42921205	0,02724689	0,00074239
1	3-4	12	0,00000559	0,10890241	2,61755735	0,2524184	0,06371505
1	3-4	13	0,00000042	0,02204996	0,50345675	0,02935115	0,00086149
1	3-4	14	0,00000064	0,03165578	0,51868925	0,03209076	0,00102982
1	3-4	15	0,00008559	2,55633211	7,17848805	1,42908979	2,04229763
1	3-4	16	0,00000014	0,02469503	0,4000039	0,03111566	0,00096818
1	3-4	17	0,00000028	0,02988907	1,24238029	0,0557672	0,00310998
1	3-4	18	0,00000049	0,06772468	1,41994961	0,11712901	0,0137192
1	3-4	19	0,00000001	0,03976685	0,9347264	0,0619365	0,00383613
1	3-4	20	0,00000135	0,0452152	0,41060671	0,05319799	0,00283003
1	3-4	21	0,00000036	0,0611678	0,78723841	0,07602543	0,00577987
1	3-4	22	0,00004526	1,05730305	4,11926422	0,83065164	0,68998215
1	3-4	23	0,00000015	0,02419954	0,61177637	0,03185318	0,00101463
1	3-4	24	0,00000433	0,06311336	0,54416502	0,06874396	0,00472573
1	3-4	25	0,00000649	0,98714464	5,37126097	0,95798783	0,91774068

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	3-4	26	0,00000121	0,03260132	0,50880102	0,03418591	0,00116868
1	3-4	27	0,00000835	0,67277965	2,73681957	0,56812434	0,32276527
1	3-4	28	0,00000316	0,03906721	0,69800725	0,04255742	0,00181113
1	3-4	29	0,00000051	0,03024699	0,20664764	0,02123139	0,00045077
1	3-4	30	0,00000106	0,04944779	0,85796811	0,06733308	0,00453374
1	3-4	31	0,00000034	0,03423653	0,27758466	0,02724618	0,00074235
1	3-4	32	0,00000146	0,04605946	1,16931048	0,08914056	0,00794604
1	3-4	33	0,00000094	0,03760361	0,3032271	0,02689873	0,00072354
1	3-4	34	0,00000905	0,04489013	0,73619209	0,04440427	0,00197174
1	3-4	35	0,00000074	0,03625269	1,26144175	0,06967352	0,0048544
1	3-8	1	0,00000007	0,02523056	0,19674924	0,02210047	0,00048843
1	3-8	2	0,00000324	0,01779441	0,10924339	0,01662166	0,00027628
1	3-8	3	0,00000112	0,02159497	0,14766274	0,02148543	0,00046162
1	3-8	4	0,00000517	0,14034842	1,64705051	0,2401974	0,05769479
1	3-8	5	0,00000307	0,01519434	0,13778553	0,01292443	0,00016704
1	3-8	6	0,00000505	0,01796393	0,14716585	0,01616444	0,00026129
1	3-8	7	0,00000032	0,01230892	0,18210294	0,0119065	0,00014176
1	3-8	8	0,00000015	0,03148315	0,77000793	0,05270257	0,00277756
1	3-8	9	0,00000014	0,01394485	0,11763736	0,01198445	0,00014363
1	3-8	10	0,00000012	0,03616229	1,18676414	0,08087555	0,00654085
1	3-8	11	0,00000016	0,01969474	0,33987616	0,02473698	0,00061192
1	3-8	12	0,00000126	0,01783928	0,20092504	0,01886567	0,00035591
1	3-8	13	0,00000067	0,01692849	0,14329507	0,01538334	0,00023665
1	3-8	14	0,00000091	0,01941319	0,2166498	0,01818834	0,00033082
1	3-8	15	0,00000079	0,01830448	0,24932923	0,01646033	0,00027094
1	3-8	16	0,00000105	0,0148106	0,11954248	0,01356118	0,00018391
1	3-8	17	0,00000074	0,02095427	0,37594329	0,0225797	0,00050984
1	3-8	18	0,00000462	0,02190815	0,39201086	0,03400059	0,00115604
1	3-8	19	0,00000909	0,04315783	0,52971395	0,03630161	0,00131781
1	3-8	20	0,00000018	0,01992802	0,20628429	0,01772978	0,00031435
1	3-8	21	0,00000231	0,01921446	0,37023936	0,01807468	0,00032669
1	3-8	22	0,00000003	0,01884953	0,35415262	0,02124995	0,00045156
1	3-8	23	0,00001535	0,03649341	0,39534558	0,03427214	0,00117458
1	3-8	24	0,00000052	0,02192562	0,56133731	0,03136174	0,00098356
1	3-8	25	0,00000037	0,01341104	0,11132928	0,01393318	0,00019413
1	3-8	26	0,00000254	0,0152886	0,36898304	0,02005823	0,00040233
1	3-8	27	0,00000705	0,02941451	0,24458219	0,02680043	0,00071826
1	3-8	28	0,00000272	0,03919904	0,98067693	0,07174159	0,00514686
1	3-8	29	0,00000039	0,02409603	0,20043756	0,02354555	0,00055439
1	3-8	30	0,00000063	0,05004808	1,00727528	0,05617892	0,00315607
1	3-8	31	0,00000023	0,02641967	0,4095856	0,03073572	0,00094468
1	3-8	32	0,00000113	0,03086428	0,23218835	0,03024797	0,00091494
1	3-8	33	0,00000195	0,01987339	0,20071653	0,02029275	0,0004118
1	3-8	34	0,00000231	0,02334522	0,60154838	0,03600253	0,00129618

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
1	3-8	35	0,0000006	0,021437	0,32470814	0,02239069	0,00050134

Tabela C.3. Comparação das Distâncias entre as Amostras com Aditivo e Lavadas

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	1-2	1	0,00000017	0,01130216	0,10305901	0,00932877	0,00008703
2	1-2	2	0,00000092	0,01396374	0,14401585	0,01292402	0,00016703
2	1-2	3	0,00000008	0,0171068	0,26630991	0,01852046	0,00034301
2	1-2	4	0,00000013	0,0137094	0,3692736	0,01578136	0,00024905
2	1-2	5	0,00000022	0,01754789	0,11207089	0,01429716	0,00020441
2	1-2	6	0,00000314	0,01702309	0,12904947	0,01275884	0,00016279
2	1-2	7	0,00000051	0,01165121	0,11892195	0,00958952	0,00009196
2	1-2	8	0,00000055	0,01112983	0,13285391	0,00973193	0,00009471
2	1-2	9	0,00000154	0,01306537	0,13126981	0,01171388	0,00013721
2	1-2	10	0,00000213	0,01271355	0,17313344	0,01094026	0,00011969
2	1-2	11	0,00000382	0,01177863	0,08015305	0,00974642	0,00009499
2	1-2	12	0,00000163	0,01351979	0,68360512	0,03172474	0,00100646
2	1-2	13	0,00000028	0,0169398	0,15729514	0,01451965	0,00021082
2	1-2	14	0,00000051	0,0129925	0,13515502	0,01122762	0,00012606
2	1-2	15	0,00000002	0,01524751	0,11538203	0,01271307	0,00016162
2	1-2	16	0,00000212	0,04577442	1,21390318	0,10322874	0,01065617
2	1-2	17	0,00000006	0,01055723	0,25436912	0,01008477	0,0001017
2	1-2	18	0,00000032	0,01327463	0,23019489	0,01282244	0,00016442
2	1-2	19	0,00000075	0,01451724	0,13160259	0,01240325	0,00015384
2	1-2	20	0,00000003	0,0173877	0,18155584	0,01514467	0,00022936
2	1-2	21	0,00000052	0,013509	0,14402917	0,01089012	0,00011859
2	1-2	22	0,00000085	0,00991682	0,21287024	0,01407017	0,00019797
2	1-2	23	0,00000006	0,01334552	0,10838724	0,01114048	0,00012411
2	1-2	24	0,00000067	0,01706984	0,20195591	0,0157239	0,00024724
2	1-2	25	0,00000002	0,01246155	0,10695198	0,01042138	0,00010861
2	1-2	26	0,00000788	0,03264149	0,13405661	0,01886812	0,00035601
2	1-2	27	0,00000011	0,01155354	0,17659467	0,0106009	0,00011238
2	1-2	28	0,00000087	0,01435521	0,16017221	0,01219842	0,0001488
2	1-2	29	0,00000004	0,01024429	0,22305882	0,01029576	0,000106
2	1-2	30	0,00000181	0,01048567	0,07687931	0,00848673	0,00007202
2	1-2	31	0,00000029	0,01119148	0,07632242	0,00960726	0,0000923
2	1-2	32	0,00000021	0,01408177	0,25036742	0,01325569	0,00017571
2	1-2	33	0,00000061	0,01687699	0,22731611	0,015093	0,0002278
2	1-2	34	0,00000324	0,01872708	0,15345997	0,01521363	0,00023145
2	1-2	35	0,00000183	0,01277518	0,13549548	0,01109784	0,00012316
2	3-4	1	0,00000027	0,01263399	0,26261109	0,01460094	0,00021319
2	3-4	2	0,00000013	0,01497132	0,16382202	0,01350247	0,00018232
2	3-4	3	0,00001123	0,04114892	0,28184187	0,02050942	0,00042064
2	3-4	4	0,00000006	0,01214229	0,21983559	0,01226588	0,00015045

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	3-4	5	0,00000093	0,02253915	0,49129037	0,02892169	0,00083646
2	3-4	6	0,00000207	0,03461565	0,4482091	0,03553777	0,00126293
2	3-4	7	0,00000026	0,01056399	0,13657121	0,01060071	0,00011237
2	3-4	8	0,00000015	0,03795118	0,88601005	0,06157428	0,00379139
2	3-4	9	0,00000017	0,01853579	0,36530932	0,02025738	0,00041036
2	3-4	10	0,00000016	0,01365299	0,42352254	0,01701068	0,00028936
2	3-4	11	0,00000384	0,04797811	0,44450655	0,03891139	0,0015141
2	3-4	12	0,00000008	0,02170288	0,36825407	0,01937267	0,0003753
2	3-4	13	0,00000073	0,02014716	0,70804865	0,02908262	0,0008458
2	3-4	14	0,00000086	0,01428864	0,28538332	0,01454893	0,00021167
2	3-4	15	0,00000043	0,01719158	0,36869319	0,0209516	0,00043897
2	3-4	16	0,00000012	0,02168191	0,21588219	0,0197896	0,00039163
2	3-4	17	0,00000181	0,01440724	0,15829731	0,01258805	0,00015846
2	3-4	18	0,00000065	0,01402966	0,19359515	0,0138753	0,00019252
2	3-4	19	0,00000008	0,01199924	0,56044899	0,01952794	0,00038134
2	3-4	20	0,00000027	0,01582789	0,1926861	0,01408241	0,00019831
2	3-4	21	0,00000007	0,02175704	0,29968504	0,02190967	0,00048003
2	3-4	22	0,00000004	0,01747686	0,25243271	0,01522329	0,00023175
2	3-4	23	0,00000055	0,02074561	0,2090946	0,01595858	0,00025468
2	3-4	24	0,00000767	1,8827497	5,92399465	1,2300165	1,5129406
2	3-4	25	0,00000078	0,0221869	0,20037667	0,01818966	0,00033086
2	3-4	26	0,00000033	0,01719317	0,19183384	0,01256422	0,00015786
2	3-4	27	0,00000006	0,01860835	0,35791046	0,02100728	0,00044131
2	3-4	28	0,00000154	0,01467323	0,19846042	0,01318881	0,00017394
2	3-4	29	0,00000009	0,01531116	0,21686195	0,0123492	0,0001525
2	3-4	30	0,00000255	0,03141251	0,20179865	0,0283653	0,00080459
2	3-4	31	0,00000086	0,01792241	0,15835504	0,01413926	0,00019992
2	3-4	32	0,00000003	0,01233623	0,2585635	0,01221105	0,00014911
2	3-4	33	0,00000028	0,0145783	0,16095509	0,01274561	0,00016245
2	3-4	34	0,00000079	0,01511342	0,21861233	0,01353355	0,00018316
2	3-4	35	0,00000003	0,02097755	0,30273964	0,02102717	0,00044214
2	3-8	1	0,00000215	0,01608453	0,16378112	0,01476166	0,00021791
2	3-8	2	0,00000073	0,02478709	0,60427022	0,03907436	0,00152681
2	3-8	3	0,00000067	0,01465573	0,34473721	0,01727776	0,00029852
2	3-8	4	0,00000065	0,01575836	0,40584715	0,02773216	0,00076907
2	3-8	5	0,00000198	0,01434046	0,19673621	0,01677771	0,00028149
2	3-8	6	0,00000267	0,01467824	0,19204304	0,01631576	0,0002662
2	3-8	7	0,00000309	0,01511842	0,14237427	0,01459639	0,00021305
2	3-8	8	0,00000078	0,02222229	0,25366462	0,02014	0,00040562
2	3-8	9	0,00000062	0,02087271	0,38467664	0,0258963	0,00067062
2	3-8	10	0,00000041	0,01881453	0,39179363	0,02731016	0,00074584
2	3-8	11	0,00000161	0,01563379	0,20975385	0,01657681	0,00027479
2	3-8	12	0,00000227	0,02946082	0,34403808	0,02349004	0,00055178
2	3-8	13	0,00000013	0,04051771	0,19380688	0,0307365	0,00094473

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	3-8	14	0,00000004	0,01709479	0,29123838	0,02265803	0,00051339
2	3-8	15	0,00000343	0,0280746	0,22386328	0,02373703	0,00056345
2	3-8	16	0,0000051	0,02956887	0,61566122	0,03649371	0,00133179
2	3-8	17	0,00000364	0,01379221	0,38499373	0,01595893	0,00025469
2	3-8	18	0,00000321	0,02176623	0,25996009	0,02132233	0,00045464
2	3-8	19	0,00000081	0,0226991	0,19030846	0,01904798	0,00036283
2	3-8	20	0,00000089	0,01998938	0,22223316	0,02039321	0,00041588
2	3-8	21	0,00000014	0,01270676	0,15465099	0,01357296	0,00018423
2	3-8	22	0,00000131	0,02660102	0,67535243	0,03626664	0,00131527
2	3-8	23	0,00000034	0,01865362	0,41733965	0,02818464	0,00079437
2	3-8	24	0,00000208	0,01609192	0,28979761	0,01656643	0,00027445
2	3-8	25	0,0000011	0,02448629	0,37409516	0,02279512	0,00051962
2	3-8	26	0,00000101	0,01449973	0,23686204	0,01583544	0,00025076
2	3-8	27	0,0000046	0,01456419	0,22903287	0,01633131	0,00026671
2	3-8	28	0,00000018	0,01717792	0,26343454	0,02024718	0,00040995
2	3-8	29	0,00000196	0,01492094	0,1673405	0,0142625	0,00020342
2	3-8	30	0,00000164	0,01977799	0,15458345	0,01753755	0,00030757
2	3-8	31	0,00000017	0,01633223	0,30962603	0,01933795	0,00037396
2	3-8	32	0,00000002	0,01367391	0,20844273	0,01472223	0,00021674
2	3-8	33	0,00000117	0,01525045	0,24432745	0,01633314	0,00026677
2	3-8	34	0,00000043	0,01800181	0,52538547	0,03003776	0,00090227
2	3-8	35	0,00001067	0,03208893	0,25298197	0,02166467	0,00046936

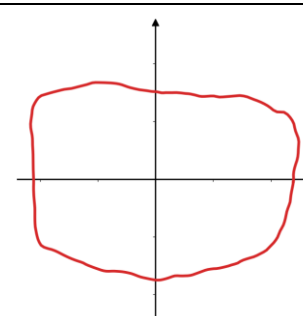
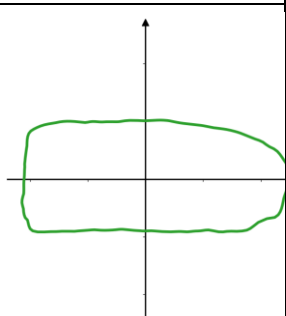
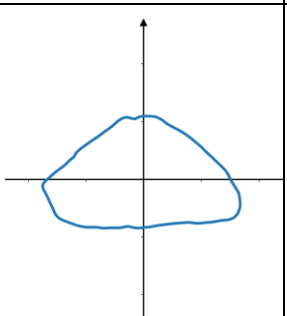
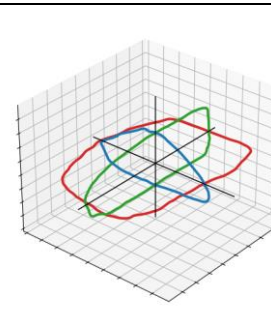
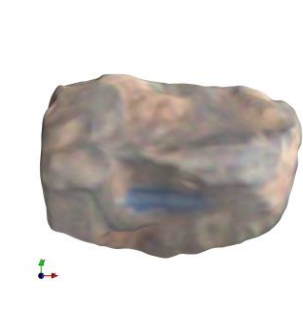
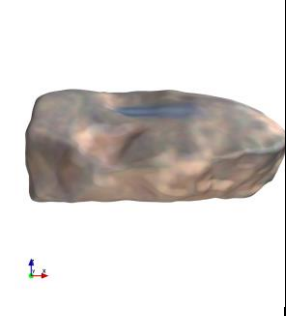
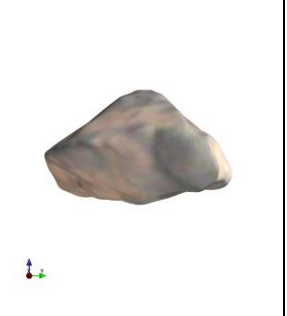
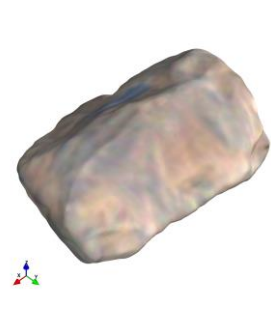
Tabela C.3. Comparação das Distâncias entre as Amostras com Aditivo e Lavadas

Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	1-2	1	0,00000017	0,01130216	0,10305901	0,00932877	0,00008703
2	1-2	2	0,00000092	0,01396374	0,14401585	0,01292402	0,00016703
2	1-2	3	0,00000008	0,0171068	0,26630991	0,01852046	0,00034301
2	1-2	4	0,00000013	0,0137094	0,3692736	0,01578136	0,00024905
2	1-2	5	0,00000022	0,01754789	0,11207089	0,01429716	0,00020441
2	1-2	6	0,00000314	0,01702309	0,12904947	0,01275884	0,00016279
2	1-2	7	0,00000051	0,01165121	0,11892195	0,00958952	0,00009196
2	1-2	8	0,00000055	0,01112983	0,13285391	0,00973193	0,00009471
2	1-2	9	0,00000154	0,01306537	0,13126981	0,01171388	0,00013721
2	1-2	10	0,00000213	0,01271355	0,17313344	0,01094026	0,00011969
2	1-2	11	0,00000382	0,01177863	0,08015305	0,00974642	0,00009499
2	1-2	12	0,00000163	0,01351979	0,68360512	0,03172474	0,00100646
2	1-2	13	0,00000028	0,0169398	0,15729514	0,01451965	0,00021082
2	1-2	14	0,00000051	0,0129925	0,13515502	0,01122762	0,00012606
2	1-2	15	0,00000002	0,01524751	0,11538203	0,01271307	0,00016162
2	1-2	16	0,00000212	0,04577442	1,21390318	0,10322874	0,01065617
2	1-2	17	0,00000006	0,01055723	0,25436912	0,01008477	0,0001017
2	1-2	18	0,00000032	0,01327463	0,23019489	0,01282244	0,00016442

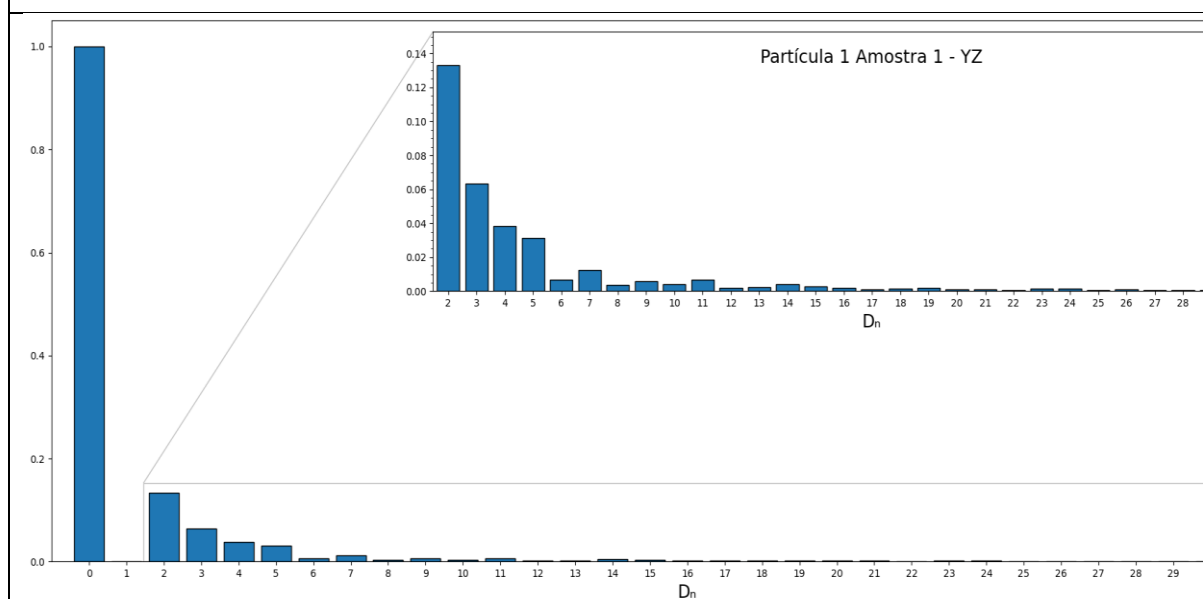
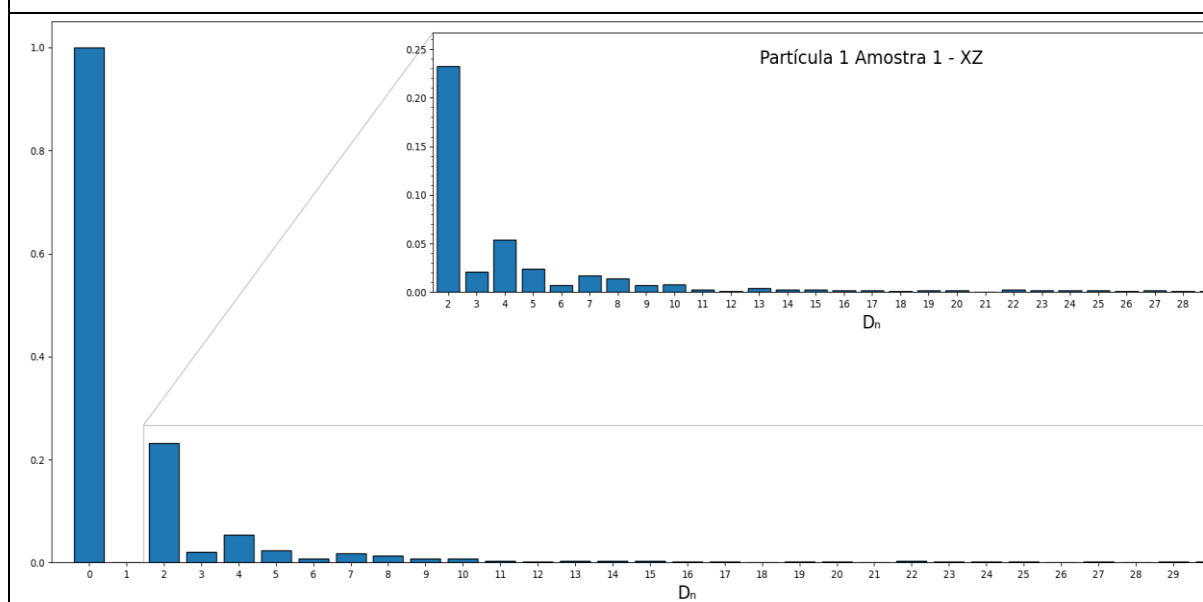
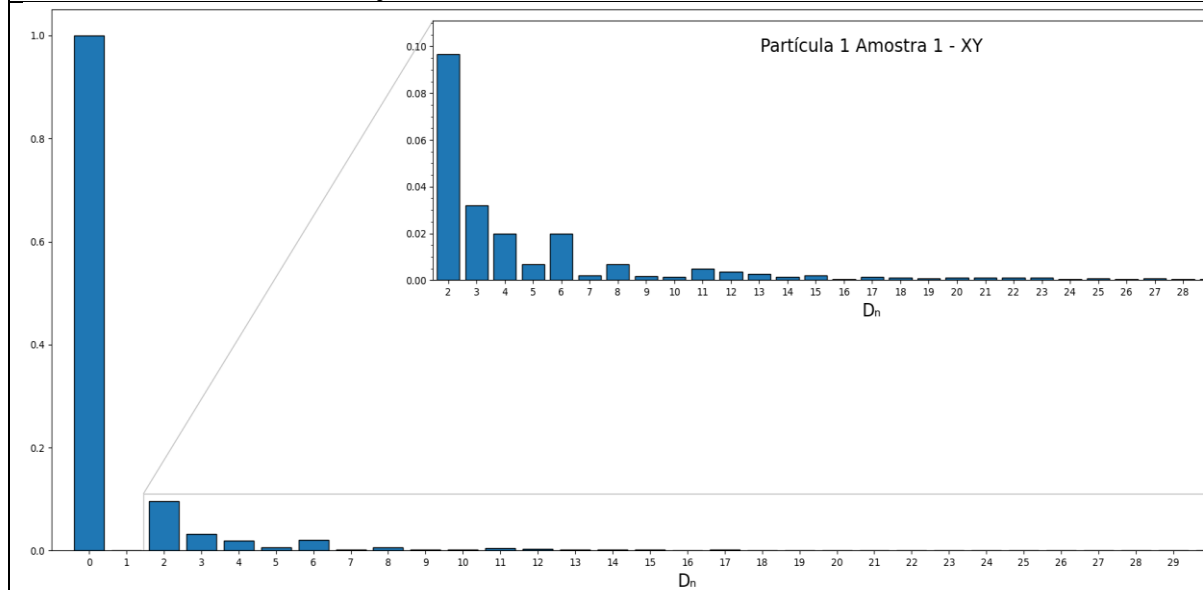
Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	1-2	19	0,00000075	0,01451724	0,13160259	0,01240325	0,00015384
2	1-2	20	0,00000003	0,0173877	0,18155584	0,01514467	0,00022936
2	1-2	21	0,00000052	0,013509	0,14402917	0,01089012	0,00011859
2	1-2	22	0,00000085	0,00991682	0,21287024	0,01407017	0,00019797
2	1-2	23	0,00000006	0,01334552	0,10838724	0,01114048	0,00012411
2	1-2	24	0,00000067	0,01706984	0,20195591	0,0157239	0,00024724
2	1-2	25	0,00000002	0,01246155	0,10695198	0,01042138	0,00010861
2	1-2	26	0,00000788	0,03264149	0,13405661	0,01886812	0,00035601
2	1-2	27	0,00000011	0,01155354	0,17659467	0,0106009	0,00011238
2	1-2	28	0,00000087	0,01435521	0,16017221	0,01219842	0,0001488
2	1-2	29	0,00000004	0,01024429	0,22305882	0,01029576	0,000106
2	1-2	30	0,00000181	0,01048567	0,07687931	0,00848673	0,00007202
2	1-2	31	0,00000029	0,01119148	0,07632242	0,00960726	0,0000923
2	1-2	32	0,00000021	0,01408177	0,25036742	0,01325569	0,00017571
2	1-2	33	0,00000061	0,01687699	0,22731611	0,015093	0,0002278
2	1-2	34	0,00000324	0,01872708	0,15345997	0,01521363	0,00023145
2	1-2	35	0,00000183	0,01277518	0,13549548	0,01109784	0,00012316
2	3-4	1	0,00000027	0,01263399	0,26261109	0,01460094	0,00021319
2	3-4	2	0,00000013	0,01497132	0,16382202	0,01350247	0,00018232
2	3-4	3	0,00001123	0,04114892	0,28184187	0,02050942	0,00042064
2	3-4	4	0,00000006	0,01214229	0,21983559	0,01226588	0,00015045
2	3-4	5	0,00000093	0,02253915	0,49129037	0,02892169	0,00083646
2	3-4	6	0,00000207	0,03461565	0,4482091	0,03553777	0,00126293
2	3-4	7	0,00000026	0,01056399	0,13657121	0,01060071	0,00011237
2	3-4	8	0,00000015	0,03795118	0,88601005	0,06157428	0,00379139
2	3-4	9	0,00000017	0,01853579	0,36530932	0,02025738	0,00041036
2	3-4	10	0,00000016	0,01365299	0,42352254	0,01701068	0,00028936
2	3-4	11	0,00000384	0,04797811	0,44450655	0,03891139	0,0015141
2	3-4	12	0,00000008	0,02170288	0,36825407	0,01937267	0,0003753
2	3-4	13	0,00000073	0,02014716	0,70804865	0,02908262	0,0008458
2	3-4	14	0,00000086	0,01428864	0,28538332	0,01454893	0,00021167
2	3-4	15	0,00000043	0,01719158	0,36869319	0,0209516	0,00043897
2	3-4	16	0,00000012	0,02168191	0,21588219	0,0197896	0,00039163
2	3-4	17	0,00000181	0,01440724	0,15829731	0,01258805	0,00015846
2	3-4	18	0,00000065	0,01402966	0,19359515	0,0138753	0,00019252
2	3-4	19	0,00000008	0,01199924	0,56044899	0,01952794	0,00038134
2	3-4	20	0,00000027	0,01582789	0,1926861	0,01408241	0,00019831
2	3-4	21	0,00000007	0,02175704	0,29968504	0,02190967	0,00048003
2	3-4	22	0,00000004	0,01747686	0,25243271	0,01522329	0,00023175
2	3-4	23	0,00000055	0,02074561	0,2090946	0,01595858	0,00025468
2	3-4	24	0,00000767	1,8827497	5,92399465	1,2300165	1,5129406
2	3-4	25	0,00000078	0,0221869	0,20037667	0,01818966	0,00033086
2	3-4	26	0,00000033	0,01719317	0,19183384	0,01256422	0,00015786
2	3-4	27	0,00000006	0,01860835	0,35791046	0,02100728	0,00044131

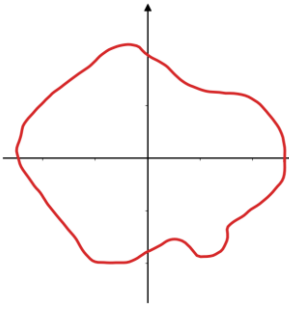
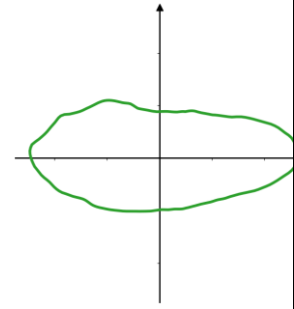
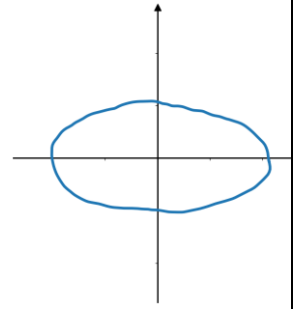
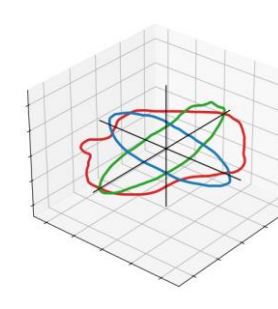
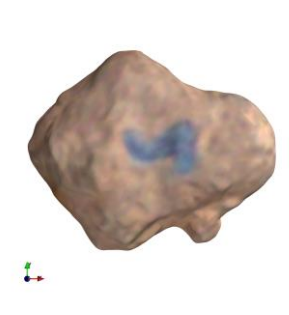
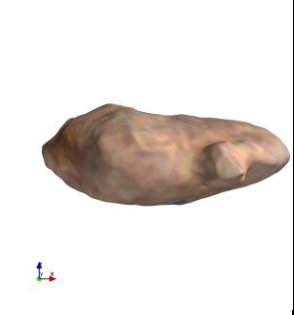
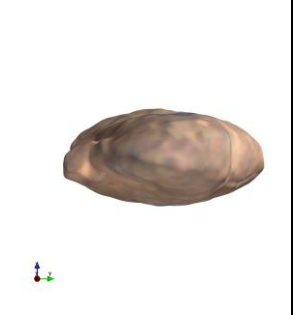
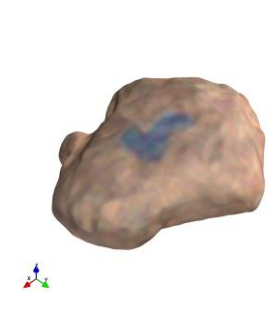
Mostra	Tamanho	Partícula	Dist. Mín.	Dist. Média.	Dist. Máx.	Desvio Padrão	Variância
2	3-4	28	0,00000154	0,01467323	0,19846042	0,01318881	0,00017394
2	3-4	29	0,00000009	0,01531116	0,21686195	0,0123492	0,0001525
2	3-4	30	0,00000255	0,03141251	0,20179865	0,0283653	0,00080459
2	3-4	31	0,00000086	0,01792241	0,15835504	0,01413926	0,00019992
2	3-4	32	0,00000003	0,01233623	0,2585635	0,01221105	0,00014911
2	3-4	33	0,00000028	0,0145783	0,16095509	0,01274561	0,00016245
2	3-4	34	0,00000079	0,01511342	0,21861233	0,01353355	0,00018316
2	3-4	35	0,00000003	0,02097755	0,30273964	0,02102717	0,00044214
2	3-8	1	0,00000215	0,01608453	0,16378112	0,01476166	0,00021791
2	3-8	2	0,00000073	0,02478709	0,60427022	0,03907436	0,00152681
2	3-8	3	0,00000067	0,01465573	0,34473721	0,01727776	0,00029852
2	3-8	4	0,00000065	0,01575836	0,40584715	0,02773216	0,00076907
2	3-8	5	0,00000198	0,01434046	0,19673621	0,01677771	0,00028149
2	3-8	6	0,00000267	0,01467824	0,19204304	0,01631576	0,0002662
2	3-8	7	0,00000309	0,01511842	0,14237427	0,01459639	0,00021305
2	3-8	8	0,00000078	0,02222229	0,25366462	0,02014	0,00040562
2	3-8	9	0,00000062	0,02087271	0,38467664	0,0258963	0,00067062
2	3-8	10	0,00000041	0,01881453	0,39179363	0,02731016	0,00074584
2	3-8	11	0,00000161	0,01563379	0,20975385	0,01657681	0,00027479
2	3-8	12	0,00000227	0,02946082	0,34403808	0,02349004	0,00055178
2	3-8	13	0,00000013	0,04051771	0,19380688	0,0307365	0,00094473
2	3-8	14	0,00000004	0,01709479	0,29123838	0,02265803	0,00051339
2	3-8	15	0,00000343	0,0280746	0,22386328	0,02373703	0,00056345
2	3-8	16	0,00000051	0,02956887	0,61566122	0,03649371	0,00133179
2	3-8	17	0,00000364	0,01379221	0,38499373	0,01595893	0,00025469
2	3-8	18	0,00000321	0,02176623	0,25996009	0,02132233	0,00045464
2	3-8	19	0,00000081	0,0226991	0,19030846	0,01904798	0,00036283
2	3-8	20	0,00000089	0,01998938	0,22223316	0,02039321	0,00041588
2	3-8	21	0,00000014	0,01270676	0,15465099	0,01357296	0,00018423
2	3-8	22	0,00000131	0,02660102	0,67535243	0,03626664	0,00131527
2	3-8	23	0,00000034	0,01865362	0,41733965	0,02818464	0,00079437
2	3-8	24	0,00000208	0,01609192	0,28979761	0,01656643	0,00027445
2	3-8	25	0,00000011	0,02448629	0,37409516	0,02279512	0,00051962
2	3-8	26	0,00000101	0,01449973	0,23686204	0,01583544	0,00025076
2	3-8	27	0,00000046	0,01456419	0,22903287	0,01633131	0,00026671
2	3-8	28	0,00000018	0,01717792	0,26343454	0,02024718	0,00040995
2	3-8	29	0,00000196	0,01492094	0,1673405	0,0142625	0,00020342
2	3-8	30	0,00000164	0,01977799	0,15458345	0,01753755	0,00030757
2	3-8	31	0,00000017	0,01633223	0,30962603	0,01933795	0,00037396
2	3-8	32	0,00000002	0,01367391	0,20844273	0,01472223	0,00021674
2	3-8	33	0,00000117	0,01525045	0,24432745	0,01633314	0,00026677
2	3-8	34	0,00000043	0,01800181	0,52538547	0,03003776	0,00090227
2	3-8	35	0,00001067	0,03208893	0,25298197	0,02166467	0,00046936

APÊNDICES D: CATALOGO DE PARTÍCULAS

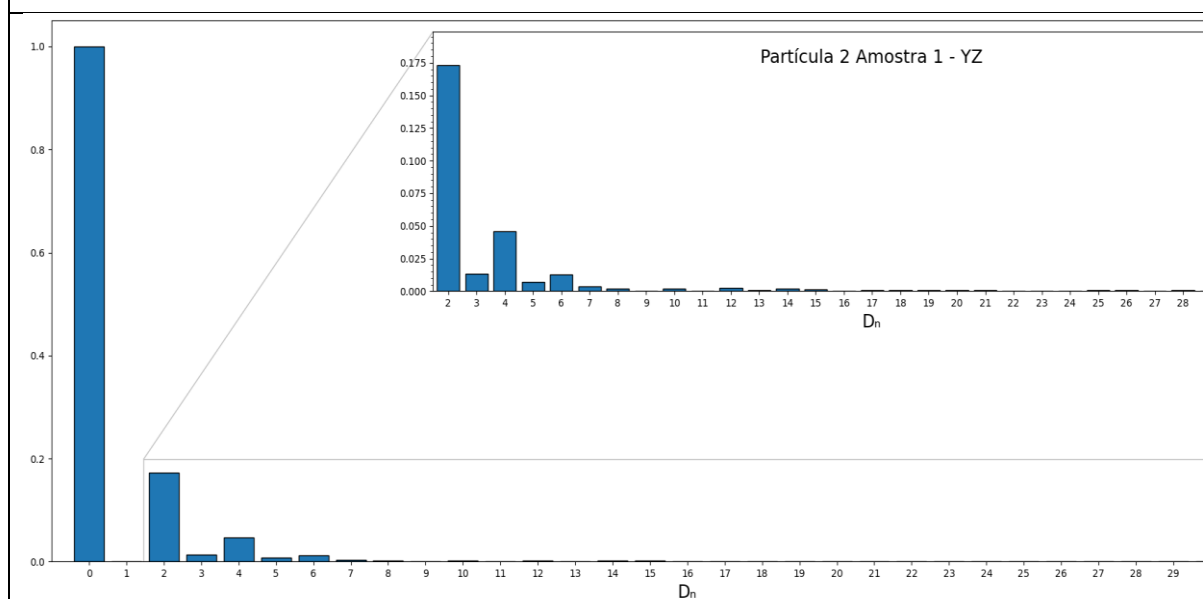
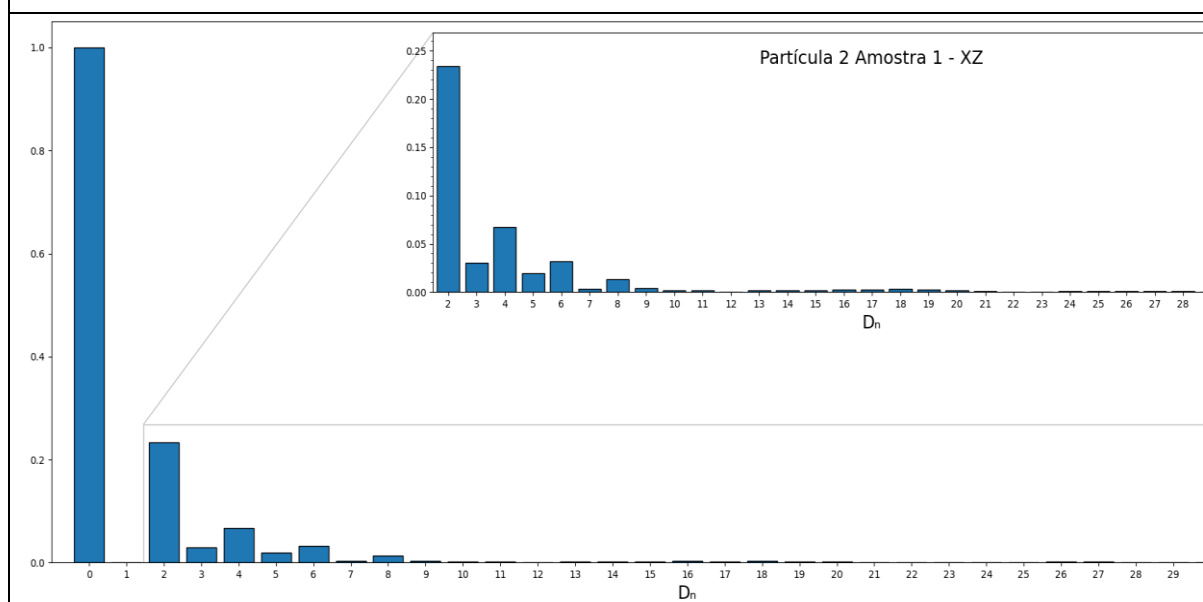
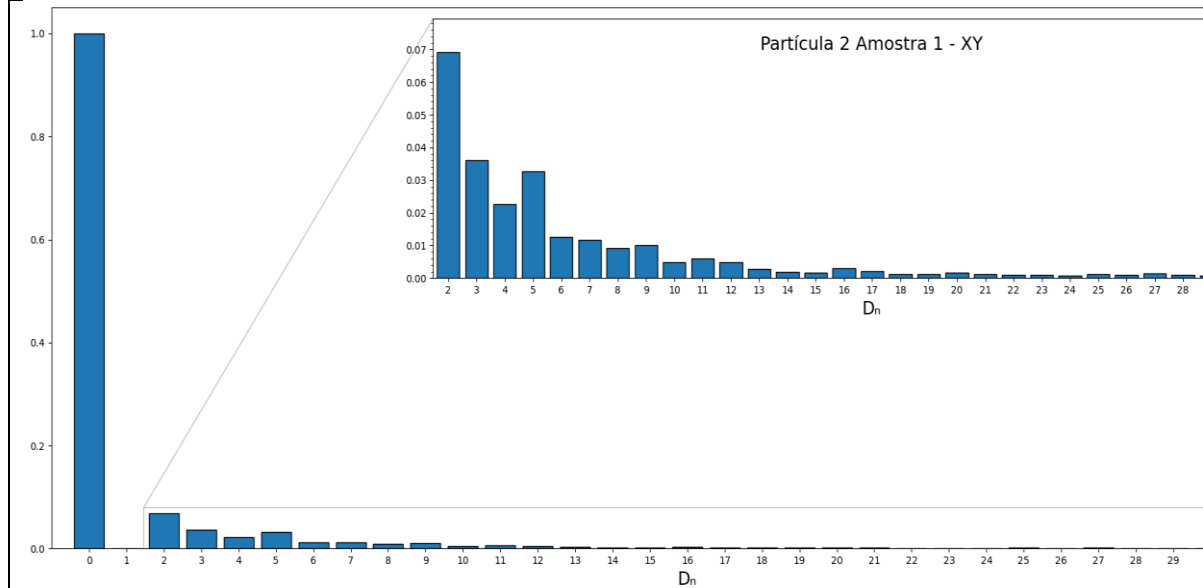
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 1	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 948.4378		Volume: 1894.0707	
Dimensão maior (dl): 23.26 mm	Dimensão Intermediária (di): 17.14 mm	Dimensão Menor (ds): 9.71 mm	
Achatamento (F): 0.567	Alongamento (E): 0.737	Relação F&E: 2.395	Esfericidade: 0.675
Diâmetro equivalente (dv): 15.351 mm	Diâmetro equivalente (ds): 42.56 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 11.982 mm	
Centro de massa: [-3.456 9.591 489.098]	Principais eixos: [77016.6 -7388.8 -1970.9] [-7388.8 46826.3 23690.7] [-1970.9 23690.7 75128.2]	Momentos de inércia: [32703.1 75520.5 90747.7]	Vetores de inércia: [-0.123 -0.869 0.479] [0.918 0.083 0.387] [-0.376 0.488 0.788]

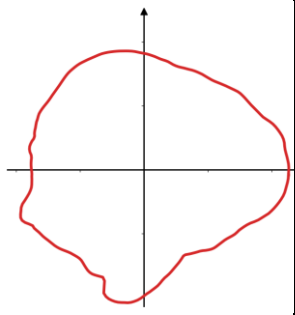
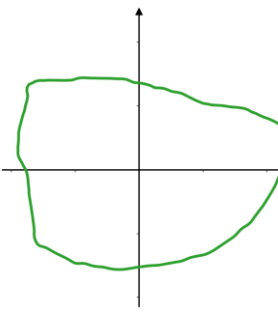
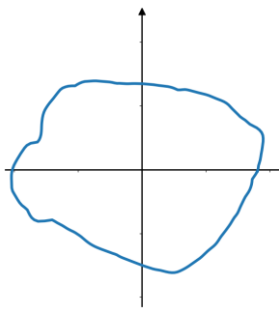
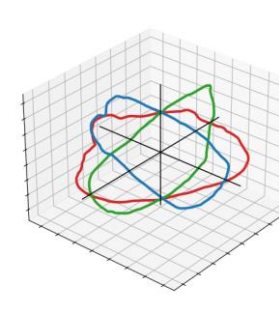
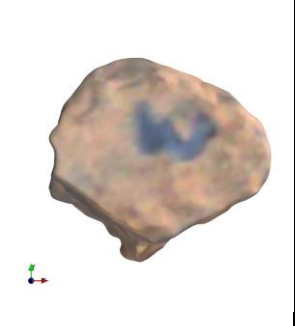
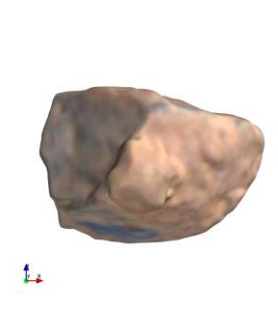
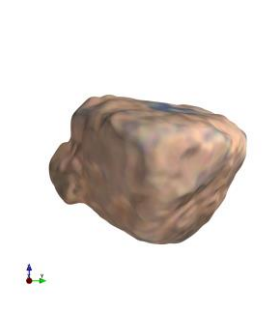
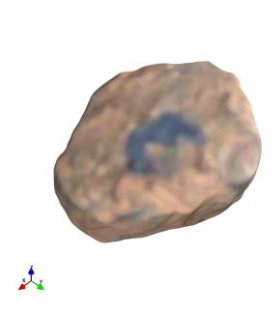
Descritores de Fourier de seções transversais



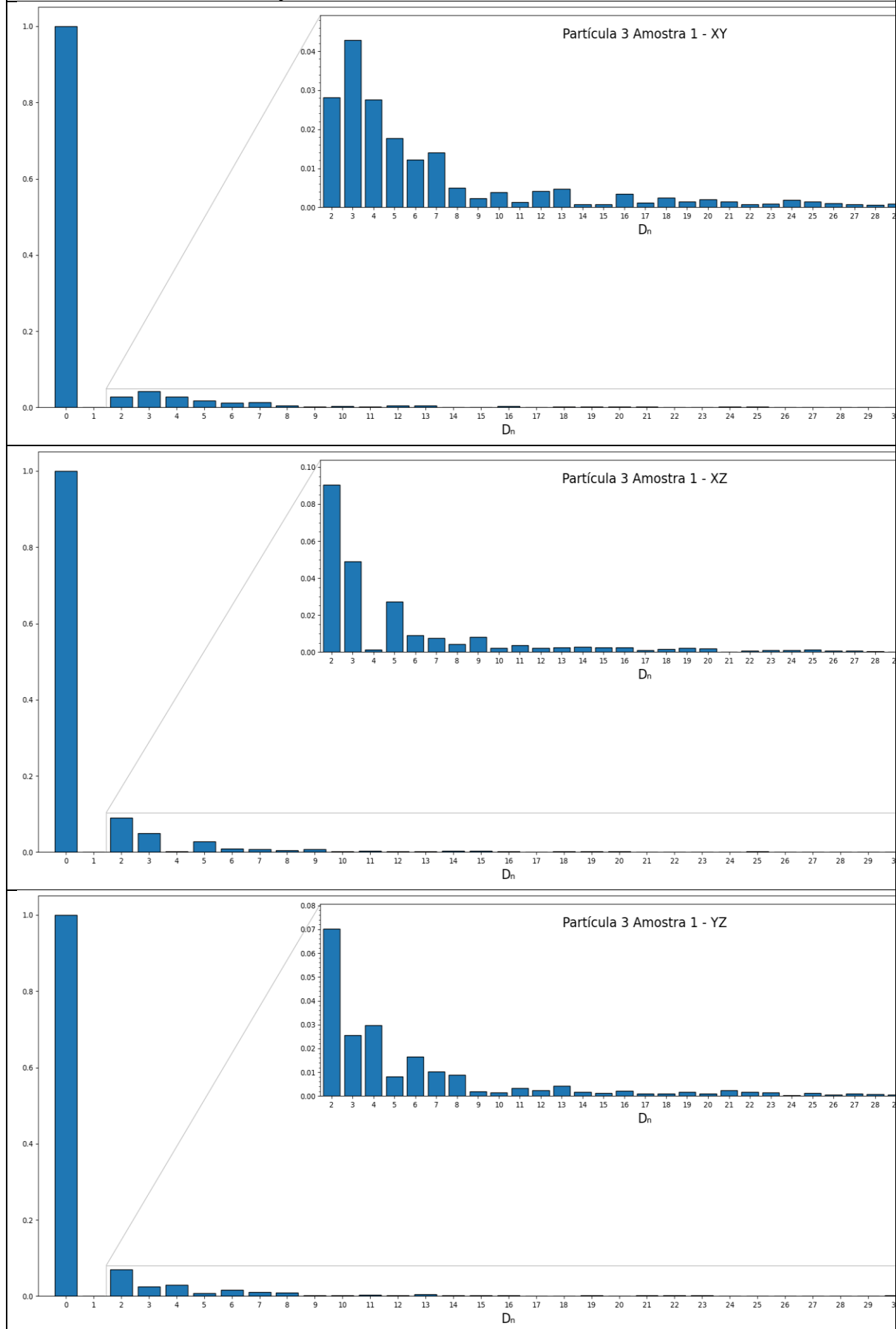
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 2	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1005.9835		Volume: 2308.559	
Dimensão maior (dl): 25.52 mm	Dimensão Intermediária (di): 20.77 mm	Dimensão Menor (ds): 10.57 mm	
Achatamento (F): 0.509	Alongamento (E): 0.814	Relação F&E: 2.415	Esfericidade: 0.696
Diâmetro equivalente (dv): 16.398 mm		Diâmetro equivalente (ds): 43.832 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 13.769 mm
Centro de massa: -6.387 11.325 492.001		Principais eixos: 75488.9 7200.8 -8711.8 7200.8 73328.3 23471.6 -8711.8 23471.6 95916.2	Momentos de inércia: 53325.6 80361.7 111046.1 Vetores de inércia: -0.439 0.746 -0.501 0.892 0.428 -0.146 -0.106 0.511 0.853

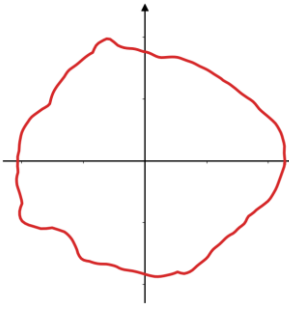
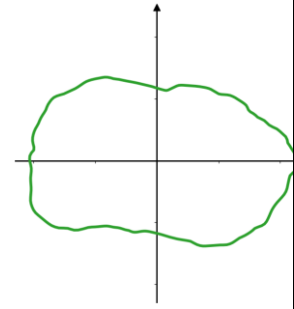
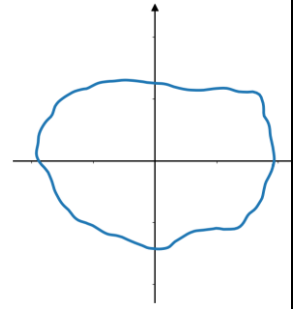
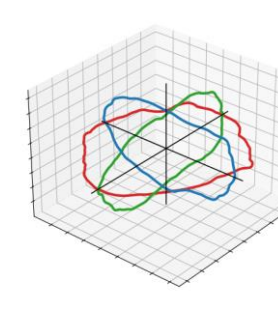
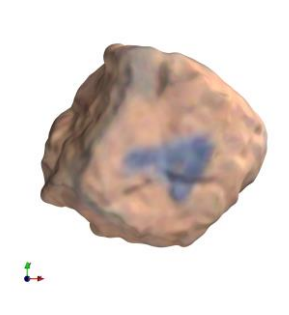
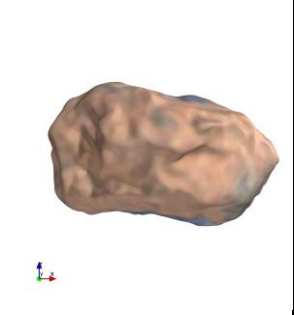
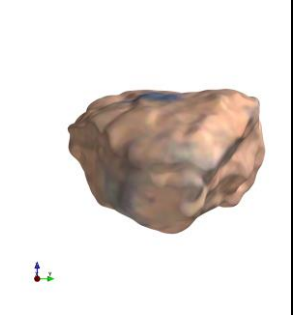
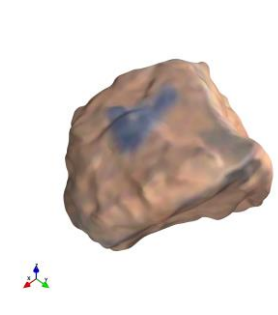
Descritores de Fourier de seções transversais



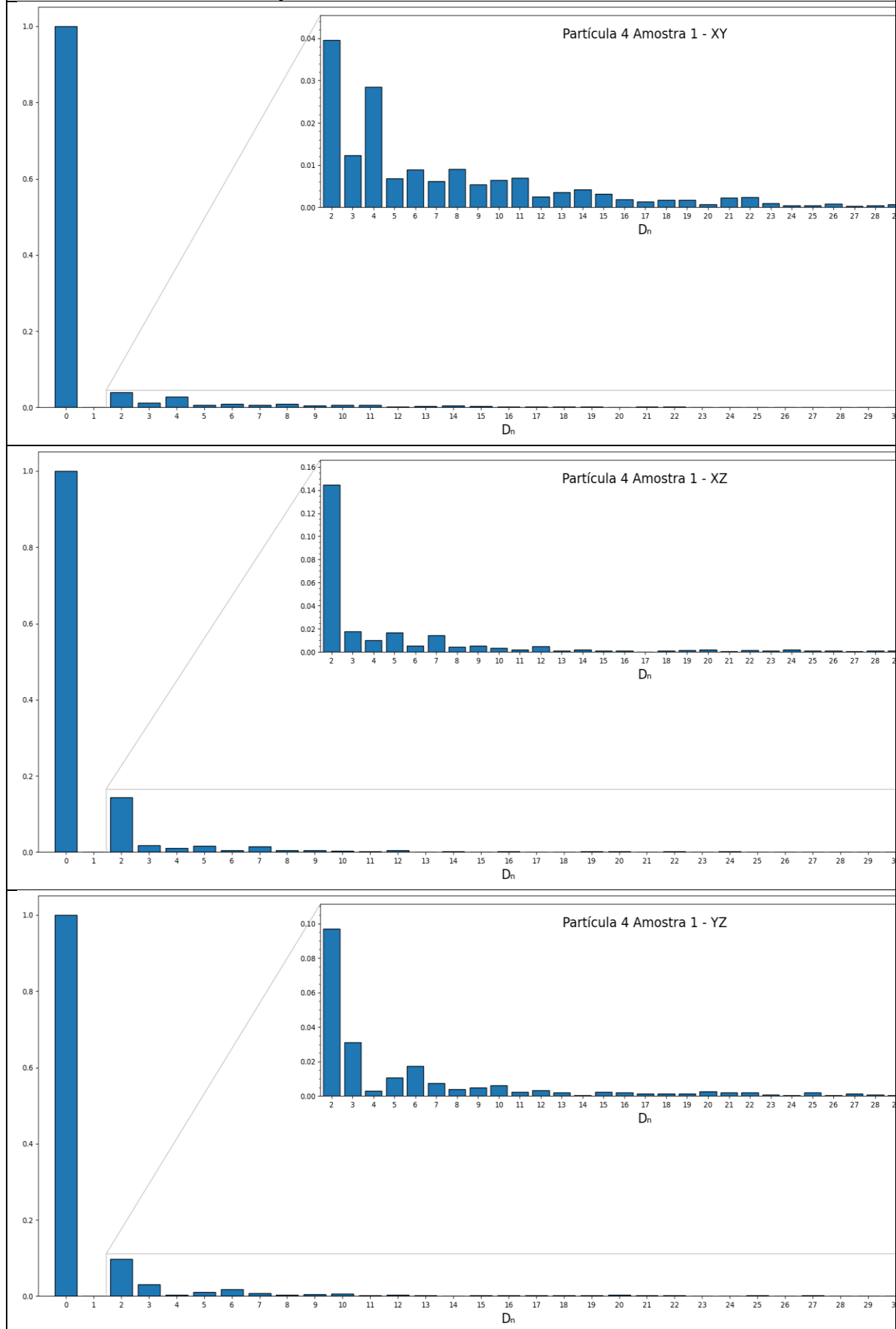
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 3	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1013.2633		Volume: 2502.9536	
Dimensão maior (dl): 21.03 mm	Dimensão Intermediária (di): 19.74 mm	Dimensão Menor (ds): 15.04 mm	
Achatamento (F): 0.762	Alongamento (E): 0.939	Relação F&E: 1.399	Esfericidade: 0.876
Diâmetro equivalente (dv): 16.846 mm		Diâmetro equivalente (ds): 43.991 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 14.821 mm
Centro de massa: -4.831 9.034 492.168	Principais eixos: 79811.3 1447.3 542.1 1447.3 71137.7 11579.4 542.1 11579.4 81482.0	Momentos de inércia: 63575.6 79697.8 89157.7	Vetores de inércia: 0.057 -0.839 0.541 -0.990 0.025 0.142 -0.132 -0.543 -0.829

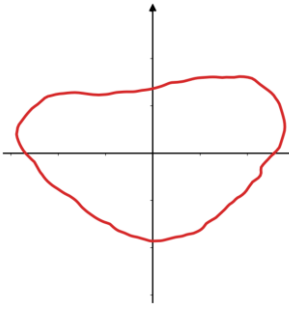
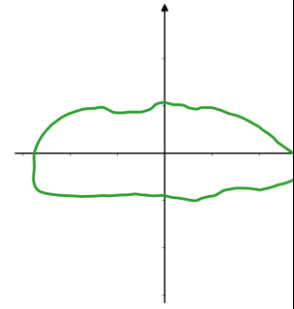
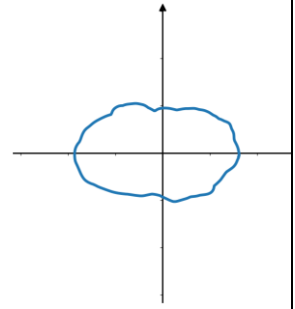
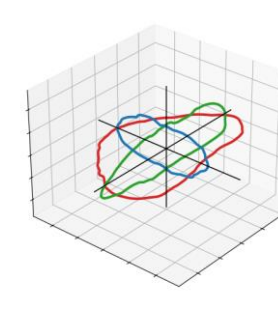
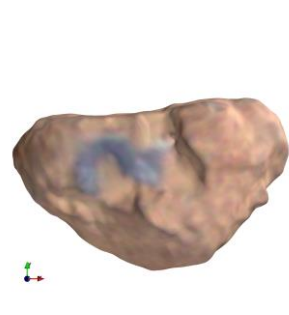
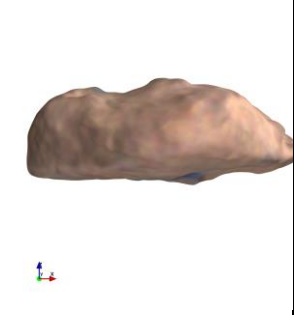
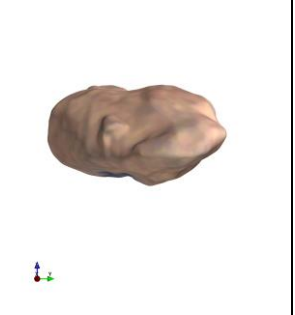
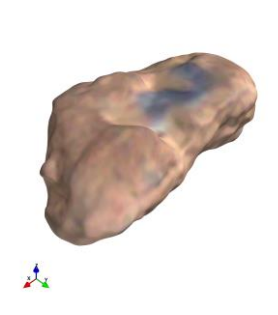
Descritores de Fourier de seções transversais



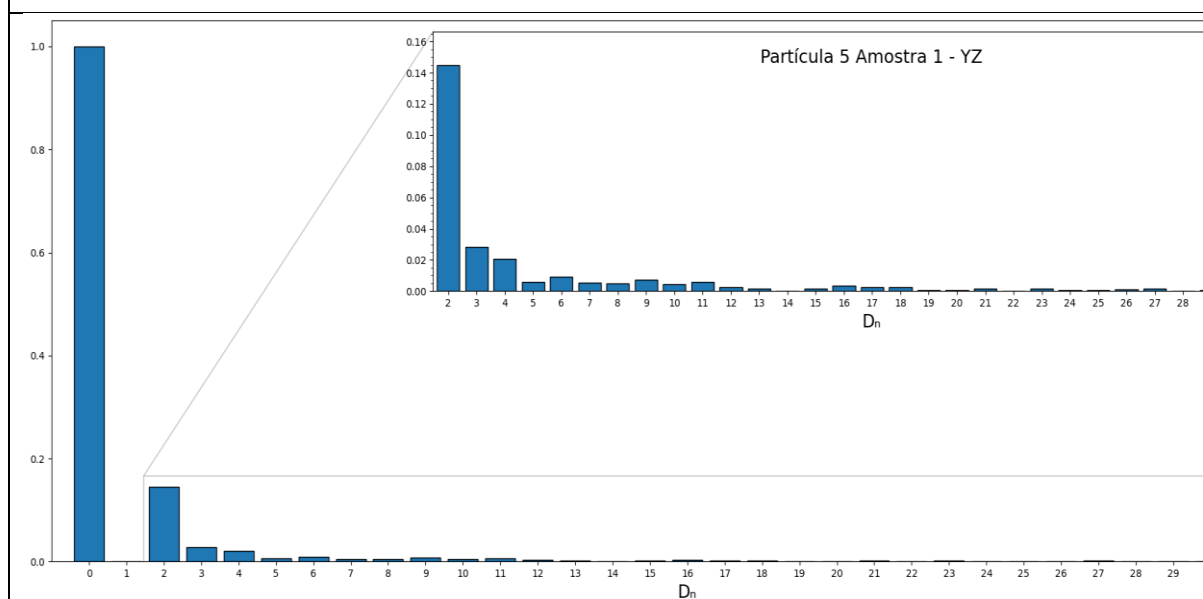
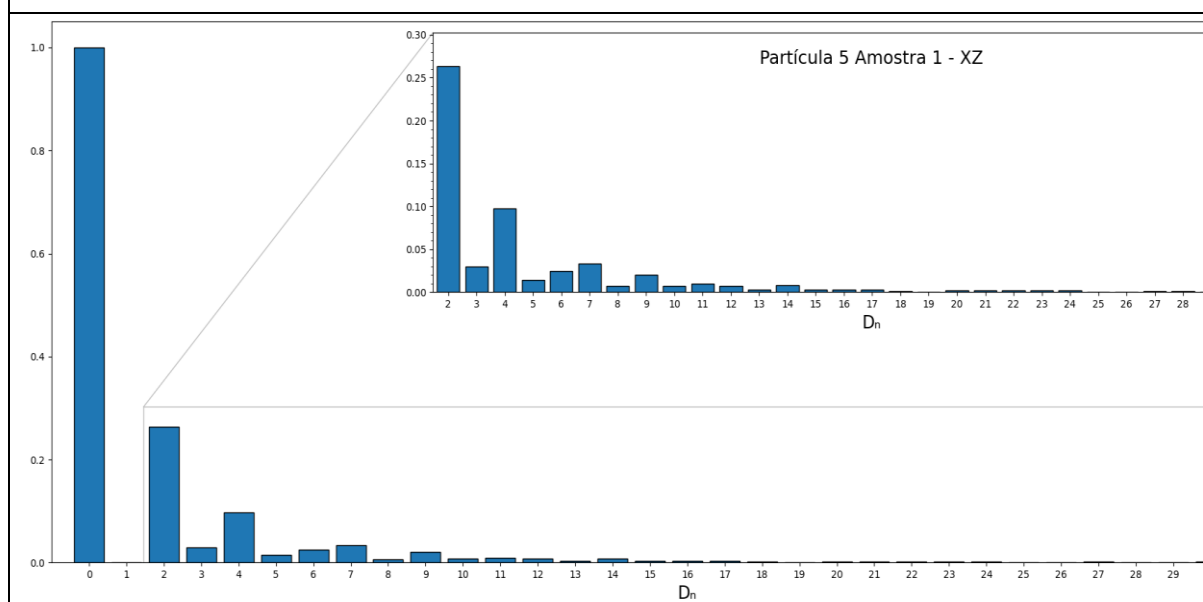
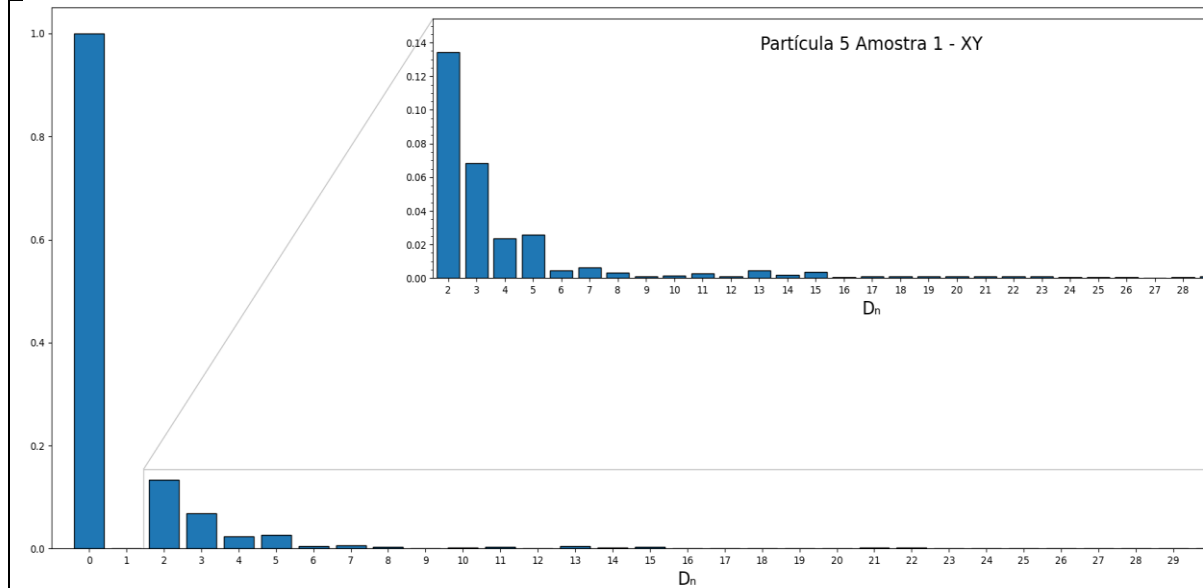
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 4	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1011.9665		Volume: 2383.6615	
Dimensão maior (dl): 21.74 mm	Dimensão Intermediária (di): 19.28 mm	Dimensão Menor (ds): 13.69 mm	
Achatamento (F): 0.71	Alongamento (E): 0.887	Relação F&E: 1.588	Esfericidade: 0.824
Diâmetro equivalente (dv): 16.574 mm		Diâmetro equivalente (ds): 43.963 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 14.133 mm
Centro de massa: -4.728 7.710 491.501	Principais eixos: 71140.1 -7135.0 -2929.4 -7135.0 63103.3 4327.4 -2929.4 4327.4 88524.8	Momentos de inércia: 58753.6 73833.2 90181.4	Vetores de inércia: 0.483 0.872 -0.079 0.846 -0.442 0.299 -0.226 0.211 0.951

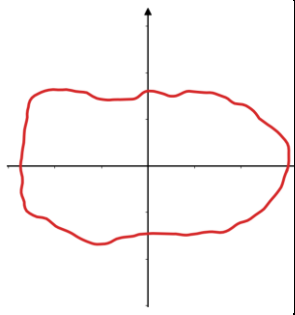
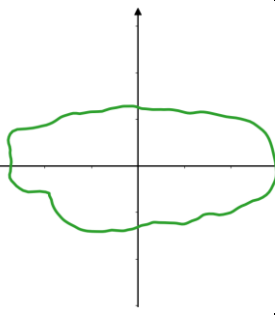
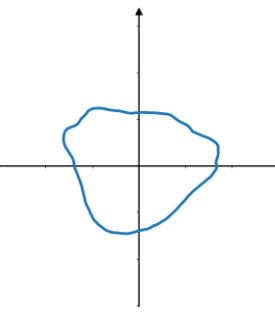
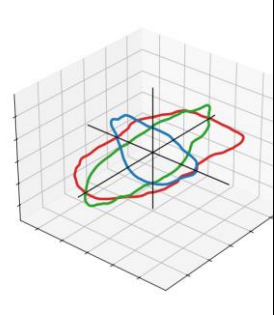
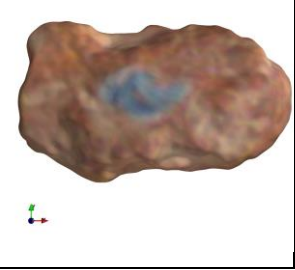
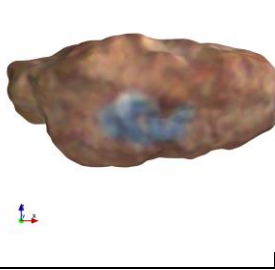
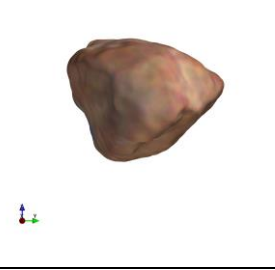
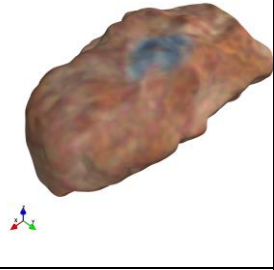
Descritores de Fourier de seções transversais



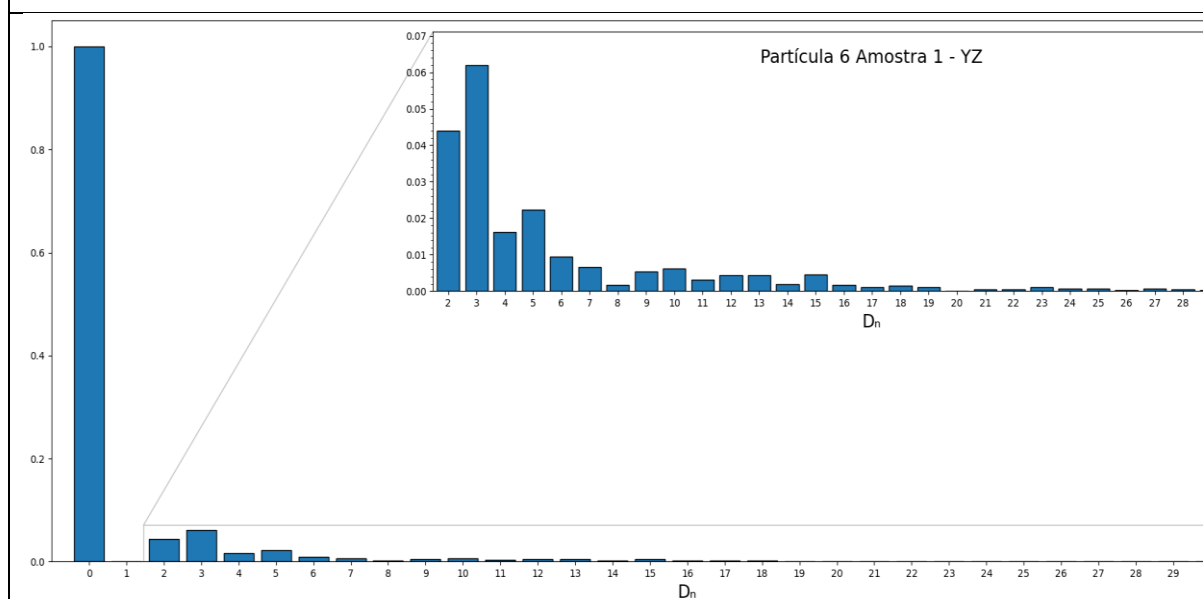
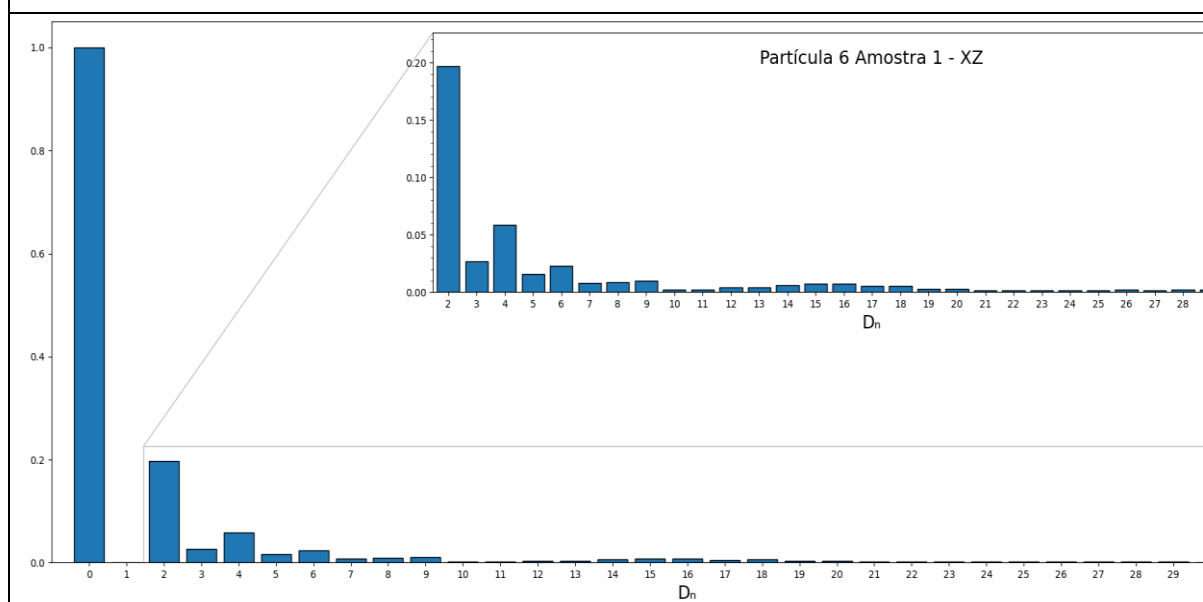
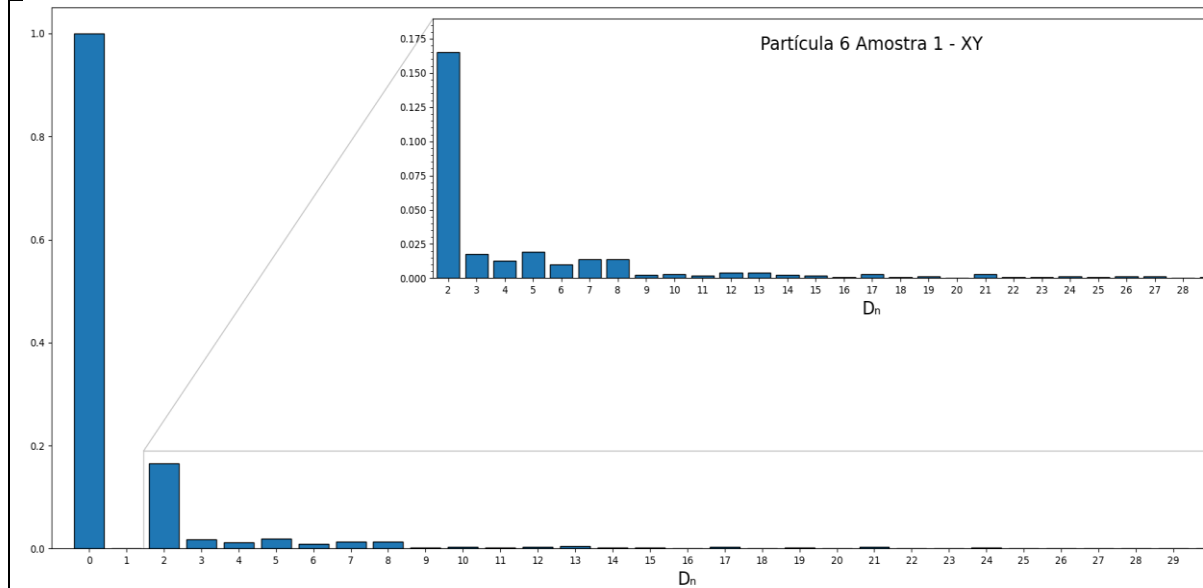
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1				
Descrição:				
Equipamento experimental: EinScan Pro HD				
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.		
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 5		
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D	
				
				
Características da partícula.				
Superfície: 1033.8577		Volume: 2259.044		
Dimensão maior (dl): 28.39 mm	Dimensão Intermediária (di): 17.41 mm	Dimensão Menor (ds): 10.38 mm		
Achatamento (F): 0.596	Alongamento (E): 0.613	Relação F&E: 2.734	Esfericidade: 0.608	
Diâmetro equivalente (dv): 16.28 mm		Diâmetro equivalente (ds): 44.436 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 13.11 mm	
Centro de massa: -2.156 13.373 490.420	Principais eixos: 104535.9 -17386.0 -814.4 -17386.0 61476.2 29863.9 -814.4 29863.9 105229.7	Momentos de inércia: 42577.3 104003.0 124661.6	Vetores de inércia: -0.241 -0.877 0.415 0.863 0.003 0.506 -0.445 0.480 0.756	

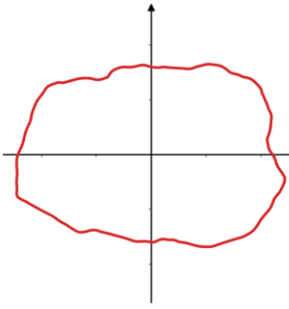
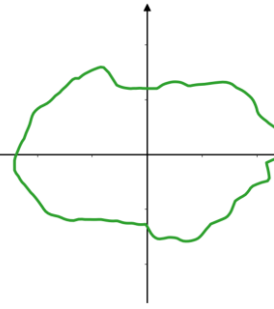
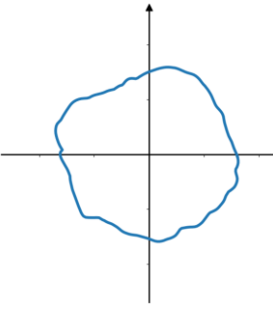
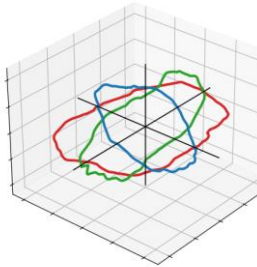
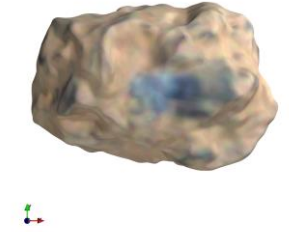
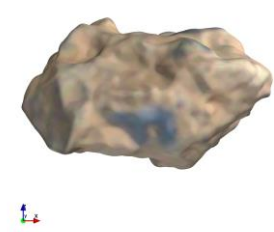
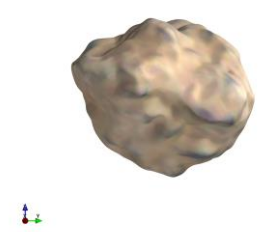
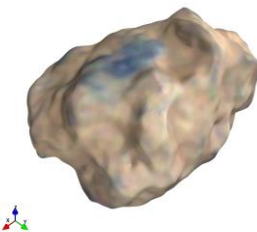
Descritores de Fourier de seções transversais



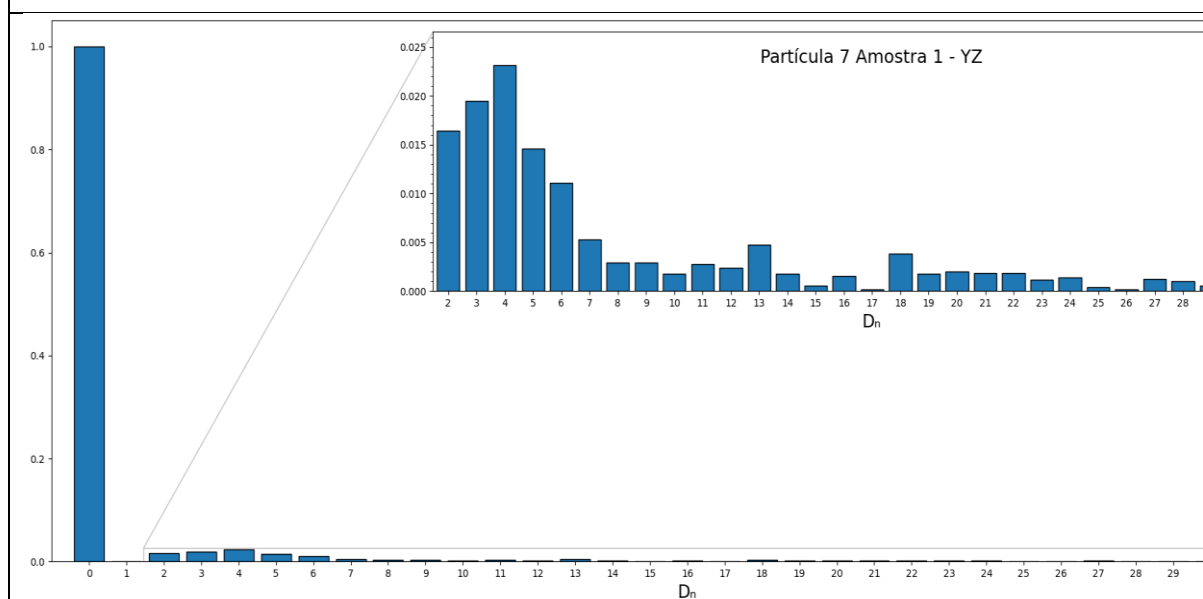
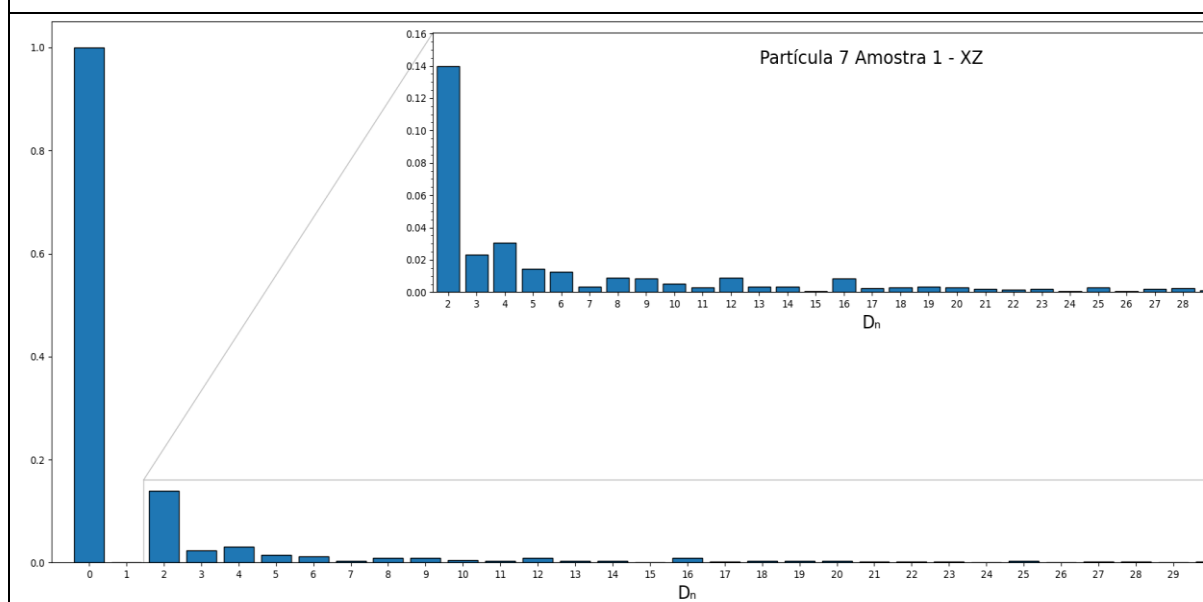
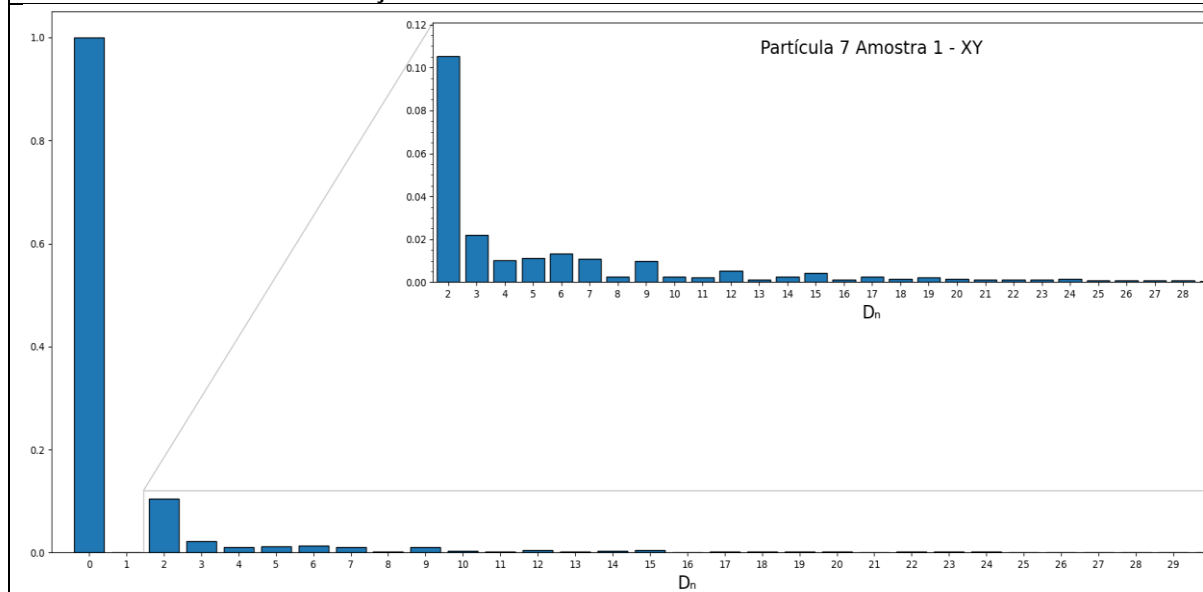
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 6	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1213.7044		Volume: 2922.4841	
Dimensão maior (dl): 28.83 mm	Dimensão Intermediária (di): 16.63 mm	Dimensão Menor (ds): 13.48 mm	
Achatamento (F): 0.81	Alongamento (E): 0.577	Relação F&E: 2.139	Esfericidade: 0.646
Diâmetro equivalente (dv): 17.739 mm		Diâmetro equivalente (ds): 48.146 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 14.447 mm
Centro de massa: -6.738 16.605 493.899	Principais eixos: 167808.5 -23591.6 3899.8 -23591.6 77155.8 34742.6 3899.8 34742.6 150714.2	Momentos de inércia: 58343.5 162198.7 175136.3	Vetores de inércia: 0.209 0.912 -0.352 0.414 0.243 0.877 -0.886 0.329 0.327

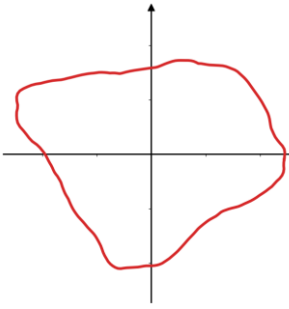
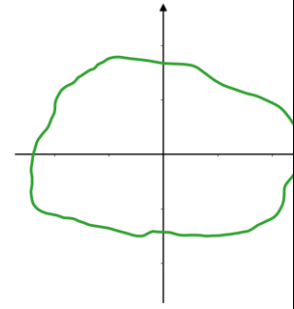
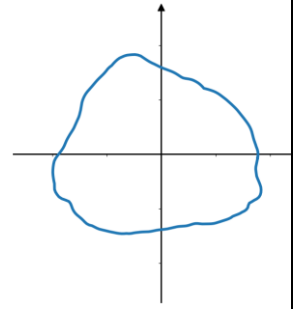
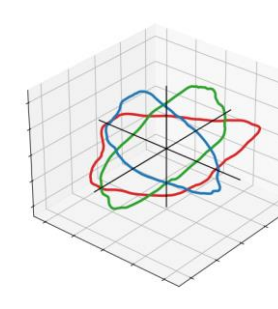
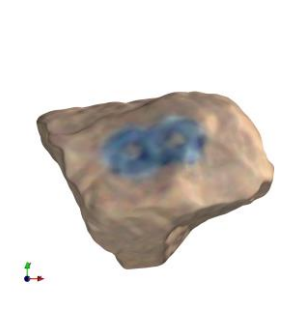
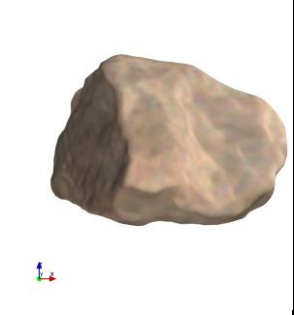
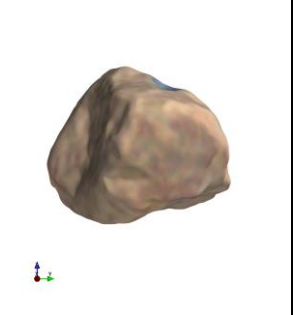
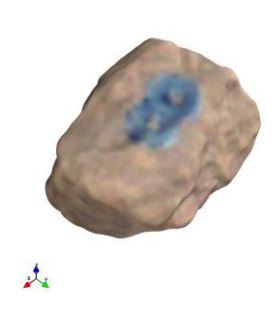
Descritores de Fourier de seções transversais



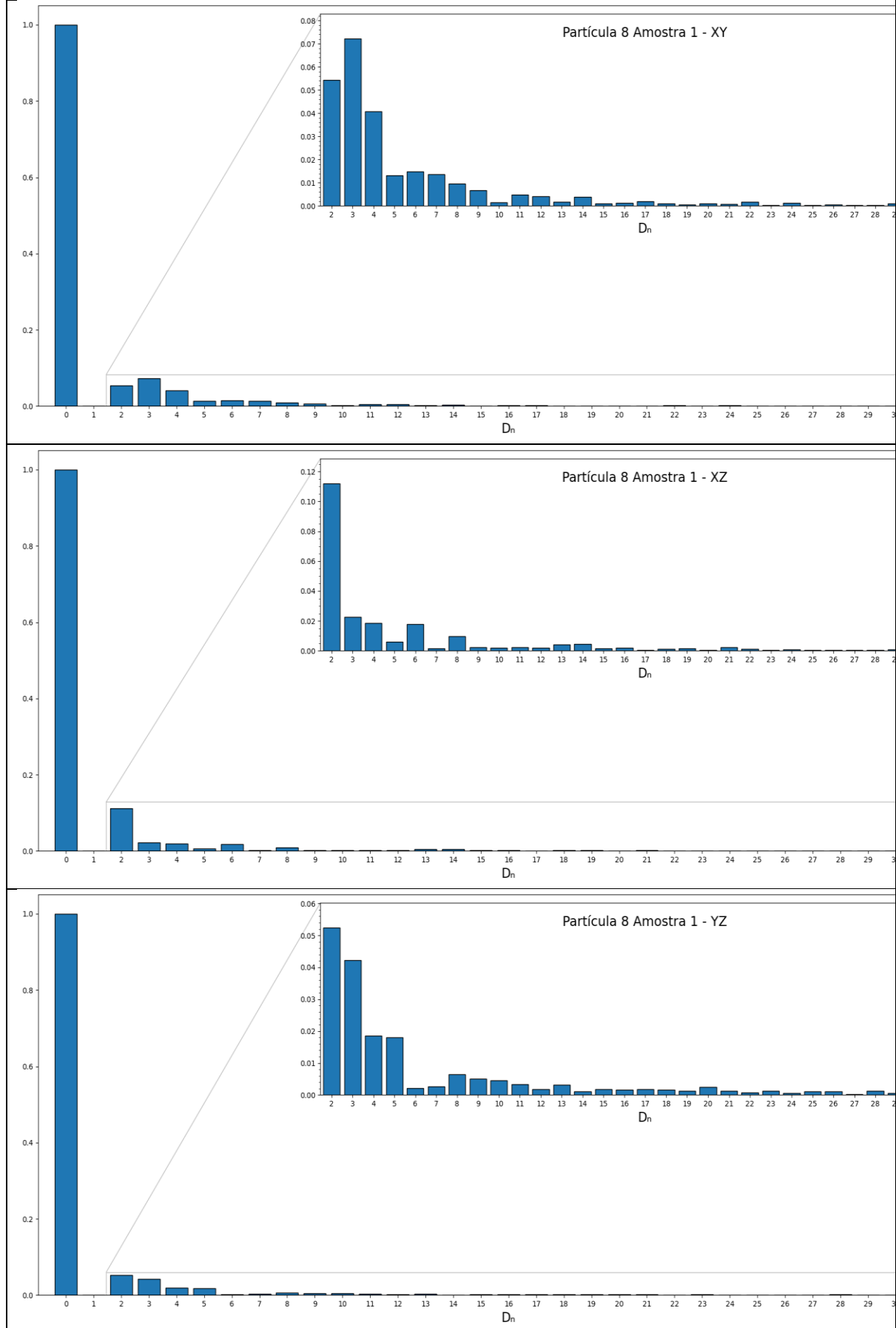
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1				
Descrição:				
Equipamento experimental: EinScan Pro HD				
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.		
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 7		
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D	
				
				
Características da partícula.				
Superfície: 1114.8982		Volume: 2748.8296		
Dimensão maior (dl): 24.45 mm	Dimensão Intermediária (di): 16.64 mm	Dimensão Menor (ds): 15.88 mm		
Achatamento (F): 0.955	Alongamento (E): 0.681	Relação F&E: 1.539	Esfericidade: 0.762	
Diâmetro equivalente (dv): 17.38 mm		Diâmetro equivalente (ds): 46.144 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 14.793 mm	
Centro de massa: -3.453 16.406 496.963	Principais eixos: 105184.1 -11517.4 3380.6 -11517.4 73560.7 17847.9 3380.6 17847.9 111455.1	Momentos de inércia: 63083.3 108465.1 118651.6	Vetores de inércia: 0.273 0.896 -0.350 0.957 -0.214 0.198 -0.102 0.389 0.916	

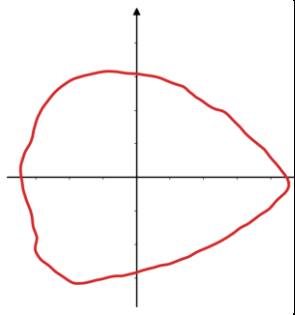
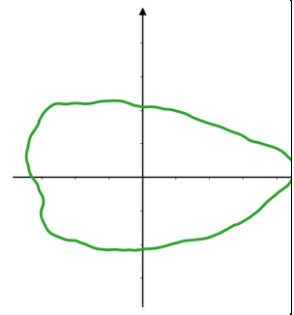
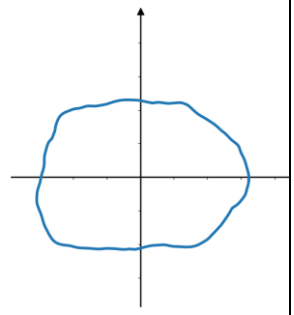
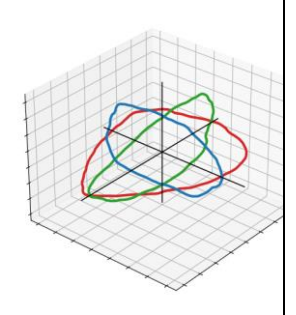
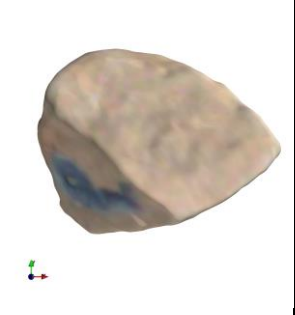
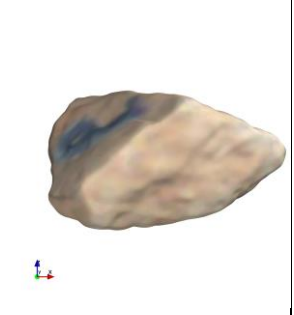
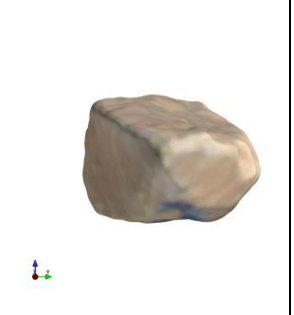
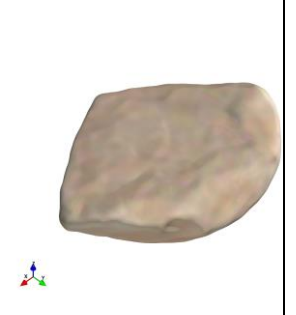
Descritores de Fourier de seções transversais



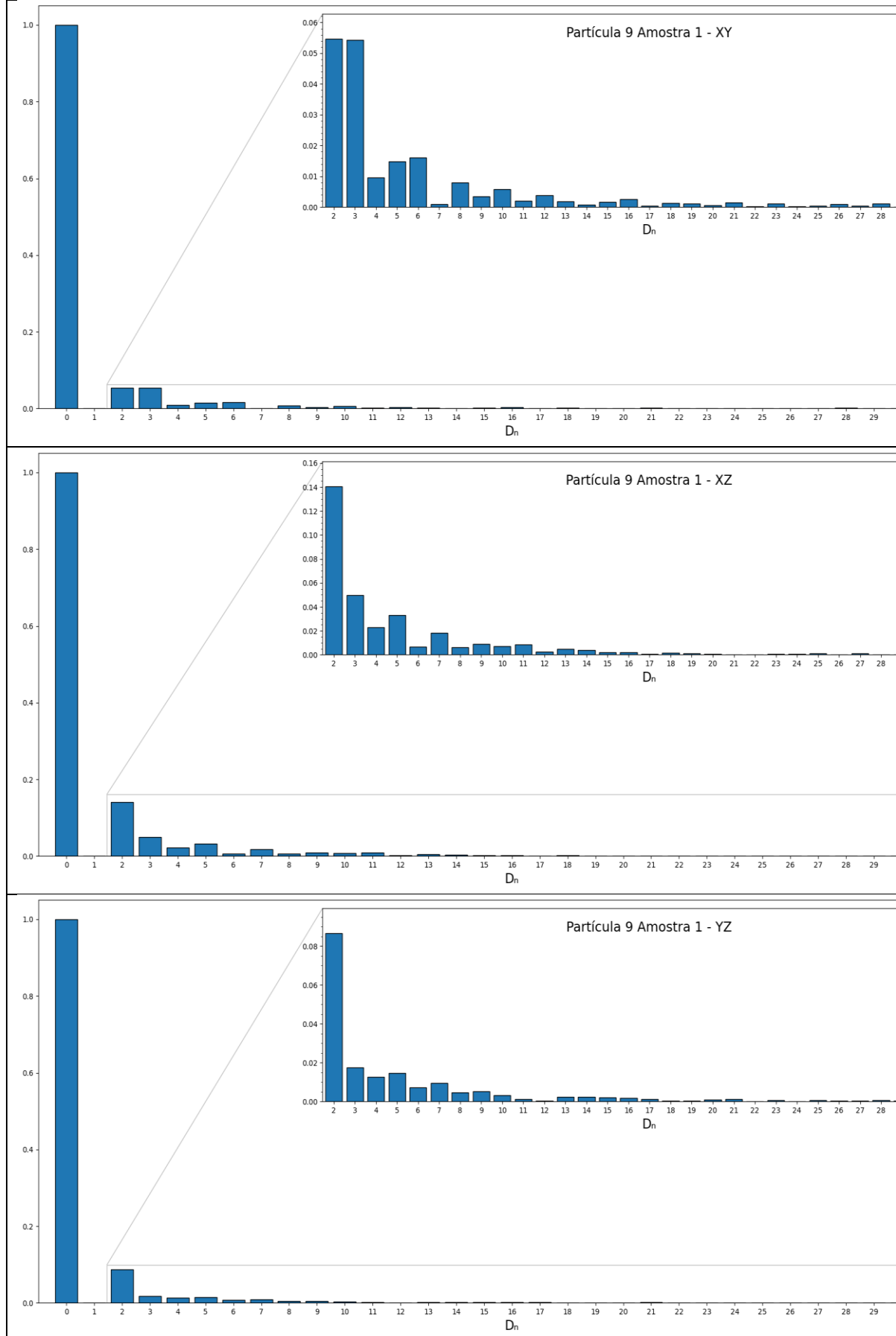
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 8	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1212.6501		Volume: 3136.4019	
Dimensão maior (dl): 24.64 mm	Dimensão Intermediária (di): 19.13 mm	Dimensão Menor (ds): 16.45 mm	
Achatamento (F): 0.86	Alongamento (E): 0.776	Relação F&E: 1.497	Esfericidade: 0.803
Diâmetro equivalente (dv): 18.161 mm		Diâmetro equivalente (ds): 48.125 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 15.518 mm
Centro de massa: [-12.819 8.533 492.115]		Principais eixos: [120805.2 10326.6 -11455.0] [10326.6 111879.7 18540.8] [-11455.0 18540.8 121135.6]	Momentos de inércia: [89895.6 127566.7 136358.1] Vetores de inércia: [-0.443 0.690 -0.572] [0.856 0.515 -0.042] [-0.266 0.508 0.819]

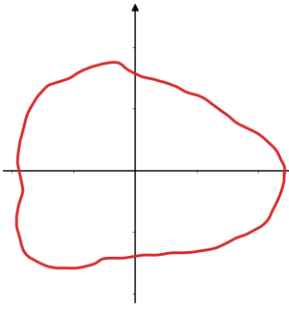
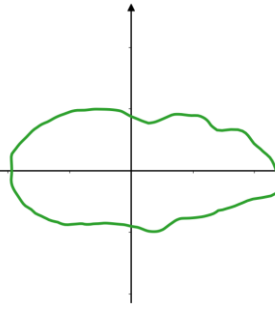
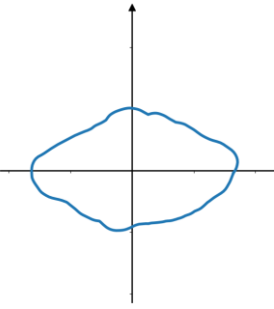
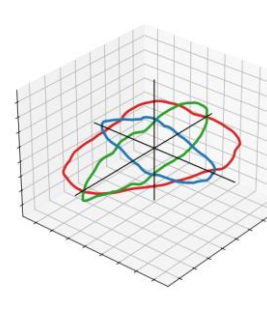
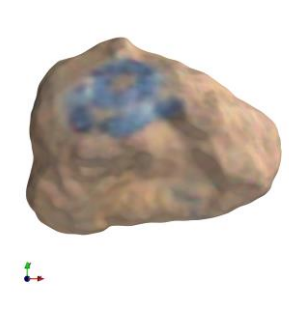
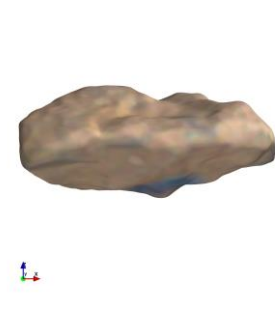
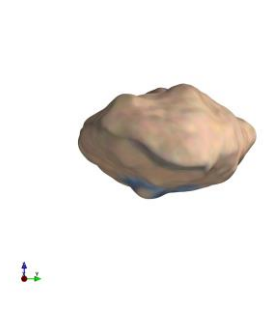
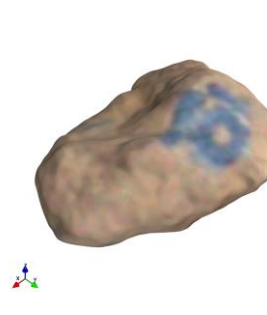
Descritores de Fourier de seções transversais



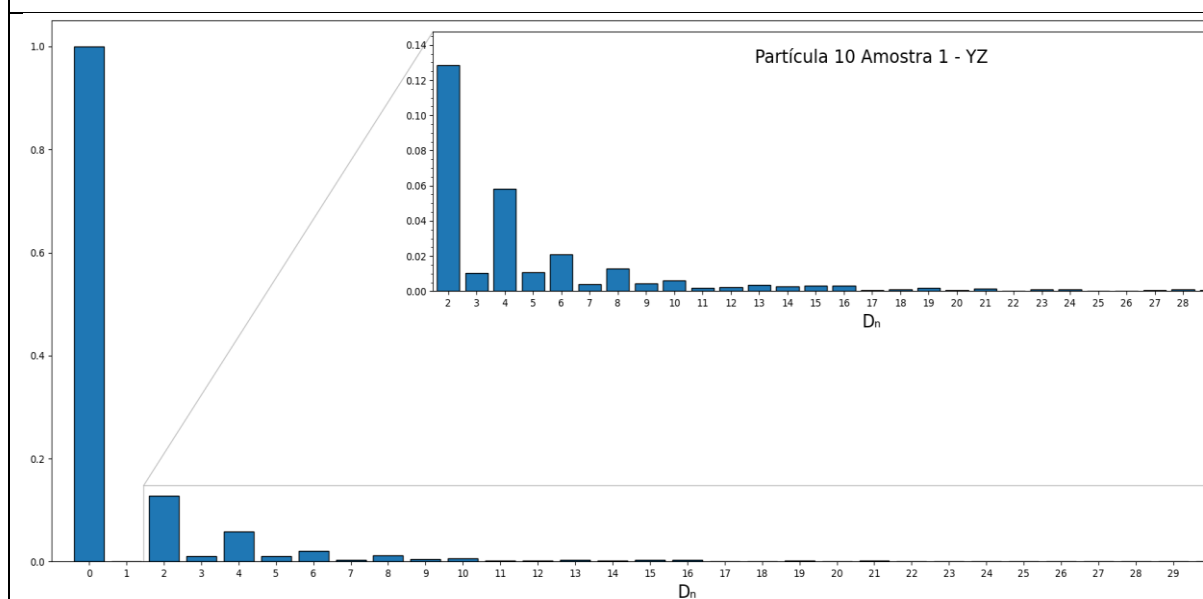
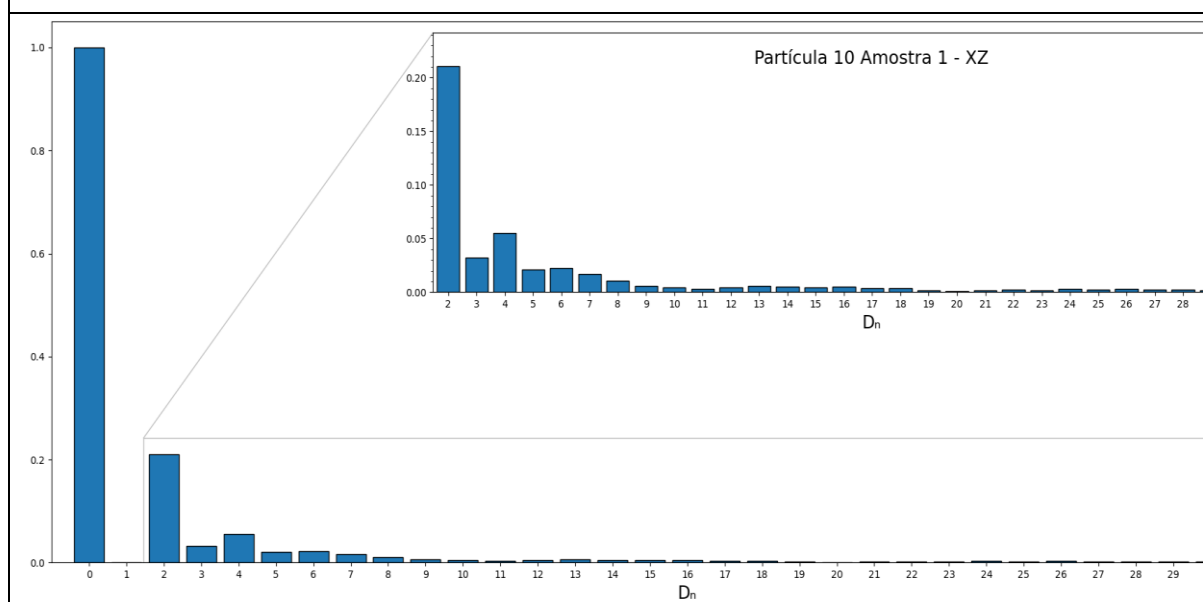
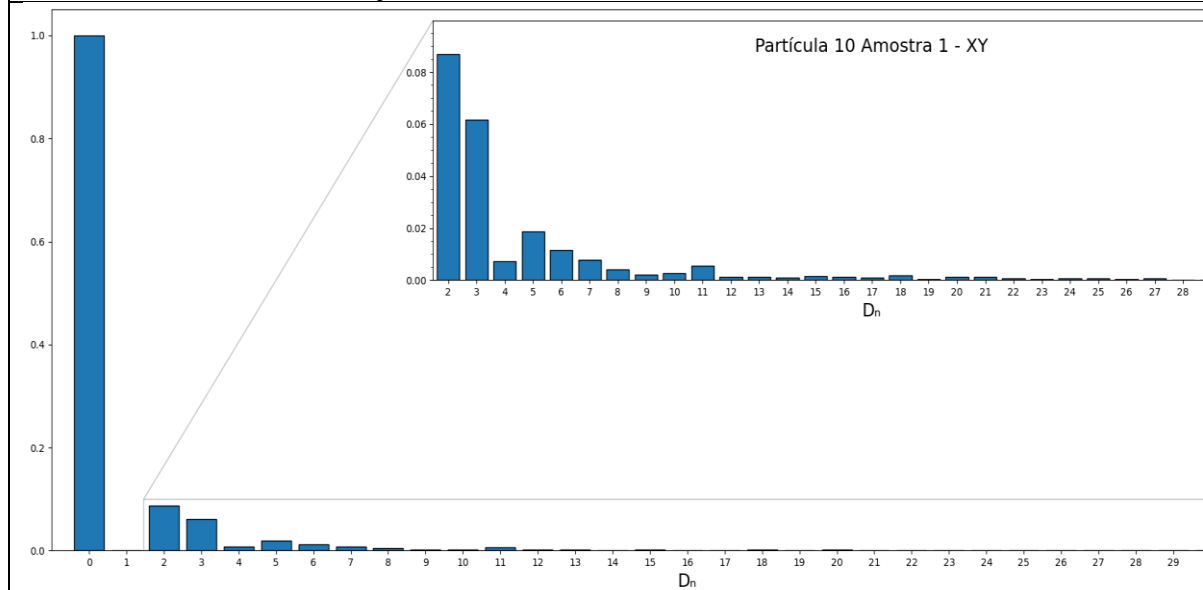
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 9	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 712.9916		Volume: 1397.8759	
Dimensão maior (dl): 19.99 mm	Dimensão Intermediária (di): 15.81 mm	Dimensão Menor (ds): 11.15 mm	
Achatamento (F): 0.705	Alongamento (E): 0.791	Relação F&E: 1.793	Esfericidade: 0.761
Diâmetro equivalente (dv): 13.873 mm		Diâmetro equivalente (ds): 36.901 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 11.763 mm
Centro de massa: [-7.329 9.607 493.075]	Principais eixos: [32112.9 -3587.4 -746.6] [-3587.4 29271.3 6427.7] [-746.6 6427.7 34186.7]	Momentos de inércia: [24006.8 31959.3 39604.8]	Vetores de inércia: [-0.315 -0.813 0.490] [0.882 -0.059 0.467] [-0.351 0.579 0.736]

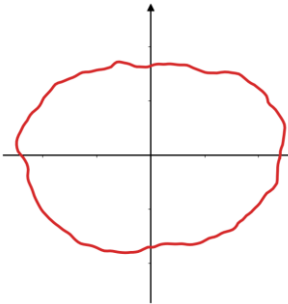
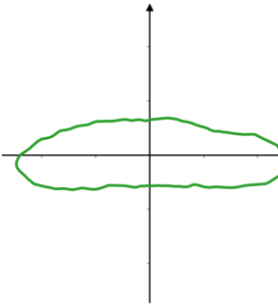
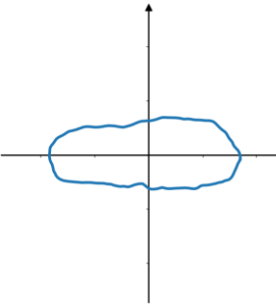
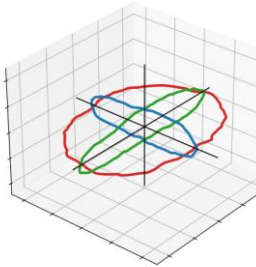
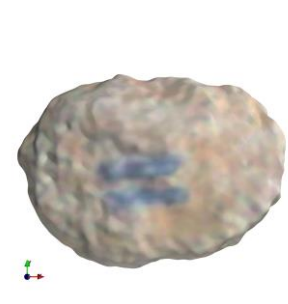
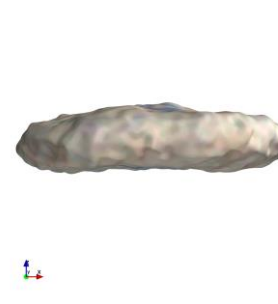
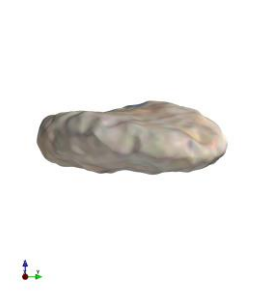
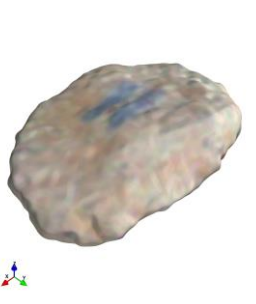
Descritores de Fourier de seções transversais



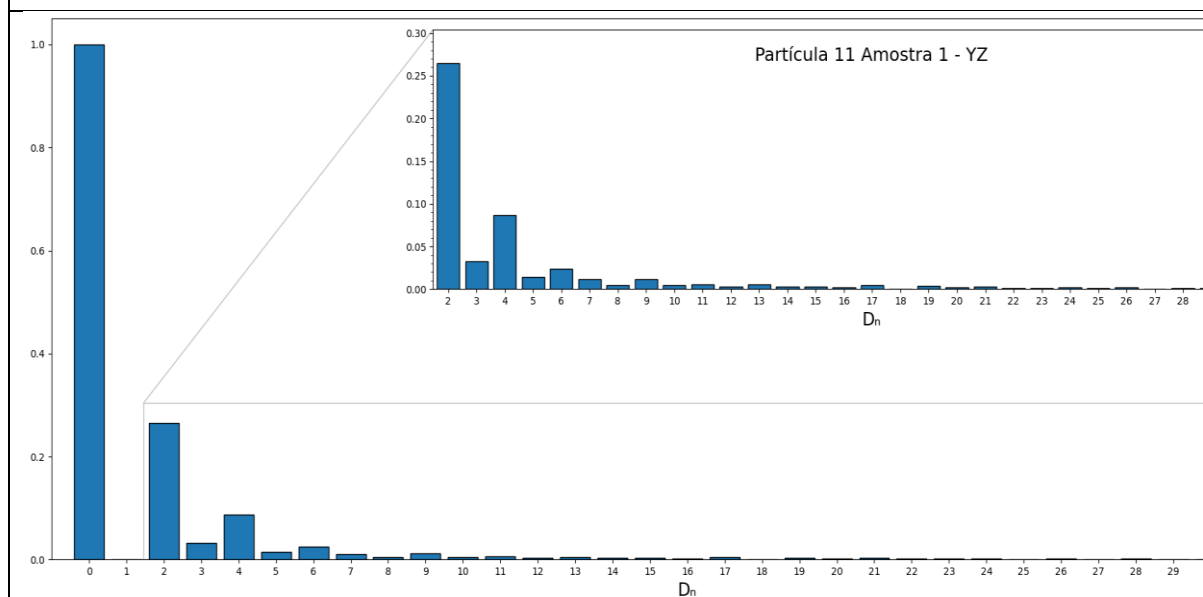
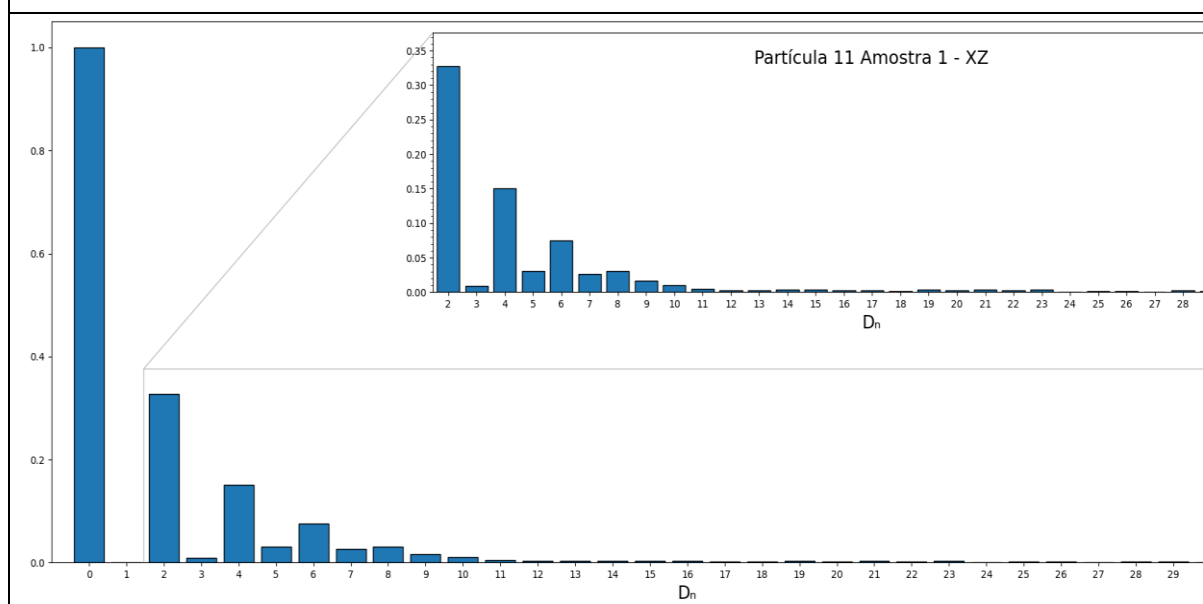
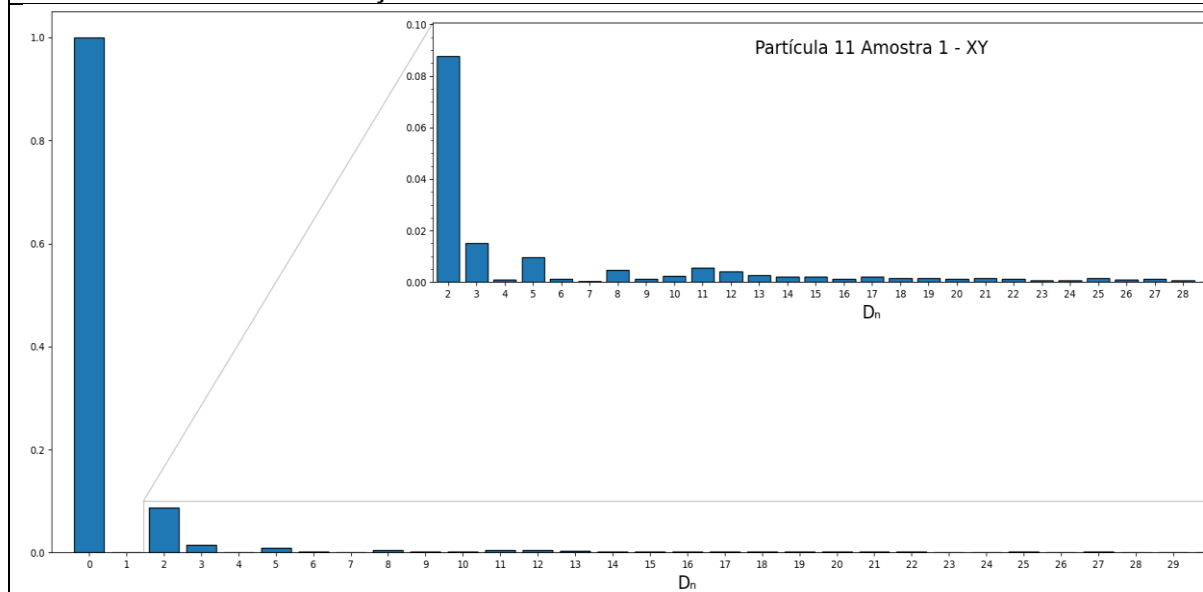
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 10	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 758.0864		Volume: 1466.0006	
Dimensão maior (dl): 21.75 mm	Dimensão Intermediária (di): 16.7 mm	Dimensão Menor (ds): 9.93 mm	
Achatamento (F): 0.595	Alongamento (E): 0.768	Relação F&E: 2.191	Esfericidade: 0.705
Diâmetro equivalente (dv): 14.094 mm		Diâmetro equivalente (ds): 38.05 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 11.603 mm
Centro de massa: -7.795 8.880 489.598	Principais eixos: 43998.3 -1784.1 -3110.2 -1784.1 28525.7 12002.5 -3110.2 12002.5 47520.0	Momentos de inércia: 22714.5 42787.7 54541.9	Vetores de inércia: -0.012 -0.901 0.434 -0.947 -0.129 -0.294 [0.321 -0.415 -0.851

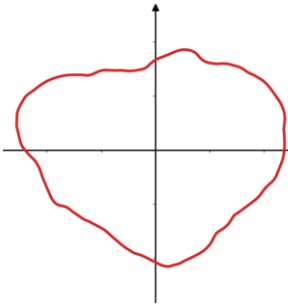
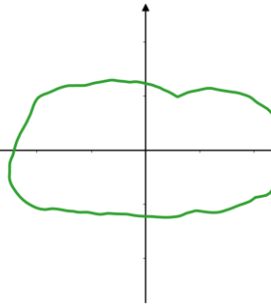
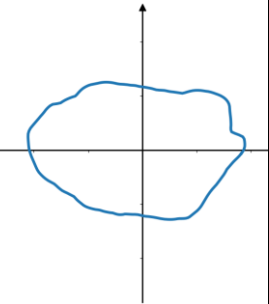
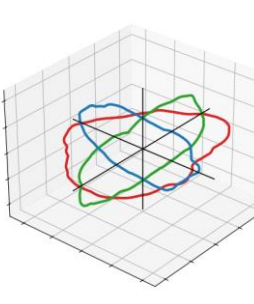
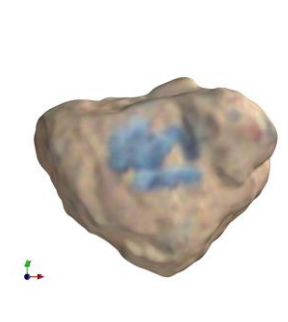
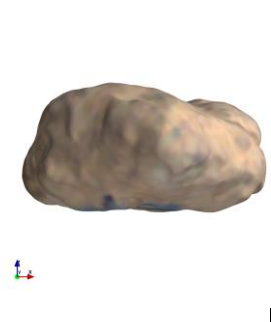
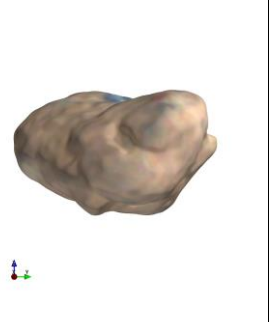
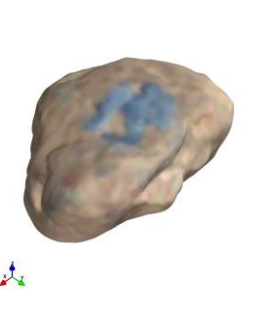
Descritores de Fourier de seções transversais



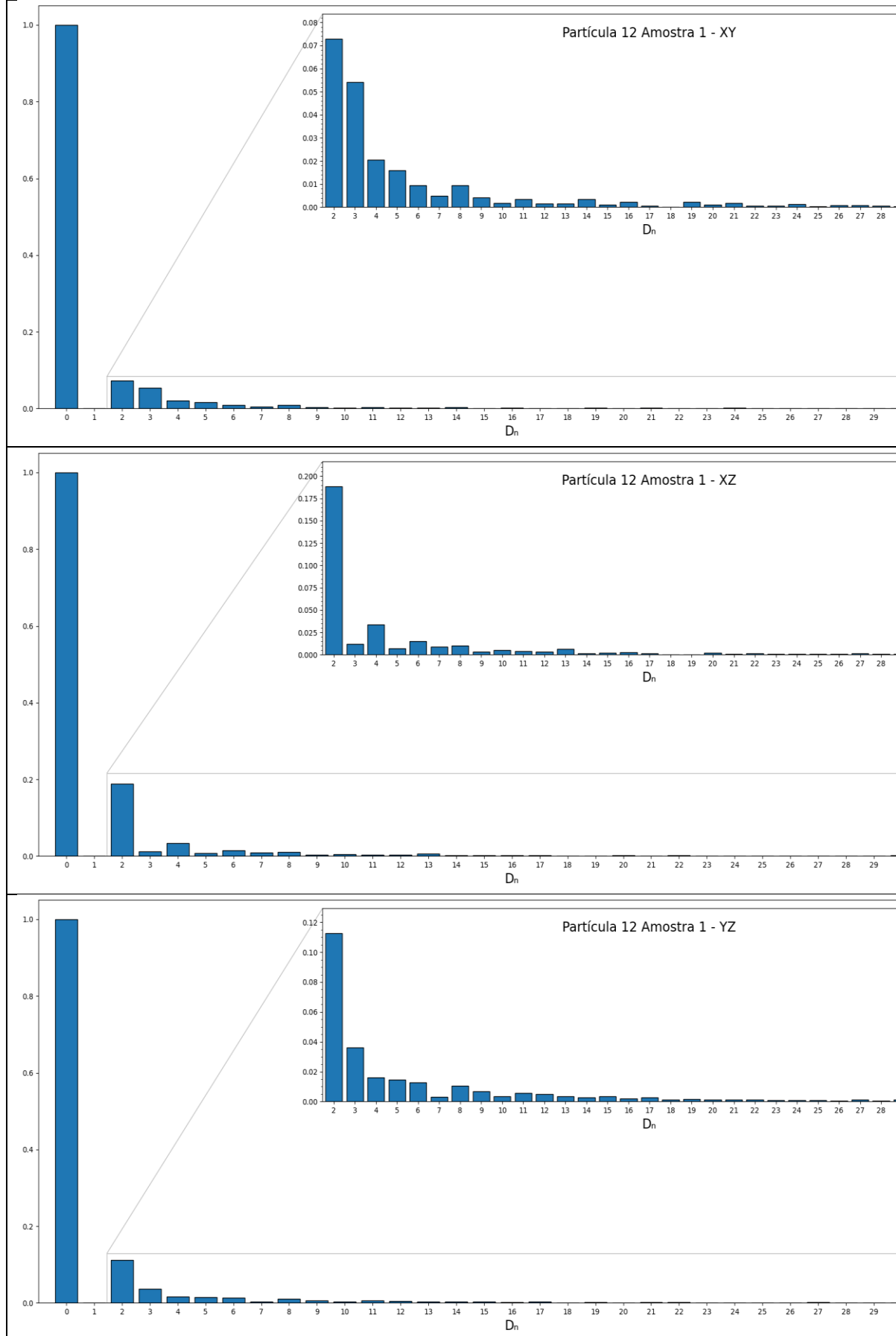
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 11	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 855.8931		Volume: 1427.5832	
Dimensão maior (dl): 24.82 mm	Dimensão Intermediária (di): 17.66 mm	Dimensão Menor (ds): 6.64 mm	
Achatamento (F): 0.376	Alongamento (E): 0.712	Relação F&E: 3.738	Esfericidade: 0.575
Diâmetro equivalente (dv): 13.97 mm		Diâmetro equivalente (ds): 40.431 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 10.008 mm
Centro de massa: -11.252 11.663 489.760	Principais eixos: 50061.6 -4685.0 -4017.6 -4685.0 36659.6 17486.0 -4017.6 17486.0 58348.9	Momentos de inércia: 26725.1 48556.9 69788.1	Vetores de inércia: -0.095 -0.876 0.472 0.955 0.055 0.293 -0.283 0.479 0.831

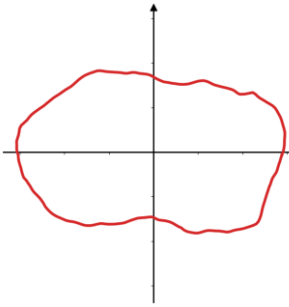
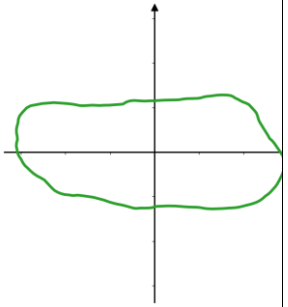
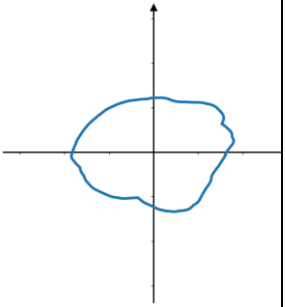
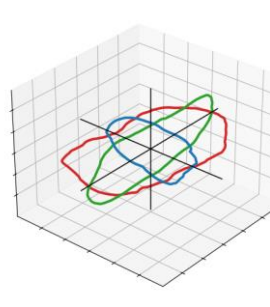
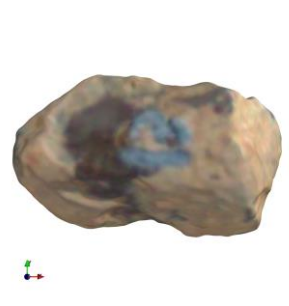
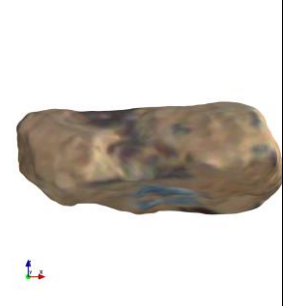
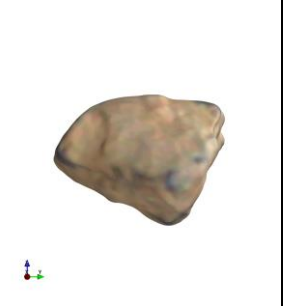
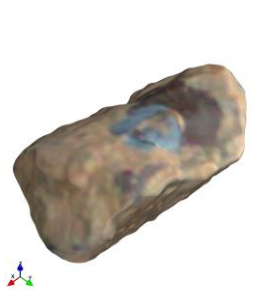
Descritores de Fourier de seções transversais



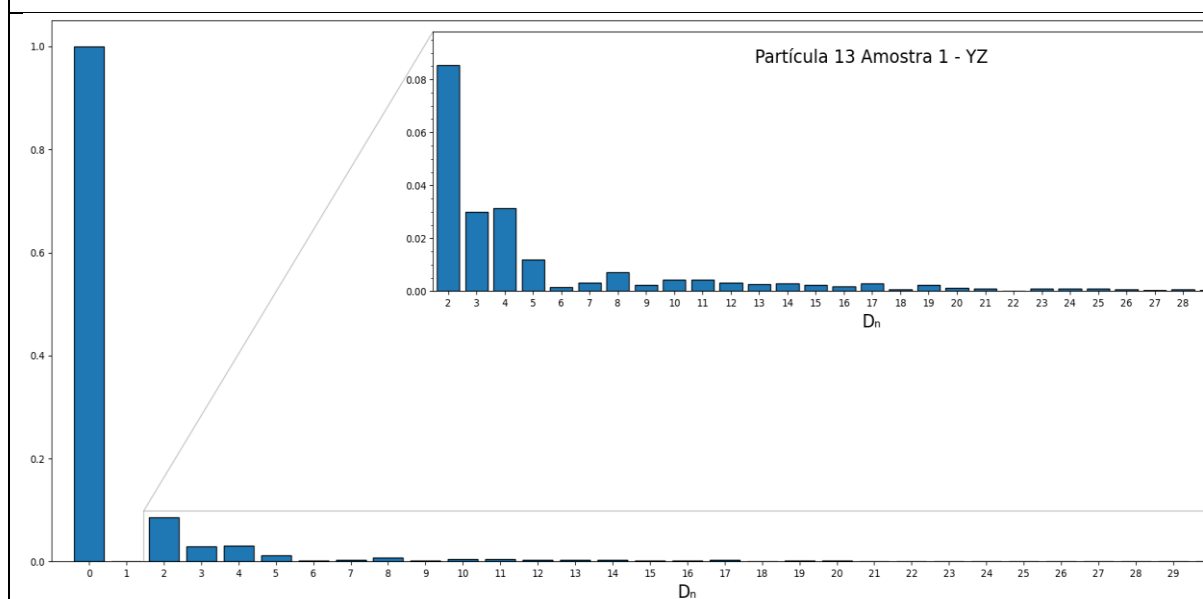
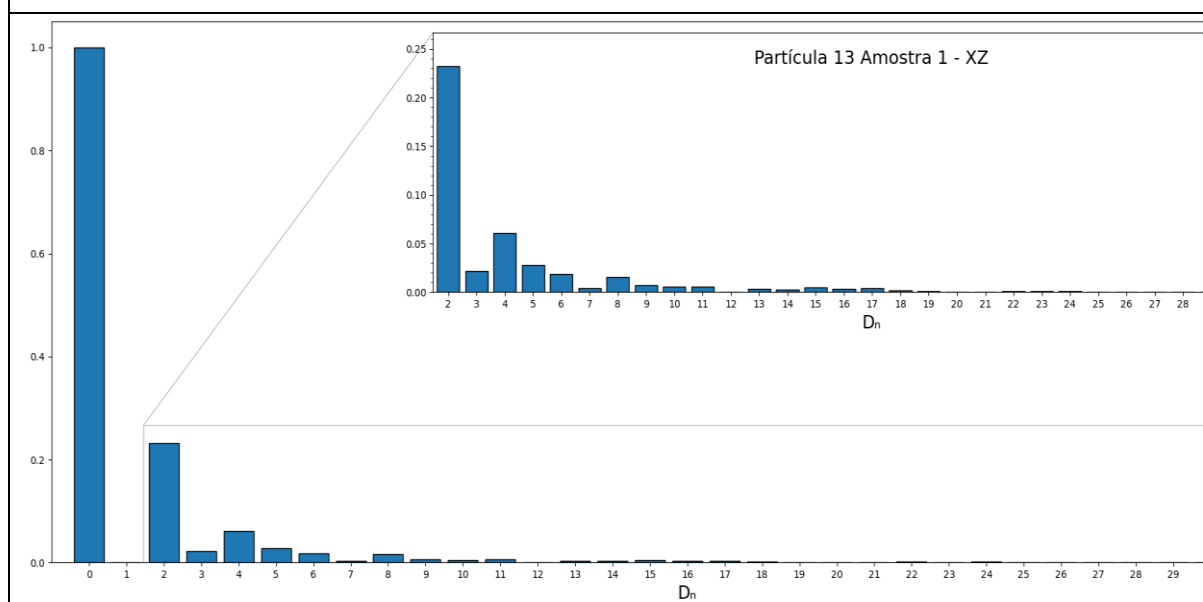
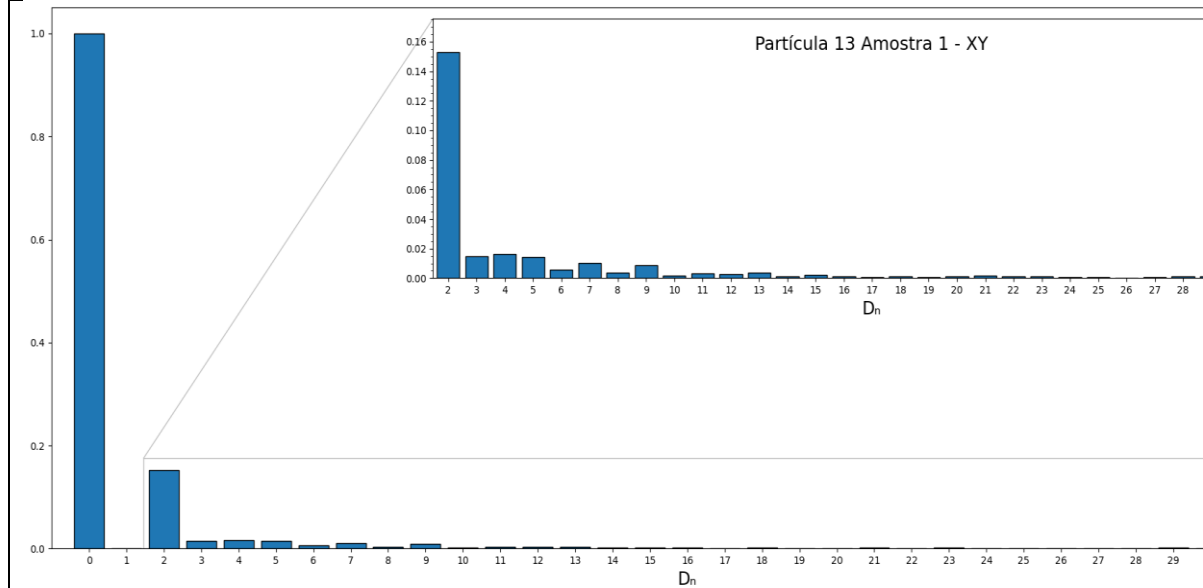
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 12	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1112.8651		Volume: 2823.2928	
Dimensão maior (dl): 24.77 mm	Dimensão Intermediária (di): 20.02 mm	Dimensão Menor (ds): 12.68 mm	
Achatamento (F): 0.633	Alongamento (E): 0.808	Relação F&E: 1.954	Esfericidade: 0.745
Diâmetro equivalente (dv): 17.536 mm		Diâmetro equivalente (ds): 46.102 mm	
Diâmetro equivalente (dsv): 15.222 mm			
Centro de massa: -8.535 10.741 487.766		Principais eixos: 118077.0 -14991.3 -1447.9 -14991.3 97364.8 28320.8 -1447.9 28320.8 102032.3	Momentos de inércia: 69125.9 112476.2 135872.0 Vetores de inércia: -0.210 -0.746 0.632 0.797 0.244 0.552 -0.566 0.620 0.543

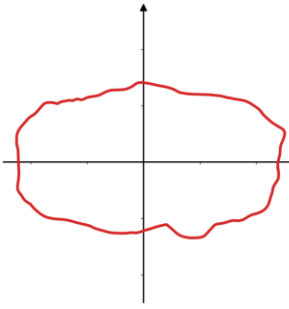
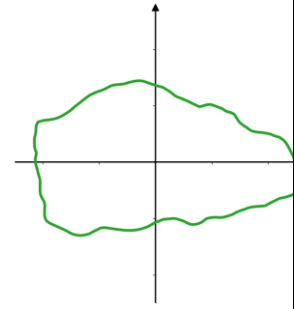
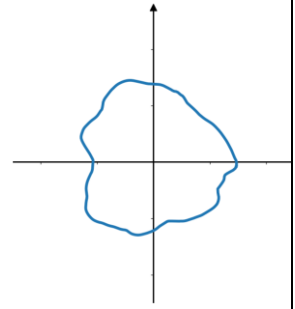
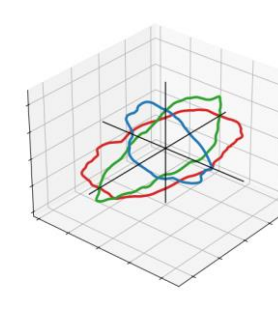
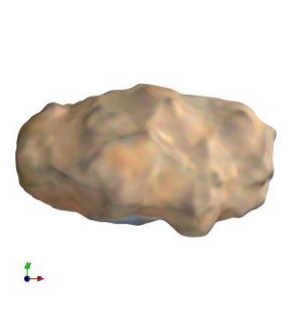
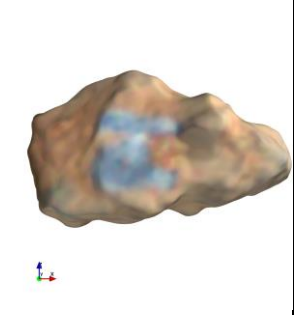
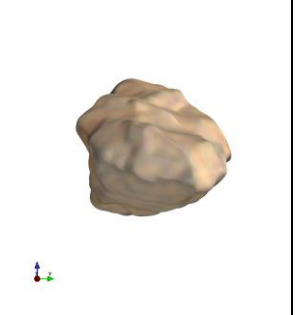
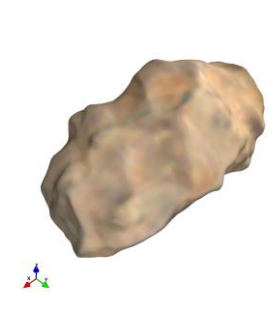
Descritores de Fourier de seções transversais



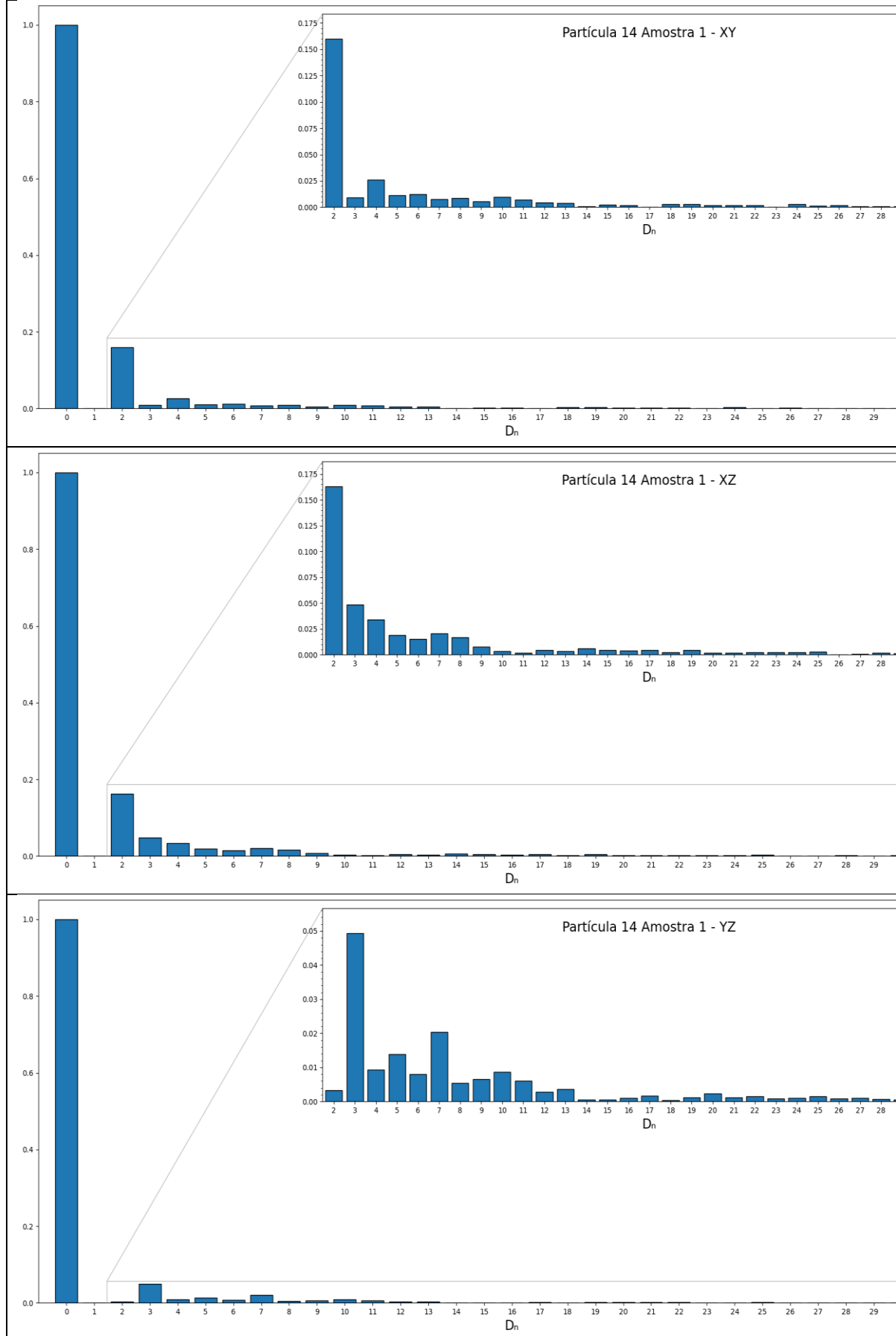
Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1				
Descrição:				
Equipamento experimental: EinScan Pro HD				
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.		
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 13		
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D	
				
				
Características da partícula.				
Superfície: 1289.8818		Volume: 3171.3984		
Dimensão maior (dl): 30.14 mm	Dimensão Intermediária (di): 18.25 mm	Dimensão Menor (ds): 12.8 mm		
Achatamento (F): 0.701	Alongamento (E): 0.605	Relação F&E: 2.356	Esfericidade: 0.636	
Diâmetro equivalente (dv): 18.228 mm		Diâmetro equivalente (ds): 49.634 mm		Diâmetro equivalente (dsv): 14.752 mm
Centro de massa: -11.481 9.792 484.849	Principais eixos: 200261.1 -672.1 -13015.9 -672.1 124815.9 65869.6 -13015.9 65869.6 144575.1	Momentos de inércia: 67605.7 190736.9 211309.5		Vetores de inércia: 0.060 -0.753 0.655 0.715 0.490 0.498 -0.696 0.438 0.568

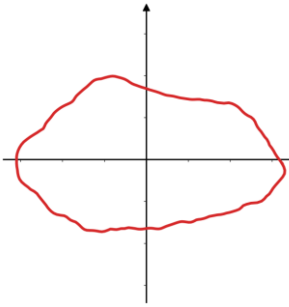
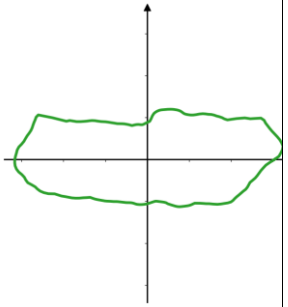
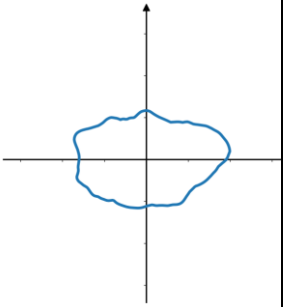
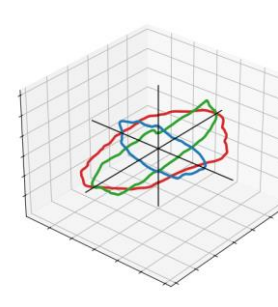
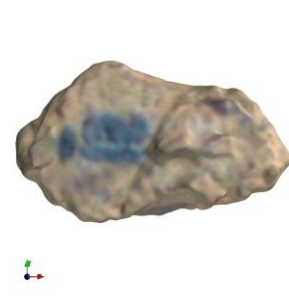
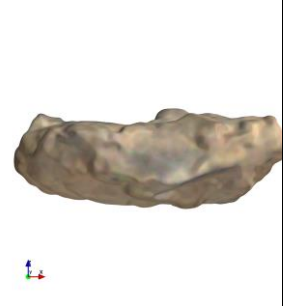
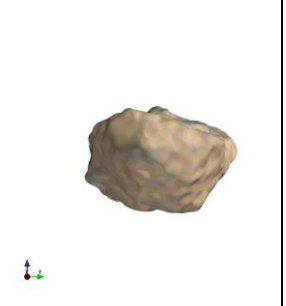
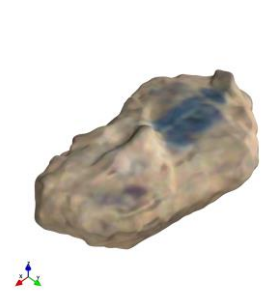
Descritores de Fourier de seções transversais



Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 14	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 868.1743		Volume: 1832.5057	
Dimensão maior (dl): 23.77 mm	Dimensão Intermediária (di): 13.77 mm	Dimensão Menor (ds): 13.71 mm	
Achatamento (F): 0.995	Alongamento (E): 0.579	Relação F&E: 1.734	Esfericidade: 0.694
Diâmetro equivalente (dv): 15.183 mm		Diâmetro equivalente (ds): 40.72 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 12.665 mm
Centro de massa: -8.327 9.750 488.295	Principais eixos: 68968.8 -700.7 -24.2 -700.7 46437.0 20094.5 -24.2 20094.5 50975.4	Momentos de inércia: 28477.6 68466.3 69437.2	Vetores de inércia: 0.013 0.746 -0.666 0.690 0.476 0.546 -0.724 0.466 0.508

Descritores de Fourier de seções transversais



Material: Partículas RCD - Sem Lavar - Amostra 1			
Descrição:			
Equipamento experimental: EinScan Pro HD			
		Descrição: Scanner 3D de mão versátil, oferecendo modos de escaneamento de alta definição, rápida precisão e fixo. Com precisão entre 0.045 mm e 0.1 mm, escaneamento de texturas opcional, e pesando 1.25 kg, é ideal para uma variedade de aplicações. Compatível com Windows 10, inclui software ExScan Pro e Solid Edge SHINING 3D Edition. Consulte einscan.com para mais informações.	
Peneira: 1/2" (12.7 mm)		Partícula: 15	
Plano XY	Plano XZ	Plano YZ	Volume 3D
			
			
Características da partícula.			
Superfície: 1221.6056		Volume: 2806.5073	
Dimensão maior (dl): 32.0 mm	Dimensão Intermediária (di): 18.56 mm	Dimensão Menor (ds): 11.63 mm	
Achatamento (F): 0.626	Alongamento (E): 0.58	Relação F&E: 2.752	Esfericidade: 0.595
Diâmetro equivalente (dv): 17.501 mm		Diâmetro equivalente (ds): 48.302 mm	Diâmetro equivalente (dsv): 13.784 mm
Centro de massa: -1.569 12.191 486.250		Principais eixos: 163852.4 -15665.5 754.3 -15665.5 99027.2 59301.0 754.3 59301.0 139272.9	Momentos de inércia: 54926.6 161860.6 185365.4 Vetores de inércia: -0.121 -0.812 0.572 0.913 0.135 0.384 -0.389 0.569 0.725

Descritores de Fourier de seções transversais

