

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

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO SIDERÚRGICO PARA
DIMENSIONAMENTO DE COLCHÃO DRENANTE COM USO DE
PERMEÂMETRO DE GRANDES DIMENSÕES

ALUNO: SILVANA FAVA MARCHEZINI, MSc
ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, PhD
COORIENTADOR: PROF. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, PhD

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD-143/18

Brasília/DF - Julho / 2018

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

CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO SIDERÚRGICO PARA DIMENSIONAMENTO
DE COLCHÃO DRENANTE COM USO DE PERMEÂMETRO DE GRANDES
DIMENSÕES

ALUNO: SILVANA FAVA MARCHEZINI, MSc

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

APROVADA POR:

PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)

PROF. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, PhD (UnB)
(COORIENTADOR)

PROF. ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. MARIA JOSÉ ARAÚJO SALES, PhD (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

PROF. MÁRCIA MARIA DOS ANJOS MASCARENHAS, PhD (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, Julho de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

MARCHEZINI, SILVANA FAVA

Caracterização do Agregado Siderúrgico para o Dimensionamento do Colchão Drenante, com
Uso de Permeâmetro de Grandes Dimensões. [Distrito Federal] 2018

xxiii, 174p., 300 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2018).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Agregado Siderúrgico 2. Escória Siderúrgica 3. Permeâmetro de Grandes Dimensões

4. Dimensionamento do Colchão Drenante 5. Pavimento Rodoviário

I. ENC/FT/UnB

II. Doutor

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Marchezini, Silvana Fava. (2018). Caracterização do Agregado Siderúrgico para o Dimensionamento do Colchão Drenante com Uso de Permeâmetro de Grandes Dimensões. Tese de Doutorado, Publicação G.TD- 143/2018, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Silvana Fava Marchezini

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Caracterização do Agregado Siderúrgico para o Dimensionamento do Colchão Drenante com Uso de Permeâmetro de Grandes Dimensões.

GRAU/ANO: Doutor/2018

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.

Silvana Fava Marchezini
smarchezini@gmail.com

DEDICATÓRIA

*À Deus por permitir a realização deste doutorado, presente em todos os momentos, me amparando, me iluminando e me dando forças para não desistir ao longo da caminhada.
À Ele toda honra e glória!*

À minha mãe pela dedicação a minha vida e a quem privei do meu carinho e presença neste momento de sua vida!

Aos meus filhos Marcelle, Marina, Thiago; as noras Juliana e Anna pelas orações, carinho e amor me incentivando e dando forças para não desistir!

*Ao meu neto Martin presença de Deus em
minha vida!*

*Ao amigo, companheiro, namorado Luiz Carlos
de Figueiredo que não desistiu de mim ao longo
desses anos, apesar da distância física e muitas
vezes afetiva!*

A todos minha eterna gratidão!

HOMENAGEM PÓSTUMAS

*Ao meu pai, Ercídio Marchezini que cedo
partiu, mas que na sua sabedoria de vida*

*sempre incentivou a buscar o estudo, o seu
aprimoramento e nunca desistir!*

AGRADECIMENTO

Aos professores André Luís Brasil e Luís Fernando Martins Ribeiro pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. As professoras Edi Guimarães do Instituto de Geociências da UnB, Maria José Araújo Sales do Instituto de Química da UnB, Cristina Célia Brandão do Laboratório de Águas da UnB pelo apoio, preparação e realização dos ensaios. À CAPES pelo suporte financeiro e ao IABr pelas amostras.

Ao professor e diretor do Infralab, Márcio Muniz de Farias que disponibilizou o laboratório do Infralab para a realização dos ensaios de caracterização física e o espaço para armazenamento das amostras.

A professora Manuelle Gois, pesquisadora convidada da UnB pelas orientações, discussões, amizade e incentivo durante o período de formatação da Tese.

Aos colegas e amigos da pós-graduação da Geotecnia da UnB: Chan Kou Wha, Nelson Padrón Sánchez, Renato Paulinelli, Katherin Rocio Cano Rojas, Mateus Bezerra Costa, Dhara Vieira Alcântara, Lucas Parreira Faria Borges, Ronaldo Vilela Wanderley Neto, Ana Paola do Nascimento e Silva, Pedro Mascarenhas pelo carinho, incentivo e discussões científicas.

A Suzana da Silva, diretora do IFMT, Campus Bela Vista pelo apoio na realização do ensaio de teor de óxido de cálcio livre; ao Éder Almeida, tecnólogo do Laboratório de Mecânica de Solos do IFMT, Campus Octayde Jorge da Silva pelo apoio na realização de ensaios e preparação de amostras.

A Roseli Aguiar Nascimento Conciani, Wilson Conciani e Fabiani Maria Dalla Rosa Barbosa que me acolheram com carinho na fase final deste trabalho imprescindível para a concretização final da Tese.

Aos meus tios Ana Maria Fava Farto e João Mischiatti Farto que deram suporte à minha mãe durante a minha ausência para a realização do doutorado.

Ao IFMT e aos colegas do Departamento da Área da Construção Civil do IFMT que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao colega e amigo Luiz Carlos de Figueiredo pelas discussões técnicas e científicas e aplicação de software na realização de gráficos.

A todos minha gratidão e apreço!

Caracterização do Agregado Siderúrgico para Dimensionamento de Colchão Drenante com uso de Permeâmetro de Grandes Dimensões

Os aspectos econômicos e ambientais vêm incentivando a utilização de materiais alternativos, provenientes das indústrias siderúrgicas aplicadas em obras geotécnicas entre os quais escórias siderúrgicas (ES) e agregados siderúrgicos (AS). A aplicação desses materiais tem relevância na contribuição da sustentabilidade do planeta. As obras rodoviárias demandam quantidade considerável de agregados naturais, aplicados como material de base e sub-base, assim como material drenante e, apresentam altos custos econômicos e grande impacto ambiental. Nesse contexto o presente trabalho estudou a potencialidade dos AS e ES como material drenante aplicado a colchão drenante e dreno longitudinal profundo. A pesquisa ocorreu com três amostras, provenientes de duas indústrias siderúrgicas. Duas amostras de escórias siderúrgicas, de mesma procedência, uma do tipo LD - B_NTLD, outra do tipo AF - C_NTAF e, a terceira amostra, agregado siderúrgico tipo LD - A_TLTD oriundo de outra siderúrgica. Foram definidas três faixas granulométricas, C1 e C4 para uso em colchão drenante e, C12 para uso em dreno longitudinal profundo, com intervalos de grãos de diâmetros entre 0,075 mm a 50 mm. As amostras foram caracterizadas de forma física, mineralógica e química, de modo a verificar a presença de óxidos com características expansivas e formadores de tufa. Para avaliar a capacidade física drenante das amostras, construiu-se um permeâmetro à carga constante de paredes rígidas de grandes dimensões. Os valores da condutividade hidráulica foram aplicados nos modelos de dimensionamento do colchão drenante propostos nesta Tese. Concluiu-se, do ponto de vista físico que há potencial de uso como material drenante, com condutividade hidráulica na ordem de grandeza de 10^{-3} m/s a 10^{-2} m/s; do ponto de vista químico, recomenda-se que o tratamento de cura das amostras deva ser intensificado pelas siderúrgicas, para reduzir a presença dos óxidos instáveis e, inibir o fenômeno expansivo e a formação de tufa. Foi constatada que a solução menos conservadora para o dimensionamento do colchão drenante é a Solução simplificada de Giroud. Para, a condutividade hidráulica (k) de 10^{-3} m/s tem-se a espessura admissível para o colchão drenante de 0,40 m, com fator de segurança hidráulico (F_{SH}) igual a 10. Foi feita a análise integrada para todas as caracterizações das amostras.

Palavras Chaves: Agregado siderúrgico; Escória Siderúrgica, Permeâmetro de grandes dimensões; Dimensionamento de colchão drenante; Pavimento Rodoviário.

Characterization of the Steel Aggregate for Drainage Dimensioning with the Use of Large Dimensional Permeameters

The economic and environmental aspects have encouraged the use of alternative materials from the steel industries applied in geotechnical works such as steel slag (ES) and steel aggregates (AS). The application of these materials has relevance in the contribution of the sustainability of the planet. The road works demand considerable amount of natural

aggregates, applied as base material and sub-base, as well as draining material and, present high economic costs and great environmental impact. In this context the present work studied the potentiality of AS and ES as drainage material applied to drainage mattress and deep longitudinal drainage. The research was carried out with three samples from two steel industries. Two samples of steel slag, of the same origin, one of the LD - B_NTL_D type, the other of the AF - C_NTAF type and, the third sample, the LD - A_TL_D steel aggregate from another steel mill. Three granulometric bands were defined, C1 and C4 for use in drainage and C12 for use in deep longitudinal drainage, with grain intervals of 0.075 mm to 50 mm. The samples were characterized physically, mineralogically and chemically, in order to verify the presence of oxides with expansive and tufa forming characteristics. To evaluate the draining physical capacity of the samples, a constant load permeameter was constructed of large rigid walls. The hydraulic conductivity values were applied in the drainage mattress design models proposed in this thesis. It was concluded from the physical point of view that there is potential of use as draining material, with hydraulic conductivity in the order of magnitude of 10^{-3} m/s at 10^{-2} m/s; from the chemical point of view, it is recommended that the curing treatment of the samples should be intensified by steelmakers to reduce the presence of unstable oxides and inhibit the expansive phenomenon and the formation of tufa. It has been found that the least conservative solution for drainage mattress design is the Simplified Giroud Solution. For the hydraulic conductivity (k) of $4.6 \cdot 10^{-3}$ m / s, the permissible thickness for the draining mattress of 0.40 m with a hydraulic safety factor (FSH) of 10 was used. The integrated analysis was performed for all characterizations of the samples.

Keywords: Steel aggregate; Steel slage; Large permeameter; Dimensioning of drainage mattress; Road Pavement

SUMÁRIO

1	Introdução	23
1.1	Objetivos	25
1.1.1	Objetivo Geral	25
1.1.2	Objetivos Específicos	25
1.2	Estrutura da Pesquisa	25
2	Revisão Bibliográfica	27
2.1	Drenagem Subterrânea	27
2.2	Escórias Siderúrgicas (ES) – Agregado Siderúrgico(AS)	30
2.2.1	Geração e Processo de Classificação das ES e AS	30
2.2.2	Composição Mineral das ES e AS	34
2.2.3	Aspectos Físicos	35
2.2.4	Limitação do Uso das Es e AS	37
2.2.4.1	Expansibilidade	37
2.2.4.2	Formação de Tufa	41
2.2.5	Análise das Águas	42
2.2.6	Colmatação	45
2.2.7	Aplicação e Normatização das ES e AS na Indústria da Construção	47
2.2.8	Caracterização Ambiental das ES e AS	48
3	Material de Pesquisa e Metodologia	53
3.1	Escórias (ES) e Agregado Siderúrgico (AS) Utilizados na Tese	53
3.2	Metodologia	57
3.2.1	Construção de Permeâmetro à Carga Constante de Paredes Rígidas de Grandes Dimensões.....	57
3.2.1.1	Planejamento da Construção	58

3.2.1.2	Execução do Permeâmetro	65
3.2.2	Caracterização Física das Escórias Siderúrgicas (ES) e do Agregado Siderúrgico (AS)	66
3.2.2.1	Distribuição Granulométrica	66
3.2.2.2	Absorção e Massa Específica Seca	67
3.2.2.3	Massa Específica dos Grãos Sólidos	68
3.2.2.4	Massa Unitária Seca	69
3.2.2.5	Índice de Vazios	70
3.2.2.6	Permeabilidade Hidráulica à Carga Constante	71
3.2.2.7	Potencial de Expansão	75
3.2.3	Caracterização Mineralógica	77
3.2.4	Caracterização Química	78
3.2.4.1	Fluorescência de Raios X – FRX	78
3.2.4.2	Microscopia de Varredura Eletrônica – MEV e Elétrons de Dispersão Espalhadas – EDS	79
3.2.4.3	Termogravimetria – TG/DTG	80
3.2.4.4	Resistência à Sulfatos	80
3.2.4.5	Capacidade de Troca Catiônica – CTC	81
3.2.4.6	Teor de Óxido de Cálcio Livre - $\text{CaO}_{\text{livre}}$	82
3.2.4.7	Análise das Águas	83
4	Resultados dos Ensaios de Caracterização	92
4.1	Resultados da Caracterização Física das (ES) e do (AS)	92
4.1.1	Distribuição Granulométrica	92
4.1.2	Absorção (a) e Massa Específica seca $-\rho_d$	96
4.1.3	Massa Específica dos Grãos Sólidos - ρ_s	98
4.1.4	Massa Unitária Seca - ρ_{ap}	98
4.1.5	Índice dos Vazios - e	99
4.1.6	Permeabilidade Hidráulica à Carga Constante - k	100
4.1.7	Avaliação do Potencial de Expansão	104
4.2	Resultados da Caracterização Mineralógica das (ES) e do (AS)	110
4.3	Resultados da Caracterização Química das (ES) e do (AS)	113
4.3.1	Fluorescência de Raios X - DRX	113
4.3.2	Microscopia de Varredura Eletrônica – MEV e Elétrons de Dispersão Espalhados - EDS	116
4.3.3	Termogravimetria - TG/DTG	121
4.3.4	Resistência à Sulfatos	127
4.3.5	Capacidade de Troca Catiônica – CTC	128
4.3.6	Teor de Óxido de Cálcio Livre	129
4.3.7	Análise das Águas	129
4.4	Avaliação da Colmatação	141
5	Proposta de Dimensionamento do Colchão Drenante	144
5.1	Metodologia Clássica de Dimensionamento do Colchão Drenante	144
5.1.1	Definições e Condições de Contorno	145
5.1.1.1	Características do Colchão Drenante	145
5.1.1.2	Taxa de Infiltração no Colchão Drenante	147
5.2	Metodologia Proposta	148
5.2.1	Parâmetros Geométricos	149
5.2.2	Parâmetro Hidráulico	150
5.2.3	Parâmetro Hidrológico	150
5.2.4	Cálculo das Espessuras	150
5.2.4.1	Fator Característico de Giroud	151
5.2.4.2	Dimensionamento Considerando a Solução de Giroud	152

5.2.4.3	Dimensionamento Considerando a Solução Analítica Proposta por McEnroe	153
5.2.4.4	Dimensionamento Considerando a Solução Analítica Transformada de McEnroe	157
5.2.4.5	Dimensionamento Considerando a Solução Empírica Baseada em resultados Numéricos	159
5.2.5	Considerações Finais sobre o Dimensionamento	160
6	Análise Integrada dos Resultados	163
6.1	Análise Integrada para Dimensionamento do Colchão Drenante das Amostras de (ES) e (AS) - Caracterização Física, Mineralógica e Química	164
7	Conclusões e Recomendações Futuras	169
	Referência Bibliográfica	173
	Apêndice	183
A	Caracterização Física das Amostras	184
B	Lei de Darcy ou Fluxo Darcyano	191
C	Imagens MEV/EDS	195

LISTA DE FIGURAS

2.1	Fontes de água – Coninfra, 2009	27
2.2	Esquema de dispositivos drenantes constituinte de uma drenagem profunda – Modificada de Pereira, 2003	28
2.3	Componente de dreno – Modificado de ES 015, DNIT 2006	29
2.4	a) basculamento; b) resfriamento das escórias - Sousa 2007	32
2.5	Classificação e separação magnética - Sousa 2007	32
2.6	a) Escória arrefecimento lento; b) Escória arrefecimento brusco - <i>National Slag Association</i> , 2013	33
3.1	a) agregado siderúrgico de aciaria, LD (A3) 36 mm x 75 mm; b) escória siderúrgica de alto forno, AF (B4) 36 mm x 75 mm; c) agregado siderúrgico de aciaria, LD (A2) 19 mm x 32 mm; d) escória siderúrgica de alto forno AF (B3) 19 mm x 32 mm	54
3.2	a) tubo de PVC cortado com o registro de saída instalado; b) chapa de aço 18, perfurada com diâmetro de 4,6 mm; c) colocação da chapa de aço no interior do tubo com duas hastes de rosca sem fim; d) permeâmetro concluído	60
3.3	Vista Frontal do permeâmetro	61
3.4	Instalação dos piezômetros	62
3.5	Esquema do sistema hidráulico do permeâmetro	63
3.6	Detalhes da instalação do equipamento	64
3.7	a) registro de saída de fluxo de 0,019 m; b) registro de entrada de fluxo de 0,019 m	65
3.8	Pentapyc 5200e	68

3.9	Amostras das faixas granulométricas: a) com dimensão característica 50 mm; b) com dimensão característica 25 mm	69
3.10	Etapas do ensaio: a) homogeneização da amostra; b) amostra no permeâmetro; c) enchimento do permeâmetro com água; d) e e) saturação da amostra; f) percolação do fluxo de água; g) estabilização do nível d'água nos piezômetros; h) coleta do volume escoado; i) leitura do volume escoado	74
3.11	Preparação CP: a) Colocação da amostra no recipiente metálico; b) etapas de montagem do corpo de prova	75
3.12	CP na estufa: a) submerso em água, na estufa; b) saturado.....	77
3.13	Difratômetro de Raios X	78
3.14	Expectômetro de Fluorescência de Raios X	79
3.15	Teor de CaO _{livre} : a) amostra após aquecimento em banho-maria; b) amostra filtrada; c) amostra titulada; d) ensaio finalizado	83
3.16	Amostras imersas nos <i>beckers</i>	84
3.17	Titulação da amostra: a) dureza parcial da água; b) dureza total da água	87
3.18	Titulação da alcalinidade: a) parcial da água; b) total da água	88
3.19	Espectrofotômetro	88
3.20	Análise para quantificar ferro: a) mesa aquecedora; b) balões volumétricos com amostra a ensaiar	89
4.1	Curvas granulométricas faixas – C1 e C2	93
4.2	Curva granulométrica faixa – C12	95
4.3	Curva da expansão média acumulada da amostra – A _{TLD}	106
4.4	Curva da expansão média acumulada da amostra – B _{N_{TLD}}	107
4.5	Curva da expansão média acumulada da amostra – C _{N_{TAF}}	108
4.6	Análise CP: a) retirado da estufa; b) desmoldado.....	108
4.7	Resultado da DRX – A _{TLD}	111
4.8	Resultado da DRX – B _{N_{TLD}}	112
4.9	Resultado da DRX – C _{N_{TAF}}	113
4.10	Resultados análise FRX – A _{TLD} e B _{N_{TLD}}	114
4.11	Resultados análise FRX – C _{N_{TAF}}	115
4.12	Análise MEV/EDS A _{TLD} : a) área 1; b) espectro do ponto 4; espectro do ponto 5	117
4.13	a) Imagem morfológica da amostra A _{TLD} ; b) ampliação das partículas	118
4.14	Análise MEV/EDS B _{N_{TLD}} : a) área 1; b) espectro do ponto 1; espectro do ponto 4	118
4.15	Imagens morfológicas da amostra B _{N_{TLD}} a) área 1; b) detalhe do ponto 4	119
4.16	Análise MEV/EDS C _{N_{TAF}} : a) área 3; b) espectro do ponto 1; Espectro do ponto 2 ..	119
4.17	a) Imagem morfológica da amostra C _{N_{TAF}} ; b) Imagem ampliada da partícula	120
4.18	Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte – A _{TLD}	121
4.19	Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante – A _{TLD}	122
4.20	Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte -B _{N_{TLD}}	123
4.21	Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante – B _{N_{TLD}}	124
4.22	Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte – C _{N_{TAF}}	125
4.23	Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante – C _{N_{TAF}}	126
4.24	Dureza: a) total; b) cálcica; c) magnésiana	130
4.25	Alcalinidade: a) parcial; b) total; c) por hidróxilas; d)por carbonatos; e) por bicarbonato	133
4.26	a) valores <i>pH</i> ; b) valores <i>CE</i> ; c) quantidade de ferro	135
4.27	Formação de nata e incrustações: a) amostra saturada no permeâmetro; b) cilindro de proctor imerso em água na estufa – ensaio de expansão; c) formação de sais em amostra imersa d) nata- amostra de agregado imersa em <i>becker</i>	137
4.28	Alterações de amostra – LD, após imersão em água: a) fratura, desintegração e oxidação; b) imagem ampliadas processo de oxidação; c) imagem ampliada do processo de oxidação, seguida de fratura e desintegração da amostra	142
4.29	a) Resíduos das amostras imersas em água após desintegração; b) sedimentação e alteração da coloração das águas	143
5.1	Esquema geométrico do colchão drenante - Modificado de Giroud <i>et al.</i> , 2000	146

5.2	Carga hidráulica, profundidade e espessura da camada em um colchão drenante, com fluxo não confinado e paralelo à declividade do <i>liner</i> – Modificada de Giroud <i>et al.</i> , 2000	146
5.3	Esquema de coleta de precipitação – Modificada de Giroud <i>et al.</i> 2000	148
5.4	Parâmetro característico: a) $\lambda > 0,25$; b) $\lambda < 0,25$; c) $\lambda \approx 0,25$ - Giroud <i>et al.</i> , 2000	152
5.5	Solução simplificada de Giroud para camada drenante	153
5.6	Solução simplificada de Giroud para β tendendo a zero	154
5.7	Solução simplificada de Giroud para λ muito pequeno	154
5.8	Solução analítica de McEnroe para $R < 0,25$	155
5.9	Solução analítica de McEnroe para $R = 0,25$	156
5.10	Solução analítica de McEnroe para $R > 0,25$	157
5.11	Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda < 0,25$	158
5.12	Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda = 0,25$	158
5.13	Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda > 0,25$	159
5.14	Solução empírica baseada em resultados numéricos	160
A.1	Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 – LD	183
A.2	Curvas granulométricas: a) amostras originais B1 e B2 – LD; b) amostras originais B3 e B4 – AF	184
A.3	Massa unitária: a) estado solto; b) estado compacto	188
A.4	Ensaio de índice de vazios: a) Índice de vazios máximo após vibração; b) Índice de vazios amostra úmida após vibração; c) Conjunto completo para realização do ensaio índice de vazios máximo e mínimo	188
B.1	Experiência de Reynolds: a) montagem; b) resultados – Modificada Ortigão, 1995 ..	190
C.1	a) imagem área 1 da ATLD; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2; d) espectro ponto 3; e) espectro ponto 6; f) espectro ponto 8	193
C.2	a) imagem área 2 da ATLD; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2	194
C.3	a) imagem área 3 da ATLD; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2	194
C.4	a) imagem morfológicas ATLD	194
C.5	a) imagem área 1 da BNTLD; b) espectro ponto 2; c) espectro ponto 3; d) espectro ponto 5	195
C.6	a) imagem área 2 da BNTLD; b) espectro ponto 3	195
C.7	a) Imagens morfológicas da BNTLD.....	195
C.8	a) imagem área 1 da CNTAF; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2	196
C.9	a) imagem área 2 da CNTAF; b) espectro ponto 1	196
C.10	Imagens morfológicas da CNTAF	196

LISTA DE TABELAS

2.1	Processo de geração das escórias	32
2.2	Processo de resfriamento as escórias	34
2.3	Composição da escória de aciaria LD [%] – Modificada de Fernandes, 2010	35
2.4	Composição Química das Escórias AF [%]	36
2.5	Características físicas e mecânicas das escórias de aciaria – Modificada de CHESNER <i>et al.</i> , 2001	37
2.6	Características físicas e mecânicas de agregados de escórias em comparação aos agregados de rocha granítica – Modificada de MOTZ e GEISELER, 2001	37
2.7	Características físicas e mecânicas de escória AF – Modificada de MOREIRA, 2006	38
2.8	Parâmetros que influenciam na expansão do agregado – Modificada de MACHADO, 2000	39
2.9	Resumo das metodologias de tratamento das escórias – modificada de SILVA, 2001	41
2.10	Grau de dureza das águas – PEVELLI e KATO, 2006	44
2.11	Compostos da alcalinidade – PEVELLI e KATO, 2006.....	45
2.12	Extrato lixiviado dos agregados siderúrgicos LD -SILVA, 2010	51

2.13	Extrato solubilizado dos agregados siderúrgicos LD -SILVA, 2010	52
3.1	Características dos agregados siderúrgicos recebidos	54
3.2	Resumo dos critérios de seleção de material granular drenante e filtrante	56
3.3	Mudança na denominação das amostras recebidas	58
3.4	Normativas para caracterizar as amostras A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF}	66
3.5	Escala granulométrica segundo as normas ABNT e ASTM.....	68
3.6	Identificação dos <i>beckers</i>	86
3.7	Massa inserida nos <i>beckers</i> [g]	92
4.1	Distribuição granulométrica – C1 e C4	94
4.2	Parâmetros das curvas granulométricas – C1 e C4	95
4.3	Distribuição granulométrica – C1 e C4	95
4.4	Análise das faixas granulométricas	96
4.5	Resultado da absorção e massa específica seca.....	97
4.6	% dos intervalos dos grãos nas faixas granulométricas	98
4.7	Resultado da massa específica dos grãos sólidos – ρ_s	99
4.8	Resultado da massa unitária seca – ρ_{ap}	100
4.9	Resultado do índice de vazios e porosidade	101
4.10	Resultados – V_{ap} e V_s	102
4.11	Resultados da massa das amostras - M_s	102
4.12	Parâmetros do ensaio de permeabilidade hidráulica	103
4.13	Valores da condutividade hidráulica	104
4.14	Resultado do número de Reynolds.....	104
4.15	Resultados da condutividade hidráulica corrigidas	105
4.16	Taxa de expansão média acumulada	106
4.17	Resumo dos parâmetros físicos por faixas granulométricas e amostra ..	110
4.18	Compostos químicos identificados por DRX	111
4.19	Resultado obtido por FRX em amostra - LD	115
4.20	Resultado obtido por FRX em amostra - AF	116
4.21	Elementos identificados pelo MEV/EDS	121
4.22	Resultados das termoanálises da A_{TLD}	122
4.23	Resultados das termoanálises da B_{NTLD}	125
4.24	Resultados das termoanálises da C_{NTAF}	127
4.25	Resistência a sulfatos de sódio	129
4.26	Valores CTC	129
4.27	Resultados das durezas D_T , D_{Ca} e D_{Mg} das amostras	132
4.28	Relações dos resultados da dureza entre as amostras	132
4.29	Resultados das alcalinidades A_r , A_T , A_{Hr} , A_{Car} e A_{Bi} das amostras	134
4.30	Relações dos resultados da alcalinidade entre as amostras	135
4.31	Resultados pH , CE e Fe das amostras	137
4.32	Relações dos resultados pH , CE e Fe entre as amostras	139
A.1	Resultado granulométrico das amostras originais tipo A -LD	183
A.2	Resultado granulométrico das amostras originais tipo B -LD e AF	184
A.3	Parâmetros das amostras originais	185
A.4	Combinação linear das amostras originais	186
A.5	Granulometria da combinação linear - % Retida	186
A.6	Parâmetros das faixas granulométricas	187
B.1	Valores da k_{corr} - Formulação de Stephenson	192

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

%Exp.	Percentual de expansão
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
ASTM	American Society for Test and Methods
BOF	<i>Blast Oxygen</i>
CDOT	<i>Colorado Department of Transportation</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CTC	Capacidade de troca catiônica
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DMC	Dimensão máxima característica
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DRX	Difração de Raios X
DTG	Termogravimetria derivada
EAF	Electric Arc Furnace
EDS	<i>Energy Dispersive Spectrometry</i>
EDTA	Ácido etilendiaminotetracético
EM	Especificação de material
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPA	Agência de Proteção Ambiental
ES	Especificação de Serviço
<i>et al.</i>	“e outros”
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FRX	Fluorescência de Raios X
<i>FSH</i>	Fator de segurança hidráulica
GP	Pedregulho mal graduado
IABr	Instituto Aço Brasil
IFMT	Instituto Federal de Mato Grosso
INFRALAB	Laboratório de Infraestrutura
IQ	Instituto de Química
JIS	<i>Japan Industrial Standard</i>
LAA	Laboratório de Análise de Água
LD	<i>Linz-Donawitz</i>
ME	Método de Ensaio
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
NSA	Associação Nacional da Escória
pH	potencial de Hidrogênio
PRO	Procedimento
PTM	<i>Pennsylvania Testing Method</i>
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i> (Policloreto de vinila)
Re	Número de Reynolds
RJ	Rio de Janeiro
RS	Rio Grande do Sul
S.U.C.	Sistema Unificado de Classificação

TG	Termogravimetria
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFG	Universidade Federal do Goiás
UFMG	Universidade Federal do Minas Gerais
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UnB	Universidade de Brasília
USA	<i>United States of America</i>
USP	Universidade de São Paulo
VMP	Valor máximo permitido

LETRAS ARÁBICAS

#	Peneira
Δ_t	Tempo de coleta
A_{Bi}	Alcalinidade por bicarbonatos
A_{Car}	Alcalinidade por carbonatos
A_h	área do fluxo
A_{Hx}	Alcalinidade por hidróxidos
A_P	Alcalinidade parcial
A_s	Área de solos
A_T	Alcalinidade total
A_v	Área de vazios
B	Frente do colchão perpendicular ao fluxo
B/Ci	Amostra B da faixa granulométrica i
C	Coeficiente de forma
C_C	Coeficiente de curvatura
CE	Condutividade elétrica da amostra
CG_{Ai}	Curva granulométrica da amostra A_i
CG_{Bi}	Curva granulométrica da amostra B_i
C_i	Faixa granulométrica obtida por combinação linear
C_U	Coeficiente de não-uniformidade
d	Diâmetro do permeâmetro
D	Profundidade de percolação, Diâmetro médio
D_e	Diâmetro do tubo dreno
D_i	Diâmetro efetivo do agregado correspondente a i% de material passado.
D_L	Altura do líquido coletado
$D_{mgCaCO_3/l}$	Dureza total
ρ	Índice de vazios
f	Número de faixas

f_i	Fração partículas entre dois tamanhos de peneira, em % (peneira maior a; peneira menor b)
g	Aceleração da gravidade
G_s	Densidade relativa dos sólidos
h	Altura da amostra no permeâmetro; altura de carga; altura líquida
i	Gradiente hidráulico
i_{corr}	Gradiente hidráulico corrigido
k	Condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade
k_{20°	Condutividade hidráulica a temperatura de 20°C
k_{corr}	Condutividade hidráulica corrigido
$k_{médio}$	Condutividade hidráulica média
L	Altura da amostra, comprimento do colchão drenante
m	Massa seca
m_h	Massa hidrostática ou submersa
m_r	Massa do recipiente vazio
m_{ra}	Massa do recipiente mais amostra
m_s	Massa saturada superfície seca
M_s	Massa da amostra a ser ensaiada
n	Porosidade
NI	Não identificado
P	Parcial
P_i	% de finos passando na peneira i.
π	Porcentagem da contribuição da curva granulométrica
Q_e	Vazão média de escoamento
Q_h	Vazão ou fluxo
q_h	Taxa de infiltração
R	Parâmetro adimensional
R_e	Número de Reynolds
S	Enxofre
T	Temperatura da água durante o ensaio
t	Espessura líquida colchão drenante
T	Total
t_e	Tempo médio da coleta
t_{LCL}	Espessura admissível do colchão drenante
$t_{máx}$	Espessura líquida máxima

u_w	Poropressão da água
v	Velocidade de fluxo ou descarga da partícula de água
V	Volume agregado
V_{ap}	Volume da amostra no permeâmetro
v_c	Velocidade crítica
V_e	Volume médio escoado
V_r	Volume do recipiente
V_s	Volume de sólido da amostra
z	Carga altimétrica

LETRAS GREGAS

λ	Parâmetro característico
n	Viscosidade cinemática da água
μ	Coefficiente de viscosidade
β	Declividade da camada drenante.
ρ_{ap}	Massa específica unitária seca
ρ_d	Massa específica seca do agregado
ρ_s	Massa específica dos grãos sólidos
ρ_w	Massa específica da água

ELEMENTOS E COMPOSTOS QUÍMICOS

Al_2O_3	Alumina
Al	Alumínio
Ca	Cálcio
$Ca(OH)_2$	Portlandita
$Ca_2Al_2SiO_7$	Gehlenita
$Ca_2Fe_2O_5$	Srebrodolskita
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
CaO	Óxidos de cálcio
$CaO.MgO.SiO_2$	Monticelita
$CaSO_4.2H_2O$	Gipsita
Co	Cobalto
CO_2	Dióxido de Carbono
Cr ₂	Cromo
Fe	Ferro

Fe_2O_3	Hematita
FeCO_3	Siderita
FeO	Wustita (óxidos de ferro)
H_2CO_3	Ácido carbônico
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
HCl	Ácido clorídrico
In	Índio
K	Potássio
Mg	Magnésio
$\text{Mg}(\text{Al.Fe})_2\text{O}_4$	Spinel
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Brucita (hidróxido de magnésio)
MgCO_3	Carbonato de magnésio
MgO	Óxidos de magnésio
Mn	Manganês
MnO	Óxido de manganês
Na	Sódio
$\text{NaMn}_6\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Todorokita
P	Fósforo
Si	Sílicio
SiO_2	Dióxidos de silício (quartzo)
Ti	Titânio
TiO_2	Óxido de titânio
Zn	Zinco

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente, a indústria siderúrgica alicerça diversas cadeias produtivas como a automotiva, a de bens de consumo e a da construção civil. Exerce um papel estratégico na economia, com geração de emprego, renda e tecnologia e, constitui a base de outras indústrias.

Segundo (IABr, 2015), o Brasil no período de 2014 – 2015 ocupou a 9ª posição no *ranking* mundial liderado pela China e respondeu por 52,3% da produção do aço na América Latina.

Neste contexto, o agregado siderúrgico proveniente das escórias de aciaria e de alto forno, tratadas nas siderúrgicas, com características semelhantes ao agregado convencional, apresenta potencial de aplicabilidade diversificada na indústria construtiva brasileira uma vez que, a produção de aço interna do Brasil, no período citado, alcançou 33,3 milhões de toneladas de aço bruto e, gerou 594 kg de resíduos¹ e coprodutos² para cada tonelada de aço bruto produzido.

Os resíduos e coprodutos industriais têm recebido uma atenção maior para a reciclagem e aplicação em outras áreas. Atribui-se este fato a aspectos econômicos e ambientais. Ressalta-se ainda a geração de receitas adicionais geradas pela comercialização e, a redução de custo, pela diminuição das áreas necessária para armazenamento.

As obras geotécnicas rodoviárias demandam quantidade considerável de agregados naturais, recurso mineral não renovável, aplicados como material de base e sub-base, assim como material drenante e, apresentam altos custos econômicos e grande impacto ambiental.

A aplicação dos agregados alternativos em obras rodoviárias tem relevância na contribuição da sustentabilidade do planeta, na redução de consumo dos materiais provenientes da indústria extrativa mineral, recurso natural não renovável.

Além de agregar valor na reutilização desses materiais a pesquisa vem ao encontro dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), criado pela Organização das Nações Unidas (ONUBR, 2015), proposta na Agenda 2030. O plano de ação contempla 17 ODS e, este trabalho tem sinergia com duas ODS e três metas, são elas:

ODS 11 – “Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis”.

- Meta 11.6 “Reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos...”.

ODS 12 – “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”

- Meta 12.4 “... alcançar o manejo ambientalmente saudável... de todos os resíduos, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos ...”;
- Meta 12.5 “... reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso”.

Com o intuito de ampliar o campo de aplicação dessas escórias, o presente trabalho estudou uma alternativa de aplicação, como material drenante com características dimensionais entre 0,075 mm a 50 mm. Até o momento, não se tem conhecimento em nível

¹ Resíduo: Segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004): Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

² Coprodutos: material que deixou de ser classificado como resíduo por ter utilização técnica, econômica e ambiental viável. Termo utilizado pela indústria. Ainda não dicionarizado.

nacional e internacional de aplicação do agregado siderúrgico para esse fim, inexistindo especificações e normativas que atendam a esse objetivo.

A proposta da pesquisa foi investigar a potencialidade das amostras aplicadas em drenagem rodoviária subterrânea, como material drenante, especificamente, nos dispositivos de dreno longitudinal profundo e colchão drenante, porém, com agregado siderúrgico proveniente de forno conversor a oxigênio, escória de aciaria - LD e escória siderúrgica provenientes do alto forno - AF.

No âmbito deste trabalho, contribuiu-se para a valorização e reutilização do agregado siderúrgico na área rodoviária, como material drenante, evitando assim que o seu destino continue a ser o depósito em aterros e passe, a ser uma solução econômica, ambiental e tecnicamente competitiva.

Devido a inexistência de especificações e parâmetros definidos de aceitação capazes de avaliar estes materiais, como material drenante, adequou-se ensaios, desenvolveu-se metodologias experimentais e, construiu-se equipamento e recipiente para atender as dimensões das amostras definidas nesta pesquisa, compreendidas entre 0,075 mm a 50 mm de diâmetro.

Portanto, a iniciativa do uso da escória de aciaria e alto forno como material drenante necessita de estudos prévios das características físicas, mineralógica e química. Tais estudos são considerados necessários para qualquer iniciativa de uso de materiais “alternativos”.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é verificar a potencialidade do agregado siderúrgico aplicado em drenagem subterrânea para obras rodoviárias.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar as amostras de agregado siderúrgico física, mineralógica e quimicamente;
- Construir um permeâmetro à carga constante de paredes rígidas de grandes dimensões para a avaliação da condutividade hidráulica do agregado siderúrgico; e
- Propor uma metodologia de dimensionamento do colchão drenante que possa ser incorporada em especificações e normativas.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

A pesquisa encontra-se organizada em 6 capítulos: Capítulo 1, que trata da Introdução, com informações sobre a indústria siderúrgica, a importância do uso de material alternativo na construção civil. Descreve, também, o objetivo geral e os objetivos específicos que norteiam este trabalho e a estrutura da pesquisa.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica descreve a pesquisa sobre Drenagem, Dimensionamento de Colchão Drenante e Escória Siderúrgica (ES) e Agregado Siderúrgico (AS), descreve-se a pesquisa bibliográfica sobre as escórias e o agregado siderúrgico, o processo produtivo, suas características, expansibilidade, uso na indústria da construção, os impactos ambientais e, também, a descrição do material utilizado.

No Capítulo 3 denominado Material de Pesquisa e Metodologia. A metodologia divide-se em: construção do permeâmetro à carga constante de paredes rígidas de grandes dimensões;

caracterização física, proposta de dimensionamento do colchão drenante, caracterização mineralógica e química das amostras necessárias para se cumprir com os objetivos desta Tese de Doutorado, tendo em vista às características do material.

No capítulo 4, os Resultados obtidos estão divididos em três partes: caracterização física, dimensionamento do colchão drenante, caracterização mineralógica e a caracterização química.

No Capítulo 5, aborda a Integração dos Resultados obtidos nas caracterizações física, mineralógica e química para fins de dimensionamento do colchão drenante, aplicado a drenagem rodoviária subterrânea e, a Conclusão e Recomendações Futuras estão descritas no capítulo 6.

O trabalho, ainda apresenta três apêndices: Apêndice A, que descreve a obtenção das faixas granulométricas e informações sobre ensaios de caracterização física; o Apêndice B relaciona o fluxo darcyano com o número de Reynolds e, no Apêndice C, as demais imagens dos resultados das análises do ensaio MEV/EDS.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Capítulo 2 apresenta a pesquisa bibliográfica sobre drenagem, dimensionamento de colchão drenante e sobre as escórias e o agregado siderúrgico. Na drenagem apresenta-se os dispositivos drenantes abordados na pesquisa. Sobre as escórias siderúrgicas e o agregado siderúrgico aborda-se sobre o processo produtivo, suas características, expansibilidade, uso na indústria da construção e os impactos ambientais.

2.1 DRENAGEM SUBTERRÂNEA

As rodovias são estruturas que normalmente estão expostas à infiltração de águas provenientes de diversas fontes:

- Infiltração através de superfícies permeáveis, juntas, trincas ou fissuras;
- Infiltração lateral de águas acumuladas em canteiros, acostamentos não revestidos e sarjetas não estanques;

- Fluxos d'água ascendentes, provenientes de lençol d'água elevado, nascente e enchente de rios

A Figura 2.1 ilustra as fontes de água citadas anteriormente e que podem penetrar em uma estrutura rodoviária.

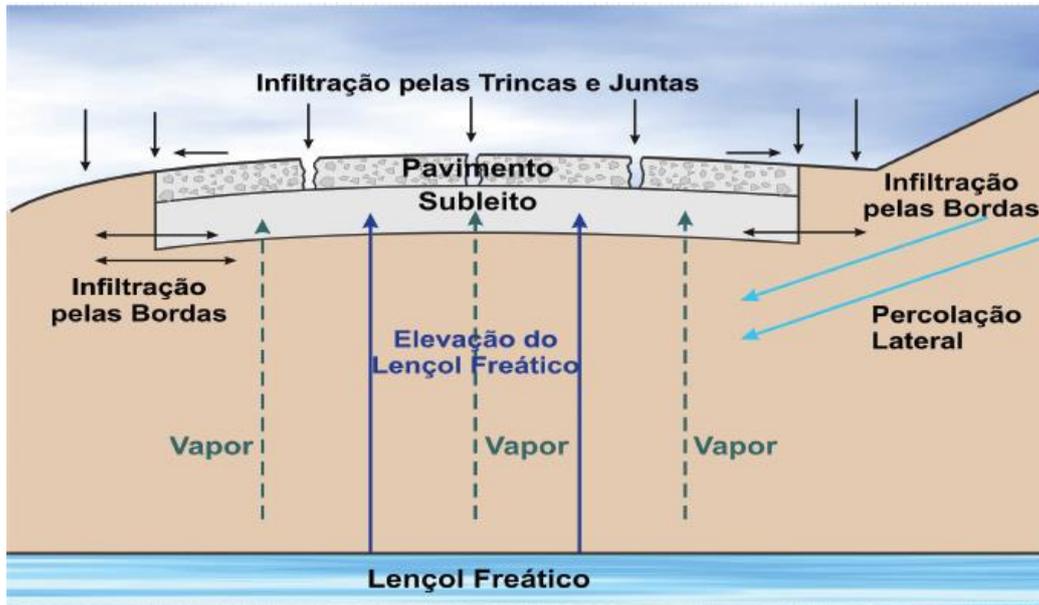


Figura 2.1 - Fontes de água - Coninfra, 2009.

Segundo DNIT (2006b) uma das maiores parcelas de contribuição da água para drenagem subterrânea são as águas de infiltração superficial dos pavimentos.

As águas que podem prejudicar o pavimento, de maneira geral são provenientes de infiltrações diretas causadas por chuvas e de lençóis d'água subterrâneos. Parte das águas são escoadas e outra parte são infiltradas. As águas escoadas são tratadas na drenagem superficial e, as infiltradas na drenagem subterrânea.

A drenagem subterrânea ou profunda objetiva interceptar as águas que possam atingir a sub-base e rebaixar o lençol freático. O fluxo de água subterrânea ocorre na zona saturada do subsolo onde os vazios são preenchidos somente com água.

Os sistemas constituintes de uma drenagem subterrânea mostrado no esquema da Figura 2.2, são basicamente compostos pelos drenos longitudinais profundos e pelo colchão drenante que pode ser acompanhado de uma camada de proteção de filtro.

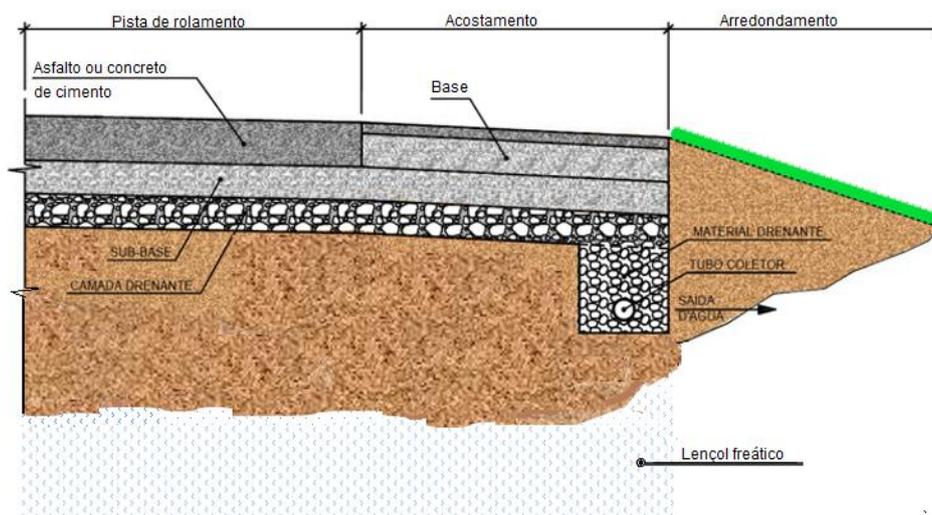


Figura 2.2 – Esquema de dispositivos drenantes constituinte de uma drenagem profunda – Modificada de Pereira, 2003.

O colchão drenante é uma camada de material muito permeável, que pode ser usada para remover a água debaixo de estruturas de pavimento quando, aplicada como base permeável ou, quando usada efetivamente para o controle das águas subterrâneas a partir de corte dos taludes e abaixo dos aterros (MOULTON, 1980 e ARIKA *et al.*, 2009). As águas captadas por este dispositivo são conduzidas até drens longitudinais profundos.

As espessuras dos colchões drenantes devem ter no mínimo 0,20 m de material grosseiros, colocadas em toda a largura da plataforma, com uma condutividade hidráulica mínimo de 10^{-3} m/s, uma saída para a água coletada e, em alguns casos, a utilização de uma ou mais camadas de proteção de filtro (CEDERGREN, 1973; CEDERGREN, 1974). A granulometria dessa camada drenante deve ser de graduação aberta e sua estabilidade ocorre pelo intertravamento dos grãos (MOULTON, 1980; DNIT, 2006b; SUZUKI *et al.*, 2013).

Outro dispositivo utilizado na drenagem profunda, como citado anteriormente, trata-se dos drens longitudinais profundos. São empregados para interceptar infiltrações subterrâneas antes de alcançar o material de suporte do pavimento e, também, para rebaixar o lençol freático, antes que atinja a sub-base.

Estes drens constituem-se por: vala, material drenante, material filtrante e tubos, como esquematizado na Figura 2.3. A vala é escavada mecanicamente no sentido longitudinal do corpo estradal com dimensões em geral de 0,50 m de largura e 1,50 m de profundidade. A declividade longitudinal mínima deve ser de 1,5%. Situado na parte inferior de uma trincheira estreita, preenchida com material permeável, envelopado com geotêxtil para evitar o entupimento do coletor a partir da migração de finos no interior do material permeável (MOULTON 1980, DNIT 2006b).

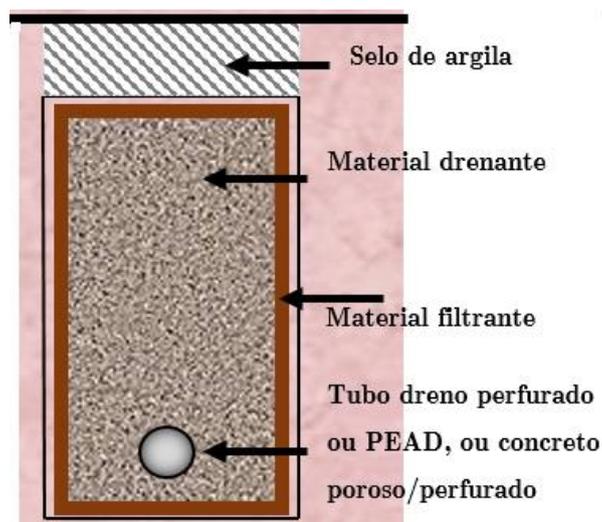


Figura 2.3 – Componente de dreno – Modificado de ES 015, DNIT 2006

A profundidade ideal de instalação do dreno subterrâneo, em geral, é 3,00 m. Vale salientar que no Colorado (USA) foram construídos drenos subterrâneos, com sucesso de funcionamento, em profundidades superiores a 9,00 m (CDOT, 2004).

O material drenante nos drenos tem a função de captar e, ao mesmo tempo, conduzir as águas a serem drenadas, devendo apresentar uma granulometria adequada à vazão escoada (DNIT, 2006a). Pode-se utilizar material resultante da britagem e classificação de rocha sã, areia grossa, brita e cascalho grosso lavado.

2.2 ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS (ES) – AGREGADO SIDERÚRGICO(AS)

Neste item descreve a pesquisa bibliográfica sobre as escórias e o agregado siderúrgico, o processo produtivo, suas características, expansibilidade, uso na indústria da construção e os impactos ambientais.

No processo produtivo, descrevem-se a geração e origem das escórias, as quais são determinadas pelos tipos de forno e processo de resfriamento. O processo de origem e o tipo de resfriamento determinam a composição mineralógica. Neste item, citam-se os elementos químicos mais representativos na composição das escórias e dos agregados siderúrgicos.

No item fatores físicos, apresentam-se parâmetros físicos e mecânicos disponíveis na literatura e alcançados por pesquisas realizadas anteriormente. Depara-se, também, com fatores que influenciam no comportamento das ES, os possíveis fenômenos que podem desencadear pela presença dos elementos químicos, os quais, se não tratados, limitam a aplicação dos AS nas obras da indústria da construção civil.

Ainda neste item, discorre-se sobre a caracterização ambiental e a classificação pela NBR 10004 (ABNT, 2004) obtidas em estudos que antecederam este trabalho.

2.2.1 GERAÇÃO E PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO DAS ES E AS

A siderurgia brasileira do aço foi responsável, no período de 2014 a 2015, por 21% da produção mundial, ocupando a 9ª posição no *ranking* mundial liderado pela China. Já na América Latina, a supremacia é brasileira, contribuindo com 52,3% do total produzido no continente em 2015 (IABr, 2015).

A aplicação do agregado siderúrgico³ na construção civil vem ocorrendo a nível nacional

³ As escórias siderúrgicas, após o processo de “cura”, são denominadas pelas siderúrgicas de agregado siderúrgico.

e internacional desde o final da década de 70. As escórias siderúrgicas são resíduos provenientes da redução de minérios ou da fusão de metais que se formam após o tratamento industrial.

O processo industrial siderúrgico gera dois tipos de escórias em larga escala na cadeia produtiva do ferro gusa e do aço (Tabela 2.1). A escória de alto forno (AF), resultante da fusão redutora dos minérios para produção do ferro gusa, é obtida diretamente do Alto-forno⁴. Já a escória de aciaria resulta da produção do aço obtida em fornos Conversores a Oxigênio Linz-Donawitz (LD) e fornos de Arco Elétrico - *Electric Arc Furnace* (EAF) - durante a conversão em aço do ferro gusa líquido e da sucata metálica (SOUSA, 2007).

Tabela 2.1 – Processo de geração das escórias

Tipo de Forno	Conversor a oxigênio (LD) <i>Linz-Donawitz</i> ou <i>Blast Oxygen</i> (BOF). (aço)	<i>Electric Arc Furnace</i> EAF	Alto-forno AF
Detalhes do processo	Adição de sucata e gusa líquido [1300 °C a 1450°C].	Fusão da sucata de aço, por um arco elétrico, formado entre o aço e os eletrodos de grafite ou carvão amorfo. Após a fusão, injeta-se oxigênio.	Fusão das impurezas do minério de ferro, juntamente com adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque.
Tipo de escórias	Oxidantes	Oxidantes/ Redutoras	Redutoras
Objetivo	Redução dos teores de carbono do ferro gusa (de 4% para 0,1%), silício, enxofre e fósforo.	Oxidação do carbono, silício e fósforo; desulfuração do aço líquido e adição de elementos de liga.	Redução dos óxidos contidos nos minerais de ferro e separação das impurezas que os acompanham.

Mais detalhes dos processos produtivos podem ser obtidos em: Machado (2000), Gonçalves (2005), Fernandes (2010) e Dayrel (2013).

Após a finalização do processo produtivo do ferro gusa e do aço, a escória (AF) e a (LD) se mantêm sobrenadante ao ferro gusa e ao aço, respectivamente, devido às diferenças de densidade entre estes dois materiais. Assim, o ferro gusa e o aço são transferidos para uma área da indústria em uma panela de grandes dimensões e, após esta operação, a escória é basculada e resfriada, apresentada na Figura 2.4, formando fragmentos grandes e regulares de escórias. O material resfriado é transportado para uma planta de beneficiamento.

⁴ A expressão Alto-forno refere-se ao equipamento (forno) que é utilizado no processo de geração do ferro gusa. Já escória de alto forno é um produto obtido pela fusão e arrefecimento da escória de ferro (um subproduto da produção do ferro e do aço) de um Alto-forno.

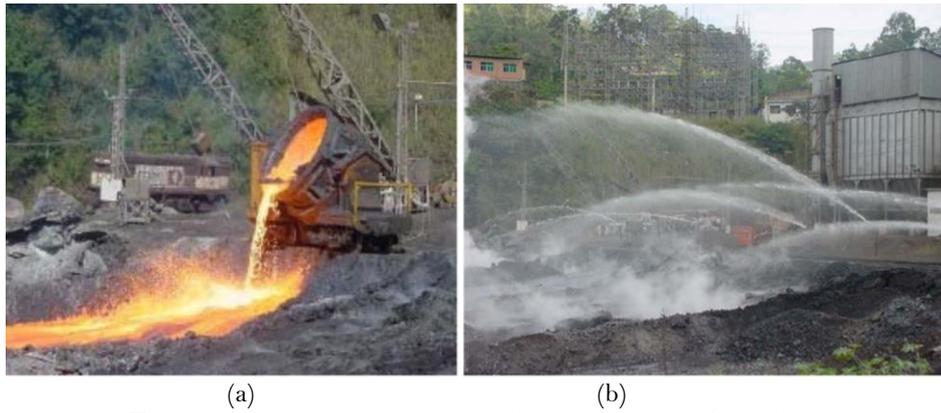


Figura 2.4 - a) basculamento; b) resfriamento das escórias - Sousa 2007

Na planta de beneficiamento, as escórias são britadas por um sistema de correias e, depois, à uma peneira vibratória para fins de classificação granulométrica e, de separação magnética (Figura 2.5), (SOUSA, 2007; HORII *et al.*, 2013).

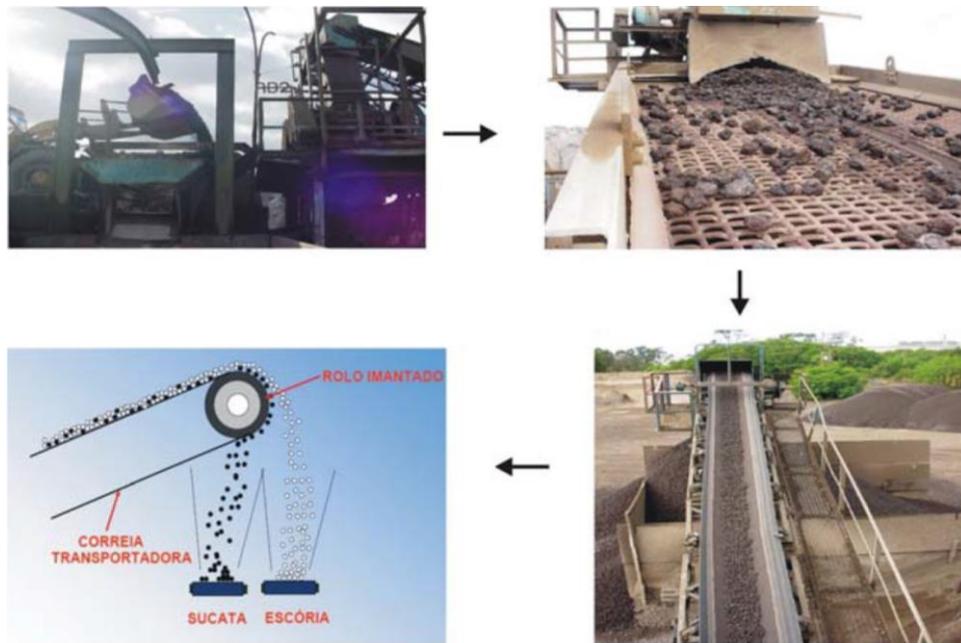


Figura 2.5 - Classificação e separação magnética - Sousa 2007

Na Tabela 2.2 apresentam-se descritos os principais processos de resfriamentos das escórias. Observa-se que as escórias utilizadas como agregado na indústria da construção originam-se do processo de resfriamento lento ao ar natural (MASUERO, 2001; YILDIRIM e PREZZI, 2009).

Tabela 2.2 - Processo de resfriamento das escórias

Processo de resfriamento	Tipo de Escória	Características	
		Aciaria	Alto-forno

Brusco com jato d'água de alta pressão e imersão em tanque com água	Granulada	Textura áspera; Estrutura porosa; Granulometria semelhante aos das areias de rio.	Baixa densidade; Elevada porosidade; Fácil fragmentação; Endurece na presença da água.
Lento, naturalmente ao ar	Inerte	Agregado na construção civil; Granulometrias diferentes; Elevada massa específica; Estrutura cristalina; Elevada resistência mecânica.	Óxidos se cristalizam; Textura superficial rugosa; Estrutura vesicular (grande número de cavidades).
Rápido, com água controlada	Expandida	Estrutura alveolar; Baixa massa específica; Maior porosidade. Mais leve.	Agregado leve; Usado em concreto leve; Estrutura celular e vesicular; Aspecto vítreo.

Pode-se observar na Figura 2.6 a diferença granulométrica que decorre de um resfriamento lento e um resfriamento brusco.



Figura 2.6– a) Escória arrefecimento lento; b) Escória arrefecimento brusco - *National Slag Association*, 2013

Quando as escórias siderúrgicas são resfriadas naturalmente ao ar, os óxidos componentes se cristalizam aos poucos e, assim, perdem seu poder de aglomerante hidráulico, sendo a escória, então, considerada inerte. Assim, depois de devidamente britada e tratada, esta escória pode ser utilizada como agregado para concreto e bases de estradas (ALDASORO, 1985; GEYER *et al.*, 1995).

2.2.2 COMPOSIÇÃO MINERAL DAS ES E AS

A escória de aciaria gerada pelos fornos conversores a oxigênio (LD) em geral são compostas pelos elementos químicos apresentados na Tabela 2.3, que traz a contribuição de diversos autores na identificação da composição das escórias de aciaria, tipo LD.

Na Tabela 2.3 os elementos químicos com maior percentual na composição química das escórias são o CaO, que é inserido após a finalização da fusão, com o propósito de retardar e

neutralizar os óxidos ácidos, gerados nas reações de oxidação que podem investir contra o revestimento do forno pela escória; e, o Fe total, que está presente na matéria-prima utilizada para a produção do aço.

Tabela 2.3 - Composição da escória de aciaria LD [%] - Modificada de FERNANDES, 2010

Autor	CaO	CaO _{livre}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	Fe total
George e Sorrentino, 1980	47	-	13	1	6	5	2	<0,1	25
Murphy <i>et al.</i> , 1997	35	-	18	3,6	11,5	6,5	-	-	-
Little e Setepla, 1999	36-46	-	11-15	0,8-4	5-12	-	-	-	14-22
Geiseler, 1999	48-54	-	11-18	1-4	1-4	1-4	-	-	14-19
Motz e Geiseler, 1998	45-55	-	12-18	<3	<3	<5	<2	-	18
Motz e Geiseler, 2001	42-50	-	12-15	<3	5-8	<5	<2	-	15-20
Iguchi <i>et al.</i> , 2001	52	-	9	1,3	5	3,3	0,7	-	19,2
Filev, 2002	44,3	-	13,8	1,5	6,4	5,3	-	0,07	17,5
Gumieri, 2002	49,3	7,5	11,6	2,8	4,4	4,5	1,3	0,29	23
Sousa, 2007	43,8	4,55	8,03	2,36	1,68	4,95	1,43	0,09	36,86
Das <i>et al.</i> , 2006	47,88	-	12,16	1,22	0,82	0,28	3,33	0,2	26,03
Arcellor Mittal, 2015	23-46	-	11-15	0,8-4	5-13	-	-	-	14-22

Verifica-se, também, na Tabela 2.3, que os elementos mais representativos na composição química da escória foram encontrados por todos os autores, diferenciando no quantitativo, em que pese a heterogeneidade inerente ao processo produtivo (matéria-prima, resfriamento).

A composição química das escórias (AF) constitui-se, em geral, pelos compostos apresentados na Tabela 2.4. Os elementos químicos com maior percentual na composição química são CaO e SiO₂. Outros elementos em menores percentuais estão presentes na composição química.

A composição mineral dos agregados siderúrgicos, após o resfriamento, varia e está condicionada ao processo de formação e composição química. Sua composição será influenciada também pelas condições de armazenamento (MOTZ e GEISELER, 2001).

Salienta-se que essas composições podem variar consideravelmente de um lote para outro, mesmo sendo da mesma origem. Isto ocorre pela heterogeneidade da matéria-prima e das condições dos fornos.

Tabela 2.4 – Composição química das escórias - AF [%]

Autor	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	S	TiO ₂
Moreira, 2006	12 a 30	20 a 40	3 a 18	2 a 9	10 a 25	-	0,1 a 2	-

Das <i>et al.</i> , 2006	37,40	37,14	9,15	11,7	1,05	-	0,37	0,73
Samaris, 2006	40,6	34,5	11,7	8,5	-	0,51	0,82	-
Arcelor Mittal, 2015	41,6	33,6	12,42	7,95	-	0,4	1,3	0,5

2.2.3 ASPECTOS FÍSICOS

Segundo Mancio (2001), as escórias de aciaria em geral apresentam elevada massa específica, possuem forma angular, textura superficial áspera, grande dureza e média absorção de água. Em relação ao uso como AS apresentam boa resistência à abrasão, boas características de sanidade e elevado índice de suporte.

Na Tabela 2.5 são apresentados os valores típicos de alguns ensaios de caracterização física e mecânica das escórias de aciaria (CHESNER *et al.*, 2001). Mancio (2001) constatou que os ensaios realizados tanto no Brasil quanto no exterior demonstraram que a escória de aciaria possui características que lhe conferem excelente qualidade quando comparada ao agregado convencional.

Tabela 2.5 – Características físicas e mecânicas das escórias de aciaria - Modificada de CHESNER *et al.*, 2001

Propriedade	Valores típicos
Massa específica (kg/m ³)	3200 – 3600
Massa unitária (kg/m ³)	1600 – 1900
Absorção de água (%)	< 3
Índice de abrasão Los Angeles	20 – 25
Ângulo de atrito interno	40° - 50°
Dureza (escala de dureza de Moh)	6 - 7
Índice de Suporte Califórnia (ISC), %	Até 300

Na Tabela 2.6 das características físicas e mecânicas ensaiadas, os agregados siderúrgicos LD apresentaram comportamento semelhante ou superior aos agregados de rocha granítica (MOTZ e GEISELER, 2001).

Tabela 2.6 – Características físicas e mecânicas de agregados siderúrgicos, em comparação aos agregados de rocha granítica - Modificada de MOTZ e GEISELER, 2001

Propriedade	Escória LD	Brita de granito
Massa específica (kg/m ³)	3300	2500
Forma (% de partículas alongadas)	< 10	< 10
Resistência ao impacto (%)	22	12
Resistência à britagem (%)	15	17
Absorção de água (%)	1,0	0,5

Os valores das características físicas e mecânicas das escórias de AF estão apresentados na Tabela 2.7. Segundo Moreira (2006), do ponto de vista geotécnico, os agregados

constituídos de escórias cristalizadas⁵ de AF são caracterizados e avaliados de maneira análoga aos agregados naturais. Na Tabela 2.6, o valor da massa específica da escória é superior ao da brita granítica.

Tabela 2.7 – Características físicas e mecânicas de escória AF
- Modificada de MOREIRA, 2006

Propriedade	Valores típicos
Massa específica (kg/m ³)	3200 – 3600
Massa unitária (kg/m ³)	1153 – 1279
Absorção de água (%)	3 – 6,9
Índice de abrasão Los Angeles (%)	35 – 45
Índice de Suporte Califórnia (ISC), %	Até 147

2.2.4 LIMITAÇÃO DO USO DAS ES E AS

Apesar das excelentes características físicas (massa específica, massa unitária) e mecânicas (índice de abrasão Los Angeles, ISC) dos agregados siderúrgicos, os mesmos podem ter seu uso limitado pelos efeitos de suas reações expansivas e formação de tufa.

2.2.4.1 Expansibilidade

As reações expansivas ocorrem pela presença de compostos expansivos em sua constituição, que as tornam instáveis quando sujeitas às ações do meio ambiente pelas reações de hidratação, decomposição, oxidação e transformação estrutural, conhecido como fenômeno de expansão. Os maiores responsáveis pelo fenômeno são o CaO_{livre} e o MgO_{livre}, que provocam a desintegração e o enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações (RODHE, 2002; SILVA, 2010).

Além da hidratação, a instabilidade volumétrica desse material também pode ocorrer pela reação da carbonatação e, ainda em menor escala, pela oxidação e corrosão do FeO e Fe⁰ (MACHADO, 2000; GUMIERI, 2002). Na Tabela 2.8, constam os principais mecanismos que controlam a expansão ou a estabilização dos agregados siderúrgicos.

As partículas de CaO_{livre} no interior dos agregados, quando hidratadas, às vezes, pode abrir uma fratura que se estende por toda a partícula, o que pode resultar em expansão desproporcional do agregado e, em alguns casos, desintegração das partículas. A expansão do CaO residual é geralmente maior que a da cal precipitada nas escórias (KNELLER *et al.* 1994; SHI, 2004).

A cal residual pode estar enclausurada nos poros internos das escórias, ficando, portanto, protegida do contato da água ou do CO₂. Alguns grãos do CaO_{livre} podem não se hidratar se não tiverem acesso à água através das fraturas que se estendem nelas (YILDIRIM e PREZZI 2009).

Tabela 2.8 - Parâmetros que influenciam na expansão do agregado - Modificada de MACHADO, 2000

⁵ Escórias cristalizadas são as submetidas a resfriamento lento, naturalmente ao ar, inertes, apropriadas para uso na construção, como agregado.

Espécie química	Parâmetros influentes na expansão	Mecanismo	Equação	Denominação
CaO e MgO	Teor óxido de cálcio e magnésio no estado livre; Umidade; Temperatura; Teor CO ₂ ; Tamanho dos grãos de escória	Hidratação	$CaO + H_2O \rightleftharpoons Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
			$MgO + H_2O \rightleftharpoons Mg(OH)_2$	Hidróxido de magnésio
		Carbonatação	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + H_2O$	Calcita
			$2CaCO_3 + Mg^{2+} \rightleftharpoons CaCO_3MgCO_3$	Dolomita
Fe ⁰	Teor de Fe ⁰ ; Umidade; Teor de oxigênio no resfriamento; Tamanho dos grãos de escória.	Oxidação	$Fe^0 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons FeO$	Wustita
			$2Fe^0 + \frac{3}{2}O_2 \rightleftharpoons Fe_2O_3$	Hematita
			$3Fe^0 + 2O_2 \rightleftharpoons Fe_3O_4$	Magnetita
		Corrosão	$Fe^2 + 2OH \rightleftharpoons Fe(OH)_2$	Hidróxido ferroso
			$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightleftharpoons 4Fe(OH)_3$	Hidróxido férrico

Gupta *et al.* (1994) e Yildirim e Prezzi (2009) observaram que o teor de CaO_{livre} aumenta nas profundidades das pilhas de estoque dos agregados armazenados. Isso evidencia que parte do CaO_{livre} é encapsulado por silicatos insolúveis ou está em poros oclusos e não tiveram contato com a água e o CO₂. Portanto, a exposição às intempéries para o tratamento de cura não diminui, necessariamente, o teor do CaO_{livre}, suficiente, para evitar a formação de tufa.

Para verificar o percentual de CaO_{livre} presente nos agregados, a técnica de extração através de etilenoglicol é a mais simples e eficaz. A NBR NM 13 (ABNT, 2012) trata do teor de CaO_{livre} em cimentos, por meio do etilenoglicol, mas esta metodologia não dissocia, a partir de um período de aproximadamente 30 dias, a presença da Ca(OH)₂ e do CaO_{livre}. Neste ensaio, o resultado apresentado soma as duas formas presentes da Ca(OH)₂ e do CaO_{livre} total (SOUSA, 2007).

Para identificar separadamente a Ca(OH)₂, pode-se utilizar o ensaio de difração de raios X. Neste caso, também, pode-se utilizar a análise termogravimétrica (TG) e a derivada termogravimétrica (DTG).

Estas técnicas são as mais indicadas para esta análise, uma vez que fornecem o comportamento dos materiais frente ao aquecimento, tendo como principais parâmetros analíticos a faixa de temperatura, na qual a amostra estudada obtém uma composição química constante, a temperatura onde se inicia o processo de decomposição e o acompanhamento das reações de desidratação, oxidação e combustão (DWECK *et al.*, 2000).

Silva *et al.* (2003) concluíram que a cinética da reação de hidratação do MgO é muito

lenta. A hidratação do MgO com a água é lenta por encontrar-se na forma cristalina, causando expansão que pode romper o material. O tamanho dos cristais, que depende da velocidade de resfriamento das escórias, determina o grau de instabilidade volumétrica. Se forem pequenos, hidratam-se rapidamente, não causam pressões internas. O resfriamento lento, o mais comum, forma grandes cristais, que se hidratam lentamente e causam grande expansão.

O MgO_{livre} quando combinado com outros óxidos, como na forma CaO.MgO.SiO₂ (CMS₃) e na forma 3CaO₃.MgO. SiO₂ (C₃MS₂) em contato com a umidade, hidrata-se lentamente e apresenta-se quimicamente estável (DRESSEN *et al.*, 1984; MACHADO, 2000; SBRIGHI e BATTAGIAN, 2002).

A estabilidade das escórias com relação ao MgO pode ser verificada pelas inequações apresentadas por Shousun (1980), citadas por Montgomery e Wang (1991). As inequações baseiam-se na premissa de que o MgO pode formar soluções sólidas com FeO e MnO, apresentadas a seguir:

$$MgO_{estável} \text{ p } \frac{\xi}{\xi} \frac{MgO}{FeO + MnO} \frac{\eta}{\eta} < 1 \quad (2.24)$$

$$MgO_{instável} \text{ p } \frac{\xi}{\xi} \frac{MgO}{FeO + MnO} \frac{\eta}{\eta} > 1 \quad (2.25)$$

Outra relação a considerar são as inequações de equilíbrio entre os CaO e de MgO, ou de CaO isoladamente com outros elementos presentes nas escórias, estudadas por Pablo Gaibrois *apud* Gumieri (2002). A escória em que cuja análise química satisfaça as inequações, segundo Pablo Gaibrois, possivelmente estará livre da desintegração causada pela hidratação dos CaO e MgO:



Para se evitar a expansão dos agregados siderúrgicos, estes devem passar pelo processo de tratamento, denominado de envelhecimento, também conhecido como cura das escórias. A cura pode ocorrer com a exposição das escórias ao meio ambiente pelo menos por seis meses, de forma que favoreça a hidratação prévia do CaO e MgO (HORRIL *et al.*, 2013). Na Tabela 2.9 apresenta-se o resumo das metodologias de tratamento de cura, a que as escórias podem ser submetidas para reduzir ou eliminar a ocorrência do fenômeno de expansão.

Tabela 2.9 – Resumo das metodologias de tratamento das escórias - Modificada de SILVA, 2001

Tratamento	Descrição	Momento de atuação	Eficiência
Aumento da dissolução dos fundentes	Redução da granulometria da cal	Antes da geração	Não divulgado
Alteração do agente	Utilização de um material sintético como fundente	Antes da geração	Baixo
Adição de sílica e oxigênio	Adição de sílica e oxigênio à escória líquida com uma fonte de calor	Após a geração com a escória no estado líquido	Média
Granulação com água	Resfriamento brusco com água	Após a geração com a escória no estado líquido	Alta

Granulação a seco	Resfriamento brusco a seco	Após a geração com a escória no estado líquido	Alta
Cura ao tempo (<i>Weathering</i>)	Exposição ao tempo – com molhagem ocasional	Após a geração com a escória no estado sólido	Variável
Cura a vapor sob pressão atmosférica (<i>Open Yard</i>)	Injeção de vapor à escória sem pressão	Após a geração com a escória no estado sólido	Alta
Cura a vapor sob pressão (<i>SKAP</i>)	Injeção de vapor à escória em autoclave	Após a geração com a escória no estado sólido	Muito alta

A inexistência da cura das escórias ou a sua ineficácia pode desencadear o fenômeno expansivo e limitar a aplicação em obras da indústria da construção civil, como descrito por Castelo Branco (2004), Tavares (2012), Dayrel (2013) e Andrade (2015). A avaliação do potencial expansivo do agregado siderúrgico pode ser realizada por vários métodos apresentados por Masuero *et al.* (2000), Machado (2000) e Faria (2007).

Dentre eles, cita-se: método de ensaio A 5015 (JIS, 1992), a norma D 4792 (ASTM, 1995) e o método de ensaio do Departamento de Transportes da Pensilvânia 130 (PTM 1978), adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DMA-1/DER-MG/92).

Os métodos de avaliação apresentados baseiam-se, em sua maioria, na determinação da expansão por penetração de água no material, e são adaptações da avaliação da expansibilidade em solos ou concretos.

O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), através da adaptação da normativa PTM 130/78, publicou a norma ME 113 (DNIT, 2009) que permite avaliar as escórias em relação à expansibilidade. Para fins rodoviários, a PRO 263 (DNIT, 1994), EM 262 (DNIT, 1994) e AREMA (2001) limitaram a expansão dos agregados siderúrgicos em 3%. O fenômeno da expansibilidade dos agregados siderúrgicos pode ser visto em detalhes nas obras de: Lee (1974), Yildirim e Prezzi (2009), Wang *et al.* (2010), Andrade (2015).

Conclui-se com o exposto que as expansibilidades dos agregados siderúrgicos resultam do processo de hidratação dos $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e $\text{MgO}_{\text{livre}}$. Em menor escala, também pode ocorrer a expansão devido aos processos de oxidação e corrosão do Fe^0 .

2.2.4.2 Formação de Tufa

Outro fenômeno, associado aos agregados siderúrgicos, refere-se à deposição do carbonato de cálcio (CaCO_3), formando a Tufa, que ocorre com a concentração $\text{CaO}_{\text{livre}}$, da água e CO_2 combinado com a temperatura e a umidade. O CaCO_3 tem sido observado obstruindo os sistemas de drenagem em rodovias construídas com agregados siderúrgicos em camadas de base e sub-base.

A tufa foi observada nos estudos realizados por Hurd (1988) e Gupta *et al.* (1994) e as consequências em sistemas de drenagem rodoviária. Ainda, Gupta *et al.* (1994) observaram que amostras de escórias de alto forno são menos reativas na presença de água e CO_2 .

O estudo ocorreu no estado de Ohio (USA). Nos pavimentos do nordeste de Ohio (Hurd, 1988 e Gupta *et al.*, 1994), nas rodovias onde escórias siderúrgicas foram utilizadas em camadas

de sub-base e base, foram observados materiais semelhantes às tufas, entupindo as saídas das drenagens, criando condições de retenção de água.

O processo de formação de tufa inicia-se com a dissolução do $\text{CaO}_{\text{livre}}$, presente nas escórias, pela água que percola através da camada de sub-base para o sistema de drenagem. As reações químicas estão expressas a seguir:



A solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provoca um aumento do potencial de Hidrogênio (pH) das águas drenadas para valores acima de 11. O pH elevado destas águas favorece a dissociação do H_2CO_3 , um ácido fraco, em *íons* de hidrogênio e de carbono, apresentando as inequações químicas:



Em um ambiente com pH elevado, as reações nas Equações 2.7 e 2.9 dão-se da esquerda para a direita. As combinações dos *íons* de carbono em solução, com os *íons* de cálcio, formam o CaCO_3 . A reação é expressa por:



Nos orifícios dos drenos, a água desta solução enriquecida de bicarbonato de cálcio evapora, devido às altas temperaturas e, além disso, o CO_2 escapa para a atmosfera. Esta condição leva à precipitação de CaCO_3 e à formação de tufa.

Essas reações químicas indicam claramente que a concentração do $\text{CaO}_{\text{livre}}$, água, CO_2 , temperatura e umidade são os principais elementos que controlam a precipitação de depósitos tufóricos em drenos.

2.2.5 ANÁLISE DAS ÁGUAS

A identificação na água de compostos químicos que provocam a formação de tufa é possível por meio da análise da água em relação à dureza total e à presença de ferro total. Os compostos que conferem dureza às águas são: bicarbonato de cálcio e de magnésio, sulfato de cálcio e magnésio. Algumas vezes, alumínio e $4\text{Fe}(\text{OH})_3$ são considerados como contribuintes da dureza (PEVELI E KATO, 2006).

Segundo Peveli e Kato (2006), classifica-se a dureza quanto aos cátions e quanto aos ânions associados a estes. Dureza cálcica e dureza magnésiana devem-se à presença de cátions. A soma da dureza cálcica com a dureza magnésiana resulta na dureza total da água.

Em relação à presença do ânion, a dureza se classifica em dureza temporária e dureza permanente. A dureza temporária ocorre quando o cálcio ou o magnésio está associado a carbonatos (ou bicarbonatos), que são removíveis por fervura e se precipitam. Os bicarbonatos de cálcio e magnésio, por ocasião da fervura da água, decompõem-se com a precipitação.

O CaCO_3 forma sais insolúveis e são percebidos através de uma nata ou incrustações nas tubulações. A soma da dureza temporária com a permanente também resulta na dureza total. A água dura, após aquecimento, precipita carbonato de cálcio que provoca entupimento nas tubulações. Por outro lado, os cloretos e sulfatos não são eliminados pela ebulição, e constituem

a dureza permanente. A dureza total da água é a soma dessas duas e é expressa em mg/l ou $\mu\text{g/l}$.

No Brasil, para caracterizar a dureza da água, o valor máximo permissível de dureza total fixado pelo padrão de potabilidade, ora em vigor, é de 500 mg/l CaCO_3 (Ministério de Saúde, 2011). Na Tabela 2.10, apresenta-se uma escala de dureza de origem americana.

Tabela 2.10 Grau de dureza das águas - PEVELLI E KATO, 2006

mg/l CaCO_3	Grau de dureza
0 – 75	Branda ou mole
75 – 150	Moderadamente dura
150 – 300	Dura
Acima de 300	Muito dura

A análise da água, além da dureza total, apresenta o valor da alcalinidade parcial e total. Pelos resultados obtidos da alcalinidade é possível identificar se há hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos presentes nas amostras. A alcalinidade é dada pela somatória das concentrações existentes de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos. As concentrações informam sobre as características corrosivas ou incrustantes das águas analisadas.

Essa análise é possível por meio das relações que se seguem:

- Se a alcalinidade de bicarbonato for menor que a dureza total, a dureza temporária equivale à alcalinidade de bicarbonatos e existe dureza permanente na amostra.
- Se a alcalinidade, total mais a parcial, for maior ou igual à dureza temporária tem-se a alcalinidade de carbonato e bicarbonato e, a dureza permanente equivale a zero.

Ligada diretamente ao pH, a alcalinidade pode existir de 3 formas, apenas uma de cada vez:

- $\text{pH} > 9,4$: hidróxidos e carbonatos;
- $8,3 < \text{pH} < 9,4$: carbonatos e bicarbonatos e,
- $4,4 < \text{pH} < 8,3$: apenas bicarbonato

A proporção dos hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos está apresentada na Tabela 2.11, onde P refere-se ao resultado da alcalinidade parcial; T é a alcalinidade total.

Além dos carbonatos e bicarbonatos presente na água, a presença de ferro também pode causar depósitos nas canalizações de águas. A solubilidade do íon ferroso (Fe^{2+}) é controlada pela concentração de carbonato. Como a água subterrânea é muitas vezes anóxica, qualquer ferro solúvel nas águas subterrâneas é geralmente no estado ferroso.

Tabela 2.11 – Compostos da da alcalinidade – PEVELLI e KATO, 2006

Resultado da titulação	Hidróxido	Carbonato	Bicarbonato
$P = 0$	0	0	T
$P < 1/2 T$	0	$2P$	$T-2P$
$P = 1/2 T$	0	$2P$	0
$P > 1/2 T$	$2P-T$	$2(T-P)$	0
$P=T$	T	0	0

Os níveis elevados de ferro na água podem causar manchas no encanamento, lavanderia e utensílios de cozinha, e podem conferir sabor e alimentos indesejáveis aos alimentos. O nível recomendado pelo Ministério da Saúde (2005), Portaria nº518, o padrão de concentração máxima de ferro, para água potável é de 0,3 mg /l.

A análise para verificar a presença de ferro na água pode ser realizada por dois métodos utilizando espectrofotometria: micro (*kit hach*) e o macro (ortofenantrolina). No método micro, o espectrofotômetro é ajustado no programa 265 e no comprimento de onda de 510 nm. Adiciona-se na amostra a ser analisada o conteúdo do sachê FerroVer. Após a dissolução do conteúdo do sachê com a amostra, em torno de 3 minutos, leva-se a mistura ao espectrofotômetro.

O método macro é o mais complexo e demorado. Envolve fervura, resfriamento e desenvolvimento de cor. Consiste em mudar o estado de oxidação do ferro através do uso redutor de cloridrato de hidroxilamina; usa-se como tampão a solução de acetato de amônia. Amostra preparada leva-se ao espectrofotômetro, ajustado no comprimento de onda de 510nm. Realiza-se a leitura. O valor final da quantidade de ferro é obtido na equação da curva de calibração do equipamento.

A medição da cor realiza-se por espectrofotômetro. Este método é aplicado somente à análise de ferro ferroso. Ele não determina a quantidade de ferro férrico presente na amostra. O reagente cloridrato de hidroxilamina é utilizado para reduzir o ferro férrico, se presente, para ferro ferroso.

Obtém-se uma curva de calibração do equipamento, por meio de leituras em amostras contendo soluções de ferro com: 0,5 mg/l; 1,0 mg/l; 2,0 mg/l; 3,0 mg/l; 4,0 mg/l e 5,0 mg/l. Com as leituras das amostras no espectrofotômetro, obtém-se a curva de calibração.

Com a equação da reta e com valores de absorbâncias das soluções em análises, obtém-se a quantidade de ferro presente nas amostras (NBR 13934, ABNT 1997).

2.2.6 COLMATAÇÃO

Os sistemas de drenagem, quando submetidos ao fluxo de fluidos contendo sólidos em suspensão, substâncias químicas ou orgânicas, cujas características ou sentido de fluxo variam com o tempo, podem também ter sua vida útil consideravelmente reduzida (PALMEIRA, 2003).

Um dos fatores que compromete a eficiência do sistema de drenagem trata-se do fenômeno da colmatação, responsável pela obstrução dos dispositivos de drenagem. A colmatação é o processo de retenção que pode reduzir a condutividade hidráulica dos filtros e drenos. Os critérios de colmatação em sua maioria relacionam a perda da condutividade hidráulica por fechamento dos vazios. É um processo que ocorre ao longo do tempo, comprometendo a eficiência do sistema drenante.

A obstrução dos dispositivos de drenagem em obra geotécnica ocorre por fenômenos físicos, químicos ou biológicos. A colmatação física mais comum refere-se ao carreamento das partículas sólidas do material pela força de percolação.

Segundo Mlynarek e Rolin (1995), citado em Carvalho (2010), uma das causas do processo de colmatação química resulta da deposição de sais como o carbonato e sulfato. Esse fenômeno pode ocorrer quando o fluido percolante contém elementos em estado dissolvido e, após a evaporação da água, formam-se cristais de sais que ocupam os vazios do meio poroso.

Colmanetti (2000) cita que a dimensão das partículas do material granular no dispositivo de drenagem é importante, pois quando possui uma granulometria fina, o processo de colmatação acontece mais rapidamente, uma vez que a condutividade hidráulica dos materiais drenantes depende primeiramente do tamanho dos grãos, das partículas finas presentes no solo.

Palmeira e Gardoni (2000) relatam que a colmatação de um filtro é causada por incompatibilidade entre as dimensões de partículas de solo e pela dimensão dos poros do filtro, conduzindo a uma redução da capacidade de descarga do dreno, aumento da propressão e

perda do controle do fluxo preestabelecido.

Na prática, o que se observa é que a colmatação devida a depósitos de carbonatos de cálcio é a causa mais comum e importante da obstrução de drenos. O tempo que leva para entupir depende de alguns parâmetros, tais como minerais solúveis, velocidade do fluxo e o pH (OSAKO, 2002).

Diante do estudo, conclui-se que há formação de tufa nas estruturas de drenagem, devido à presença de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ nestes materiais; que o teor de óxidos de cálcio livre não reduz na profundidade das pilhas estocadas; que a cura das escórias durante seis meses não reduz suficientemente a quantidade de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ de modo a diminuir o volume de precipitado de carbonato de cálcio (tufa); que a análise das águas identifica a presença de compostos químicos responsáveis pelos fenômenos de expansão e formação de tufa; que as escórias de aciaria só devem ser aplicadas nas camadas do pavimento se a cal livre tiver sido removida durante a fase de maturação.

2.2.7 APLICAÇÃO E NORMATIZAÇÃO DAS ES E AS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

A escória de aciaria vem sendo utilizada em obras de infraestrutura de estradas nos Estados Unidos da América (EUA), Inglaterra, Japão e Canadá (HEATON, 1996; CASTELO BRANCO, 2004). Diversas pesquisas foram desenvolvidas nas décadas de 70, 80 e 90 para analisar o emprego desse material em obras rodoviárias.

Na Europa, cerca de 88% das escórias de aciaria LD são aproveitadas; destas, 51% na engenharia civil, 19,3% na metalurgia, 18,2% como fertilizante e 11,4% como aterro (GEISELER, 1996). Em 1998, a Alemanha reaproveitou cerca de 97% das escórias de aciaria nas camadas superficiais dos pavimentos, nas camadas de base e sub-base de pavimentos com alto tráfego (construção de estradas), aterros e em estruturas hidráulicas (MOTZ e GEISELLER, 2001).

Países europeus como o Reino Unido, a Alemanha e a França têm normatizações a respeito do uso de escórias siderúrgicas (BRASIL, 1988). No Reino Unido, através da norma BS 6543:1985, é preconizado um conjunto de requisitos para o uso dos agregados siderúrgico, cujos valores limites são estabelecidos mediante a adaptação e experiência com os agregados naturais, não devendo ser utilizados como especificação para materiais alternativos.

Já na Espanha, aplica-se um conjunto de especificações técnicas gerais para a construção de estradas e pontes, onde são estabelecidos os requisitos para a área da pavimentação, válida, tanto para os materiais tradicionais como para as escórias siderúrgicas, na execução de camadas granulares. Em Portugal, ainda não há especificações ou critérios técnicos que permitam avaliar a possibilidade de utilização dos agregados siderúrgicos (ANDRADE, 2015).

No Japão, por sua vez, as normas para a utilização de agregados siderúrgicos na pavimentação estão em vigor desde 1979 pelo *Japanese Industrial Standard* (JIS), cuja norma atual é a JIS A-5015 de 1992.

No Brasil, além do uso dos agregados siderúrgicos em obras rodoviárias (ROCHA, 2011; TARAZONA 2016; OLIVEIRA et al., 2018) tem sua aplicação na fabricação de cimento, fertilizante de solos, fabricação de artefatos de cimento e lastro ferroviário (CASTELO BRANCO, 2004; FERNANDES, 2010; DAYREL, 2013).

Além destas utilizações, há registros desse material na redução da drenagem ácida de

rochas, proveniente da extração de metais pesados (ALMEIDA *et al.*, 2015), como corretivo da acidez do solo para agricultura (CORRÉA, 2006), uso na construção da camada de coleta de chorume e remoção de resíduos sólidos urbanos de aterro sanitário (ALMEIDA *et al.*, 2014).

Machado (2000) e Masuero (2001) realizaram trabalhos acadêmicos em parceria com indústrias siderúrgicas utilizando-as no setor da construção civil e, em pavimentação, como agregado para lastro ferroviário.

As normativas que regulamentam o uso do agregado siderúrgico no Brasil são ainda escassas e, por vezes, pouco desenvolvidas, sendo necessário recorrer à experiência adquirida com materiais naturais para o mesmo tipo de utilização. As normas existentes aplicam-se essencialmente à utilização deste material em camadas granulares e em camadas betuminosas.

No Brasil, o Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), atualmente DNIT, publicou as seguintes normas: EM 260 (DNER, 1994) EM 262 (DNER, 1994), PRO 261 (DNER, 1994), PRO 263 (DNER, 1994), ES 114 (DNIT, 2009) e a ES 115 (DNIT, 2009) que tratam da execução de camada de sub-base e camada de base com uso desse material.

A norma ME 113 (DNIT, 2009) é a que verifica a expansibilidade das escórias quando compactadas e testadas em laboratório. Recentemente, o DNIT publicou a ES 406 (DNIT, 2017) e a ES 407 (DNIT, 2017) que tratam, respectivamente, de normativas para base e sub-base rodoviária, estabilizada granulometricamente com Açobrita® (agregado siderúrgico).

A norma rodoviária NBR 11804-EB 2103 (ABNT, 1991), tomada como referência para a norma do DNIT, é mais rigorosa e específica para a utilização em sub-base de pavimentos. Nesta, o agregado não deve ter uma expansão superior a 1% e, para o uso em base de pavimentos, este valor deve ser inferior a 0,5%. Entretanto, a presença de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e $\text{MgO}_{\text{livre}}$ na escória siderúrgica recém produzida levam a uma expansão superior ao especificado por essas normas.

2.2.8 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL DAS ES E AS

Segundo Dutra (1999), na maioria dos países, a escória é considerada, em geral, resíduo sólido, mas nunca listada como resíduo perigoso ou não passível de reciclagem. Os materiais, como escória de aciaria, que podem ser destinados como matéria-prima ou insumo para outros processos, estão sendo já classificados como coprodutos e, portanto, excluídos das regulamentações mais rigorosas específicas de resíduos.

A composição química deste material poderá apresentar um potencial risco ao meio ambiente e à saúde humana. Esta possibilidade desencadeia diversas pesquisas a nível mundial, de forma a ampliar seu uso no segmento da indústria de construção, de maneira ambientalmente correta.

Nos Estados Unidos, desde 1920, a Associação Nacional da Escória (NSA) apresenta relatórios técnicos que mostram as escórias de aciaria como não perigosas. Em maio de 1980, nesse mesmo país, a (EPA), baseando-se em estudos de investigação e em ensaios feitos nas escórias, classificou-as como *Resíduos Não Perigosos* nos métodos e padrões de ensaios existentes.

Os órgãos ambientais no Brasil têm dedicado um cuidado especial relativo ao manuseio e utilização de resíduos sólidos industriais, enfatizando que estes precisam ser tratados obedecendo-se às disposições legais pertinentes, de forma a se impedir possíveis riscos de problemas e eventuais punições previstas na Lei de Crimes Ambientais – Lei n.º. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. É preciso observar, também, as resoluções que o Conselho Nacional de Meio Ambiente publica regularmente tratando sobre o tema (FERNANDES, 2010).

No Brasil, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), mediante a resolução 313 (CONAMA, 2002), realizou um inventário dos resíduos sólidos industriais, e a Associação

Brasileira de Normas Técnicas expediu as normativas para classificação e identificação de resíduos sólidos:

- NBR 10004 (ABNT, 2004) – “Resíduos sólidos – Classificação. Classifica resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que estes resíduos possam ter manuseio e destinação adequados”;
- NBR 10005 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Identifica as substâncias liberadas pelas amostras, após o processo de lavagem e percolação. Em seguida, classifica-os como perigosos quando eles apresentam valores de poluentes no extrato lixiviado em concentração superior aos padrões permitidos, anexo F da NBR 10004 (ABNT, 2004).
- NBR 10006 (ABNT, 2004) – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Avalia a solubilidade dos compostos presentes no material estudado, por meio da concentração de substâncias solúveis em água. Para efeito de classificação de resíduos, comparar os dados obtidos com aqueles constantes no anexo G da NBR 10004 (ABNT, 2004).

Motz e Geiseler (1998) citam que nas escórias de aciaria a lixiviação de elementos nocivos é insignificante, em termos de impacto ambiental, ao comparar os resultados dos ensaios com os limites estabelecidos em normativas, NBR 10004 (ABNT, 2004).

Motta *et al.* (2006), ao avaliarem o comportamento quanto ao risco ambiental da utilização de escória de aciaria em pavimentos sem cobertura, classificaram-na como resíduo classe II A (não perigoso, não inerte) por apresentar concentração de fluoreto solubilizado, limite acima do especificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004). Os resíduos da classe II A podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Segundo os autores, o ensaio de solubilização representa uma condição de exposição máxima da massa de escória em relação à solução, porém, na prática, a água das chuvas não entra em contato direto com toda a superfície sólida ao atravessar o pavimento, o que reduz a massa de contribuição das espécies para a água de percolação, e, como a massa de contaminantes solubilizada é finita, constituindo uma fração da massa seca de escória presente, existe uma tendência de diminuição da concentração liberada com o tempo.

Na pesquisa realizada por Silva (2010), o autor observou que os valores médios dos parâmetros analisados no extrato lixiviado, apresentados na Tabela 2.12, das amostras dos agregados siderúrgicos de aciaria LD, são inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), sendo caracterizado como resíduo não perigoso e classificado como material inerte (Classe IIB), não apresentando riscos à saúde pública ou efeitos nocivos ao meio ambiente.

Tabela 2.12 – Extrato lixiviado dos agregados siderúrgicos LD - SILVA, 2010

Parâmetros	Concentração Média (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)	Limite Máximo Permitido (mg/L)
Arsênio	$5,3 \times 10^{-3}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \times 10^0$
Bário	$4,0 \times 10^{-1}$	$7,0 \times 10^{-2}$	7×10^1

Tabela 2.12 – Extrato lixiviado dos agregados siderúrgicos LD - SILVA, 2010 - continuação

Parâmetros	Concentração Média (mg/L)	Desvio Padrão (mg/L)	Limite Máximo Permitido (mg/L)
------------	---------------------------	----------------------	--------------------------------

Cádmio	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$5,1 \times 10^{-1}$
Chumbo	$2,2 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^0$
Cromo	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^0$
Mercúrio	$1,7 \times 10^{-3}$	$5,4 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-1}$
Prata	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^0$
Selênio	$7,1 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^0$
Fluoreto	$1,5 \times 10^0$	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^2$

O mesmo autor, Silva (2010), realizou a mesma observação para o extrato solubilizado. Na Tabela 2.13, as amostras dos agregados siderúrgicos de aciaria LD apresentam valores inferiores aos limites máximos prescritos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), anexo G, da norma, sendo caracterizado como resíduo não perigoso e classificado como material inerte (Classe IIB), não apresentando riscos à saúde pública ou efeitos nocivos ao meio ambiente.

Tabela 2.13 – Extrato solubilizado dos agregados siderúrgicos LD - SILVA, 2010

Parâmetros	Concentração Média [mg/l]	Desvio Padrão [mg/l]	Limite Máximo Permitido [mg/l]
Arsênio	Não detectado	-	$1,0 \times 10^{-2}$
Bário	$4,9 \times 10^{-1}$	$2,6 \times 10^{-2}$	7×10^{-1}
Cádmio	$2,0 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-3}$
Chumbo	$1,6 \times 10^{-3}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Cromo	$3,4 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-3}$	$5,0 \times 10^{-2}$
Mercúrio	$8,5 \times 10^{-4}$	$9,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-3}$
Prata	$1,3 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-4}$	$5,0 \times 10^{-2}$
Alumínio	$2,4 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-1}$
Ferro	$5,8 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-2}$	$5,0 \times 10^0$
Manganês	$1,4 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-1}$
Sódio	$7,2 \times 10^0$	$4,4 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^2$
Cobre	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^0$
Selênio	$3,6 \times 10^{-4}$	$7,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-2}$
Sulfato	$8,2 \times 10^0$	$3,7 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^2$
Cloreto	$42,0 \times 10^0$	$2,8 \times 10^0$	$2,5 \times 10^2$
Fluoreto	$6,7 \times 10^{-1}$	$3,0 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^0$

São classificados como resíduos da classe II B – Inertes, aqueles que, quando colocados em contato dinâmico e estático com a água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 – Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos (ABNT 2004), nenhum dos seus constituintes solubilizem a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água conforme anexo G da NBR 10004.

Segundo Barbosa (2013), a caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros (siderúrgicas localizadas em Pindamonhangaba – SP; Barão de Cocais – MG; Simões Filho – BA; Sapucaia do Sul – RS e Rio de Janeiro – RJ, por meio dos ensaios de lixiviação e de solubilização, mostram que as escórias de aciaria geram baixo impacto ao meio ambiente quando aplicadas, pois são classificadas como resíduos Classe IIA, enquanto os

elementos que excederam os limites disponíveis são em sua maioria encontrados em solos convencionais nos estados brasileiros avaliados.

Moreira (2006) relata que as escórias de alto forno, cristalinas, ou seja, aquelas resfriadas lentamente, são, em sua maioria, termodinamicamente estáveis, comparativamente às escórias vitrificadas, comportando-se relativamente como agregados inertes, e estão classificados na classe 3 - NBR-10004 – materiais inertes.

Segundo Proctor *et al.* (2002), as escórias siderúrgicas podem possuir metais pesados tais como antimônio, cádmio, cromo total e hexavalente, manganês, mobilênio, prata, selênio, tálio ou vanádio em concentrações superiores às dos solos. Porém, esses rejeitos possuem pH alcalino, em torno de 11, que, em geral, contribuem para a mobilização desses metais, tornando possível o emprego das escórias sob condições adequadas.

A primeira parte da revisão bibliográfica apresentou conceitos e parâmetros sobre a drenagem subterrânea, sintetizadas na tabela, que possibilita verificar a potencialidade de um determinado material a ser utilizado como material drenante. A segunda parte apresentou as características do material proposto para o estudo, as excelentes características desse material e fatores que podem limitar seu uso, mas que, com tratamentos adequados realizados pelas siderúrgicas, o uso do material se torna viável. Também apresentou métodos para realização de análises técnicas e ambientais que nos assegurará o uso como material drenante.

Com o estudo realizado neste capítulo, possibilitou definir a metodologia a ser desenvolvida durante a pesquisa e, a conscientização dos desafios a serem superados.

CAPÍTULO 3

3. MATERIAL DE PESQUISA E METODOLOGIA

A primeira parte deste Capítulo descreve o processo de origem e a granulometria das amostras recebidas para o estudo desta Tese. A segunda parte trata-se da metodologia que, se divide na construção do permeâmetro, na proposta de dimensionamento do colchão drenante e nas caracterizações laboratoriais.

3.1 ESCÓRIAS (ES) E AGREGADOS SIDERÚRGICOS (AS) UTILIZADOS NA TESE

As ES e os AS, utilizados nesta Tese, foram fornecidos pelo Instituto Aço Brasil coletados no pátio de duas siderúrgicas distintas, denominadas neste trabalho de A e B e acondicionadas em 30 sacos com aproximadamente 1.000 kg cada. Na siderúrgica A, coletou-se amostra (AS) tipo LD e, na siderúrgica B, coletaram-se amostras (ES) tipo LD e AF.

Em seguida, as amostras foram transportadas diretamente para o laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB), descarregadas em julho de 2015 nas instalações onde funciona o Laboratório de Infraestrutura (INFRALAB), próximo ao laboratório da Geotecnia, ambos localizados no *campus* Darcy Ribeiro, da UnB, por necessitar de um amplo espaço.

As amostras foram geradas por dois processos distintos, LD e AF, descritos anteriormente, e fornecidas pelas Siderúrgicas com diferentes faixas granulométricas, resumidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Característica dos agregados siderúrgicos recebidos

Amostra	Forno	Siderúrgica	Processo	Resfriamento	Tamanho (mm)
A1	A oxigênio	A	Aciaria - LD (Linz -Donawitz)	Lento ao ar	12 x 25
A2					19 x 36
A3					36 x 75

B1	A oxigênio	B	Aciaria - LD (Linz -Donawitz)	19 x 36
B2				36 x 75
B3	Alto-forno		Alto-forno (AF)	19 x 36
B4				36 x 75

O processo de tratamento das amostras, utilizadas nesta Pesquisa de Doutorado, foi realizado pelas indústrias siderúrgicas. Segundo a siderúrgica A, as amostras foram submetidas ao processo prévio de cura no pátio da empresa e enviadas diretamente ao Laboratório de Geotecnia da UnB (ENC/UnB), agregado siderúrgico.

Segundo a siderúrgica B, não houve a necessidade de realizar o processo de cura das amostras de escórias siderúrgicas, tendo em vista que:

a) As escórias de aciaria (LD) destinadas à função de dreno não passaram por um controle de expansão. As pilhas são espalhadas em alturas de cerca de 1,5 m na forma cônica e, posteriormente, despachadas para utilização;

b) As escórias Alto-forno (AF) resfriadas ao ar, comumente denominadas de (*Dry Pit*), destinadas à função de base em pavimentos confinados, não passaram por um controle de expansão. Estas escórias não possuem em sua composição a presença de óxido de cálcio livre ($\text{CaO}_{\text{livre}}$) e óxido de magnésio livre ($\text{MgO}_{\text{livre}}$) que auferem efeito expansivo ao material. Quanto aos processos de amostragem, é utilizado como referência o procedimento da NBR 10007 (ABNT, 2004).

O manuseio das amostras nos sacos constituiu-se uma das grandes dificuldades do processo. Primeiro pela densidade desse material, superior aos agregados convencionais; segundo, devido a ineficiência da homogeneização das amostras. Os grãos menores se localizavam no fundo dos sacos e os maiores na parte superior. Na Figura 3.1, encontra-se imagens de quatro amostras diferentes recebidas das siderúrgicas.

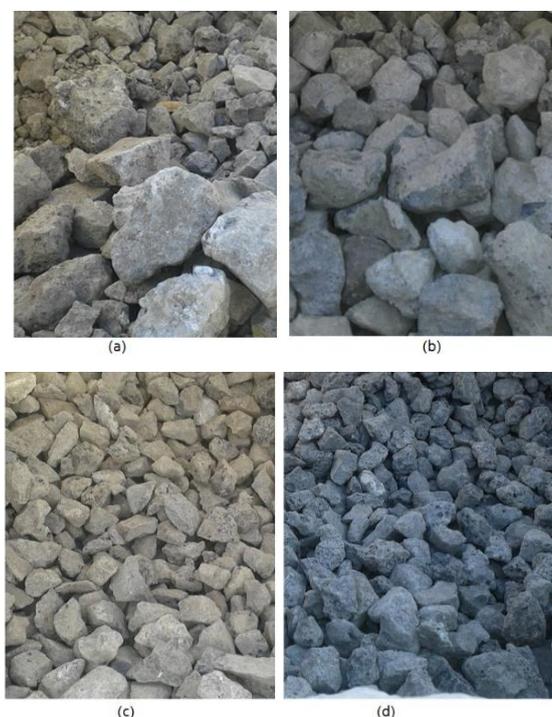


Figura 3.1 – a) agregado siderúrgico de aciaria, LD (A3) 36 mm x 75 mm; b) escória siderúrgica de alto forno, AF (B4) 36 mm x 75 mm; c) agregado siderúrgico de aciaria, LD (A2) 19 mm x 32 mm; d) escória siderúrgica de alto forno AF (B3) 19 mm x 32 mm.

À medida que os materiais eram retirados dos sacos, que estavam identificados em

intervalos de 36 mm a 75 mm, constatava-se que no fundo do saco havia uma grande quantidade de material granular fino, que se depositava no fundo da embalagem com frações de 0,075 mm a 9,5 mm.

Os materiais granulares para uso em drenagem devem satisfazer os critérios de seleção de materiais descritos na Tabela 3.2. Neste caso, os primeiros parâmetros a serem verificados são o coeficiente de não-uniformidade (C_U) e o coeficiente de curvatura (C_C).

Tabela 3.2– Resumo dos critérios de seleção de material granular drenante e filtrante.

Recomendação	Condição	Critério
Terzaghi (1996) (DNIT 2006b), (Moulton 1980), (Suzuki <i>et al.</i> 2013)	Permeabilidade	$D_{15_{filtro}}^3 \leq 5D_{15_{solo}}$ Máximo de 5% passando peneira 0,075 mm
	Não entupimento do material filtrante	$D_{15_{filtro}} \leq 5D_{85_{solo}}$ $D_{15_{filtro}} \leq 40D_{15_{solo}}$
	Não entupimento do tubo	$D_{85_{filtro}}^3 \leq D_e$
	Uniformidade	$D_{50_{filtro}} \leq 25D_{50_{solo}}$
	Coeficiente de não- uniformidade do Material Granular (C_U).	$2 \leq C_U \leq 20$
Suzuki <i>et al.</i> (2013)	Coeficiente de curvatura (C_C) para material permeável	$0,63 \leq C_C \leq 1,64$
Bureau of Reclamation (DNIT, 2006a)	Material do envelope	100% passante na peneira de 37,5 mm. Máximo 5% passando na peneira 0,355 mm
	Material bem graduado	Material granular $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ Material miúdo $0,63 \leq C_C \leq 1,64$ Material graúdo e miúdo

Tabela 3.2– Resumo dos critérios de seleção de material granular drenante e filtrante - continuação

Recomendação	Condição	Critério
Soil Conservation Service (DNIT, 2006a)	Necessidade de filtro	$\frac{D_{50_{filtro}}}{D_{50_{solo}}} = 12 \text{ a } 48$ $\frac{D_{15_{filtro}}}{D_{15_{solo}}} = 12 \text{ a } 40$
	Solo e envelope com material de granulometria uniforme	$\frac{D_{15_{filtro}}}{D_{15_{solo}}} < 5$

Observou-se que a faixa granulométrica fornecida pelas siderúrgicas não atendeu aos critérios estabelecidos na Tabela 2.15, $[0,63 < C_U < 1,64]$ e $[2 < C_C < 20]$. Por este motivo, houve a necessidade de se definir novas faixas granulométricas.

As amostras recebidas do Instituto Aço Brasil foram combinadas entre si (misturadas), com o intuito de obter uma curva granulométrica que satisfizesse os critérios preestabelecidos $[0,63 < C_U < 1,64]$ e $[2 < C_C < 20]$.

O processo de combinação para obtenção das novas faixas granulométricas foi realizado a partir das combinações lineares entre as diferentes faixas granulométricas recebidas. Desta forma, foi possível estabelecer uma gama maior de alternativas entre as amostras. O processo de combinação linear e obtenção das novas faixas granulométricas seguiram a formulação dada por:

$$CG_{comb} = \sum_{i=1}^3 p_i CG_{Ai} + \sum_{i=1}^4 p_{i+3} CG_{Bi} \quad (3.1)$$

$$\sum_{i=1}^7 p_i = 100\% \quad (3.2)$$

onde CG_{Ai} é a curva granulométrica da amostra A_i ; CG_{Bi} é a curva granulométrica da amostra B_i ; p_i é a porcentagem da contribuição da curva granulométrica CG_{Ai} ou CG_{Bi} .

A partir disso, as amostras receberam novas denominações que se encontram descritas na Tabela 3.3. Ressalta-se que as novas denominações das amostras preservaram a origem, o processo de produção original e as características das amostras. Na Tabela 3.3: A_{TLTD} é amostra A tratada do tipo LD, portanto, agregado siderúrgico tipo LD; B_{NTLD} é amostra B não tratada do tipo LD, portanto, escória siderúrgica tipo LD; C_{NTAF} é amostra C não tratada do tipo AF, portanto, escória siderúrgica tipo AF.

Tabela 3.3 - Mudança na denominação das amostras recebidas

Denominação da amostra recebida	Forno	Processo	Siderúrgica	Denominação atual da amostra
A1	A oxigênio	Aciaria - LD (Linz -Donawitz)	A	A_{TLTD}
A2				
A3				
B1	A oxigênio	Aciaria - LD (Linz -Donawitz)	B	B_{NTLD}
B2				
B3	Alto-Forno	Alto-Forno (AF)		C_{NTAF}
B4				

Nota-se, pela Tabela 3.3, que as sete amostras recebidas do IABr, após a realização do processo de combinação linear, foram reduzidas à apenas três amostras.

As amostras desta Tese não foram caracterizadas ambientalmente: Lixiviação e Solubilização. A literatura apresenta resultados de inúmeras pesquisas que as classificaram como *Resíduos Não Perigosos* nos métodos e padrões recomendados pelas NBR 10004 (ABNT, 2004).

Os resultados podem ser constatados nas obras de: Motz e Geiseler (1998); Gumieri (2002); Silva (2010); Fernandes (2010); Barbosa (2013); Dayrel (2013); Andrade (2015);

3.2 METODOLOGIA

Neste item apresenta-se a construção do permeâmetro à carga constante de paredes rígidas de grandes dimensões, a caracterização física do material, a proposta de dimensionamento do colchão drenante e, para finalizar as características mineralógica e química adotados para analisar a viabilidade da utilização das escórias siderúrgicas (ES) e do agregado siderúrgico (AS) para uso como material drenante.

3.2.1 CONSTRUÇÃO DE PERMEÂMETRO À CARGA CONSTANTE DE PAREDES RÍGIDAS DE GRANDES DIMENSÕES

Segundo Agab (2005) o permeâmetro de parede rígida compõe-se de um tubo circular rígido que contém a amostra que será ensaiada. O tubo pode ser de metal, acrílico ou vidro e, é fixado nas extremidades inferior e superior do tubo, chapas conectadas através de parafusos. Os ensaios realizados nestes equipamentos variam de acordo com a velocidade de infiltração empregada: à carga constante, carga variável e fluxo constante.

A necessidade de construir um permeâmetro surgiu na proposta de aplicar os materiais pesquisados nesta Tese como material drenante e, utilizar amostras com dimensões diferenciadas, com faixa granulométrica contendo intervalos de grãos com diâmetros 0,075 mm a 50 mm. A condutividade hidráulica para solos granulares pode ser determinada por meio do permeâmetro à carga constante.

A determinação desse parâmetro segue as orientações da NBR 13292 (ABNT, 1995): Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. A normativa, não contempla grãos com dimensões superiores a 19 mm. Nesta pesquisa utilizou-se grãos até 50 mm e, não há permeâmetro disponível para o experimento, para obter a condutividade hidráulica.

O subitem 3.11 da norma, NBR 13292 (ABNT, 1995), orienta as dimensões mínimas que o permeâmetro deve ter: “ *O permeâmetro...deve ter diâmetro interno no mínimo de 8 a 12 vezes a dimensão máxima dos grãos maiores...A sua altura útil deve ser de 1,5 a 2 vezes o diâmetro interno*”. Ao considerar, a dimensão máxima dos grãos desta pesquisa, 50 mm, concluiu-se que o equipamento construído deveria ter as seguintes dimensões: diâmetro interno mínimo de 0,40 m e altura útil de 0,60 m.

Nesse método de ensaio à carga constante, a água é circulada pela amostra para medir o volume de água percolado em um determinado tempo. Neste caso, o gradiente hidráulico deve permanecer constante, mantendo a altura do nível d'água, ou mantendo invariável a pressão da água na entrada e saída da amostra, durante todo o tempo de ensaio (DOURADO, 2003).

Além do desafio da construção do equipamento surgiram outras questões: a mudança de escala do material pesquisado de 19 mm para até 50 mm; adequação do equipamento para as dimensões geométricas do ensaio; comportamento hidráulico no que diz respeito ao transporte ou fluxo de água; alimentação do fluxo d'água durante o ensaio; tipo do material a ser utilizado na construção do equipamento.

3.2.1.1 PLANEJAMENTO DA CONSTRUÇÃO

Para a construção do equipamento identificou-se todos os componentes do permeâmetro necessários para a construção, tais como: tubo, base, conexões, mangueiras e registros. Também, realizou-se uma visita ao Laboratório de Geotecnia da pós-graduação da UnB, com a finalidade de conhecer a infraestrutura do local, onde o equipamento seria construído.

Listou-se os materiais necessários para a construção, e a checagem da disponibilidade deles no Laboratório de Geotecnia, isto com a finalidade de conhecer os componentes do permeâmetro que deveriam ser adquiridos e as peças que seriam confeccionadas.

Em sequência, prosseguiu-se a cotação e compra dos materiais e, a confecção das peças necessárias. Estas peças foram confeccionadas no Laboratório de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB.

Em seguida, realizou-se toda a montagem dos componentes do equipamento: o tubo do permeâmetro, os registros necessários, instalação de piezômetros, montagem do sistema hidráulico.

Com a finalidade de verificar a operação do equipamento realizou-se um ensaio teste, a fim de solucionar os problemas que pudessem acontecer, e assim validar os processos propostos de: montagem da amostra, percolação, saturação da amostra, e determinação da condutividade hidráulica.

3.2.1.2 EXECUÇÃO DO PERMEÂMETRO

No item, descreve-se a construção do equipamento, permeâmetro à carga constante de paredes rígidas de grandes dimensões, desde a sua concepção inicial, até a construção final com a incorporação de melhorias.

Definiu-se que o permeâmetro por questão econômica e disponibilidade do material, utilizaria um tubo PVC. Adquiriu-se o tubo de PVC de 6,0 m com diâmetro de 0,40 m. Utilizou-se uma “maquita”, para efetuar o corte do tubo com altura de 1,00 m.

Cortou-se uma chapa de aço nº 18 em formato de disco, com 0,408 m de diâmetro, a qual foi perfurada com broca de 4,6 mm. A finalidade deste disco é receber o corpo de prova e separá-lo do fundo do permeâmetro, camada separadora. Os furos têm a função de direcionar o fluxo, evitando o retorno. Para introduzir a chapa metálica no interior do tubo de PVC, utilizou-se dois parafusos de rosca sem fim, com arruelas, uma vez que o comprimento finalizado do tubo PVC, possui em torno de 1,075 m de comprimento como mostra a Figura 3.2. A chapa metálica foi instalada logo abaixo da saída de fluxo do permeâmetro.

Dois registros foram instalados no tubo: um na parte superior, que funciona como controlador do nível d'água, conhecido popularmente como ladrão, que mantém o nível constante e, o outro na parte inferior, onde o escoamento ocorre, ambos com diâmetro de 0,0127 m. O fundo do permeâmetro foi feito por meio de uma bolsa em PVC, que se encaixou na base do tubo e foi colado com cola PVC.

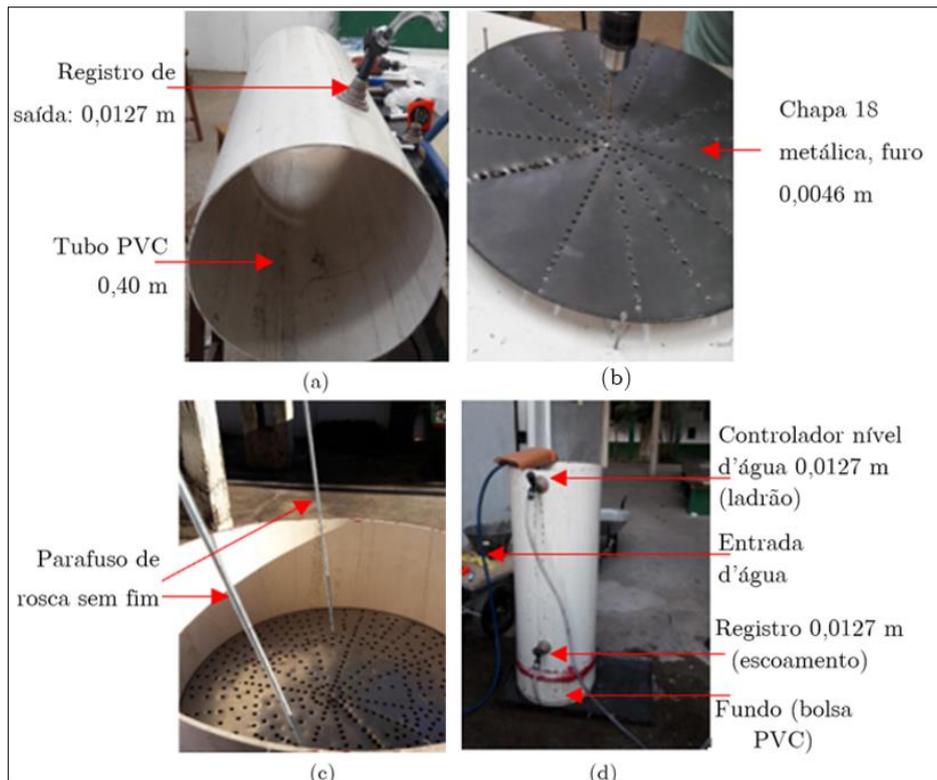


Figura 3.2- a) tubo de PVC cortado com o registro de saída instalado; b) chapa de aço 18, perfurada com diâmetro de 0,0046 m; c) colocação da chapa de aço no interior do tubo com duas hastes de rosca sem fim; d) permeâmetro concluído

O permeâmetro à carga constante de parede rígida de grandes dimensões, após finalizado apresentou as seguintes dimensões: área transversal de $0,115 \text{ m}^2$ e volume $0,0831 \text{ m}^3$.

Para testar o equipamento e validar os processos do ensaio de permeabilidade à carga constante, utilizou-se amostras de agregado siderúrgico, tipo A_{TLD} , faixa C1. Obteve-se para a condutividade hidráulica o valor de $3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, que segundo Terzaghi (1996) apresenta boa drenagem.

No teste com o equipamento, identificou-se durante o ensaio, etapas do processo a ser melhoradas, tais como: visualizar a estabilização do nível da água; reaproveitar a água utilizada durante o ensaio e controlar a entrada da água; nivelar o equipamento; instalar em local de fácil acessibilidade, para realizar as medidas do fluxo percolado.

Mediante as necessidades de melhorias, ampliou-se as etapas construtivas do equipamento para atender com eficácia as novas demandas quais sejam: instalação de piezômetros para visualizar o nível da água estabilizado; aquisição de uma bomba de recalque para reaproveitamento da água utilizada durante os ensaios; nivelamento do equipamento, tornando-o estável, durante a colocação e a retirada do corpo de prova. Na Figura 3.3 apresenta-se a vista frontal do permeâmetro.

Na Figura 3.3 visualiza-se o permeâmetro, o reservatório em PVC, a bacia plástica, o separador em chapa metálica assentada sobre uma camada de areia no interior do permeâmetro situado abaixo da saída de fluxo, as camadas de areias no interior da bacia e a para receber o permeâmetro. Instalou-se o permeâmetro a $0,98 \text{ m}$ do reservatório d'água que alimentou o ensaio. As melhorias implementadas estão descritas com mais detalhes a seguir:

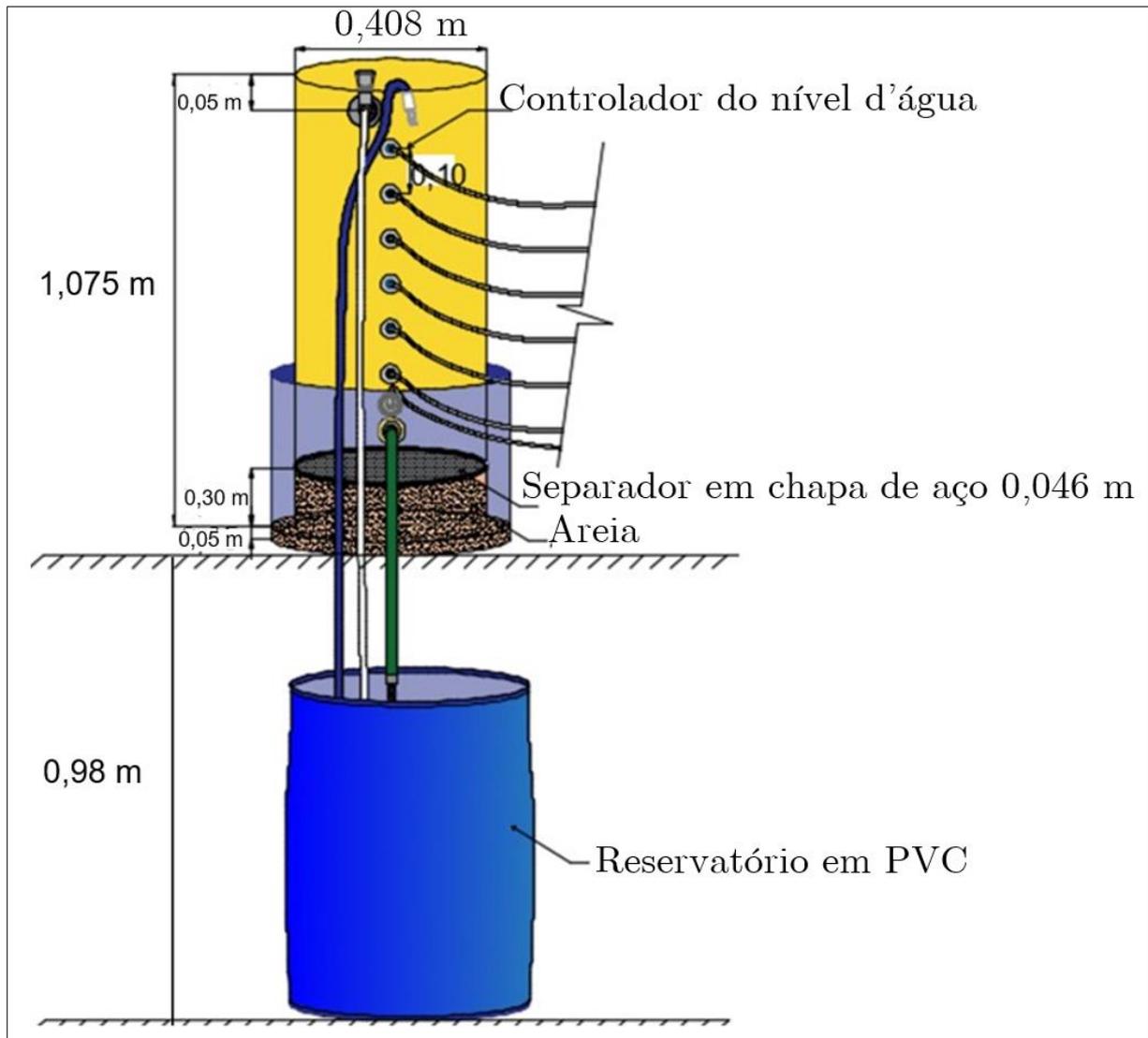


Figura 3.3 – Vista frontal do permeâmetro

a) Instalação dos Piezômetros

Com o objetivo de visualizar o nível d'água estabilizado com maior acurácia instalou-se sete piezômetros no permeâmetro, a cada 0,10 m ao longo de 0,60 m de altura (altura máxima do corpo de prova). A instalação dos piezômetros foi realizada por conectores de engate rápido – reto de 0,0064 m e mangueiras de mesmo diâmetro.

A instalação dos conectores iniciou-se de baixo para cima. O primeiro instalou-se a 0,10 m do registro da parte inferior do permeâmetro. Os seis restantes foram distribuídos a cada 0,10 m a partir do primeiro conector instalado. Engatou-se, em cada piezômetro uma mangueira com diâmetro de 0,0064 m.

Para sustentar as mangueiras do piezômetro e manter sua verticalidade, adquiriu-se um painel de madeira, onde as mesmas foram fixadas. Paralelamente às mangueiras, fixou-se uma métrica metálica de maneira que permitiu-se confirmar a linearidade do nível do fluxo apresentada na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Instalação dos piezômetros.

b) Instalação de um Sistema Hidráulico

Montou-se um sistema hidráulico para otimizar o uso de água utilizada no ensaio e permitir um maior controle do fluxo, na entrada e saída. Adquiriu-se uma bomba submersa (B) de 750 W com vazão máxima de 13000 l/h e altura manométrica máxima de 9 m de coluna d'água (m.c.a), munida de um sensor de nível que controla o acionamento da mesma, que atendeu a necessidade do ensaio, retroalimentando-o.

Na Figura 3.5 encontra-se o esquema do sistema hidráulico do permeâmetro, montado. Adquiriu-se uma bombona de PVC, com a função de reservatório, onde inseriu-se a bomba, que trabalha submersa. O conjunto hidráulico é composto por 3 mangueiras sendo:

- uma de recalque, saindo da bomba até o permeâmetro, com a função de alimentar o fluxo;
- a segunda, saindo do permeâmetro até o reservatório, com a finalidade de retroalimentar o reservatório e,
- a última, saindo da parte superior do permeâmetro, com a função de controlar o nível d'água, esta, também conduzida até o reservatório.

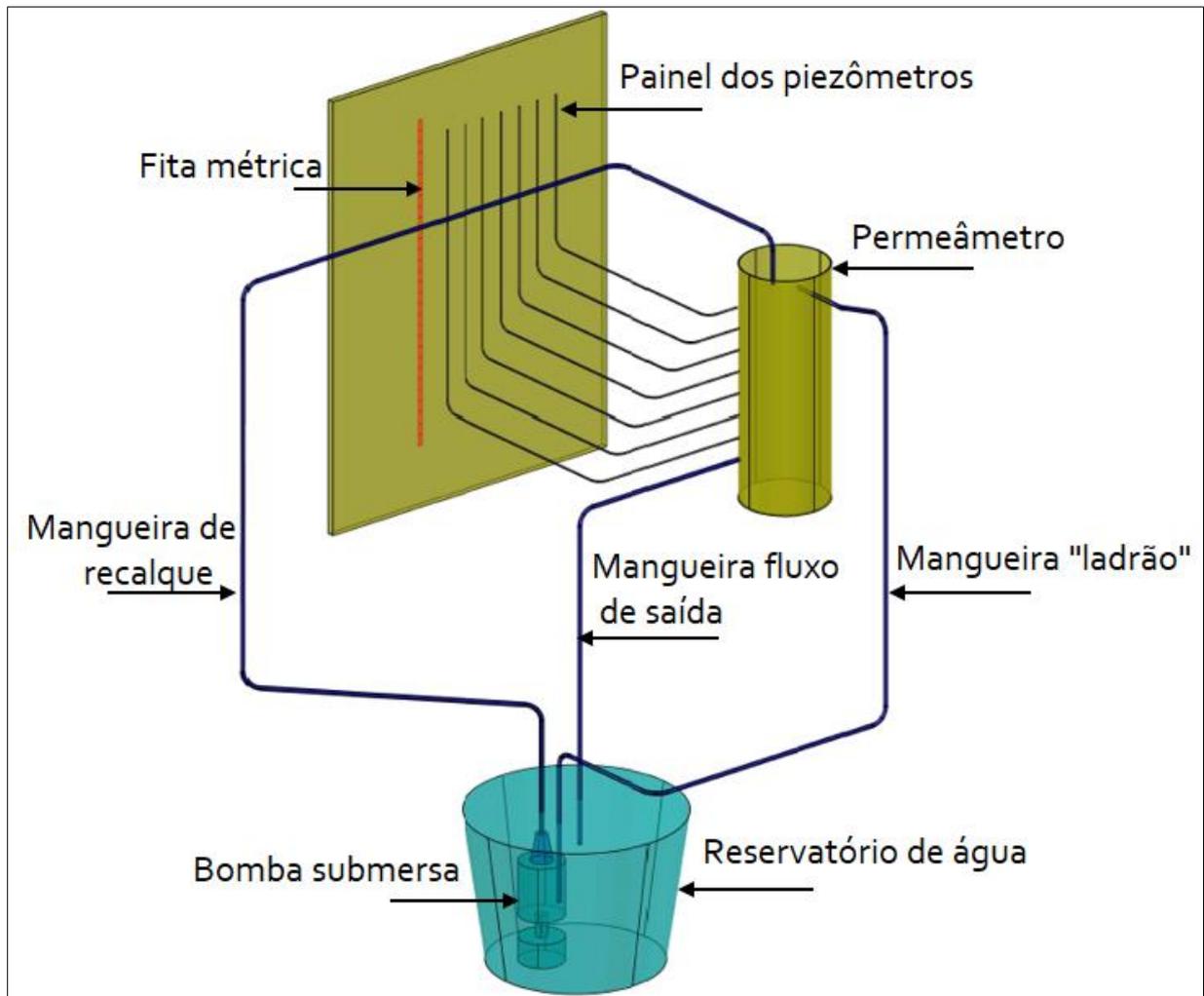


Figura 3.5 –Esquema do sistema hidráulico do permeâmetro

c) Nivelamento do Equipamento

Para o nivelamento do equipamento adquiriu-se uma bacia plástica de PVC. No interior da bacia foi inserido uma camada de 0,05 m de areia, na qual o permeâmetro foi assentado e nivelado (Figura 3.6). A colocação do permeâmetro no interior da bacia facilitou a movimentação do mesmo e a proteção dos conectores e conexões instalados. Também, na mesma Figura, é possível identificar o local de instalação do conjunto -permeâmetro e sistema hidráulico.

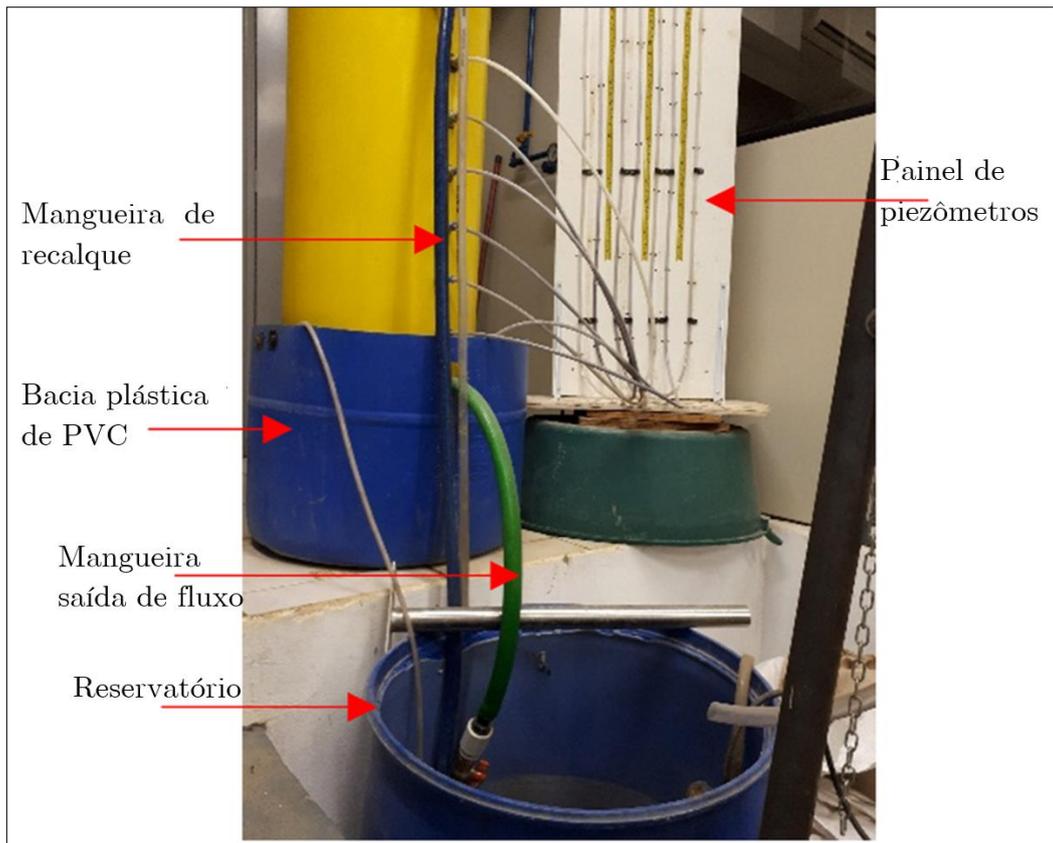


Figura 3.6 – Detalhes da instalação do equipamento

Para controlar o fluxo de entrada e saída instalou-se um registro de 0,019 m na extremidade da mangueira de recalque, (bomba submersa) que alimenta o permeâmetro com a água (Figura 3.7a) e, outro registro de mesmo diâmetro instalado na saída do fluxo percolado no corpo de prova (Figura 3.7b).

Devido a densidade e tamanho dos grãos não se utilizou um sobrepeso na parte superior do corpo de prova contido no permeâmetro, tendo em vista que, o fluxo desse permeâmetro é descendente, o que não se observa em outros permeâmetros de menores dimensões.

Com a construção finalizada do equipamento, iniciou-se a caracterização física das amostras para obter a condutividade hidráulica do material por meio do ensaio de permeabilidade.



(a)

(b)

Figura 3.7 – a) registro de saída de fluxo de 0,019 m; b) registro de entrada de fluxo de 0,019 m.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS ESCÓRIAS SIDERÚRGICAS (ES) E DO AGREGADO SIDERÚRGICO (AS)

As amostras após quarteadas foram peneiradas para definição da faixa granulométrica. Em seguida, analisados os coeficiente de não-uniformidade e de curvatura nos limites definidos para uso como material drenante. Ao não atender os limites, fez-se a combinação linear, e realizou-se novo peneiramento. Atendido os limites definidos dos coeficientes citados, obteve-se a faixa granulométrica da pesquisa, utilizada para a realização da caracterização física. As normativas adotadas para caracterizá-las encontram-se resumidas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Normativas para caracterizar as amostras - A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF}

Ensaio	Normas
Agregados – análise granulométrica	ME 083 (DNER, 1998)
Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água	NM 53 (ABNT, 2009)

Tabela 3.4 – Normativas para caracterizar as amostras - A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} - continuação

Ensaio	Normas
Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer	D 5550-14 (ASTM, 2014)
Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios	NM 45 (ABNT, 2006)
Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante	NBR 13292 (ABNT, 1995)
Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	ME 089 (DNER, 1994)
Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno-glicol	NM 13 (ABNT, 2012)

Os ensaios de caracterização física foram executados no Laboratório de Geotecnia, localizado no bloco da Pós-graduação da Engenharia Civil da UnB (ENC/UnB) os quais são descritos a seguir.

3.2.2.1 Distribuição Granulométrica

Por meio deste ensaio, determinou-se a distribuição das partículas com base nas suas dimensões e, calculou-se a percentagem em peso que cada tamanho de partícula representa na massa total ensaiada. Com os resultados construiu-se a curva de distribuição granulométrica importante para classificar o material, bem como para estimar parâmetros para filtros, bases estabilizadas, permeabilidade e capilaridade. Determinou-se, também, a dimensão máxima característica dos agregados.⁶

Para o ensaio de granulometria empregou-se um peneirador mecânico convencional, atendendo as orientações da norma ME 083 (DNER, 1998). Utilizou-se as peneiras: 76 mm; 50 mm; 37,5 mm; 25 mm; 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm e 0,075 mm.

Na Tabela 3.5, apresentam-se as escalas granulométricas adotadas pelas normas: NBR 6502 (ABNT, 1995) e D 2487 (ASTM, 2006).

Tabela 3.5 – Escalas granulométricas segundo as normas ABNT e ASTM

Norma	Pedregulho (mm)	Areia (mm)			Silte (mm)	Argila (mm)
		Grossa	Média	Fina		
ABNT NBR 6502	60 a 2,0	0,6 a 0,20	0,6 a 0,02	0,02 a 0,06	0,02 a 0,002	Menor 0,002
ASTM D 2487	75 a 4,75	4,75 a 2,00	2,00 a 0,425	0,425 a 0,075	0,074 a 0,005	Menor 0,0075

3.2.2.2 Absorção e Massa Específica Seca

Este ensaio revelou propriedades que o material dispõe em relação à sua utilização. O valor da absorção e da massa específica se relacionam com o tipo de resfriamento sofrido pelas escórias. O tipo do resfriamento altera a massa específica. No caso de resfriamento lento, observam-se altos valores de massa específica para os agregados siderúrgicos e as escórias siderúrgicas.

O ensaio de absorção e massa específica atendeu as orientações da norma NM 53 (ABNT, 2009). Obteve-se com este ensaio a massa saturada superfície seca (m_s) e a massa seca (m) das ATLD, BNTLD e CNTAF. Por meio dessas massas, calculou-se a absorção $-a$, em percentagem, com uma casa decimal:

$$a = \frac{m_s - m}{m} \cdot 100 \quad (3.3)$$

A absorção indica a quantidade de água nos poros permeáveis das amostras. Adotou-se o valor resultante da média entre os valores obtidos por cada amostra após a realização de três ensaios.

Obteve-se também a massa específica seca (ρ_a) das ATLD, BNTLD e CNTAF pela relação

⁶ Dimensão máxima característica correspondente à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta uma percentagem retida acumulada, igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

entre a massa seca (m) das A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} e seu volume (V), excluindo-se os poros vazios permeáveis, dada por:

$$r_d = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{m_s - m_h}{\rho_w} + \frac{m}{\rho_s}} \quad (3.4)$$

onde ρ_w é a massa específica da água [ML^{-3}]; (m_h) a massa hidrostática ou submersa das A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} . Para parametrizar os resultados obtidos nesta Tese, utilizou-se os limites descritos pelas normativas:

- EM 260 (DNER, 1994), recomendam para escórias de alto forno a absorção entre 1% a 3% e a massa específica entre 2.000 kg/m³ a 3.000 kg/m³;
- EM 262 (DNER, 1994), recomendam para escórias de aciaria a absorção entre 1% a 2% e a massa específica entre 3.000 kg/m³ a 3.500 kg/m³.

Outras normativas recomendam limites diferenciados as normas do DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagens):

- A norma japonesa A 5015 (JIS, 1992) prevê para camadas granulares: absorção de água inferior a 3% e massa específica superior a 2.450 kg/m³.
- A NBR 7418 (ABNT, 1987) recomenda que para o uso do agregado siderúrgico em lastros ferroviários, a absorção não deva ser superior a 1%.

3.2.2.3 Massa Específica dos Grãos Sólidos

A massa específica dos grãos sólidos é a relação entre a massa das partículas sólidas e o volume dos sólidos. Varia pouco de solo para solo, é função dos minerais constituintes e da porcentagem de cada um deles nas amostras. Por si só, não permite identificar o solo em questão, mas é necessário para caracterizá-lo quanto aos seus valores de índices físicos.

Através da metodologia descrita na norma D 5550 (ASTM, 2014) obteve-se os valores de massa específica dos grãos sólidos (ρ_s) das A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} . Utilizou-se o equipamento *Penta Pycnometer*, modelo *Pentapyc 5200* da *Quantachrome Corporation*, com aquisição automática a partir do software do equipamento *Pentapyc 5200e V 4.01*, que se encontra no Laboratório de Geotecnia da UnB (ENC/UnB). Na Figura 3.8 apresenta-se o equipamento no momento da realização do ensaio.



Figura 3.8 - Pentapyc 5200e

Com o resultado da massa específica dos grãos sólidos (ρ_s) [ML^{-3}] obtida pelo *Penta Pycnometer*, obteve-se a densidade relativa dos grãos sólidos (G_s), das A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} , através da Equação 3.3:

$$G_s = \frac{r_s}{r_w} \quad (3.5)$$

onde (ρ_w) é a massa específica da água $[ML^{-3}]$.

3.2.2.4 Massa Unitária Seca

A massa unitária de um material é a propriedade que reflete a compacidade do material, dependendo de como os grãos se arranjam, resultará em uma maior ou menor compacidade. Foi utilizada como medida indireta da quantidade de vazios presentes entre os grãos das ATLD, BNTLD e CNTAF expressa pelo índice de vazios.

A massa unitária pode ser obtida para o estado solto e o estado compacto da amostra. Nesta Tese, obteve-se somente a massa unitária seca no estado solto das ATLD, BNTLD e CNTAF, uma vez que, para o objetivo desta pesquisa, o material utilizado na drenagem subterrânea é compactado apenas pelo processo de energia de deposição.

A massa unitária seca no estado solto das ATLD, BNTLD e CNTAF atendeu as orientações da norma NM 45 (ABNT, 2006), “método C - massa unitária do material no estado solto”. Define-se massa unitária como a relação entre a massa da amostra lançado no recipiente e o volume desse recipiente.

Devido ao tamanho característico dos grãos, 25 mm e 50 mm como apresenta na Figura 3.9, necessitou-se confeccionar recipientes especiais que atendessem as normativas deste ensaio.

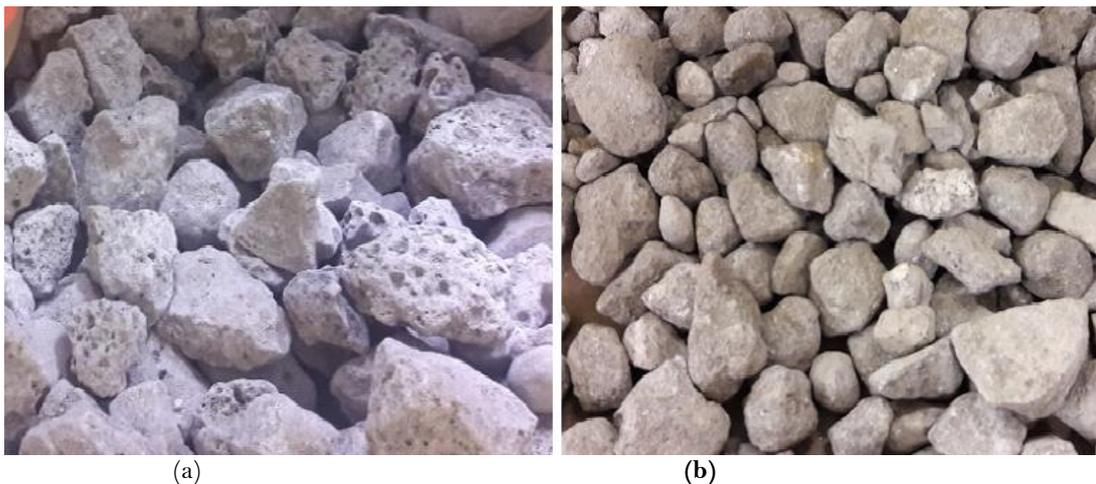


Figura 3.9– Amostras das faixas granulométricas: a) com dimensão característica 50 mm; b) com dimensão característica 25 mm

Os recipientes possuem as seguintes dimensões:

- a) Para grãos com diâmetro máximo característico de 50 mm – capacidade do recipiente de $0,03 \text{ m}^3 (V_r)$, com altura média de 0,31 m e diâmetro médio de 0,35 m.
- b) Para grãos de diâmetro máximo característico de 25 mm – capacidade do recipiente de $0,015 \text{ m}^3 (V_r)$, com altura média de 0,31 m e diâmetro de 0,14 m.

Determinou-se a massa unitária seca no estado solto $(\rho_{ap})[ML^{-3}]$, pela relação entre a diferença a massa do recipiente cheio $(m_{ra}) [M]$ e a massa do recipiente vazio $(m_r)[M]$ e, o volume do recipiente $(V_r)[L^3]$, descrito na formulação a seguir:

$$r_{ap} = \frac{m_{ra} - m_r}{V_r} \quad (3.6)$$

Conforme a norma, registrou-se a massa do recipiente vazio. A seguir, encheu-se o recipiente até transbordar, utilizando-se uma concha. Despejou-se a amostra de uma altura de 0,05 m da borda superior do recipiente. Rasou-se a amostra de forma a coincidir com a borda superior do recipiente.

Os resultados deste ensaio, foram parametrizados pelas normativas:

- EM 260 (DNER, 1994), recomendam para escórias de alto forno a massa unitária entre 1110 kg/m³ a 1.240 kg/m³;
- EM 262 (DNER, 1994) – recomendam para escórias de aciaria a massa unitária entre 1.500 kg/m³ e 1.700 kg/m³.

Outras normativas recomendam limites diferenciados as normas do DNER (Departamento Nacional de Estradas e Rodagens):

- A norma japonesa A 5015 (JIS, 1992) prevê valores para massa unitária do agregado siderúrgico seco igual ou superior 1.500 kg/m³.

Resultados obtidos por outros pesquisadores:

- Polese (2007) e Rodrigues (2007) encontraram para massa unitária de aciaria LD, valores entre 1.999 kg/m³ a 2.210 kg/m³;
- Almeida (2009) encontrou para escória de AF, valores de 1.710 kg/m³.

3.2.2.5 Índice de Vazios

O índice de vazios é parâmetro governante da permeabilidade pois se relaciona com a porosidade do material percolado. Um acréscimo nesse índice resulta em um aumento da condutividade hidráulica. Com este parâmetro, obteve-se o valor da porosidade do material, que indica o percentual de massa sólida e de vazios que a amostra possui e, relaciona com a menor ou maior facilidade de percolação do fluido.

Obteve-se o índice de vazios (e) das amostras, pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Com os valores obtidos nos ensaios anteriores, massa específica seca (ρ_d) [ML⁻³]; massa unitária da amostra seca no estado solto (ρ_{ad}) [ML⁻³]; adotando a massa específica da água em 1000 kg/m³ (ρ_w) [ML⁻³], obteve-se o parâmetro indiretamente, pela formulação:

$$e = 100 \frac{\rho_d \cdot r_w - r_{ap} \rho_w}{r_d \cdot r_w} \quad (3.7)$$

Na seqüência obteve-se a porosidade máxima em $\%(n)$:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (3.8)$$

3.2.2.6 Permeabilidade Hidráulica à Carga Constante

Com este ensaio obteve-se a condutividade hidráulica (k) das amostras, parâmetro físico que conferirá se, as amostras pesquisadas possuem capacidade drenante suficiente, para atender o propósito da pesquisa. Este ensaio baseou-se na norma NBR 13292 (ABNT, 1995) e devido as características do material e o objetivo da pesquisa, o ensaio utilizou o permeâmetro construído e descrito neste Capítulo, no subitem 3.1. Para atender as especificações dimensionais das amostras propôs alteração na metodologia da norma citada nos seguintes itens

- Utilizou grãos com diâmetros acima de 19 mm (0,075 mm a 50 mm);
- Não se utilizou camada granular ou contrapeso com objetivo de comprimir levemente o material subjacente;
- Utilizou-se peneiras superiores a 19 mm (0,075 mm a 50 mm);
- O corpo de prova (CP) não foi compactado por sapata metálica, sendo que a

compactação se deu por deposição do material;

- À saturação da amostra não utilizou bomba de vácuo;

Cada amostra (A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF}) foi ensaiada nas faixas granulométricas C1 e C4 (colchão drenante) e C12 (dreno longitudinal profundo) e seguiu-se os seguintes passos:

- Definiu-se a altura do CP das faixas granulométricas C1 e C12, de 0,60 m, e para a faixa C4, a altura da amostra de 0,40 m (recomendado pela NBR 13292 (ABNT, 1995)).
- Com os valores da massa unitária seca no estado solto, do índice de vazios máximo (e), da porosidade máxima (n), calculou-se o volume de sólido da amostra (V_s) [L^3] a ser ensaiada:

$$V_s = V_{ap}(1 - n) \quad (3.9)$$

$$V_{ap} = \frac{\pi d^2}{4} h \quad (3.10)$$

onde V_{ap} , o volume da amostra no permeâmetro; d , o diâmetro do permeâmetro [L]; h , altura da amostra no permeâmetro [L].

A seguir, obteve-se a massa do CP, a ser ensaiada (M_s):

$$M_s = \rho_s V_s \quad (3.11)$$

onde ρ_s , massa específica dos grãos sólidos [ML^{-3}]; V_s , volume de sólido da amostra [L^3].

Com o valor da massa do CP, prosseguiu-se com o ensaio:

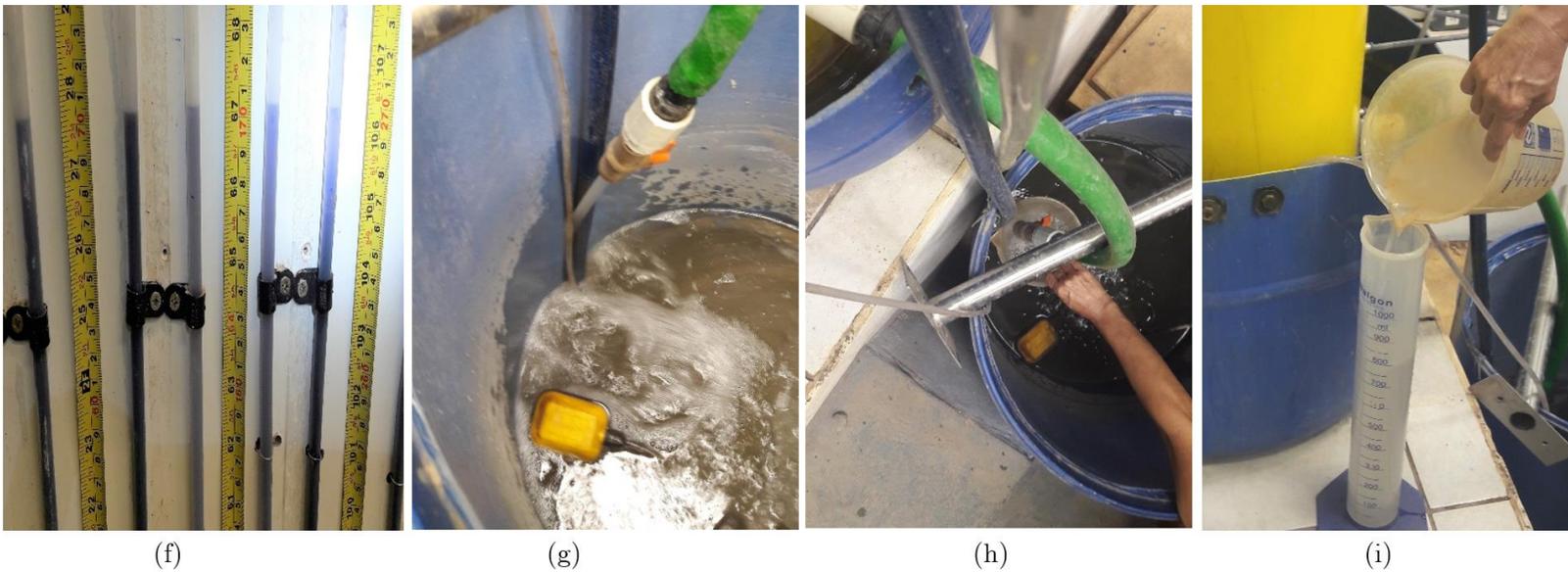
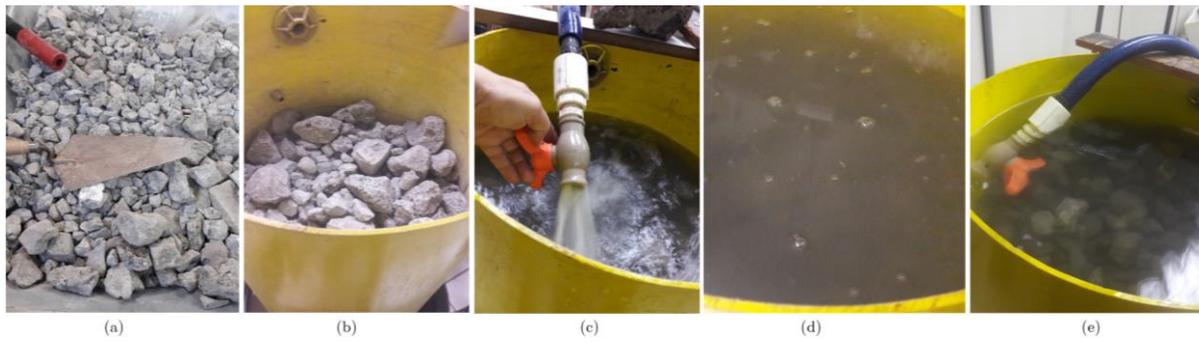
- Definiu-se a altura útil do CP no permeâmetro, mediu-se de eixo do registro inferior (saída do fluxo) até obter a altura de 0,60 m (C1 e C12) ou de 0,40 m altura, para a faixa C4;
- Inseriu-se a amostra, compactada por energia de deposição, a uma altura de lançamento de 0,10 m da extremidade da concha até o nível a ser lançada;
- Espalhou-se a amostra, sem aplicar energia de compactação sobre a mesma, por se tratar de dimensões características de 25 mm e 50 mm;
- Após inserir toda a amostra no permeâmetro, acionou-se o sistema hidráulico, com somente o registro de alimentação do permeâmetro aberto (registro de entrada de água);
- Após cobrir toda a amostra, com uma lâmina d'água em torno de 0,05 a 0,10 m, desligou-se o sistema hidráulico e a amostra passou por um período de saturação;
- Após o período de saturação acionou-se o sistema hidráulico, porém, com os registros de entrada e saída de água abertos;
- Abriu-se o registro de saída em sua capacidade máxima. Por outro lado, controlou-se a abertura do registro de entrada d'água. Desse modo, obteve-se a altura constante do nível da água e as medidas dos volumes do fluxo percolado pela amostra.
- Obteve-se a altura constante do nível d'água, ao observar no painel dos piezômetros, o momento em que o nível d'água, nas mangueiras deixaram de oscilar. Mediu-se no interior do permeâmetro, a altura do nível d'água.
- As medidas dos volumes escoados, mediu-se com o auxílio de um cronômetro e de uma proveta de 2.000 ml. Acionou-se o cronômetro e, simultaneamente, inseriu o *becker* para coletar o volume escoado d'água, pelo registro de saída, em um determinado tempo. As etapas dos ensaios estão resumidas na Figura 3.10.

Na imagem 3.10, apresenta-se resumidamente, em nove passos, a sequência do ensaio de permeabilidade e descritos anteriormente:

- Figura 3.10a, a amostra é homogeneizada antes de ser inserida no permeâmetro, para garantir que todos os diâmetros da faixa granulométrica formem o corpo de prova;
- O CP inserido no permeâmetro, após a homogeneização, está apresentada na Figura 3.10b, respeitando a altura de deposição;
- Com o CP no permeâmetro, iniciou-se a etapa de enchimento com água Figura 3.10c;
- Nas Figuras 3.10d e 3.10e apresentam-se a saturação da amostra, em dois momentos, o primeiro em que o ar está sendo expulso dos vazios da amostra, e o segundo, onde os vazios estão preenchidos pela água;
- Após o período de saturação, imagem 3.10f, os registros são abertos e inicia-se a percolação d'água no CP;
- Na Figura 3.10g, apresenta-se o fluxo estabilizado, o que se visualizou nos piezômetros;
- As últimas etapas do ensaio, Figuras 3.10h e 3.10i, ocorre a coleta e a leitura do volume percolado.

Com esses valores e aplicando-se a Lei de *Darcy*, obteve-se a condutividade hidráulica para cada uma das amostras e faixas granulométricas, corrigidos em relação a temperatura do fluido escoado para a viscosidade da água na temperatura a 20°C.

Para caracterização física, não há normativa que oriente os limites dos parâmetros para uso em drenagem subterrânea. Desse modo optou-se, por associar os valores paramétricos com as normas definidas para o tipo do material em estudo, porém, para aplicação em pavimentos rodoviários. Contudo, observa-se que, e.g., a massa específica seca, absorção, massa unitária são negligenciáveis uma vez que, fundamentalmente interessa em qualquer drenagem o fluxo e a diminuição deste ao longo do tempo de utilização de qualquer dispositivo de drenagem.



3.10 – Etapas do Ensaio: a) homogeneização da amostra; b) amostra no permeâmetro; c) enchimento do permeâmetro com água; d) e e) saturação da amostra; f) percolação do fluxo de água; g) estabilização do nível d'água nos piezômetros; h) coleta do volume escoado; i) leitura do volume escoado.

3.2.2.7 Potencial de Expansão

Para avaliar o potencial de expansão, realizou-se o experimento seguindo a orientação da Norma ME 113 (DNIT, 2009), adaptada do método PTM 130 (*Pennsylvania Test Method* No. 130: *Evaluation of Potential Expansion of Steel Slags*).

Preparou-se inicialmente a amostra para o ensaio de expansão, conforme prescrito no item 4 da norma. Devido ao objetivo da Tese, uso do agregado como material drenante, propôs-se alteração no método de ensaio. O prescrito no item 5.1 da referida norma, que descreve sobre a compactação da amostra, a obtenção da umidade ótima e a densidade máxima, não são relevantes nesta pesquisa uma vez que, a colocação do material drenante nos dispositivos de drenagem, são compactados por deposição e, portanto, esses parâmetros não foram considerados para moldar os corpos de prova (CP).

Inseriu-se as amostras no cilindro metálico como apresenta-se na Figura 3.11, etapas de montagem do corpo de prova.

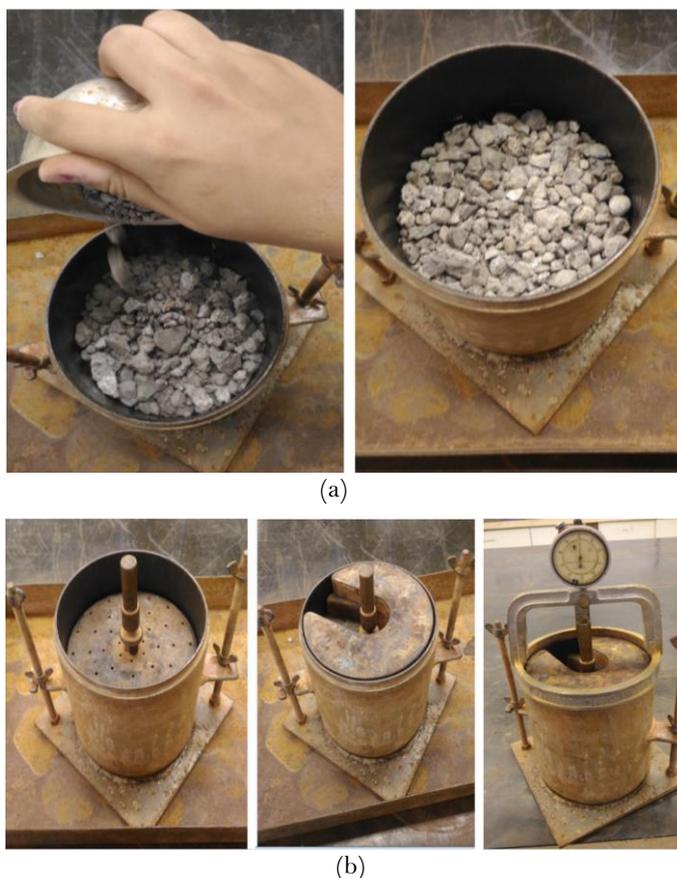


Figura 3.11 - Preparação CP: a) Colocação da amostra no recipiente metálico; b) etapas de montagem do corpo de prova

Observa-se na Figura 3.11a, que a amostra está sendo inserida no cilindro metálico, sem compactação mecânica, mas por deposição. Na Figura 3.11b, apresenta-se a sequência da montagem do cilindro metálico.

A sequência do ensaio, descreve-se a seguir:

- Moldou-se três corpos de prova por amostra, subitem 4.1 e 4.2 da norma, sem compactar;
- Levou-as em seguida à estufa, em temperatura $71 \pm 3^\circ\text{C}$, submersas em recipientes com temperatura da água em 38°C ;

- Após 30 minutos, realizou-se a primeira leitura, e as mesmas foram continuadas diariamente, por um período de sete dias;
- Antes de realizar as leituras, completava-se o nível da água nas amostras, suficiente para mantê-las submersas e, somente após duas horas da adição da água, realizava-se a leitura;
- Após decorrer sete dias do ensaio, retirou-se parte da água, deixando a amostra saturada, mas não submersa;
- Realizou-se durante os sete dias seguintes, leituras diárias.
- Duas horas antes de realizar as leituras adicionou-se água no CP mantendo-os saturados.

Na Figura 3.12. apresenta-se os corpos de prova inseridos na estufa. Observa-se na Figura 3.12a, que o CP se encontra na estufa totalmente submerso e, na Figura 3.12b, parte da água foi retirada, mantendo o CP saturado.

O cálculo do percentual de expansão volumétrica, após 14 dias de leitura, obteve-se pela formulação:

$$\%Exp. = \frac{L_f - L_i}{h_i} \quad (3.12)$$

onde, $\%Exp.$ a porcentagem de expansão volumétrica do agregado siderúrgico [%]; L_f a leitura do extensômetro no final do ensaio em mm [L]; L_i a leitura do extensômetro no início do ensaio em mm [L] e, h_i a altura inicial da amostra em m [M].

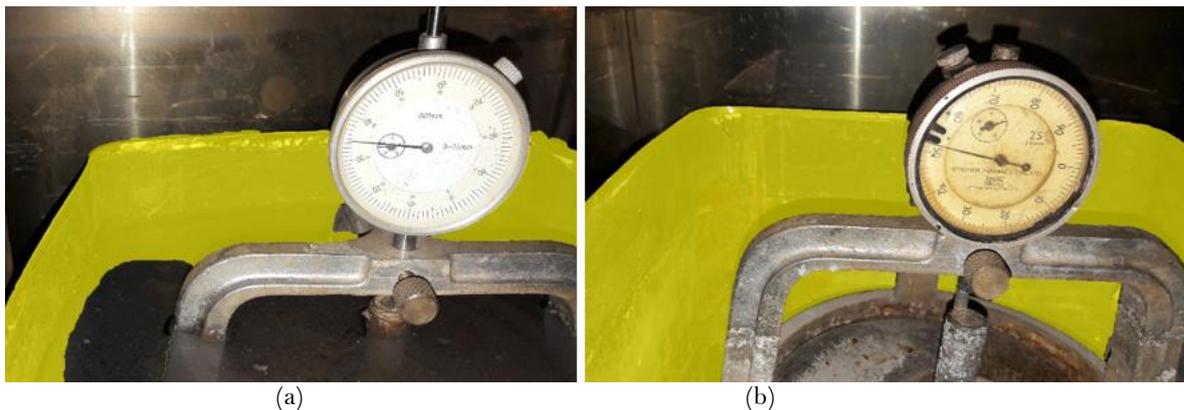


Figura 3.12 – CP na estufa: a) submerso em água, na estufa; b) saturado

Após os 14 dias, o limite de expansão volumétrica, permitido pelo ES 416 (DNIT, 2017) é 3%, para expansão acumulada. Portanto o lote de escória de aciaria é aceitável quando sua expansão verificada pelo método PTM-130/78, for inferior ao limite de 3%.

A norma japonesa A 5015 (Jis, 1992) *apud* Fernandes (2010) recomenda para camadas granulares, limite inferior a norma brasileira, permite expansibilidade máxima de 2% aos 10 dias.

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

O ensaio de caracterização mineralógica, Difratomia de raios X -DRX, foi realizado no Laboratório do Instituto de Geociências (IG/UnB).

O objetivo desta análise é identificar como os elementos químicos presentes nas amostras estão combinados. Este ensaio não apresenta resultados quantitativos, mas avalia as maiores incidências observadas na difração, com ocorrências acima de 5%.

A técnica identifica as fases mineralógicas presentes nas amostras, considerando que,

cada tipo de cristal, corresponde a uma série de ângulos de difração que lhe são característicos. A identificação das fases é baseada na aplicação da Lei de Bragg, Equação 3.13:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.13)$$

onde, n é o número inteiro de ondas (1, 2, 3, 4...); λ o comprimento de onda dos Raios X; d a distância entre os planos reticulares paralelos [Å]; θ é o ângulo que ocorre a difração, ângulo de incidência (ângulo de Bragg).

Os grãos das amostras foram moídos e pulverizados até o tamanho menor que 0,075 mm, retidos na peneira 230. Em seguida, passaram por processos de secagem, destorroamento e peneiramento (material passante na #200). Na sequência, prepara-se as lâminas com o material levemente prensado. A velocidade adotada no ensaio foi de 1,2 graus/minutos com duração de 70 minutos.

Identificou-se as fases cristalinas, por meio de comparação com um banco de dados. Os dados resultantes apresentam-se em difratogramas que exibem os picos característicos correspondentes aos resultados do processo de difração de Raios X, em planos cristalográficos dos materiais analisados. Correlaciona-se com a posição, intensidade e forma da estrutura cristalina, e, dessa maneira, identifica-se a composição mineralógica dos materiais pesquisados.

Utilizou-se um Difratorômetro da marca Rigaku (Figura 3.13) modelo D/MAX-B Séries, intervalo de varredura de 2 a 70°, radiação de 40 kV e 15 mA e tubo de cobre.



Figura 3.13 - Difratorômetro de Raios X

3.2.4 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

A caracterização química das amostras ocorreram nos seguintes laboratórios: na Soloquímica de Brasília, o ensaio de capacidade de troca catiônica (CTC); na Central Analítica, no Instituto de Química (IQ/UnB), o ensaio análise térmica (TG e DTG) e de fluorescência de Raios X (FRX); no Laboratório de Geochronos (IG/UnB), o ensaio de microscopia de varredura eletrônica (MEV/EDS); no Laboratório de Análise de Água (ENC/UnB), o ensaio de análise das águas; no Laboratório de Química do Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), o ensaio resistência à sulfatos e de teor de cal livre, em Cuiabá e o de potencial de expansão no Laboratório de Geotecnia da UnB.

3.2.4.1 Fluorescência de Raios X - FRX

Este ensaio químico tem a capacidade de quantificar os elementos contidos em uma amostra por meio da exposição de Raios X, na superfície do material e, a consequente avaliação dos raios fluorescentes emitidos. Constitui-se uma metodologia fundamentada na mensuração da intensidade dos Raios X característicos, emitidos pelos elementos que fazem parte do material.

Dessa maneira, os Raios X emitidos a partir de uma fonte radioativa estimulam as partes constituintes que, por sua vez, lançam linhas espectrais com energias características do elemento e, cujas intensidades estão correlacionadas com a concentração do elemento na amostra. Utilizou-se o equipamento da Marca Shimadzu, Modelo EDX 720HS (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Expectômetro de fluorescência de Raios X.

Preparou-se as ATLD, BNTLD e CNTAF, da seguinte forma:

- após moídas e peneiradas, utilizou-se 20g retida na peneira 230;
- aqueceu-as ao forno a temperatura entre 100 a 120 °C;
- adicionou 0,6 g de ácido estuário - $C_{18}H_{36}O_2$ (que atua como cola para fixar a amostra);
- pulverizou-as, por aproximadamente 4 minutos, com a finalidade de misturar o material da amostra com o ácido estuário;
- em seguida, prensou-se a mistura na forma de pastilha.

3.2.4.2 Microscopia de Varredura Eletrônica – MEV e Elétrons de Dispersão Espalhados - EDS

A microscopia eletrônica de varredura é um método que obtêm informações estruturais e químicas do material em análise. Esta caracterização qualitativa, da morfologia de partículas das amostras em estudo realizou-se empregando-se um microscópio eletrônico de varredura, marca FEI Quanta 450, EDS EDAX.

Além de identificar o mineral, o equipamento permite o mapeamento da distribuição de elementos químicos por minerais, gerando mapas composicionais de elementos desejados. A composição química de um ponto ou região da superfície, possibilita identificar, praticamente, qualquer elemento presente.

Para realizar o ensaio as amostras tornam-se condutoras em presença do carbono. Para

tanto, são metalizadas com grafites, por uma fita de dupla face. Através desse processo, as amostras passam a ser condutoras e é possível realizar o ensaio. Elas são bombardeadas por elétrons e feitas fotomicrografias.

Pelos elétrons secundários, obtém-se as imagens topográficas da superfície da amostra, com alta resolução. Os elétrons retroespalhados, fornecem as imagens características de composição da amostra. Dividiu-se as amostras em áreas. Em cada área, escolheu-se pontos a serem analisados para maior informação do material em análise.

3.2.4.3 Termogravimetria - TG/DTG

Os testes foram conduzidos por termogravimetria dinâmica, ou seja, as amostras foram aquecidas em ambiente cuja temperatura varia a uma taxa pré-determinada, preferencialmente a uma razão linear. O ensaio realizou-se pelo equipamento da marca *Shimadzu*, modelo DTG-60H. As condições de ensaio empregadas foram a taxa de aquecimento de 10°C por minuto, atmosfera dinâmica de N₂ e oxidante e, temperatura máxima de 1000°C.

3.2.4.4 Resistência à Sulfatos

O objetivo do ensaio é determinar a resistência à desintegração dos materiais sujeitos à ação do tempo, pelo ataque de soluções saturadas de sulfato de sódio. Seguiu-se as orientações da norma ME 089 (DNER, 1994).

Submeteu-se as amostras a cinco ciclos de ensaio para maior precisão no resultado, e ocorreu nos intervalos das partículas retidas nas seguintes peneiras: 63 mm a 37,5 mm; 37,5 mm a 19 mm e, 19 mm a 9,5 mm, para as três amostras da pesquisa (duas amostras do tipo LD e uma amostra do tipo AF). Examinou-se as amostras de maneira qualitativa e quantitativa, após finalização dos ciclos do ensaio, conforme descrito na normativa.

Para parametrizar os resultados obtidos nesta Tese, utilizou-se os limites descritos pelas normativas:

- EM 260 (DNER, 1994) – recomenda para as escórias de alto forno o limite máximo de perda de massa a 5%;
- EM 262 (DNER, 1994) – recomenda para as escórias de aciaria o limite máximo de perda de massa a 5%.

3.2.4.5 Capacidade de Troca Catiônica - CTC

A CTC refere-se à capacidade de adsorção de cátions em uma amostra. Medida pela quantidade de cargas negativas dos elementos químicos presentes no material. Relaciona-se diretamente com a formação de sais presentes no meio aquoso. Neste trabalho a CTC relacionou com a quantidade de sais presentes no meio aquoso, proveniente da presença de carbonatos.

Por exemplo, os solos tropicais apresentam maior teor de alumínio, o que lhes conferem uma capacidade de troca catiônica baixa. As argilas com alta reatividade podem reter grandes quantidades de cátions e, podem apresentar uma CTC alta devido a decomposição da matéria orgânica. A CTC varia com o tipo de solo, para os solos ácidos e arenosos a CTC é baixa, devido ao escasso conteúdo de matéria orgânica evidenciada por uma maior lixiviação de cátions.

A determinação da capacidade de troca catiônica, obedeceu ao Manual de Métodos de Análises de Solos da EMBRAPA (EMBRAPA, 2011).

Nestes ensaios as amostras analisadas são mantidas em seu pH natural. O procedimento consiste basicamente na saturação de uma amostra de 1,0 g de material com a solução de cloreto de bário, BaCl₂. Adicionada à solução, o material é agitado e centrifugado, e o sobrenadante é recolhido.

O material é então lavado duas vezes com a solução de BaCl₂ e desse modo, garante-se a completa substituição de todos os elementos, antes contidos na superfície do material por bário (Ba²⁺) e cloro (Cl⁻¹). Após a segunda lavagem com BaCl₂ diluído, a amostra úmida é pesada para determinação do MgSO₄ (sulfato de magnésio), penetrante que será adicionado na próxima etapa da análise.

Adiciona-se então MgSO₄ e ajusta-se para 0,3 μS/cm a condutividade elétrica da solução, com a finalidade de garantir a troca iônica com agitação por 8 horas. Realiza-se após o procedimento a pesagem dos tubos para determinar o volume de MgSO₄ ou água adicionada.

Novamente as amostras são centrifugadas e o sobrenadante é retirado para determinação do Cl⁻ e Mg²⁺. O Mg²⁺ é determinado por espectrometria de emissão óptica com plasma (ICP-OES)⁷ e, a quantidade adsorvida, é calculada pela diferença entre o total adicionado, que são o volume inicial e o volume adicionado para ajuste da condutividade, e o valor obtido na leitura do sobrenadante.

3.2.4.6 Teor de Óxido de Cálcio Livre - CaO_{livre}

Este ensaio determina o percentual de CaO_{livre} presente nas amostras, fundamental para analisar a possibilidade de desencadear fenômenos prejudiciais ao objetivo da Tese.

Para avaliar a presença da CaO_{livre}, seguiu-se o prescrito da norma NM 13 (ABNT, 2012), norma específica para cimentos, mas que vem sendo aplicada para o material em pesquisa. O método não diferencia o CaO do Ca(OH)₂ e não determina o cálcio que está quimicamente combinado em solução sólida com o FeO e o MnO ou na forma de silicatos (SOUSA, 2007).

A norma específica a avaliação do óxido de cálcio livre por dissolução em etilenoglicol e, posterior titulação em solução padronizada de ácido clorídrico (HCl), adotando-se também um indicador de pH.

Triturou-se 1,2 g da amostra em almofariz de ágata por 5 minutos. Levou-se em torno de 1 g da amostra triturada para um recipiente (*Erlenmeyer*) com capacidade de 125 ml. Adicionou-se aproximadamente 30 ml de etilenoglicol e algumas pérolas de vidro. Vedou-se o recipiente (*Erlenmeyer*) e o agitou. Em seguida, aqueceu-o em banho-maria à temperatura entre 65 a 70 °C por aproximadamente 30 min. Agitou-o de 5 minutos em 5 minutos manualmente.

Após esse procedimento, filtrou-se em funil de *Buchner* de placa perfurada provido de um papel de filtração média, a baixa pressão. Recolheu o filtrado em frasco *Kitassato* de 250 ml. Lavou-se duas a três vezes o precipitado, com aproximadamente 10 ml de etilenoglicol aquecido a cada lavagem.

Adicionou-se ao filtrado três a cinco gotas de solução mista de indicadores e, titulou-o em seguida com solução padronizada de HCl (0,1 mol/l), até que a mudança de cor de verde para rosa. A Figura 3.15 apresenta a sequência do ensaio.

Obtém-se o resultado em (%) pela expressão:

$$CaO_{(livre)} = \frac{25 \cdot F \cdot V \cdot 0,002804 \cdot \frac{0}{0}}{m} \cdot 100 \quad (3.14)$$

onde, *F* fator de HCl obtido pela razão 25/*V*, sendo *V* o volume de solução de HCl gasto na titulação [M³], *m* a massa de amostra triturada [M]. Para as escórias, não há normativa que limite o percentual do CaO_{livre}. A parametrização deste ensaio, utiliza-se o prescrito para a

⁷ Técnica analítica que quantifica elementos (metais, semimetals e terras raras) em diversos tipos de amostras. Baseia-se na detecção da radiação eletromagnética emitida por átomos neutros ou íons excitados nas regiões do espectro eletromagnético visível e ultravioleta.

presença de cal livre no cimento, limitado a 2%.

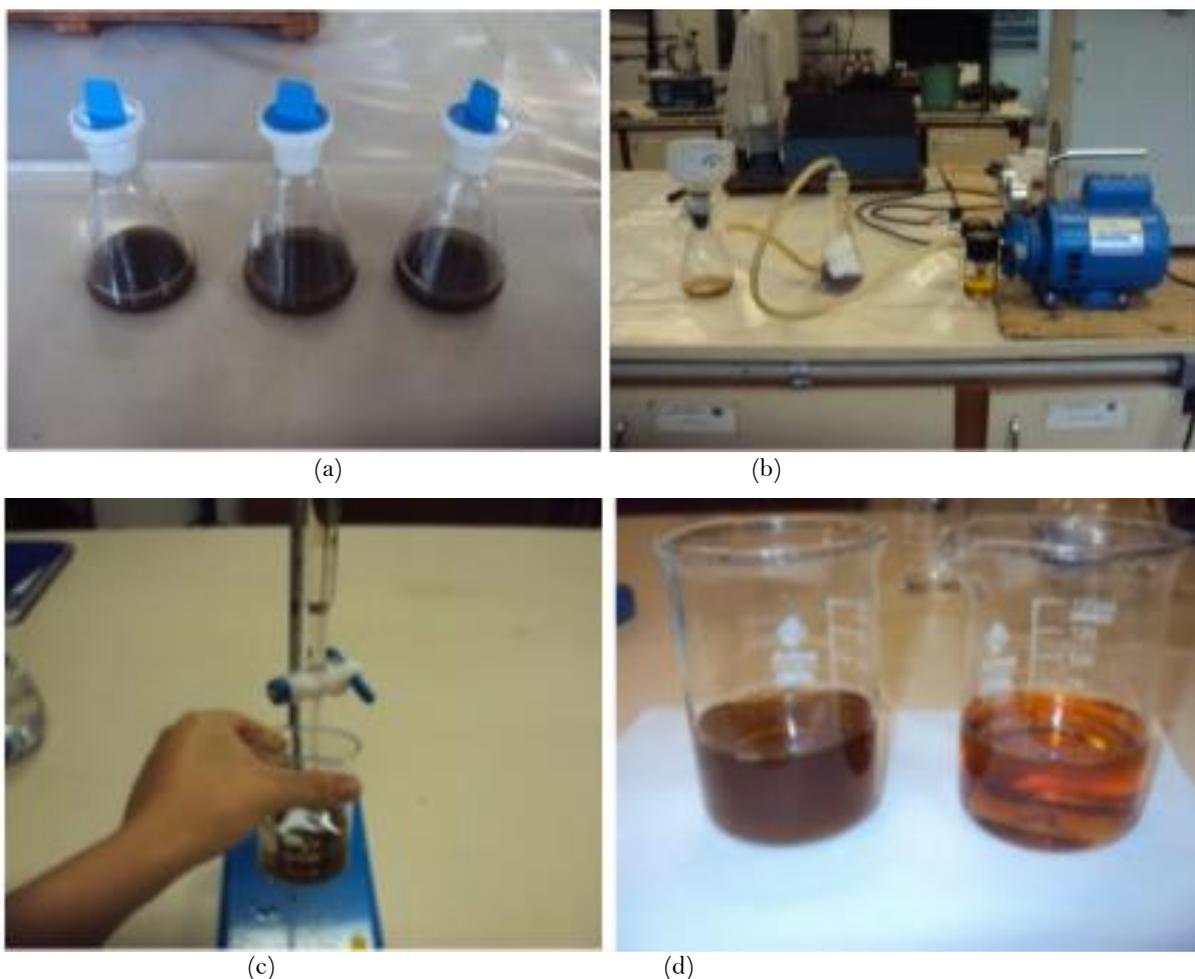


Figura 3.15– Teor de $\text{CaO}_{\text{livre}}$: a) amostra após aquecimento em banho-maria; b) amostra filtrada; c) amostra titulada; d) ensaio finalizado

3.2.4.7 Análise das Águas

Além dos ensaios citados, realizou-se a imersão das amostras em água por um período, compreendido entre 10 de julho de 2017 até 07 de dezembro de 2017. O intuito desta análise é conhecer o comportamento das amostras em meio aquoso, por um determinado período. As amostras foram imersas em três tipos de água: água normal (torneira), água destilada e água ácida.

Utilizou-se para cada tipo de amostra, 9 *beckers*, sendo:

- 03 *beckers* de 2000 ml com amostra global (um para cada tipo de água);
- 03 *beckers* de 1000 ml com amostra de partículas grosseiras, compreendendo diâmetro de 50 mm a 25 mm (um para cada tipo de água);
- 03 *beckers* restantes com a amostra fina, compreendendo 19 mm até 0,075 mm, como nos anteriores, um *becker* para cada tipo de água, Figura 3.16.

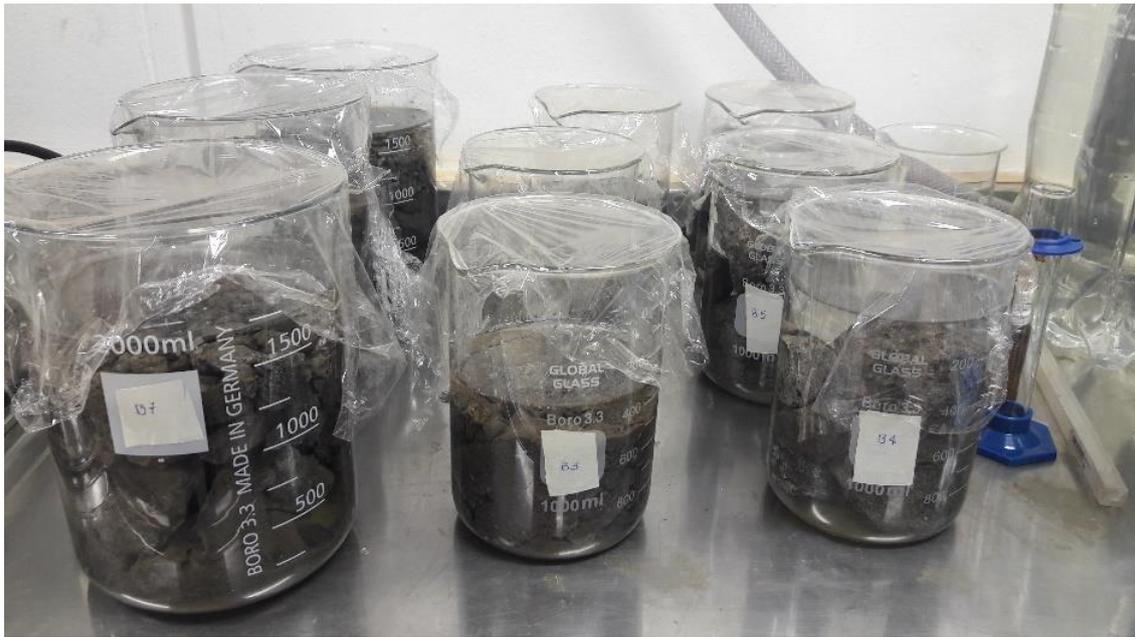


Figura 3.16– Amostras imersas nos *beckers*

Inicialmente, analisou-se a água utilizada para a imersão das amostras, em dois períodos, o primeiro após 10 dias de imersão e a segunda análise após 148 dias. Analisou-se a água em relação a sua dureza total, dureza cálcica, alcalinidade total, alcalinidade parcial e ferro total. Obteve-se o pH e a condutividade elétrica por amostra e tipo de água. A dureza magnésiana obteve-se por diferença entre a dureza total e a cálcica.

A coleta ocorreu por tipo de água e tipo de amostra, *e.g.*, a água dos *beckers* 1, 4 e 7 (ATLD água torneira) formou uma única amostra de água analisada, obteve-se dessa forma nove amostras. A distribuição das amostras imersas está apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Identificação dos *beckers*

Tipo amostra	Número Becker	Fração amostra	Tipo água
ATLD	1	Fina (19 a 0,075)	Torneira
	2		Destilada
	3		Ácida
	4	Grossa (50 a 25)	Torneira
	5		Destilada
	6		Ácida
	7	Global (50 a 0,075)	Torneira
	8		Destilada
	9		Ácida
BNTLD	10	Global (50 a 0,075)	Torneira
	11		Destilada
	12		Ácida
	13	Fina (19 a 0,075)	Torneira
	14		Destilada
	15		Ácida
	16	Grossa	Torneira

C _{N_{TAF}}	17	(50 a 25)	Destilada
	18		Ácida
	19	Global (50 a 0,075)	Torneira
	20		Destilada
	21		Ácida
	22	Fina (19 a 0,075)	Torneira
	23		Destilada
	24		Ácida
	25	Grossa (50 a 25)	Torneira
	26		Destilada
27	Ácida		

Determinou-se a dureza da água pelo método Complexométrico com EDTA (ácido etilodiaminotetrácetico), descrito a seguir:

a) Dureza total - D_T

- Inseriu a solução EDTA, (0,01 mol/l), na bureta e, preparou-se a prova em branco, com 50 ml de água destilada em um recipiente (*erlenmeyer*) de 250 ml.
- Em seguida, colocou-se a mesma quantidade de amostra (50 ml) em outro *erlenmeyer*. Em cada *erlenmeyer*, adicionou-se 2 ml do tampão de amônia (NH₄Cl/NH₄OH).
- Adicionou-se, em seguida, 0,20 g de indicador sólido Preto de Eriocromo T em cada *erlenmeyer*. Ao surgir a coloração avermelhada, iniciou-se a titulação EDTA.
- Titulou-se a prova em branco e a amostra partindo-se do zero da bureta, com a adição vagarosa do titulador EDTA. Finalizou-se a titulação ao mudar a cor avermelhada para azul.
- Registrou-se o volume do EDTA (ml) gasto na titulação da amostra e do branco. O cálculo da dureza total (D_T) em (CaCO₃/l) obteve-se pela expressão:

$$D_{T(CaCO_3/l)} = \frac{A.B.1000}{V} \quad (3.15)$$

onde A é o volume do EDTA na titulação, obtido pela diferença entre o volume gasto na amostra (ml) e o volume gasto no Branco do EDTA (ml); $B_{mgCaCO_3/l}$ equivale a 1 ml de titulador EDTA (padronização da solução EDTA) e V , o volume da amostra em (ml).

b) Dureza cálcica - D_{Ca}

- Inseriu o mesmo titulador (EDTA) (0,01 mol/l), na bureta e em seguida, colocou em um *erlenmeyer* 50 ml da amostra.
- Acrescentou-se na amostra 2 ml da solução de Na₄(OH) (1N) e, adicionou-se 0,2 g do indicador sólido de muxerita.
- Ao surgir a cor rosa, titulou-se até a mudança da cor para o roxo. Registrou-se o volume do EDTA gasto na titulação. A dureza cálcica, (D_{Ca}) em (CaCO₃/l)) foi obtida pela expressão:

$$D_{Ca(CaCO_3/l)} = \frac{A.B.1000}{V} \quad (3.16)$$

onde A é o volume EDTA gasto na titulação da amostra; $B_{mgCaCO_3/l}$, equivalente a 1 ml de agente titulador EDTA (padronização de solução EDTA) e V , o volume da amostra em ml. Na Figura 3.17 apresenta-se as imagens da titulação para obter a dureza da água.

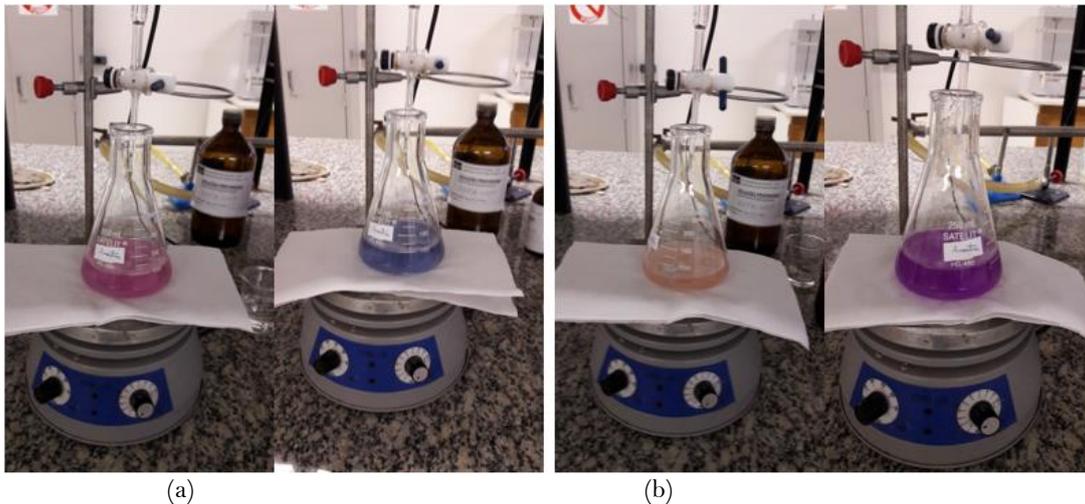


Figura 3.17– Titulação da amostra: a) dureza parcial da água; b) dureza total da água.

c) A Dureza magnésiana foi obtida pela diferença entre a dureza total e a dureza cálcica.

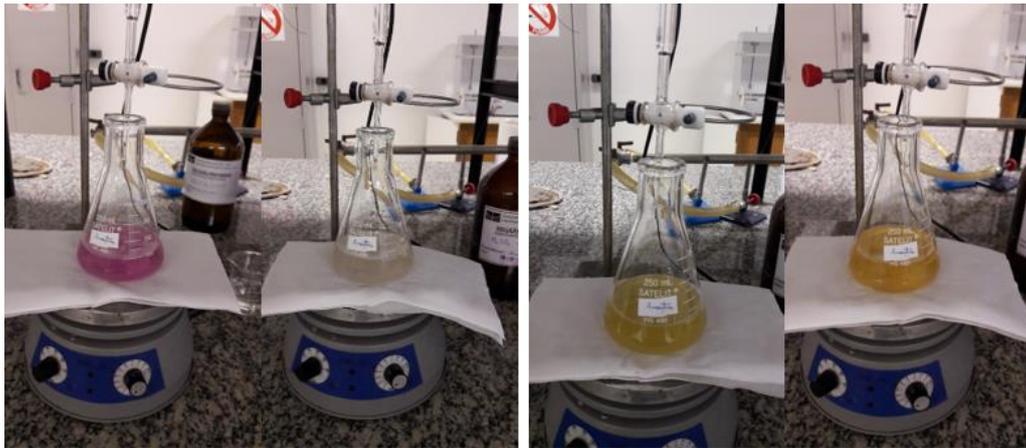
Obteve-se também, nesta análise, a alcalinidade total e parcial das águas, responsável pela formação de incrustações em tubulações. A determinação ocorreu, também, pelo método, Titulometria, descritos a seguir:

d)Alcalinidade parcial (A_p)

- Utilizou-se como titulador a solução de ácido sulfúrico 0,01 mol, H_2SO_4 (2N);
- Inseriu-se 100 ml da amostra em um erlenmeyer de 250 ml; adicionou-se 3 gotas do indicador fenolftaleína;
- Ao surgir a coloração rósea após a adição do indicador, iniciou-se a titulação até a mudança de cor para incolor;
- Anotou-se o volume (V_1) em ml [M^3], utilizado do titulador, que é equivalente a alcalinidade parcial A_p (mg/l de $CaCO_3$);
- A não ocorrência da cor rósea, indicou a inexistência da alcalinidade parcial da referida amostra.

e)Alcalinidade total (A_T)

- Adicionou-se na mesma amostra 4 gotas do indicador alaranjado de metila;
- Ao surgir a cor amarelada, prosseguiu com a titulação da amostra com a solução de H_2SO_4 (2N), até mudar para uma leve coloração alaranjada;
- Registrou-se o volume gasto do titulador, V_2 (ml) equivalente a alcalinidade total em mg/l de $CaCO_3$. Na Figura 3.18, apresenta-se a titulação para alcalinidade da amostra.



(a) (b)
Figura 3.18– Titulação da alcalinidade: a) parcial da água; b) total da água

O cálculo, realizou-se por:

$$A_P_{(mgCaCO_3/l)} = V_1 \cdot 10 \quad (3.17)$$

$$A_T_{(mgCaCO_3/l)} = V_2 \cdot 10 \quad (3.18)$$

Com os resultados, a alcalinidade foi expressa em hidróxido, carbonato e bicarbonato, seguindo a metodologia apresentada na Tabela 2.11, Capítulo 2 desta Tese.

f) Determinação de ferro

A determinação de ferro total das águas ocorreu pelo método macro, por meio do espectrofotômetro (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Espectrofotômetro

A reação da ortofenantrolina, com o ferro ferroso produziu um complexo avermelhado, como descrito a seguir:

- Adicionou-se em um *becker* de 100 ml, 50 ml da amostra e em outro, 50 ml de água destilada para a prova em branco;
- Adicionou 2 ml de HCl (ácido clorídrico) e 1 ml de hidroxilamina (Figura 3.20);
- Levou-se as amostras para fervura, até reduzir para 20 ml;
- Em seguida, após resfriada as amostras em temperatura ambiente, transferiu-a para um balão volumétrico de 100 ml;
- Em cada uma das amostras adicionou-se 10 ml de acetato de amônia e 4 ml de

fenantrolina. Completou-se em seguida, com água destilada o volume do balão volumétrico (100 ml) e, aguardou 10 minutos para desenvolver a cor avermelhada;

- Decorrido os 10 minutos, ligou-se o espectrofotômetro no comprimento de onda de 510 nm. Colocou-se em uma cubeta de 10 ml a amostra “branca”, para calibrar o equipamento;
- Em outra cubeta, colocou-se 10 ml da amostra a ser analisada. Inseriu a cubeta com a amostra e registrou-se a leitura apresentada no equipamento;
- Com o valor da leitura, verificou-se na curva de calibração o valor da quantidade de ferro total contida na amostra.

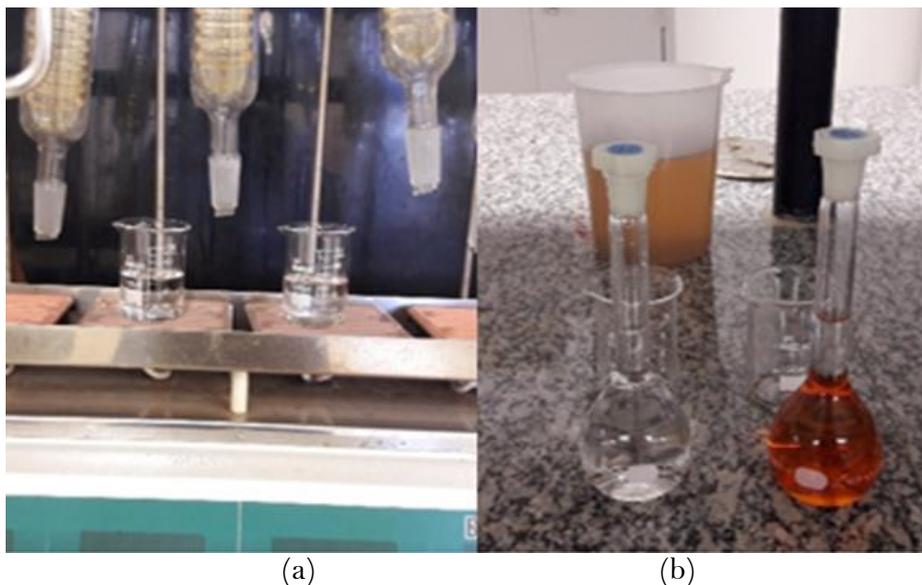


Figura 3.20 – Análise para quantificar ferro: a) mesa aquecedora; b) balões volumétricos com amostra a ensaiar g) Condutividade elétrica da água (*CE*) e o potencial de Hidrogênio (*pH*)

A *CE* e o *pH* das amostras foram obtidas através de leituras por Condutivímetro elétrico e por Phmetro, respectivamente.

A condutividade elétrica mede a concentração de sais dissolvidos na água que define a capacidade de a água conduzir eletricidade, devido à presença de íons Cl^- e H^+ .

A *CE* em uma água é representada em sua maioria por sólidos dissolvidos em água, dos quais se destacam dois tipos: compostos iônicos e compostos catiônicos. Os compostos iônicos (cargas negativas, que possuem elétrons livres na camada de valência) são sólidos que se dissolvem em água e caracterizados como sendo cloretos, sulfatos, nitratos e fosfatos.

Os compostos catiônicos (cargas positivas, que perderam elétrons na camada de valência) também interferem na condutividade elétrica da água e possuem cátions de sódio, magnésio, cálcio, ferro, alumínio e amônio.

Os bicarbonatos de cálcio e magnésio, quando dissolvidos na água, são facilmente notados. Bicarbonatos dissolvidos na água a tornam água dura - que, quando evaporadas, deixam materiais sólidos nas superfícies, os carbonatos.

O *pH* é a unidade de medida que descreve o grau de acidez ou alcalinidade e é medido em uma escala que vai de 0 a 14. O valor do *pH* de determinada substância está diretamente relacionado à proporção das concentrações dos íons de hidrogênio $[\text{H}^+]$ e hidroxilas $[\text{OH}^-]$.

Além das análises das águas, avaliou-se quantitativamente a perda de massa das amostras, após o período de imersão.

Apresenta-se na Tabela 3.7 a quantidade das massas e os diâmetros inseridos em cada *becker*. O objetivo de inserir a massa por tamanho de grãos em cada *becker* é de verificar possível fragmentação dos grãos, e a possibilidade de colmatagem das amostras. Pesou-se uma massa aleatória, inicial das mesmas, por fração de cada amostra, divididas em intervalos, como descrito e apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Massa inserida nos *beckers* [g]

Número Bécher	Diâmetro partículas (mm)								
	0,075	2,36	4,75	9,5	12,5	19	25	37,5	50
1	171,08	6,18	132,09	181,21	135,23	433,32	-	-	-
2	230,03	124,18	231,93	214,84	186,14	236,09	-	-	-
3	230,11	65,50	141,54	196,26	140,08	235,22	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	139,35	512,12	523
5	-	-	-	-	-	-	214,63	140,82	1147,63
6	-	-	-	-	-	-	193,82	619,27	405,91
7	236,79	17,06	214,68	172,75	137,09	343,73	250,62	332,38	809,32
8	276,98	16,35	168,98	224,14	116,42	324,93	211,97	413,90	776,81
9	151,53	13,47	109,17	184,67	247,78	316,12	460,00	359,60	651,83
10	253,23	129,08	163,10	157,56	136,46	206,59	212,43	610,70	750,45
11	252,97	166,90	266,57	256,75	173,78	219,24	274,90	755,50	545,30
12	295,37	185,66	263,58	197,17	174,73	222,10	215,73	641,87	952,80
13	122,91	113,70	151,20	149,20	97,48	135,20	-	-	-
14	169,79	115,15	195,82	164,72	90,87	166,75	-	-	-
15	221,75	124,43	180,44	212,42	120,71	150,24	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	128,46	391,16	806,54
17	-	-	-	-	-	-	149,80	278,51	757,13
18	-	-	-	-	-	-	163,15	313,76	769,80
19	134,25	60,37	84,39	57,03	99,51	307,85	262,32	269,53	902,43
20	316,64	119,04	320,20	200,03	287,62	416,27	183,36	370,99	497,30
21	153,84	54,02	83,32	68,41	149,36	276,32	132,92	56,87	519,41
22	220,92	92,72	114,97	103,52	147,48	-	-	-	-
23	185,25	12,23	185,22	100,27	163,82	-	-	-	-
24	163,90	86,24	142,74	130,49	167,80	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	163,07	518,61	301,60
26	-	-	-	-	-	-	196,48	369,07	572,01
27	-	-	-	-	-	-	213,47	218,91	634,78

No final do período de imersão essas amostras, foram levadas à estufa, e peneirada na sequência de malha contida em cada *bécher*, por exemplo, a amostra do *becker* 20 passou pelas peneiras 50 mm; 37,5 mm; 25 mm; 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,36 mm e 0,075 mm.

A do *becker* 17, pelas peneiras 50 mm; 37,5 mm e 25 mm, para obter a massa final, e assim, sucessivamente. Comparou-se a massa inicial com a massa final de cada diâmetro, verificando perda ou ganho de massa nos referidos intervalos.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Neste Capítulo, apresenta-se a análise dos resultados obtidos nesta Tese, dividido em três partes: caracterização física, caracterização mineralógica e a caracterização química, todas referentes às amostras A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} .

4.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS (ES) E DO (AS)

Caracterizou-se fisicamente as amostras para identificar a aplicabilidade como material drenante. Apresentam-se os resultados dos seguintes ensaios: distribuição granulométrica; absorção e massa específica seca; massa específica dos grãos sólidos; massa unitária seca do agregado; índice de vazios e porosidade e, permeabilidade hidráulica à carga constante. A metodologia de cada ensaio fora descrito no Capítulo 3 e os resultados encontram-se nas seções seguintes.

A análise dos resultados obtidos na distribuição granulométrica realizou-se por cada faixa, definida nesta Tese (C1, C4 e C12), descritas no Apêndice A.1. Para os demais ensaios desta caracterização, os resultados foram analisados por faixa granulométrica (C1, C4 e C12) e por amostra (A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF}).

4.1.1 Distribuição Granulométrica

O ensaio tem sua importância para determinar a condutividade hidráulica das amostras, um dos objetos de pesquisa. A distribuição granulométrica das amostras estudadas (A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF}) realizou-se em conformidade com as especificações da norma ME 083 (DNER, 1998).

Para que as amostras possam ser utilizadas como material drenante, devem atender limites definidos (Tabela 3.2): $2 \leq C_v \leq 20$; $0,63 \leq C_c \leq 1,64$; % passante na peneira (#) 0,075 mm < 5%.

Na Tabela 4.1, descrevem-se os valores dos percentuais retidos e passantes, em cada peneira, das faixas C1 e C4 definidas para uso no colchão drenante.

Tabela 4.1 – Distribuição Granulométrica - C1 e C4

Peneiras (mm)	Faixas			
	C1		C4	
	% retida	% passante	% retida	% passante
75,0	0,0	100,0	0,0	100,0
50,0	16,5	83,5	0,0	100,0
37,5	15,5	68,0	0,0	100,0
25,0	26,2	41,8	33,0	67,0

19,0	23,2	18,6	41,9	25,1
12,5	7,0	11,6	14,3	10,9
9,5	1,7	9,8	1,1	9,8
4,75	3,0	6,8	1,8	8,1
2,36	2,8	4,1	1,6	6,5
0,075	3,4	0,7	5,3	1,2
Fundo	0,74	0,0	1,17	0,0

Observa-se na Tabela 4.1 que a dimensão máxima característica (DMC) da faixa C1 foi 50 mm e, da faixa C4, foi 25 mm. Com os resultados da Tabela 4.1, geraram-se as curvas granulométricas das faixas C1 e C4 (Figura 4.1).

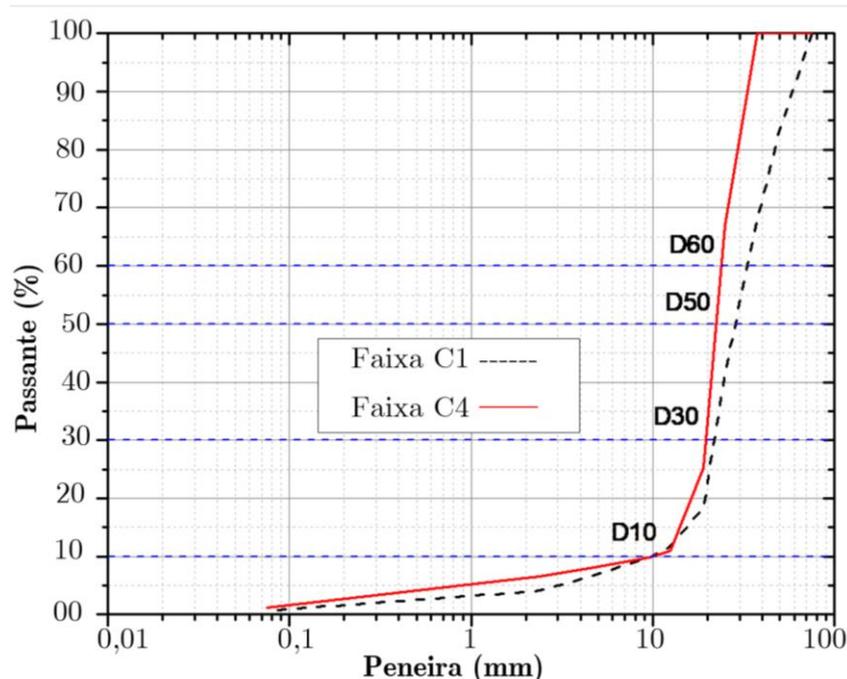


Figura 4.1 - Curvas granulométricas faixas - C1 e C4

Ao gerar as curvas granulométricas obteve-se os valores de D_{10} em mm, diâmetro efetivo dos grãos, correspondente à porcentagem onde passam apenas 10% em massa das partículas na curva granulométrica; D_{30} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 30%, em massa, das partículas na curva granulométrica; D_{50} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 50%, em massa, das partículas na curva granulométrica D_{60} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 60%, em massa, das partículas na curva granulométrica, Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros das curvas granulométricas - C1 e C4

Faixa granulométrica	Características			
	D_{10} [mm]	D_{30} [mm]	D_{50} [mm]	D_{60} [mm]
C1	9,8	21,9	29,0	33,7
C4	9,9	19,7	22,0	24,0

Além das faixas granulométricas C1 e C4, definiu-se a faixa C12 para uso no dreno longitudinal profundo. A distribuição granulométrica dessa faixa está na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica - C12

Peneiras (mm)	Faixa	
	C12	
	% retida	%passante
75,0	0,0	100,0
50,0	50,0	50,0
37,5	0,0	50,0
25,0	50	0,0
19,0	0,0	0,0
12,5	0,0	0,0
9,5	0,0	0,0
4,75	0,0	0,0
2,36	0,0	0,0
0,075	0,0	0,0
Fundo	0,0	0,0

Observa-se que esta faixa é composta por 50% de grãos de diâmetro de 50 mm e 50% de grãos de 25 mm. Com os dados da Tabela 4.3, gerou-se a curva granulométrica da faixa C12 como mostra a Figura 4.2.

A análise das faixas C1, C4 e C12 está resumida na Tabela 4.4, D_{10} , D_{30} , D_{50} e D_{60} estão em mm; DMC é dimensão máxima característica; C_u – coeficiente de não uniformidade, C_c – coeficiente de curvatura; (#) peneira; (S.U.C) Sistema Unificado de Classificação dos Solos, GP, pedregulho mal graduado.

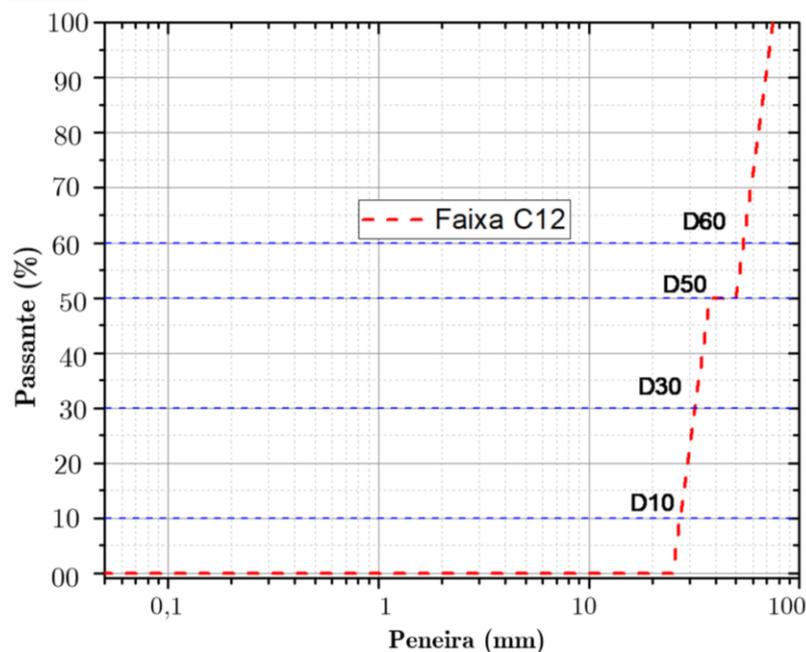


Figura 4.2 - Curva granulométrica faixa - C12

Com os valores descritos na Tabela 4.4, pode-se afirmar que a faixa C12 tem maior descontinuidade quando comparada com as demais faixas, visto que, quanto menor o valor de C_u , maior a descontinuidade.

As faixas granulométricas atenderam aos limites definidos para C_u , C_c e ao percentual passante na # 0,075 mm e, portanto, podem ser utilizadas como material permeável (Suzuki, 2013). As três faixas – C1, C4 e C12 são constituídas por pedregulho mal graduado (GP).

Tabela 4.4 - Análise das faixas granulométricas

Características	Faixa granulométrica			Fonte
	C1	C4	C12	
D_{10}	9,8	9,9	27,0	Curvas granulométricas
D_{30}	21,9	19,7	32,5	
D_{50}	29,0	22,0	45,0	
D_{60}	33,7	24,0	50,0	
C_U	3,4	2,4	2,0	
C_C	1,5	1,6	0,69	
% passante # 0,075 mm	0,7	1,2	0,0	
Pedregulho (%)	93	92	100	S.U.C (Pinto 2006)
DMC (mm)	50	25	50	
C_U (S.U.C)	<4			
Classificação	GP			

Definidas as faixas granulométricas (Apêndice A) para uso em drenagem, prosseguiu-se à caracterização física, de modo a investigar os demais parâmetros que determinaram a condutividade hidráulica, considerando a faixa granulométrica e o comportamento da amostra.

4.1.2 Absorção (a) e Massa Específica Seca - ρ_d

Como tratado no Capítulo 3, a absorção das amostras e a massa específica seca se relacionam com o tipo de resfriamento sofrido pelas escórias. No caso de resfriamento lento, observam-se altos valores de massa específica nas escórias siderúrgicas e nos agregados siderúrgicos devido a formação de grandes cristais.

Os ensaios realizaram-se pela NM 53 (ABNT, 2009) para cada amostra ($A_{TL D}$, B_{NTLD} e C_{NTAF}) e por faixa granulométrica (C1, C4 e C12). Para parametrizar os resultados alcançados, utilizaram-se os limites descritos pelas normativas:

- EM 260 (DNER, 1994) – recomenda para as escórias de alto forno a absorção de 1% a 3% e a massa específica de 2.000 kg/m³ a 3.000 kg/m³;
- EM 262 (DNER, 1994) – recomenda para as escórias de aciaria a absorção de 1% a 2% e a massa específica de 3.000 kg/m³ a 3.500 kg/m³.

A absorção indica a quantidade de água nos poros permeáveis das amostras. Elevados índices de absorção podem propiciar maior deterioração do material por intemperização e, a ocorrência de reações de hidratação pela presença de água, a expansão e oxidação. Os resultados da a e da ρ_d estão descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultado da absorção e massa específica seca

Amostras	Faixa granulométrica	Absorção [%]		Massa específica seca [kg/m ³]	
		a	Limites normativos	ρ_d	Limites normativos
$A_{TL D}$	C1	1,8	atendeu	3482	atendeu

	C4	2,0	atendeu	3494	atendeu
	C12	1,1	atendeu	3405	atendeu
B _N TLD	C1	2,6	acima	3255	atendeu
	C4	3,6	acima	3276	atendeu
	C12	1,8	atendeu	3207	atendeu
C _N TAF	C1	3,9	acima	2351	atendeu
	C4	4,7	acima	2687	atendeu
	C12	3,7	acima	2301	atendeu

Observa-se na Tabela 4.5 que há valores da a que não atenderam aos limites estabelecidos pelas normas citadas. Também, nos estudos realizados por Polese (2007) e Rodrigues (2007) em amostras de aciaria LD, os valores da a não atenderam ao limite estabelecido pela citada norma.

Ao verificar os resultados da a , fez-se as seguintes relações:

- C12 < C1 < C4 (faixas granulométricas);
- A_TLTD < B_NTLD < C_NTAF (amostras).

Pode-se dizer que a variação da absorção é proveniente dos diâmetros dos grãos que constituem a faixa granulométrica (Tabela 4.6) as quais relacionam com a superfície específica. Observa-se, na Tabela 4.6, que a faixa C4 detém o maior % dos intervalos dos grãos entre 25 mm a 12,5 mm, o que a caracteriza com intervalos granulométricos de menor diâmetro e, portanto, maior superfície específica.

Tabela 4.6 - % dos intervalos dos grãos nas faixas granulométricas

Diâmetro (mm)	Faixas granulométricas		
	C1	C4	C12
50,0 a 25,0	-	-	100
50,0 a 37,5	32,0	-	-
25,0 a 12,5	56,4	89,2	-
9,5 a 4,75	4,7	2,9	-

Na relação da superfície específica - SE com resultados da absorção para cada amostra observou-se que a C4 tem maior SE, por consequência, a maior absorção e, a C12 tem menor SE, por consequência, menor absorção.

Há, também, diferenças nos resultados da a das amostras LD (A_TLTD) comparada com a (B_NTLD) de mesma origem: ou seja, a absorção da A_TLTD < B_NTLD.

Ao analisar os resultados da ρ_d , tem-se as seguintes relações:

- C12 < C1 < C4 (faixas granulométricas);
- A_TLTD > B_NTLD > C_NTAF (amostras).

Em resumo, os resultados da a e da ρ_d apresentam relações diretas com a superfície específica dos grãos: para a faixa de maior SE obteve-se maior valor para a e ρ_d . A mesma analogia ocorre com a faixa de menor SE, em que se tem o menor valor para a e ρ_d .

4.1.3 Massa Específica dos Grãos Sólidos - ρ_s

Utilizou-se para obter a massa do ensaio de permeabilidade hidráulica das amostras. O ensaio realizou-se pela norma D 5550 (ASTM, 2014) através do equipamento *Penta Pycnometer*, para cada amostra.

Na Tabela 4.7, apresenta-se o resultado da massa específica dos grãos sólidos em $[\text{kg}/\text{m}^3]$; peso específico dos grãos sólidos - γ_s $[\text{kN}/\text{m}^3]$ e, G_s densidade relativa dos grãos sólidos $[\text{adimensional}]$.

Tabela 4.7 - Resultado da massa específica dos grãos sólidos - ρ_s

Amostras	ρ_s [kg/m^3]	γ_s [kN/m^3]	G_s	Observações
A _{TLD}	3489	355,6	3,5	Amostra triturada
B _{N_{TLD}}	3650	372,1	3,7	
C _{N_{TAF}}	3080	314,0	3,1	
A _{TLD}	3370	343,5	3,4	Amostra com frações misturadas
A _{TLD}	3480	354,74	3,5	Amostra moída
B _{N_{TLD}}	3656	372,7	3,7	
C _{N_{TAF}}	3081	314,1	3,1	

Os resultados encontrados comprovam que o peso específico dos grãos sólidos deste material é elevado quando comparado ao agregado convencional que, em média, fica em torno de $276,4 \text{ kN}/\text{m}^3$. Os valores para ρ_s entre as amostras apresentam a seguinte relação: $C_{NTAF} < A_{TLD} < B_{NTLD}$

O elevado valor ρ_s do material pesquisado concederá maior estabilidade entre os grãos, para o bom desempenho da amostra como material drenante. A composição mineralógica da amostra influencia no valor desse parâmetro.

4.1.4 Massa Unitária Seca - ρ_{sp}

Realizou-se este ensaio pela norma (NM 45, ABNT 2006) para o estado solto e compacto (Apêndice A.2). O método não apresentou diferenças significativas entre os dois estados (Apêndice A.2). Decidiu-se realizar o ensaio apenas no estado solto uma vez que, na drenagem, a compactação é feita por energia de deposição.

Parametrizou os valores alcançados pelas normativas:

- EM 262 (DNER, 1994), para obras rodoviárias, escórias de aciaria a norma estabelece os limites $1.500 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $1.700 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- EM 260 (DNER, 1994) para obras rodoviárias, escórias de Alto-forno a norma estabelece os limites $1.100 \text{ kg}/\text{m}^3$ a $1.240 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Resultado da massa unitária seca - ρ_{sp}

Amostras	Faixas granulométricas	Massa unitária [kg/m^3]	Limites normativos
A _{TLD}	C1	1827	Acima
	C4	1899	Acima
	C12	1678	Acima

B _N TLD	C1	1834	Acima
	C4	1913	Acima
	C12	1745	Acima
C _N TAF	C1	1252	Acima
	C4	1288	Acima
	C12	1164	Atende

Os valores alcançados e apresentados na Tabela 4.8, foram superiores aos limites estabelecidos pelas normativas, exceto da faixa granulométrica C12 da C_NTAF. Observa-se uma variação nos valores da ρ_{ap} :

- C12 < C1 < C4 (faixas granulométricas);
- C_NTAF < A_TLD < B_NTLD (amostras).

Observa-se, também, que os valores da massa unitária seca do agregado apresentam relação direta com a massa específica dos grãos sólidos. A amostra de maior ρ_s apresentou maior valor de ρ_{ap} , isso deve-se a composição mineralógica da amostra.

Em relação aos limites estabelecidos por norma, apenas a faixa C12 da C_NTAF atendeu ao limite especificado. As demais faixas obtiveram valores superiores. A desvantagem dessa superioridade é somente em relação ao custo de transporte à obra, em relação aos materiais mais leves. Positivamente, essa superioridade contribuirá com maior compacidade e estabilidade do material.

4.1.5 Índice de Vazios – e

O índice de vazios é um índice que se relaciona com o volume de vazios e o volume de grãos sólidos. Obteve-se este parâmetro pela Equação 3.5, Capítulo 3, descrito na norma NM 45 (ABNT, 2009). Com os valores da ρ_{ap} e da ρ_s , calculou-se o índice de vazios.

O índice de vazios influencia a condutividade hidráulica pois, se relaciona com a porosidade do material percolado. Com os valores dos índices de vazios calculou-se a porosidade das amostras, que indica o percentual de vazios existentes entre os grãos do material pela Equação 3.6, Capítulo 3.

Os valores dos parâmetros ρ_s e ρ_{ap} usados para cálculo do e encontram-se nas Tabelas 4.6 e 4.8, respectivamente. Considerou-se a massa específica da água igual a 1.000 kg/m³ a 4°C. Os resultados do e , n estão descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultado do índice de vazios e porosidade

Amostras	Faixas granulométricas	Índice de vazios (e)	Porosidade (n) [%]
A _T LD	C1	1,0	0,5
	C4	1,0	0,5
	C12	1,0	0,5
B _N TLD	C1	1,0	0,5
	C4	1,0	0,5
	C12	1,0	0,5
C _N TAF	C1	1,0	0,5
	C4	1,0	0,5
	C12	1,0	0,5

Nos resultados alcançados para e não houve variação nos valores. Pode-se dizer que os parâmetros, ρ_d e ρ_{ap} , utilizados na obtenção desse índice, apresentaram pouca variação em seus resultados e, semelhança na proporcionalidade entre eles.

Em consequência dos resultados do e , os valores de n também se mantiveram constantes para todas as amostras e faixas granulométricas. Os valores de n informam que 50% do volume da amostra é ocupado por espaços vazios.

4.1.6 Permeabilidade Hidráulica à Carga Constante - k

Com o ensaio de permeabilidade obteve-se a condutividade hidráulica, um dos objetos desta Tese. Realizou-se um ensaio teste, conforme descrito no Capítulo 3. Após ajustes no permeâmetro, obteve-se a condutividade hidráulica para cada amostra e faixa granulométrica.

Para o cálculo da massa da amostra a ser ensaiada no permeâmetro - M_s , seguiram-se os passos descritos no Capítulo 3, subitem 3.2.1. Calculou-se primeiro o volume da amostra no permeâmetro - V_{ap} , Equação 3.8, em seguida o volume dos sólidos - V_s , Equação 3.7. Na sequência, obteve-se o valor - M_s . Na Tabela 4.10, tem-se o diâmetro médio do permeâmetro - d , altura útil do permeâmetro - H , altura da amostra - L e os resultados de V_{ap} e V_s .

Tabela 4.10 – Resultados - V_{ap} e V_s

Faixa granulométrica	d (m)	H (m)	L (m)	V_{ap} (m ³)	V_s (m ³)
C1	0,38	0,725	0,60	0,068	0,0340
C4			0,40	0,045	0,023
C12			0,60	0,068	0,0340

Com os valores alcançados nos cálculos anteriores e os valores de n e ρ_s , obteve-se a M_s utilizada no ensaio de permeabilidade hidráulica, Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultado da massa da amostra - M_s

Amostra	Faixa granulométrica	n [%]	ρ_s [kg/m ³]	M_s [kg]
A _{TLD}	C1	0,50	3480	118,30
	C4			80,04
	C12			118,30
B _{NULD}	C1	0,50	3656	124,30
	C4			84,10
	C12			124,30
C _{NTAF}	C1	0,50	3081	104,70
	C4			70,90
	C12			104,70

Conhecida a massa a ser inserida no permeâmetro - M_s , realizaram-se os ensaios, como descritos no Capítulo 3, resumidos em nove passos na Figura 3.13. Realizou-se 05 ensaios por amostra e faixa granulométrica, totalizando 40 ensaios de permeabilidade com número superior de 380 coletas de fluxo durante os ensaios.

As leituras do permeâmetro foram ajustadas linearmente pelo método dos mínimos quadrados, e os valores de R^2 ficaram no intervalo de (0,9715 a 0,9988) para os grupos de leitura. Desse modo, as leituras apresentaram dispersões aceitáveis menores que 5%.

Na Tabela 4.12, resume-se a média dos resultados alcançados nos ensaios de permeabilidade hidráulica onde:

- volume escoado - V_e e o tempo - t_e de escoamento foram obtidos durante o ensaio;
- temperatura da água que percolou no permeâmetro foi aferida durante o ensaio;
- vazão de escoamento - Q_e obteve-se em função do V_e e do t_e ;
- altura de carga - h é a diferença entre a altura útil do permeâmetro e o nível da água estabilizada;
- altura da amostra inserida no permeâmetro - L , ora 0,60 m ora 0,40 m, obteve-se considerando 8 vezes a maior dimensão característica da faixa granulométrica, sugerida pela NBR 13292 (ABNT, 1995).

Tabela 4.12 – Parâmetros do ensaio de permeabilidade hidráulica

Amostra	Faixas Granulométrica	V_e médio [m ³]	t_e médio [s]	T [°C]	Q_e média [m ³]	h [m]	L [m]
A _{TLD}	C1	8,13x10 ⁻⁴	1,23	24	6,62x10 ⁻⁴	0,65	0,60
	C4	1,00x10 ⁻³	1,78	25	5,62x10 ⁻⁴	0,68	0,40
	C12	7,59x10 ⁻⁴	1,19	23	6,36x10 ⁻⁴	0,67	0,60
B _{N_TL_D}	C1	7,60x10 ⁻⁴	1,47	24	5,15x10 ⁻⁴	0,74	0,60
	C4	5,98x10 ⁻⁴	1,34	26	4,45x10 ⁻⁴	0,67	0,40
	C12	7,86x10 ⁻⁴	1,27	23	6,22x10 ⁻⁴	0,69	0,60
C _{N_TA_F}	C1	6,68x10 ⁻⁴	1,66	25	4,00x10 ⁻⁴	0,75	0,60
	C4	8,80x10 ⁻⁴	2,53	25	3,46x10 ⁻⁴	0,68	0,40
	C12	7,23x10 ⁻⁴	1,17	23	6,20x10 ⁻⁴	0,65	0,60

Com os valores da Tabela 4.12, calculou-se a k , pela equação de Darcy (Tabela 4.13). Na Tabela, apresenta-se a condutividade hidráulica k , considerando o fluxo darcyano; gradiente hidráulico - i ; condutividade hidráulica média - $k_{média}$; viscosidade da água corrigida - μ_{corr} ; e condutividade hidráulica à 20°C - $k_{20°C}$.

Os valores obtidos para a k , Tabela 4.13, para todas as amostras e faixas, referem-se a uma areia limpa, areia limpa e mistura de pedregulho, classificada como boa drenagem e elevada condutividade hidráulica, (Terzaghi, 1996) sendo propícia para uso como material drenante.

Tabela 4.13 – Valores da condutividade hidráulica

Amostra	Faixa Granulométrica	i	k média [m/s]	μ_{corr} [g.s/cm ²]	$k_{20°C}$ [m/s]
A _{TLD}	C1	1,082	5,3x10 ⁻³	9,08x10 ⁻¹	4,8x10 ⁻³
	C4	1,695	2,9x10 ⁻³	8,94x10 ⁻¹	2,6x10 ⁻³
	C12	1,125	4,9x10 ⁻³	9,44x10 ⁻¹	4,6x10 ⁻³
B _{N_TL_D}	C1	1,231	3,6x10 ⁻³	9,08x10 ⁻¹	3,3x10 ⁻³
	C4	1,687	2,3x10 ⁻³	8,67x10 ⁻¹	2,0x10 ⁻³

	C12	1,146	$4,7 \times 10^{-3}$	$9,44 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-3}$
C _{NTAF}	C1	1,256	$2,8 \times 10^{-3}$	$8,94 \times 10^{-1}$	$2,5 \times 10^{-3}$
	C4	1,780	$1,8 \times 10^{-3}$	$8,94 \times 10^{-1}$	$1,6 \times 10^{-3}$
	C12	1,078	$5,0 \times 10^{-3}$	$9,44 \times 10^{-1}$	$4,7 \times 10^{-3}$

Na maioria dos solos o regime de fluxo é laminar e obedece à lei de Darcy. Em rochas fraturadas, pedregulhos e areias muito grossas, podem existir condições de fluxo turbulento, e a lei de Darcy deixa de ser válida (DAS, 2011). Como critério de investigação, utilizou-se o cálculo do Número de Reynolds - R_e , (Apêndice B). Na Tabela 4.14, descrevem-se os resultados obtidos para o número de Reynolds, onde: e : índice de vazios, e n : porosidade em %.

Tabela 4.14 – Resultado do número de Reynolds

Amostras	Faixas granulométricas	e	n (%)	R_e
A _{TLD}	C1	1,00	0,50	141,95
	C4	1,00	0,50	58,33
	C12	1,00	0,50	211,09
B _{N_{TLD}}	C1	1,00	0,50	97,59
	C4	1,00	0,50	44,87
	C12	1,00	0,50	206,50
C _{NTAF}	C1	1,00	0,50	73,93
	C4	1,00	0,50	35,89
	C12	1,00	0,50	215,68

Os resultados mostraram que o R_e ultrapassou o limite de 12 (HARR, 2012), (Apêndice B). Contudo, a redução do R_e para um limite superior de 12 (Harr, 2012) impõe uma classificação de regime turbulento para os resultados dos ensaios (Tabela 4.14).

Assim, optou-se por corrigir a k pela formulação de Stephenson (1979) (Li *et al.*, 1998), aplicando os valores i calculados pela Equação (B.12). Na formulação, o gradiente hidráulico - i corrigido permite o fluxo do cálculo da condutividade hidráulica - k em fluxos turbulentos para enrocamento, (Apêndice B).

A Tabela 4.15 apresenta os resultados: índice de vazios - e ; porosidade - n em %; condutividade hidráulica média - $k_{m\u00e9dia}$ em m/s; condutividade hidráulica à temperatura de 20°C - k_{20° em m/s; gradiente hidráulico corrigido - i_{corr} ; e condutividade hidráulica corrigida - k_{corr} em m/s; $k_{20^\circ corr}$ em m/s.

Tabela 4.15 – Resultados da condutividade hidráulica corrigida

Amostras	Faixas	e	n [%]	$k_{m\u00e9dia}$ [m/s]	$k_{20^\circ C}$ [m/s]	i_{corr}	k_{corr} [m/s]	$k_{corr 20^\circ C}$ [m/s]
A _{TLD}	C1	1,00	0,50	$5,3 \times 10^{-3}$	$4,8 \times 10^{-3}$	1,089	$5,04 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$
	C4	1,00	0,50	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	1,682	$2,90 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$
	C12	1,00	0,50	$4,9 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	0,444	$1,22 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$
B _{N_{TLD}}	C1	1,00	0,50	$3,6 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	0,888	$5,04 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$
	C4	1,00	0,50	$2,3 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-3}$	1,306	$2,96 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$
	C12	1,00	0,50	$4,7 \times 10^{-3}$	$4,5 \times 10^{-3}$	0,446	$1,21 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-2}$

C _{NTAF}	C1	1,00	0,50	2,8x10 ⁻³	2,5x10 ⁻³	0,689	5,04 x10 ⁻³	4,5x10 ⁻³
	C4	1,00	0,50	1,8x10 ⁻³	1,6x10 ⁻³	1,036	2,90 x10 ⁻³	2,6x10 ⁻³
	C12	1,00	0,50	5,0x10 ⁻³	4,7x10 ⁻³	0,474	1,21 x10 ⁻²	1,2x10 ⁻²

Analisando os valores de k_{corr} , observa-se que não se alteram para a mesma faixa. Estes resultados levam em consideração somente o tamanho dos grãos da faixa granulométrica.

Conclui-se com o ensaio de permeabilidade hidráulica que:

- Não ocorreu deslocamento dos grãos das amostras no corpo de prova com a movimentação do líquido (fluxo da água) durante o ensaio, como previsto no Capítulo 3.
- Os valores da $k_{corr20^{\circ}C}$ não variaram entre as três amostras, para as C1 e C4 ficaram na ordem de grandeza de 10⁻³. Para a C12, também não variaram na ordem de grandeza para as três amostras, com 10⁻².

4.1.7 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE EXPANSÃO

Neste ensaio, avalia-se o potencial de expansibilidade da amostra através da ME 113 (DNIT, 2009), que prescreve o método para obter o potencial de expansão para agregado siderúrgico de aciaria. No Capítulo 3, descreve-se a mudança na metodologia adotada nesta pesquisa. Os resultados alcançados estão descritos na Tabela 4.16 e as fases do ensaio podem ser resumidas da seguinte forma:

Dia 1: Início do ensaio – corpos de prova na condição submersa;

Dia 7: 50% do ensaio foi realizado – mudança na condição de submersa para saturada;

Dia 14: Final do ensaio – mantida a condição de saturada.

Tabela 4.16 – Taxa de expansão média acumulada

Estado	Dia	Expansão Acumulada - Média [%]		
	Número	Amostras		
		A _{TLD}	B _{NTLD}	C _{NTAF}
Imersão	0	0	0	-1,43x10 ⁻²
	1	-2,860x10 ⁻³	3,980x10 ⁻¹	2,114x10 ⁻²
	2	-7,160x10 ⁻³	5,381x10 ⁻¹	1,690x10 ⁻²
	3	0	6,005x10 ⁻¹	9,160x10 ⁻³
	4	0	2,491x10 ⁻²	9,160x10 ⁻³
	5	5,727x10 ⁻³	2,062x10 ⁻²	9,160x10 ⁻³
	6	1,289x10 ⁻²	2,205x10 ⁻²	9,160x10 ⁻³
Saturação	7	1,432x10 ⁻²	2,205x10 ⁻²	9,160x10 ⁻³
	8	2,577x10 ⁻²	4,167x10 ⁻¹	6,012x10 ⁻³
	9	3,866x10 ⁻²	1,927x10 ⁻¹	2,005x10 ⁻³
	10	7,732x10 ⁻²	1,134x10 ⁻¹	-7,051x10 ⁻² -4,870x10 ⁻³
	11	1,260x10 ⁻¹	-2,663x10 ⁻²	-6,593x10 ⁻³
	12	1,661x10 ⁻¹	-2,377x10 ⁻²	-1,380x10 ⁻²
	13	1,933x10 ⁻¹	1,260x10 ⁻²	-1,952x10 ⁻²
	14	2,205x10 ⁻¹	-1,374x10 ⁻²	-2,235x10 ⁻²
	15	-	8,677x10 ⁻²	-

	16	-	$2,520 \times 10^{-2}$	-
Expansão (%)	0,22	-0,46	-0,023	

Observa-se, na Tabela 4.16, que a A_{TLD} apresentou aumento de expansão a partir do quinto dia e continuou aumentando até o final do ensaio; a B_{NTLD} apresentou oscilação no resultado; ora expandia, ora retraía; expandiu até o terceiro dia, retraiu em seguida.

No oitavo dia, quando mudou o estado de submersa para saturada, a B_{NTLD} voltou a expandir, mas, a partir do nono dia, voltou a retrair, até o décimo quarto dia; apresentou expansão no dia seguinte e finalizou o ensaio retraindo a amostra; a C_{NTAF} apresentou expansão até o segundo dia e, em seguida a amostra retraiu até o final do ensaio. O ensaio da B_{NTLD} realizou-se em 16 dias devido a interrupção de energia no laboratório, durante o ensaio desta amostra.

Ao analisar a expansão média acumulada das amostras, a A_{TLD} expandiu; a B_{NTLD} apresentou oscilações de expansão e retração e, a C_{NTAF} apresentou retração.

Os valores de expansão apresentados pelas amostras atendem ao limite da norma ME 113 (DNIT, 2009) máximo 3% para escória de aciaria. Atendem, também, à norma Japonesa A 5015 (Jis, 1992), *apud* Fernandes (2010) a qual recomenda para camadas granulares a expansibilidade máxima de 2% aos 10 dias.

Observa-se que a normativa que orienta a avaliação do potencial de expansão é direcionada para pavimentos rodoviários e escória de aciaria. Não há, independente da origem da escória, até o momento, normativa específica para material drenante.

Com os dados apresentados na Tabela 4.16 geraram-se curvas de expansão para cada corpo de prova (CP) e a média acumulada. Na Figura 4.3 apresentam-se as curvas de cada corpo de prova e, a curva média, das leituras realizadas para a A_{TLD} . O CP1 foi o que apresentou maior expansão.

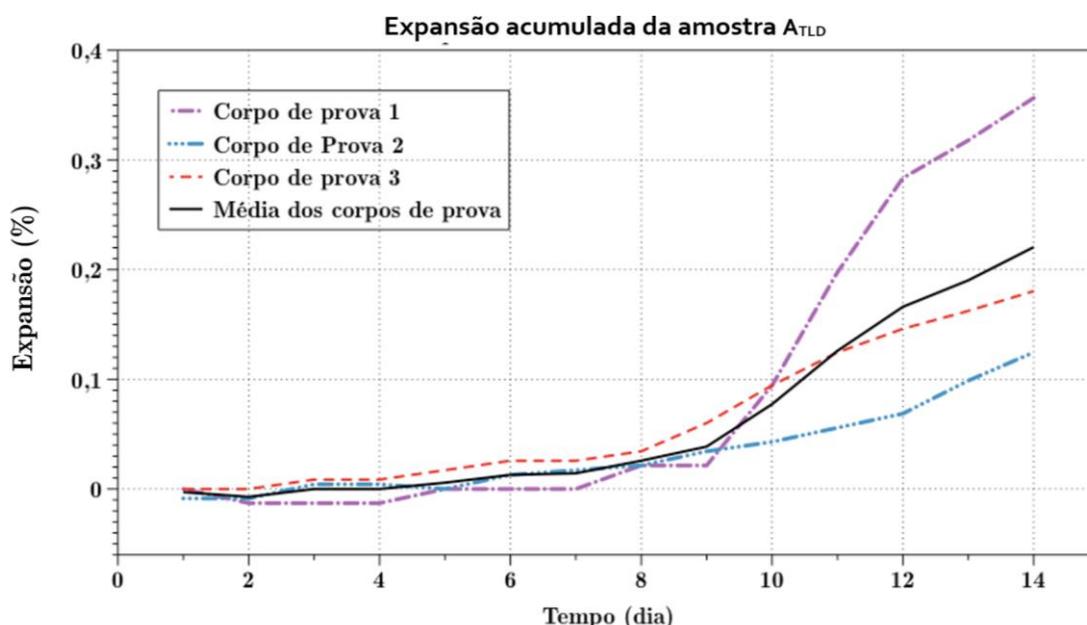


Figura 4.3 – Curva da expansão média acumulada - A_{TLD}

O CP1, até o 4º dia, apresentou redução volumétrica, provável acomodação dos grãos mais finos, ocupando os vazios da amostra. Na sequência, houve expansão até finalizar o ensaio.

Observa-se que, a partir da oitava leitura, etapa saturada, o gráfico apresenta expansão crescente, a expansibilidade não estabilizou no final do ensaio, apresentou curva crescente.

Para a amostra B_{NTLD} , o gráfico da Figura 4.4 apresenta picos crescentes e decrescentes no CP1 e CP2. O CP1 apresentou redução volumétrica acentuada até o 4º dia, infere-se, ser a ocupação dos finos nos vazios da amostra; estabilizou até o 8º dia, voltando a diminuir até o 12º dia; e, em seguida, houve pequena expansão volumétrica.

Já o CP2 comportou-se diferente. Houve aumento de volume até a transição da fase submersa para a saturada. Na fase saturada, houve redução volumétrica da amostra até o 14º dia. O CP2 apresentou pequena expansão durante período do ensaio. No entanto, o CP3 apresentou uma linha paralela ao eixo do tempo. Provavelmente, ocorreu problema no extensômetro desse CP.

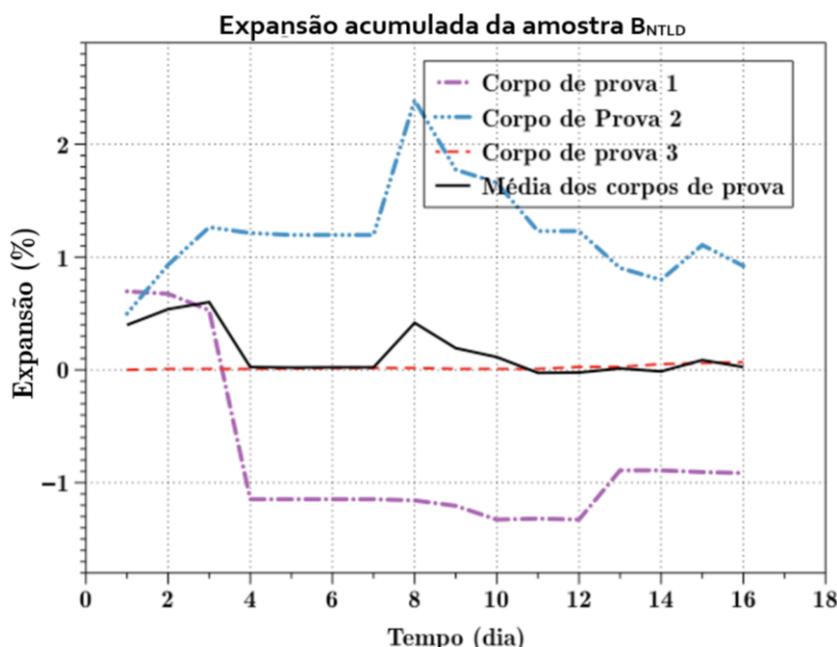


Figura 4.4 – Curva da expansão média acumulada - B_{NTLD}

Nas curvas da Figura 4.5 o CP1 da C_{NTAF} apresentou até o 2º dia aumento de volume acentuado; manteve-se constante até o 8º dia na transição da fase submersa com a saturada e, pequena redução volumétrica até o final do ensaio. No geral, o CP1 apresentou pequena expansão volumétrica. Inverso ao CP1, o CP2 e CP3 apresentaram redução volumétrica durante o período de ensaio. Vale ressaltar que a normativa de expansão adotada é específica para amostra do tipo aciaria; neste caso, a amostra analisada é de alto forno.

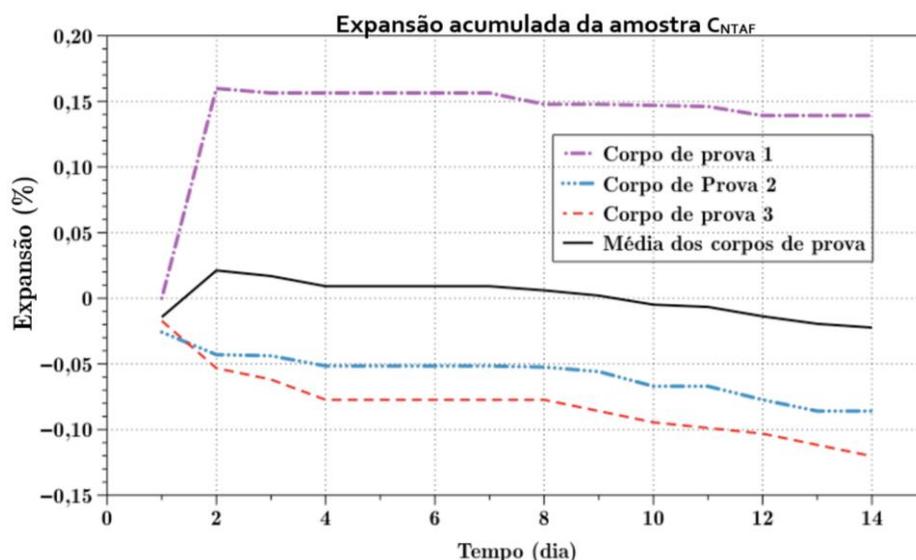


Figura 4.5 - Curva da expansão média acumulada - C_{NTAF}

Gontijo (2006) critica o uso deste limite de 3,0% pela ME 262 (DNER, 1994), já que se trata de um ensaio adaptado do (PTM 130) e, atualmente, o Departamento de Transportes da Pensilvânia especifica que este limite máximo de expansão não seja superior a 0,5%.

A norma americana, através da metodologia de ensaio D 4792 (ASTM, 2000), que avalia a expansão do agregado siderúrgico aos 7 dias, na condição submersa à temperatura de $70 \pm 3^\circ\text{C}$, estabelece o limite máximo de 0,5% em camadas de base e sub-base de rodovias e na condição submersa.

Conforme orientação da norma, após o período de 14 dias, retirou-se, o CP da estufa e, como se observa na Figura 4.6a antes de desmoldar o CP, não há formação de cristais, observa-se também, após a desmoldagem do CP na Figura 4.6b, a inexistência de cristais na amostra após o ensaio de expansão.

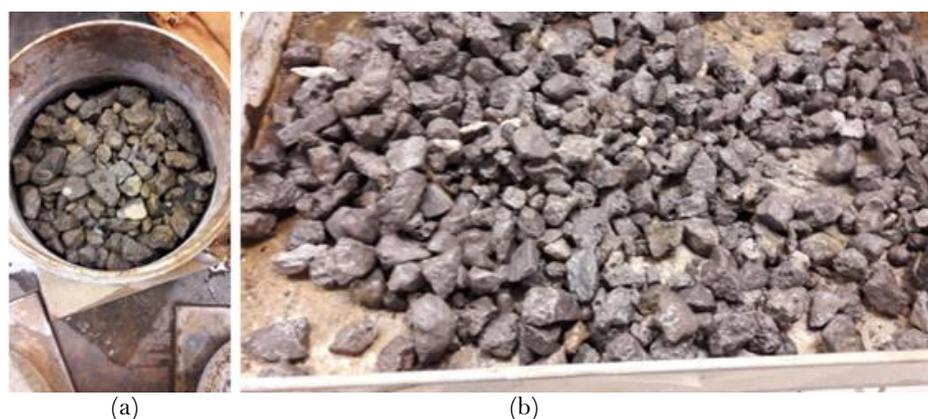


Figura 4.6 - Análise CP: a) retirado da estufa; b) desmoldado

Na Tabela 4.17, apresentam-se resumidamente todos os resultados dos ensaios por amostra e faixa granulométrica: de absorção - a , massa específica seca - ρ_d , massa unitária - ρ_{sp} , índice de vazios - e , porosidade - n , condutividade a 20°C - $k_{20^\circ\text{C}}$ e condutividade hidráulica corrigida - k_{corr} .

Tabela 4.17 - Resumo dos parâmetros físicos por faixas granulométricas e amostra

Faixa	Amostra	Índices Físicos
-------	---------	-----------------

		a [%]	ρ_d [kg/m ³]	ρ_{sp} [kg/m ³]	e	n [%]	$k_{corr20^\circ C}$ [m/s]
C1	ATLD	1,8	3482	1827	1,00	0,50	$4,6 \times 10^{-3}$
	BNTLD	2,6	3255	1834	1,00	0,50	$4,6 \times 10^{-3}$
	CNTAF	3,9	2351	1252	1,00	0,50	$4,5 \times 10^{-3}$
C4	ATLD	2,0	3494	1899	1,00	0,50	$2,6 \times 10^{-3}$
	BNTLD	3,6	3276	1913	1,00	0,50	$2,6 \times 10^{-3}$
	CNTAF	4,7	2687	1288	1,00	0,50	$2,6 \times 10^{-3}$
C12	ATLD	1,1	3405	1678	1,00	0,50	$1,2 \times 10^{-2}$
	BNTLD	1,8	3207	1745	1,00	0,50	$1,2 \times 10^{-2}$
	CNTAF	3,7	2301	1164	1,00	0,50	$1,2 \times 10^{-2}$

Com a caracterização física, é possível fazer as seguintes observações:

- O valor obtido para a $k_{corr20^\circ C}$ em m/s apresenta característica de boa drenagem e elevada condutividade hidráulica, ordem de grandeza de 10^{-3} a 10^{-2} m/s (Terzaghi, 1996);
- Os resultados da absorção se alteram em relação às dimensões dos grãos que constituem a faixa granulométrica: quanto menor o diâmetro das partículas, maior a superfície específica e, conseqüentemente, maior a absorção. A C4 tem maior superfície específica e, a C12, menor superfície específica, como se apresenta na Tabela 4.16: (C12 < C1 < C4);
- Ao relacionar os resultados de absorção das amostras com os valores da massa específica seca, verificou-se que: a amostra CNTAF possui a maior absorção- a e a menor massa específica seca- ρ_d ; A amostra ATLD apresentou a menor - a e a maior - ρ_d . Portanto, a na ATLD < BNTL < CNTAF e, ρ_d na CNTAF < BNTLD < ATLD.
- Observou uma variação nos valores da ρ_d , entre as faixas granulométricas, para a mesma amostra: C12 < C1 < C4. Também, verificou-se que, entre as amostras, os resultados da ρ_d , para as 3 faixas, apresentaram a seguinte relação: CNTAF < BNTLD < ATLD.
- Os resultados alcançados nas amostras para a ρ_s comprovam que as amostras apresentam valores elevados ao comparar com os dos agregados convencionais.
- Os valores dos índices de vazios são constantes para todas as amostras e faixas granulométricas. Pode-se dizer que, devido à proporcionalidade das ρ_d e ρ_{sp} entre as faixas e amostras, resultou na similitude dos resultados do índice de vazios.
- Valores elevados de ρ_d , ρ_s e ρ_{sp} apresentam vantagens para a estabilização por ação da gravidade, necessária como material drenante.
- Os valores da porosidade indicam que a amostra possui 50% de vazios e 50% de massa sólida. Esse parâmetro está diretamente relacionado com a $k_{20^\circ C}$ das amostras.
- Não ocorreu deslocamento dos grãos do corpo de prova com a movimentação do líquido (fluxo da água) durante o ensaio, em decorrência dos elevados valores ρ_d e ρ_s .

4.2 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DA (ES) E DO (AS)

Na caracterização mineralógica, por meio da difratometria de raios X (DRX) a análise ocorreu por amostras. O objetivo foi identificar combinações com caráter expansivo e formadores de tufa. O método do ensaio fora descrito no Capítulo 3 e os resultados estão descritos a seguir.

A análise das fases cristalinas permitiu verificar a combinação dos óxidos presentes nas (ES) e no (AS) e, também, confirmou a presença de compostos considerados expansivos citados pela literatura. Os resultados estão resumidos na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Compostos químicos identificados por DRX

Espécie Química	Formulações	Amostras		
		A	B	C
Calcita	CaCO ₃	X	X	X
Portlandita	Ca(OH) ₂	-	X	-
Gipsita	CaSO ₄ .2H ₂ O	-	-	X

Tabela 4.18 – Compostos químicos identificados por DRX - continuação

Espécie Química	Formulações	Amostras		
		A	B	C
Gehlenita	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-	-	X
Srebrodolskita	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	X	X	-
Hematita	Fe ₂ O ₃	X	X	X
Siderita	FeCO ₃	X	X	X
Wustita	FeO	X	X	-
Quartzo	SiO ₂	X	X	-
Spinela	Mg(Al,Fe) ₂ O ₄	-	X	-
Strengita	(Mg,Fe,Al)PO ₄ .2H ₂ O	-	X	-
Todorokita	NaMn ₆ O ₁₂ .3H ₂ O	-	-	X
Rutilio	TiO ₂	-	X	-
Sulfúrico (Enxofre)	S	-	-	X

Os difratogramas mostram a magnitude de ocorrência das fases mineralógicas constituintes dos materiais. A Figura 4.7 apresenta os resultados dos compostos identificados na ATLD pela análise DRX e o difratograma correspondente.

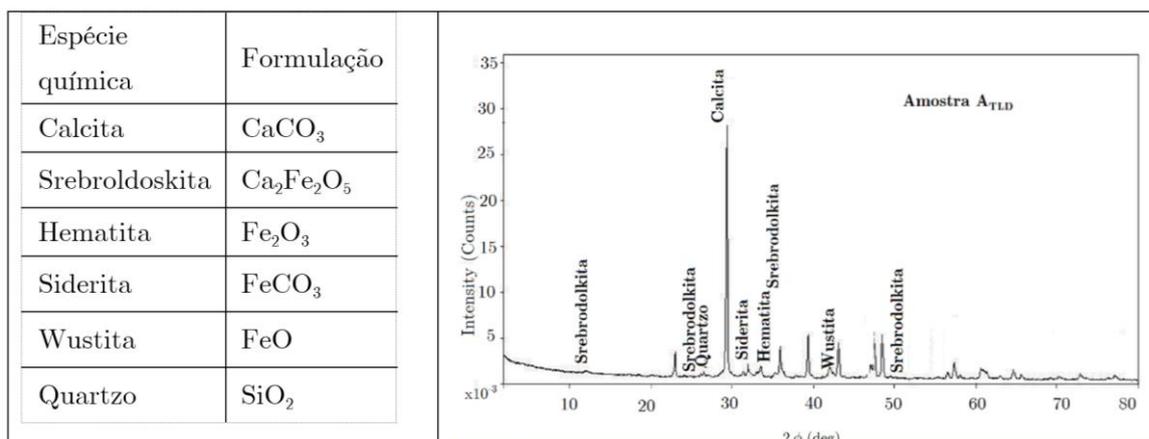


Figura 4.7 – Resultado da DRX – ATLD

Observa-se que a amostra possui, em sua composição, o CaCO_3 e $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ compostos instáveis, suscetíveis a desencadear o fenômeno da expansão e formação de tufa por hidratação, carbonatação e oxidação. O $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, na presença da água e do dióxido de carbono (CO_2), se torna instável e se decompõe em CaCO_3 e $\text{FeO}(\text{OH})$ (SILVA e VALENTINI, 2015). Também, estão presentes FeO e Fe_2O_3 que, em solução aquosa o potencial de Hidrogênio (pH) $> 8,3$ se precipitam, oxidam e podem desencadear o fenômeno de expansão.

A Figura 4.8 apresenta os resultados dos compostos identificados na B_{NTLD} pela análise DRX e o difratograma correspondente. Esta amostra também possui em sua composição os compostos instáveis CaCO_3 e $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, suscetíveis a desencadear o fenômeno da expansão e da tufa por hidratação, carbonatação e oxidação.

A $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, na presença da água e do dióxido de carbono CO_2 , se torna instável e se decompõe em CaCO_3 e $\text{FeO}(\text{OH})$ (SILVA e VALENTINI, 2015). Como na amostra anterior, a presença do FeO e Fe_2O_3 , em solução aquosa, $\text{pH} > 8,3$ se precipitam, se oxidam e podem desencadear o fenômeno de expansão. Além dos compostos citados, esta amostra apresentou a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que, em contato com CO_2 e água, precipita-se e libera o $\text{CaO}_{\text{livre}}$, responsável pelo fenômeno da expansão e formação de tufa.

A Gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$) é um óxido estabilizante, o Ca na presença de SiO_2 e Al_2O_3 , é estável.

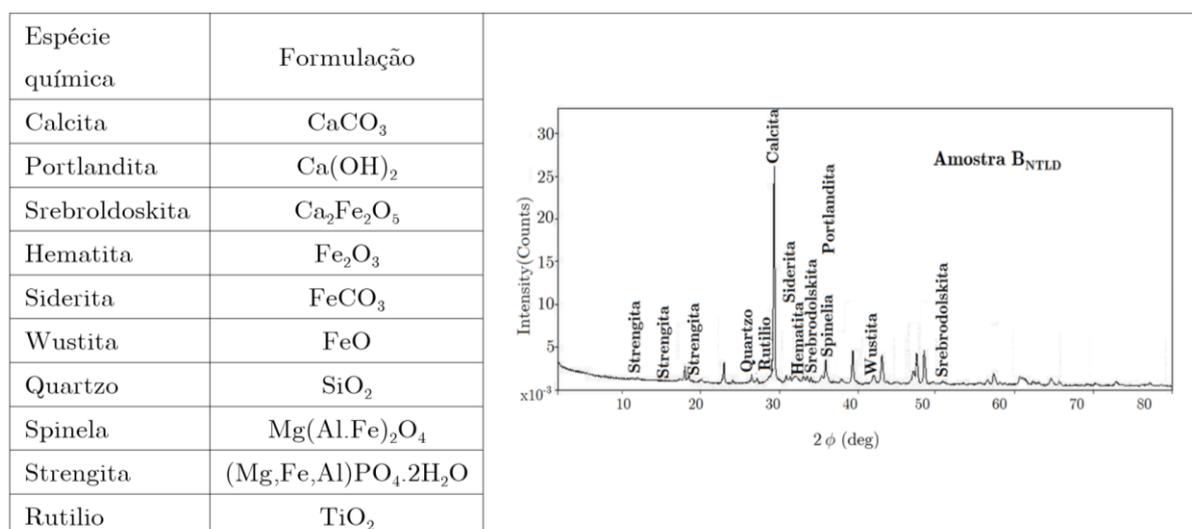


Figura 4.8 – Resultado da DRX – B_{NTLD}

Outras combinações presentes: composto hidratado como $(\text{Mg,Fe, Al})\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, um

fosfato de ferro hidratado, solúvel onde existe um baixo pH e um baixo potencial de redução de oxidação.

Os resultados da análise DRX da amostra C_{NTAF} encontram-se na Figura 4.9. Possuem o $CaCO_3$ e Fe_2O_3 , responsáveis pelos fenômenos de expansão e formação de tufa. Além destes, estão presentes os compostos hidratados $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ e $NaMn_6O_{12} \cdot 3H_2O$; a presença dos $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ e S confirmam o forte odor de enxofre presente na amostra ao ser manuseada.

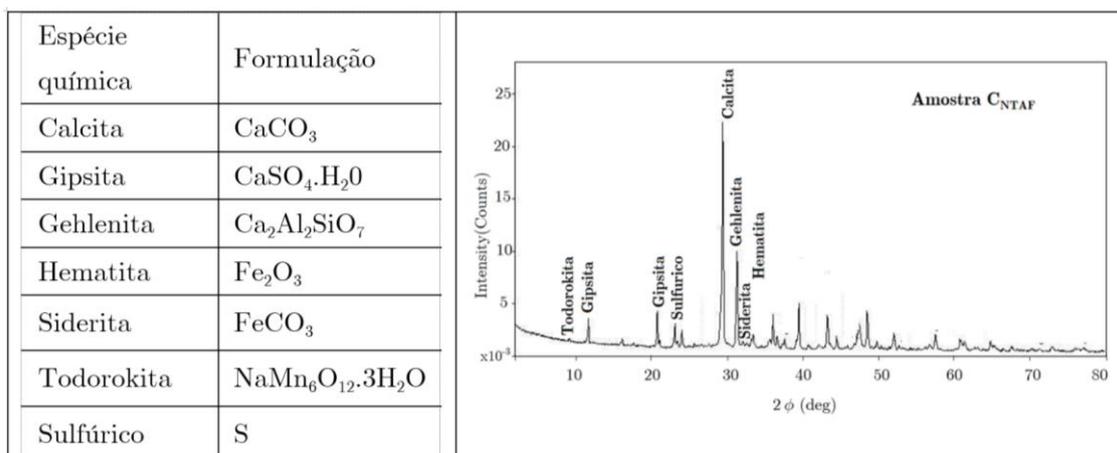


Figura 4.9– Resultado da DRX – C_{NTAF}

Ao analisar o resultado da DRX, as combinações químicas que podem desencadear os fenômenos de expansão e formação de tufa são o $CaCO_3$, Fe_2O_3 e $FeCO_3$, presentes nas três amostras. Ao observar os difratogramas, verifica-se que a intensidade do $CaCO_3$ na $C_{NTAF} < B_{NTLD} < A_{TLD}$. As fases mineralógicas encontradas nas amostras são semelhantes às estudadas por FERNANDES (2010) e DAYREL (2013).

Segundo Nogueira (1986), os $Fe(OH)_2$ se solubilizam com um pH igual ou inferior a 5 ou podem permanecer em solução num meio com pH de até 7,5. Este valor de pH 7,5 deve-se conservar para que o ferro permaneça em solução e não ocorra precipitação.

Os resultados obtidos pela análise DRX irão auxiliar o entendimento dos fenômenos expansivos e formação de tufa, correlacionado com a análise FRX e Análise das Águas.

4.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA (ES) E DO (AS)

O objetivo de caracterizar quimicamente as amostras foi identificar a presença de óxidos responsáveis pela expansão e formação de tufa, o percentual presente e o comportamento das amostras em meio aquoso.

Na caracterização química, a análise ocorreu, também, por amostras. A descrição dos ensaios fora descrita no Capítulo 3 e os resultados estão descritos nas seções seguintes.

4.3.1 Fluorescência de Raios X - FRX

A análise FRX identifica e quantifica os óxidos presentes nas amostras. Os óxidos mais representativos das amostras A_{TLD} e B_{NTLD} , estão apresentadas na Figura 4.10.

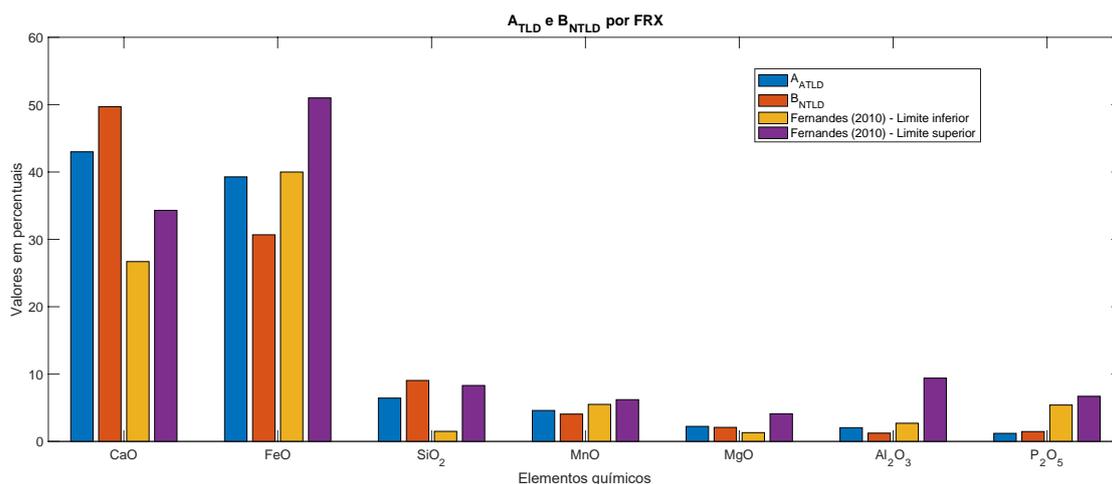


Figura 4.10 – Resultados análise FRX - A_{TLD} e B_{NTLD}

Observa-se que o CaO e FeO são os óxidos de maior percentual nas duas amostras. Os resultados apresentaram valores superiores para CaO comparado ao alcançados por Fernandes (2010), como se visualiza na Figura 4.6. Ele apresenta, em seus resultados, um limite inferior e superior.

Na Tabela 4.19, descrevem-se todos os óxidos identificados e percentuais identificados nas A_{TLD} e B_{NTLD} e, os alcançados por Fernandes (2010).

Tabela 4.19 – Resultado obtido por FRX em amostra -LD

Elementos químicos	Valores (%)		
	A _{TLD}	B _{NTLD}	Fernandes, 2010
CaO	43,00	49,97	26,7 – 34,3
FeO	39,27	30,68	40,0 – 51,0
SiO ₂	6,43	9,05	1,5 – 8,3
MnO	4,59	4,06	5,5 – 6,2
MgO	2,23	2,08	1,3 – 4,1
Al ₂ O ₃	2,04	1,23	2,7 – 9,4
P ₂ O ₅	1,20	1,46	5,4 – 6,7
TiO	0,49	0,41	-
K ₂ O	NI	0,27	-
SO ₂	0,24	0,10	0,60
CuO ₂	0,03	-	-

Ao comparar os resultados entre as amostras verifica-se que:

- CaO na A_{TLD} < B_{NTLD};
- FeO na B_{NTLD} < A_{TLD};
- MgO na B_{NTLD} < A_{TLD}.

Os resultados dos óxidos mais representativos da C_{N_{TAF}} estão apresentados na Figura 4.11 e comparados com valores obtidos por Samarís (2005) e Arcellor Mittal (2015).

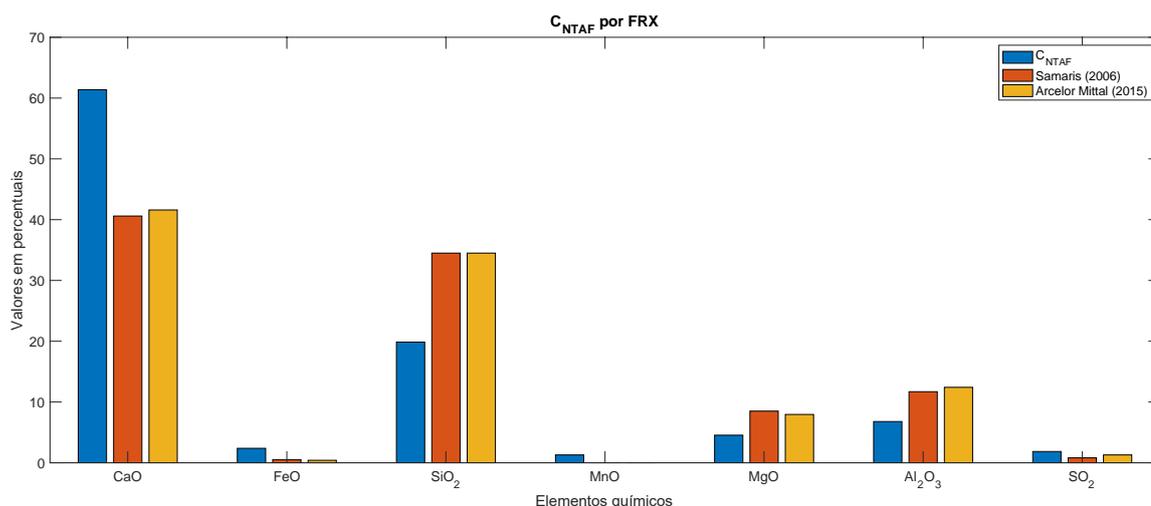


Figura 4.11 – Resultados análise FRX - C_{NTAF}

Nesta amostra, a maior presença é do CaO. Observa-se também que a C_{NTAF} possui valores superiores para CaO e FeO, ao comparar com os limites das análises de Samaris (2006) e Arcelor Mittal (2015). Na Tabela 4.20, descrevem-se todos os óxidos e os percentuais identificados na C_{NTAF} com e, os alcançados por Samaris (2005) e Arcelor Mittal (2015).

Tabela 4.20– Resultados obtidos por FRX em amostra - AF

Elementos químicos	Valores (%)		
	C _{NTAF}	Samaris, 2006	Arcelor Mittal, 2015
CaO	61,38	40,6	41,6
FeO	2,38	0,51	0,4
SiO ₂	19,85	34,5	34,5
MnO	1,30	-	-
MgO	4,54	8,5	7,95
Al ₂ O ₃	6,78	11,7	12,42
P ₂ O ₅	-	-	-
TiO	0,90	-	0,5
KO ₂	0,67	-	-
SO ₂	1,86	0,82	1,3
SrO	0,28	-	-
ZnO	0,03	-	-

Ao comparar as três amostras em relação aos CaO, FeO e MgO, observa-se que:

- CaO na ATLD < B_{NTLD} < C_{NTAF};
- FeO na C_{NTAF} < B_{NTLD} < ATLD;
- MgO na B_{NTLD} < ATLD < C_{NTAF}.

Ao analisar os resultados acima, as amostras são quimicamente semelhantes, diferenciadas nos percentuais. Não há normativa que limite os percentuais de cada elemento para uso como material drenante. A norma americana para ferrovias (AREMA, 2001) preconiza que a escória de aciaria para ser empregada como lastro ferroviário precisa apresentar uma percentagem de CaO inferior a 45%, e uma somatória de Al₂O₃ e de FeO inferior a 30%

Em relação à estabilidade do MgO, apresentada por Montgomery e Wang (1991), as ATLD e BNTLD apresentaram soluções estáveis do MgO em relação ao FeO e MnO, e a CNTAF instável.

Quanto ao equilíbrio entre os MgO e CaO, ou do CaO com outros óxidos presentes nas amostras, (inequações de Pablo Gaibros), as três amostras, ATLD, BNTLD e CNTAF, apresentaram suscetibilidade de desintegração para o módulo A e o módulo B, sendo $C_{NTAF} < B_{NTLD} < A_{TLD}$. Nesta análise, a amostra tratada não apresentou resultados favoráveis em relação às amostras não tratadas.

4.3.2 Microscopia de Varredura Eletrônica – MEV e Elétrons de Dispersão Espalhados - EDS

A MEV fornece informações estruturais e químicas do material em análise. Neste estudo, caracterizaram-se, em caráter pontual, as diferentes fases minerais presentes e, de forma qualitativa, a morfologia de partículas das amostras. A análise realizou-se no material pulverizado, como descrito no Capítulo 3: dividiu-se em áreas e, aleatoriamente, analisaram-se pontos escolhidos em cada área.

Os pontos analisados geraram espectros, que apresentam os picos mais intensos, dos elementos químicos presentes. Do ponto de vista morfológico, as análises são de caráter subjetivo.

Para analisar a ATLD, dividiu-se em 3 áreas. Na Figura 4.12a apresenta-se a distribuição morfológica obtida por MEV/EDS da área 1 e os pontos definidos para a análise. Dividiu-se área 1 em 8 pontos. Mais duas áreas foram definidas nessa amostra, área 2 e a área 3, com dois pontos analisados em cada área (Apêndice C). Analisou-se pontualmente cada ponto representado por espectros. Na abscissa, unidade de energia [keV] e, na ordenada, contagem de elétrons multiplicado por um fator de 1.000 (k).

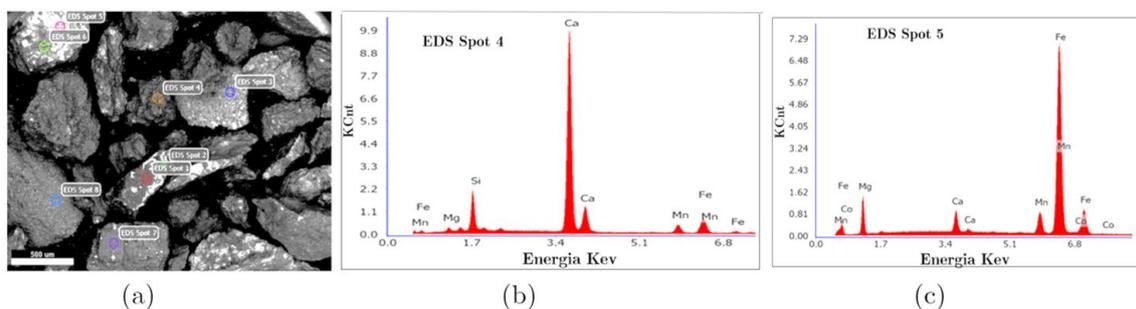


Figura 4.12 – Análise MEV/EDS da ATLD: a) área 1; b) espectro do ponto 4; c) espectro do ponto 5

Os espectros apresentam os elementos químicos com os picos mais intensos. Nas Figuras 4.22b e 4.22c apresentam-se os picos obtidos no ponto 4 e no ponto 5 da área 1, respectivamente; os demais estão disponibilizados no Apêndice C. O pico de maior intensidade, Figura 4.22b, refere-se ao Ca. Outros elementos identificados foram: Si, Fe, Mn e o Mg.

No ponto 5 da área 1 da ATLD mostrada na Figura 4.12c, o pico de maior intensidade refere-se ao Fe. Outros elementos identificados foram: Mn, Mg, Ca e Co. Observa-se que os dois pontos analisados nos espectros apresentam semelhanças nos elementos químicos presentes. Difere-se na presença do Si no ponto 4, e a do Cr no ponto 5.

A micrografia da ATLD (Figura 4.13a) apresenta textura e forma heterogênea. Na Figura 4.23b, imagem ampliada das partículas, apresentam-se superfícies irregulares, com formas angulosas romboédricas e partículas finas aderidas e cimentadas às partículas maiores.

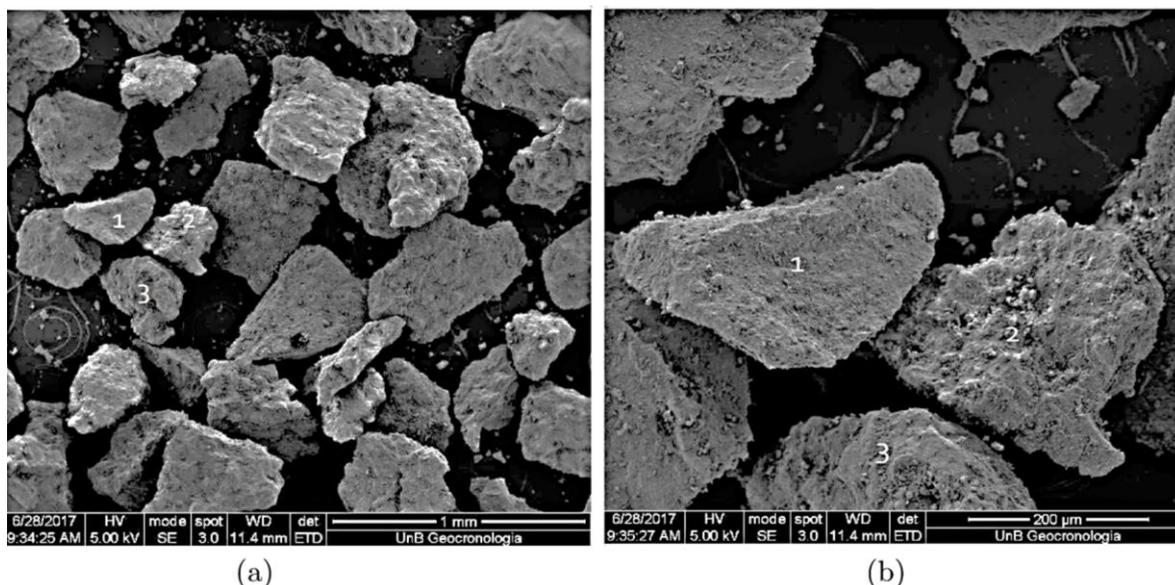


Figura 4.13 – a) imagem morfológica da amostra ATLD; b) ampliação das partículas

A amostra BNTLD dividiu-se em 2 áreas. Na Figura 4.14a apresenta-se a distribuição morfológica da área 1, dividida em 5 pontos. Analisou-se pontualmente, representado nos espectros. Na abscissa, unidade de energia [keV] e, na ordenada, contagem de elétrons multiplicado por um fator de 1.000 (k). Outra área foi definida nessa amostra: área 2 com três pontos analisados em cada área (Apêndice C).

No espectro do ponto 1 (Figura 4.14b) o elemento com maior pico é do Ca, seguido pelos elementos: Si, Fe e P. Na Figura 4.14c o espectro 4 da amostra BNTLD o elemento Fe apresentou o pico com maior intensidade. Os demais elementos identificados nesse espectro são: Mn, Ca, Mg e Si.

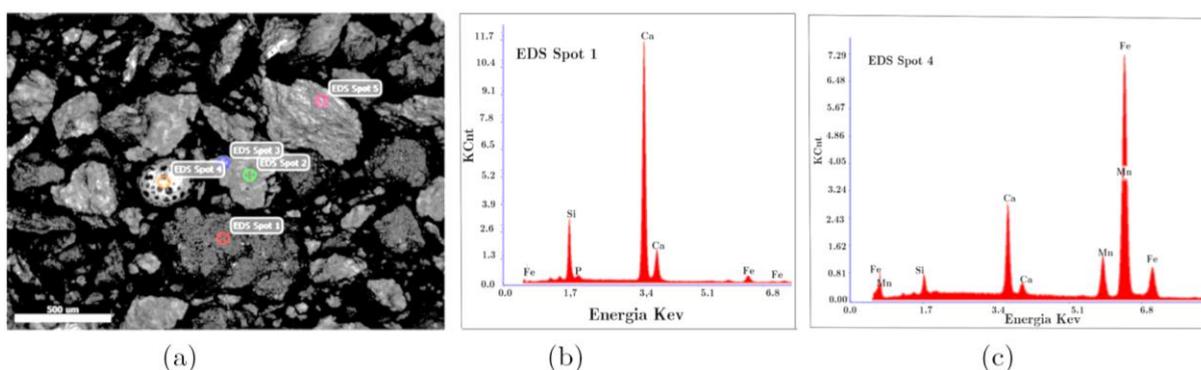


Figura 4.14 – Análise MEV/EDS da BNTLD: a) área 1; b) espectro do ponto 1; c) espectro do ponto 4

Na Figura 4.15a apresenta-se a morfologia da BNTLD e observa-se textura e formas heterogêneas, com partículas de dimensões variadas.

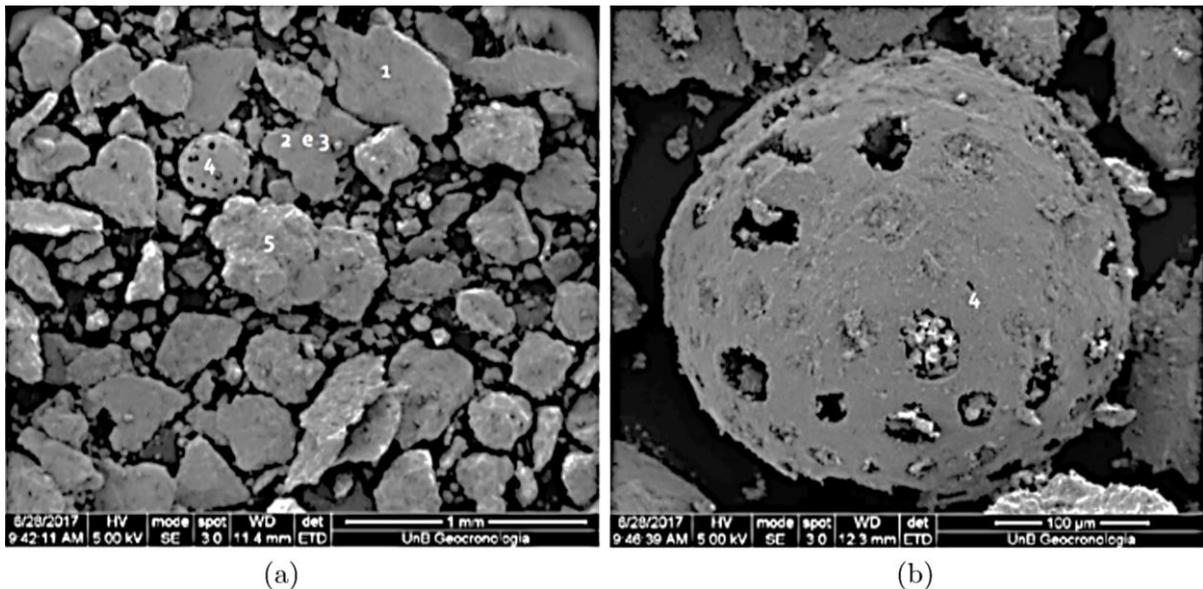


Figura 4.15 – Imagens morfológicas da amostra B_NTLD a) área 1; b) detalhe do ponto 4

Ampliou-se a partícula 4 como mostra a Figura 4.15b e observou-se forma arredondada, constituída por cavidades em sua extensão. Observa-se que essa partícula tem representação ímpar nessa área. Há predominância na área de formas lamelares e grãos de menores dimensões. Como na A_TLD, há partículas finas em grande quantidade, aderidas às partículas maiores.

Já a amostra C_NTAF dividiu-se em 3 áreas. A área 3 apresentada na Figura 4.16a dividiu-se em 2 pontos. Analisou-se, pontualmente, cada ponto representado por espectros. Mais duas áreas foram definidas nessa amostra, área 1 com 2 pontos e a área 2, com um ponto (Apêndice C).

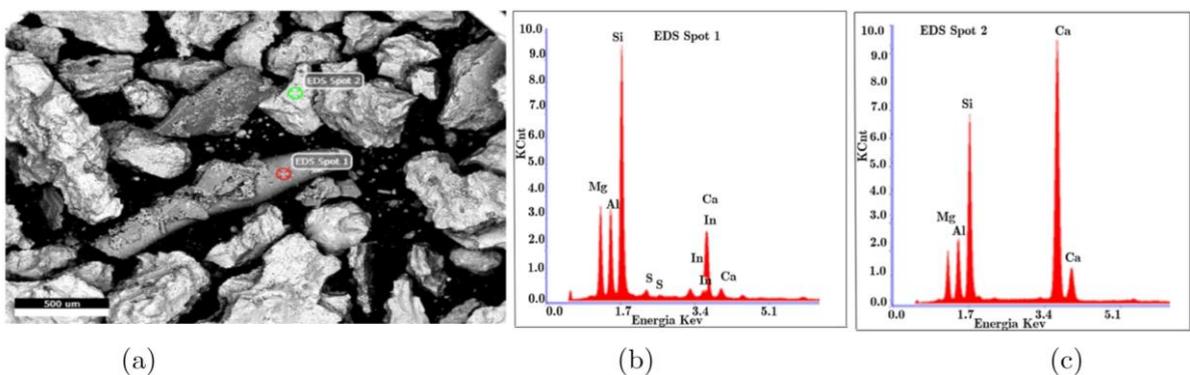


Figura 4.16 – Análise MEV/EDS C_NTAF: a) área 3; b) espectro do ponto 1; espectro do ponto 2

O espectro apresentado na Figura 4.16b apresenta os picos dos elementos químicos mais representativos neste ponto analisado. No ponto 1 da área 3 o Si é mais intenso. Outros elementos identificados: Mg, Al, Ca, In e S. O espectro do ponto 2 da área 3 como mostra a Figura 4.16c, o pico mais intenso é o Ca. Outros elementos identificados no espectro são: Si, Mg e Al.

A micrografia geral da amostra da Figura 4.17a, apresenta textura heterogênea, sem presença de grãos de menores dimensões.

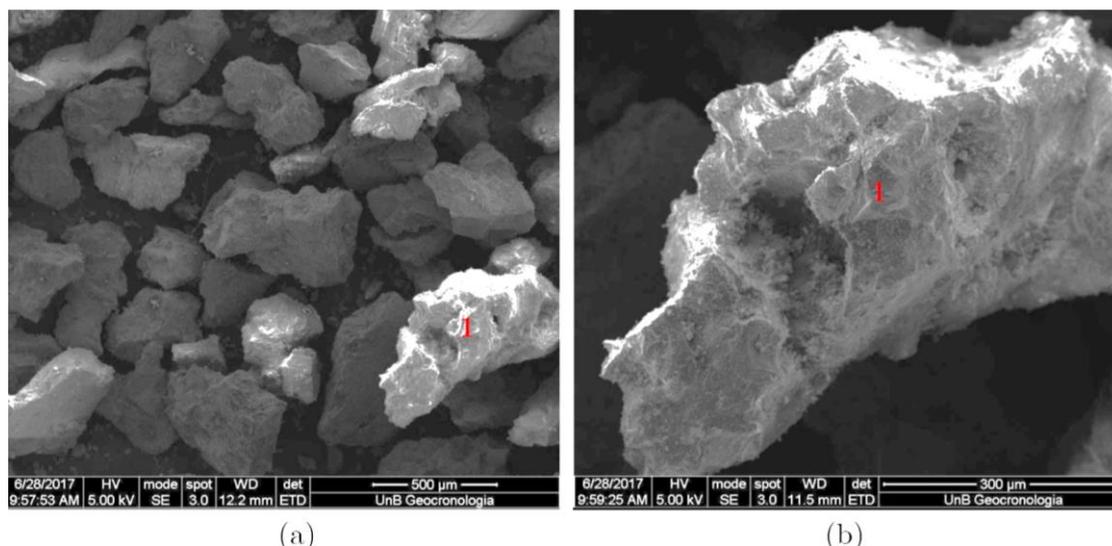


Figura 4.17 – a) Imagem morfológica da amostra C_{NTAF} ; b) Imagem ampliada da partícula

Na Figura 4.17b apresenta-se a forma ampliada de uma partícula da amostra. Identificou-se, em sua forma, partículas cimentadas, forma irregular e cavidades presentes. Observou-se, também, material fino aderido às partículas maiores.

Na Tabela 4.21 apresentam-se todos os elementos químicos identificados pelo ensaio MEV/EDS. O elemento In (Índio) não foi identificado pela FRX, assim como o elemento Zn não foi identificado pela MEV/EDS. Pode-se inferir ser o mesmo elemento, uma vez que o elemento Índio só se encontra nas minas de Zinco.

Tabela 4.21 - Elementos identificados pelo MEV/EDS

Elemento químico	Amostra		
	A _{TLD}	B _{N_{TLD}}	C _{NTAF}
Ca	X	X	X
Fe	X	X	X
Si	X	X	X
Mn	X	X	X
Mg	X	X	X
Al	X	X	X
P	X	X	X
Ti	-	X	X
K	-	-	X

Tabela 4.21 - Elementos identificados pelo MEV/EDS - continuação

Elemento químico	Amostra		
	A _{TLD}	B _{N_{TLD}}	C _{NTAF}
S	-	-	X
Cr	-	-	X
In	-	-	X

Na	-	-	X
Co	X	X	-

A análise pelo MEV/EDS apresentou em seus espectros das A_{TLD} e B_NTLD que os picos mais intensos se referem aos elementos Ca e Fe. Para a C_NTAF, os mais intensos são os Ca e Si.

Outro aspecto analisado foi a morfologia que, para as três amostras, apresentou textura heterogênea, partículas irregulares e partículas finas aderidas aos grãos maiores. A morfologia das amostras difere em relação à forma dos grãos. A A_{TLD} apresentou formas angulosas e romboédricas; a B_NTLD formas lamelares, romboédricas; na C_NTAF, formas romboédricas, angulares.

4.3.3 TERMOGRAVIMETRIA - TG/DTG

Nas Figuras 4.18 e 4.19 apresentam-se as curvas de termogravimetria (TG/DTG) obtidas na termoanálise para a amostra A_{TLD}, na atmosfera inerte e oxidante, respectivamente. Os gráficos apresentam setas indicativas para melhor visualização nos intervalos de perdas ou ganho de massas.

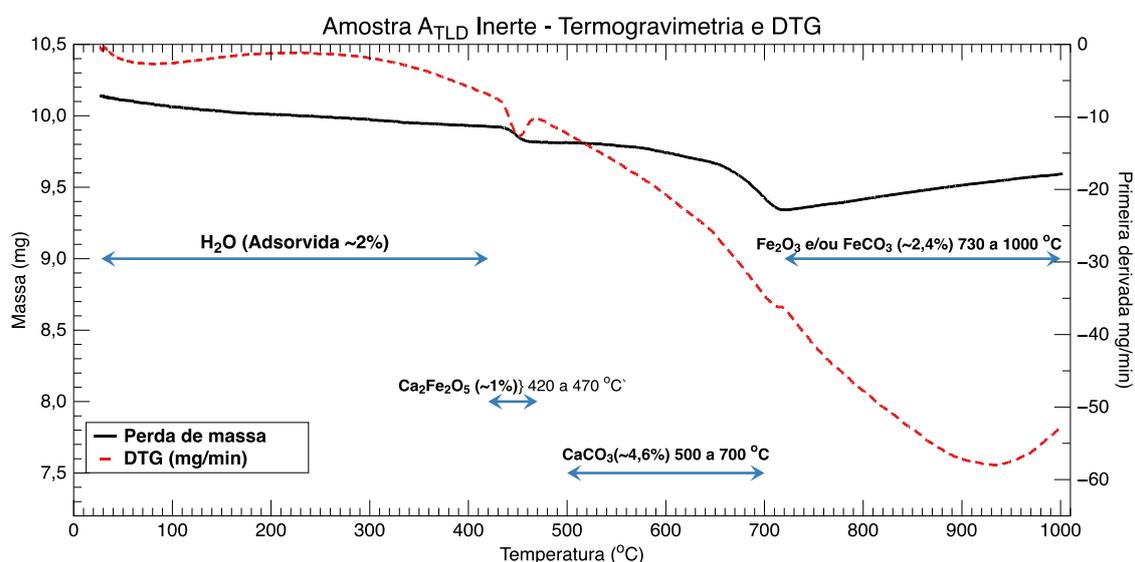


Figura 4.18 – Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte - A_{TLD}

Observa-se no gráfico da Figura 4.18 que o maior intervalo de temperatura ocorreu para a decomposição da H₂O adsorvida e, o menor, para a decomposição da Ca₂Fe₂O₅. Apresenta também a decomposição do CaCO₃, perda de massa e o ganho de massa para Fe₂O₃ e/ou FeCO₃. O Ca₂Fe₂O₅ se decompõe em CaCO₃ e, em FeO(OH) que em contato com o CO₂ precipita-se e oxida-se.

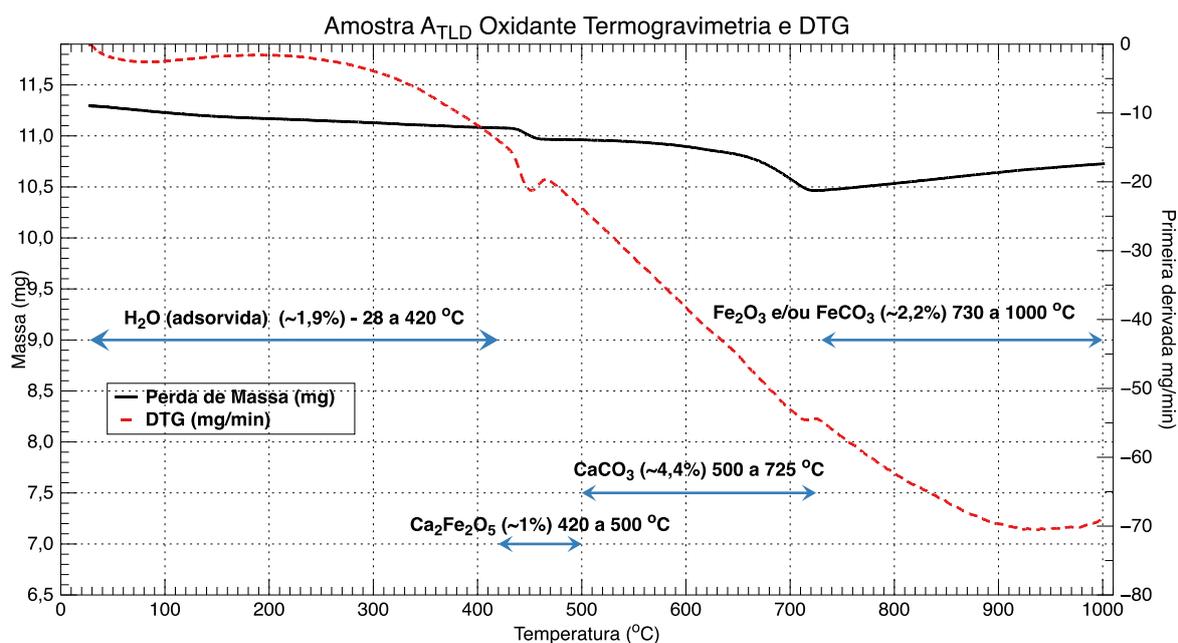


Figura 4.19– Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante - A_{TLD}

As duas curvas, atmosfera inerte e a oxidante são semelhantes. O comportamento da amostra não se alterou com a variação da atmosfera. Nota-se pelas Figuras 4.18 e 4.19 que as curvas DTG apresentaram picos endotérmicos e exotérmico, característicos da decomposição e ganho de massa respectivamente, de fases presentes na amostra.

Na Tabela 4.22 apresenta-se de forma resumida as perdas e ganho de massas da amostra A_{TLD}, e o intervalo das temperaturas para as duas atmosferas. As perdas e ganhos de massa da amostra foram obtidas pela curva TG, e o intervalo de temperatura de variação de massa, pela curva DTG.

Inicialmente, houve perda de água adsorvida nas amostras entre 28°C a 420°C. Em seguida, ocorreu uma pequena decomposição Ca₂Fe₂O₅ em (CaO+Fe₂O₃) até 470°C. O CaCO₃ se decompôs em (CaO+CO₂), entre 500°C a 700°C. Provavelmente, da reação do CO₂ decomposto (CaCO₃) na etapa anterior, houve ganho de massa para o Fe₂O₃ e/ou FeCO₃.

Tabela 4.22 - Resultados das termoañalises da A_{TLD}

Amostra A _{TLD}						
Fases analisadas	Atmosfera inerte			Atmosfera oxidante		
	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)
H ₂ O _{adsorvida}	28 - 420	2,0	-	28 - 415	1,9	-
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	420 - 470	1,0	-	420 - 470	1,0	-
CaCO ₃	500 - 700	4,6	-	500 - 725	4,4	-
FeCO ₃ e/ou Fe ₂ O ₃	700 - 1000	-	2,4	730 - 1000	-	2,2

As termoañalises obtidas pelas curvas de termogravimetria (TG/DTG) para a B_NTLD na atmosfera inerte e oxidante respectivamente, estão apresentadas nas Figuras 4.20 e 4.21.

Similar à amostra A_{TLD}, o gráfico apresenta o maior intervalo de temperatura na decomposição da H₂O adsorvida, e o menor para a decomposição da Ca₂Fe₂O₅. Apresenta-se, também, a decomposição do CaCO₃, perda de massa e o ganho de massa para Fe₂O₃ e/ou

FeCO_3 . O $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ se decompõe em CaCO_3 e, em $\text{FeO}(\text{OH})$ que em contato com o CO_2 precipita-se e oxida-se.

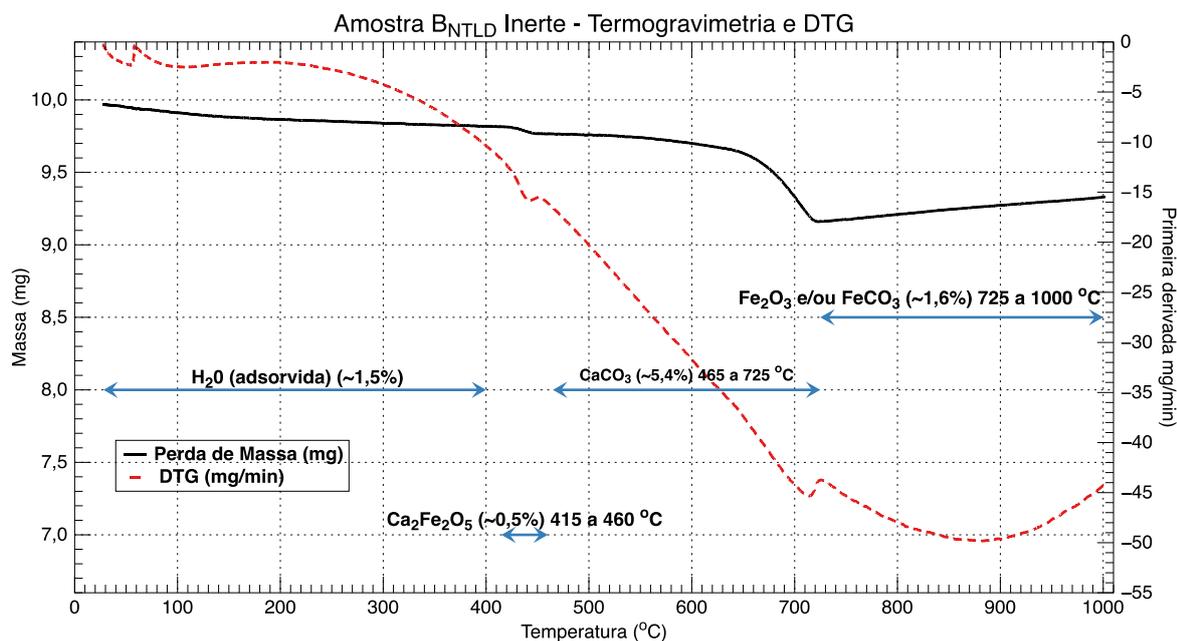


Figura 4.20— Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte - B_{N_TL_D}

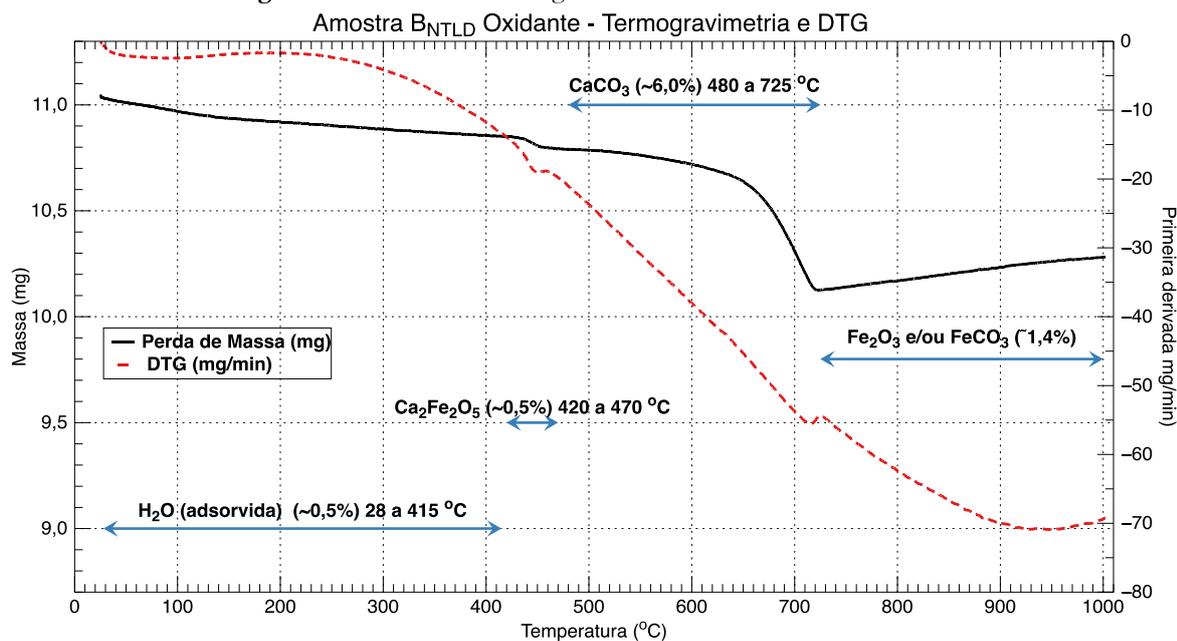


Figura 4.21— Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante - B_{N_TL_D}

As duas curvas, atmosfera inerte e a oxidante são semelhantes. O comportamento da amostra não se alterou com a variação da atmosfera. Nota-se pelas Figuras 4.20 e 4.21 que as curvas DTG apresentaram picos endotérmicos e exotérmico, característicos da decomposição e ganho de massa respectivamente, de fases presentes na amostra.

Resumidamente, na Tabela 4.23 apresentam-se as perdas e ganho de massas da amostra B_{N_TL_D} e, o intervalo das temperaturas para as duas atmosferas. As perdas e ganhos de massa da amostra foram obtidas pela curva TG, e o intervalo de temperatura de variação de massa, pela curva DTG.

Tabela 4.23 - Resultados das termoanálises da B_{N_TL_D}

Amostra B _{NTLD}						
Fases analisadas	Atmosfera inerte			Atmosfera oxidante		
	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)
H ₂ O _{adsorvida}	28 - 400	1,5	-	28 - 415	1,6	-
Ca ₂ Fe ₂ O ₅	415 - 460	0,5	-	420 - 470	0,5	-
CaCO ₃	465 - 725	5,4	-	480 - 725	6,0	-
FeCO ₃ e/ou Fe ₂ O ₃	725 - 1000	-	1,6	725 - 1000	-	1,4

Inicialmente, houve perda de água adsorvida nas amostras entre 28°C a 400°C. Há pequena decomposição Ca₂Fe₂O₅ em (CaO+Fe₂O₃) até 415°C a 460°C. O CaCO₃ se decompôs em (CaO+CO₂) entre (465°C - 725°C). Provavelmente da reação do CO₂, decomposto (CaCO₃) na etapa anterior, houve ganho de massa para o Fe₂O₃ e/ou FeCO₃, iniciando em 725°C.

Ao analisar as Tabelas 4.23 e 4.24 as duas amostras apresentaram os mesmos compostos. A B_{NTLD} apresentou menores picos exotérmicos e endotérmico, excetuando para o CaCO₃, onde ocorreu maior perda de massa ao comparar com a ATLD. Os intervalos de temperatura também são semelhantes à amostra anterior.

Os gráficos das curvas de termogravimetria TG/DTG para a C_{NTAF} estão apresentados nas Figuras 4.22 e 4.23, na atmosfera inerte e oxidante respectivamente, e difere em relação às duas amostras anteriores.

Esta amostra tem seu processo de origem diferente e não apresenta em sua composição o composto Ca₂Fe₂O₅. O comportamento da amostra não se alterou com a variação da atmosfera.

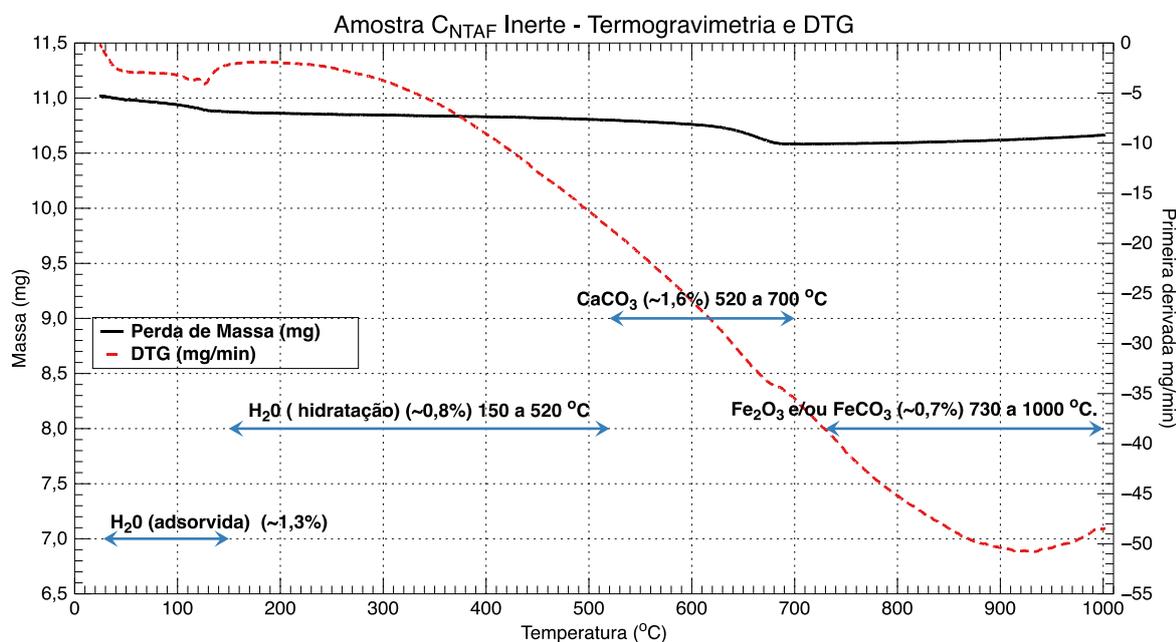


Figura 4.22 – Curvas Termogravimétricas na atmosfera inerte - C_{NTAF}

Observa-se no gráfico que o maior intervalo de temperatura ocorreu para a decomposição da H₂O_{hidratação} e, o menor, para a decomposição H₂O_{adsorvida}. Apresenta-se, também, a decomposição do CaCO₃, perda de massa, e o ganho de massa para Fe₂O₃ e/ou FeCO₃.

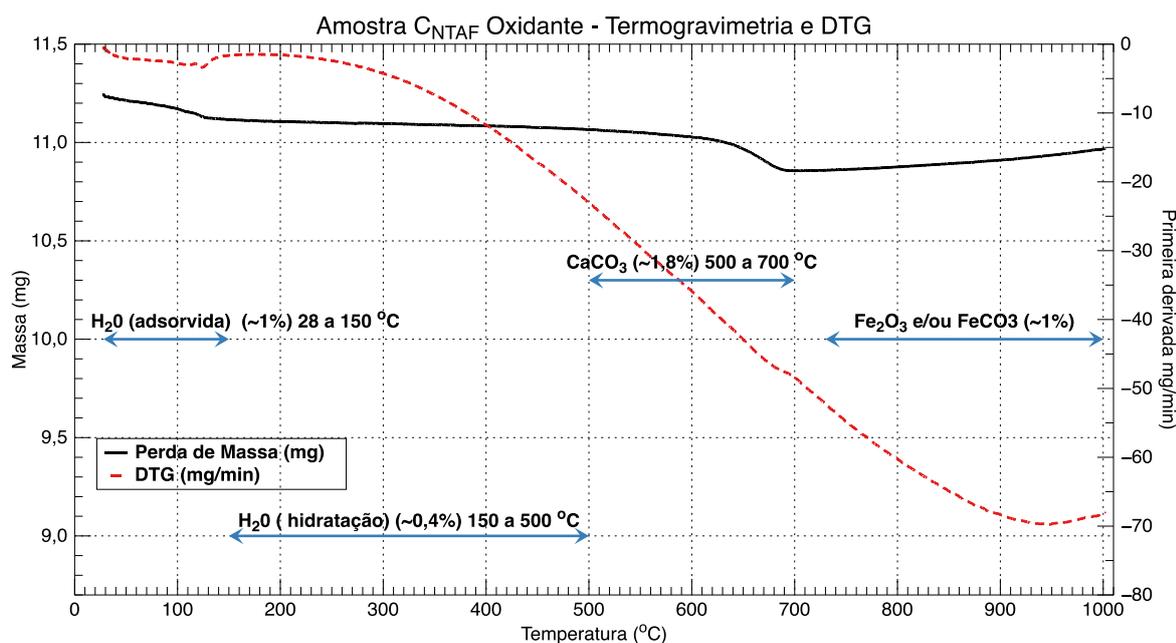


Figura 4.23 – Curvas Termogravimétricas na atmosfera oxidante - C_{NTAF}

As duas curvas (atmosfera inerte e a oxidante) são semelhantes. O comportamento da amostra C_{NTAF} não se alterou com a variação da atmosfera. Nota-se pelas Figuras 4.22 e 4.23 que as curvas DTG apresentaram picos endotérmicos e exotérmico característicos da decomposição e ganho de massa respectivamente, de fases presentes na amostra.

Na Tabela 4.24 resume-se os resultados das análises: as perdas e ganho de massas da amostra e o intervalo das temperaturas para as duas atmosferas. As perdas e ganhos de massa da amostra foram obtidas pela curva TG, e o intervalo de temperatura de variação de massa, pela curva DTG.

Tabela 4.24- Resultados das termoanálises da C_{NTAF}

Amostra C_{NTAF}						
Fases analisadas	Atmosfera inerte			Atmosfera oxidante		
	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)	Intervalo de temperatura (°C)	Perda de Massa (%)	Ganho de Massa (%)
$H_2O_{adsorvida}$	28 - 150	1,3	-	28 - 150	1,0	-
$H_2O_{hidratação}$	150 - 520	0,8	-	150 - 500	0,4	-
$CaCO_3$	520 - 700	1,6	-	500 - 700	1,8	-
$FeCO_3$ e/ou Fe_2O_3	730 - 1000	-	0,7	730 - 1000	-	1,0

Inicialmente, houve perda de água adsorvida nas amostras entre 28°C a 150°C e a perda de água hidratação 150°C a 520°C. Em seguida, ocorreu a decomposição do $CaCO_3$, que se decompôs em ($CaO+CO_2$), entre 500°C - 700°C. Provavelmente, da reação do CO_2 , decomposto ($CaCO_3$) na etapa anterior, houve ganho de massa para o Fe_2O_3 e/ou $FeCO_3$.

A C_{NTAF} difere das duas anteriores. Apresentou perda de massa de H_2O adsorvida e de hidratação. A perda de $H_2O_{hidratação}$ é correspondente à perda de massa de compostos hidratados (Mg, Fe, Al) $PO_4 \cdot 2H_2O$ e $CaSO_4 \cdot H_2O$. Observa-se que, para a perda de água de hidratação, é necessária temperatura mais elevada em relação à água adsorvida. A perda de massa do $CaCO_3$ foi a menor em relação as demais amostras, assim como o ganho de massa.

A análise termogravimétrica nos apresentou as perdas e ganhos de massa dos compostos. Nas ATLD e BNTLD ocorreram a decomposição do CaCO_3 e do $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$, liberando $\text{CaO}_{\text{livre}}$, responsável pela expansibilidade e formação de tufa; e, ainda, a $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ decompõe em $\text{FeO}(\text{OH})$, provocando a oxidação. Na CNTAF houve a perda de água de hidratação e a decomposição do CaCO_3 .

A relação de decomposição nas amostras foram:

- CaCO_3 na $\text{CNTAF} < \text{ATLD} < \text{BNTLD}$;
- $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ na $\text{BNTLD} < \text{ATLD}$.

4.3.4 RESISTÊNCIA À SULFATOS

Este ensaio simulou a ação do intemperismo químico sobre o agregado, considerando que a presença de sulfato de sódio saturado em uma solução recria um ambiente externo, ao qual os minerais presentes no agregado serão submetidos.

O ensaio apresentou o resultado em % de perda de massa seguindo à orientação da ME 089 (DNER, 1994). A perda de massa para uso em pavimentos rodoviários não deve ser superior a 5% para as escórias de aciaria e de alto forno, conforme prescrito nas normas EM 262 (DNER, 1994) e EM 260 (DNER, 1994), respectivamente. Para uso como material drenante, não há normativa que oriente o limite aceitável de perda, assim posto segue a parametrização definida nas normas citadas. Os resultados apresentam-se na Tabela 4.25.

Tabela 4.25 - Resistência a sulfatos de sódio

Amostras	Frações das partículas [mm]	Verificação da perda				
		Massa inicial [g]	Massa retida # 8mm [g]	Nº partícula ensaiada	Nº partícula afetada	% perda massa
ATLD	63,5 – 38,0	3061,65	3056,65	14	10	0,21
	38,0 – 19,0	1557,99	1555,99	95	53	
	19,0 – 9,5	1403,72	1397,72	214	143	
BNTLD	63,5 – 38,0	3179,25	3178,08	14	10	0,01
	38,0 – 19,0	1460,10	1459,09	95	53	
	19,0 – 9,5	968,25	969,80	214	143	
CNTAF	63,5 – 38,0	3144,60	3144,4	22	22	0,01
	38,0 – 19,0	1491,23	1491,03	88	53	
	19,0 – 9,5	989,49	989,09	267	191	

A verificação da perda de massa ocorreu para os intervalos das frações das partículas em mm: 63,5 a 38,0; 38,0 a 19,0; 19,0 a 9,5. Os resultados deste ensaio, obtidos em relação à durabilidade ao sulfato de sódio, apresentaram valores bem inferiores aos limites da norma (máximo de 5% após 5 ciclos).

Com os resultados verificou-se que a ATLD obteve a maior perda de massa, mas não ultrapassou o limite estabelecido por norma, o que não inviabiliza o uso deste material.

4.3.5 CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA - CTC

A CTC refere-se à capacidade de adsorção de cátions em uma amostra, medida pela quantidade de cargas negativas dos elementos químicos presentes no material.

Essa capacidade de troca revela o potencial de interação do agregado siderúrgico com outros materiais também reativos, como os argilominerais e matéria orgânica. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 4.26.

Tabela 4.26 – Valores CTC

Tipo Amostra	pH em H ₂ O	CTC [cmol/dm ³]
A _{TLD}	12,5	10,9
B _{N_{TLD}}	12,4	8,0
C _{N_{TAF}}	11,6	17,5

A C_{N_{TAF}} apresentou a maior capacidade de adsorção de cátions, seguida da amostra A_{TLD} e da amostra B_{N_{TLD}}.

4.3.6 TEOR DE ÓXIDO DE CÁLCIO LIVRE

Este ensaio avalia a presença do CaO_{livre}, um dos compostos que desenvolve a expansão no material. A hidratação CaO_{livre} forma o hidróxido de cálcio Ca(OH)₂, tornando maior o volume molar.

A avaliação seguiu a orientação da NM 13 (ABNT, 2012), definida para obter o percentual de CaO_{livre} em cimentos. As amostras apresentaram valores menores que 2%, limite estabelecido pelas normas PRO 263 (DNER, 1994) e EM 262 (DNER, 1994). Os resultados alcançados foram:

- A_{TLD} com 0,34%;
- B_{N_{TLD}} com 0,57% e,
- C_{N_{TAF}} com 0,42%.

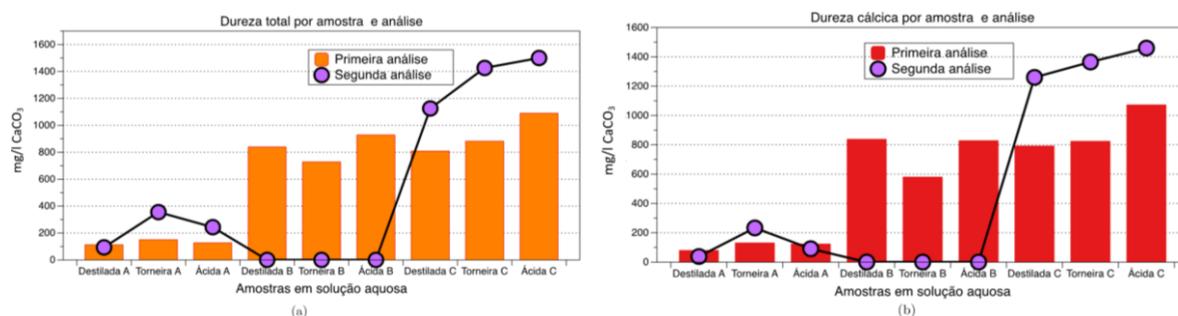
Os valores mostram uma avaliação positiva e indicam para esta análise que a possibilidade de ocorrência de expansões pelo CaO_{livre} nessas amostras é baixa. Dos resultados, apresenta-se a relação do % de CaO_{livre} entre as amostras: A_{TLD} < C_{N_{TAF}} < B_{N_{TLD}}.

4.3.7 ANÁLISE DAS ÁGUAS

Como descrito no Capítulo 3, as amostras foram imersas em águas destilada, de torneira e ácida. Analisaram-se as águas com o intuito de conhecer o comportamento das amostras em meio aquoso por um determinado período. As amostras foram analisadas em relação à dureza total D_T ; dureza cálcica D_{Ca} ; dureza magnésiana D_{Mg} ; alcalinidade parcial A_P e alcalinidade total A_T .

Com os resultados da A_P e A_T , verificou-se a presença da alcalinidade por hidróxidos A_{Hx} , carbonatos A_{Car} e bicarbonatos A_{Bi} . Obteve-se, também, o pH, a condutividade elétrica – CE e a quantidade de ferro em cada tipo de água e amostra.

Os resultados obtidos nas análises de D_T , D_{Ca} e D_{Mg} estão apresentados em gráficos na Figura 4.24.



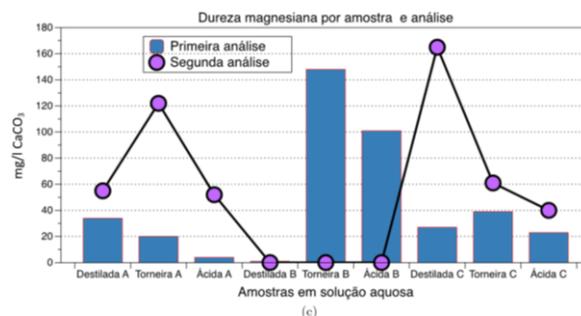


Figura 4.24– Dureza: a) total; b) cálcica; c) magnésiana

Na Figura 4.24a apresentam-se os valores da D_T . Para a primeira análise, observou-se, de maneira geral, a seguinte relação: $A_{TLTD} < B_{NTLD} < C_{NTAF}$. Para a segunda análise, não se obtiveram valores para a B_{NTLD} . Isso se deve ao fato de que a metodologia utilizada, Titulometria, não conseguiu titular a amostra, mesmo com 150 ml do titulador.

Ao Analisar os resultados das A_{TLTD} e C_{NTAF} no decorrer do tempo, identificou-se aumento nos valores da D_T . A amostra A_{TLTD} obteve os menores valores. Pode-se inferir que a amostra B_{NTLD} também teria seus valores acrescidos.

Para a D_{Ca} , na primeira análise, a B_{NTLD} e C_{NTAF} , (Figura 4.24b), apresentaram similaridade a D_T . Na primeira análise, de maneira geral, observa-se a seguinte relação: $A_{TLTD} < B_{NTLD} < C_{NTAF}$. Para a segunda análise, não se obtiveram valores para a B_{NTLD} ; a metodologia adotada não apresentou eficiência. Com o decorrer do tempo, houve acréscimo nos valores da D_{Ca} , a A_{TLTD} obteve os menores valores. Pode-se inferir que os valores da B_{NTLD} , tendenciosamente, acresceriam na segunda análise.

A D_{Mg} resulta da diferença entre a D_T e D_{Ca} , Figura 4.24c. Depende diretamente das demais durezas. A B_{NTLD} , como nos demais resultados da primeira análise, foi superior.

Na Tabela 4.27, descrevem-se os resultados dos ensaios para cada amostra e tipo de água. A primeira linha de cada análise refere-se à realizada em 18 de julho de 2017, após sete dias de imersão; a segunda linha de cada análise refere-se à realizada no dia 06 de dezembro de 2017, após 148 dias das amostras imersas em água. Na Tabela 4.27: D_T dureza total ($mgCaCO_3$); D_{Ca} dureza cálcica ($mgCaCO_3$); D_{Mg} dureza magnésiana ($mgCaCO_3$); e (NT) é amostra não titulada.

Tabela 4.27 - Resultados das durezas D_T , D_{Ca} e D_{Mg} das amostras.

Análise	Água Destilada			Água Torneira			Água Ácida		
	A_{TLTD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}	A_{TLTD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}	A_{TLTD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}
$D_T [mg/l CaCO_3]$	113	839	809	150	728	882	127	929	1090
	93	NT	1425	355	NT	1426	243	NT	1500
$D_{Ca} [mg/l CaCO_3]$	79	838	792	130	580	824	123	828	1073
	38	NT	1260	233	NT	1365	191	NT	1460
$D_{Mg} [mg/l CaCO_3]$	34	1	27	20	148	39	4	101	23
	55	NT	165	22	NT	61	52	NT	40

A água é classificada quanto ao grau de dureza, descrita na Tabela 2.10, Capítulo 2. A portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011, do Ministério da Saúde dispõe sobre o valor máximo permitido (V.M.P) para a dureza total da água em relação à potabilidade, 500 mg/l.

Ao analisar a Tabela 4.27, verifica-se que somente a amostra A_{TLTD} , nas duas análises, apresentou valores de potabilidade em detrimento da dureza total. A B_{NTLD} , na primeira análise, apresentou valores de água muito dura, com 87% (água ácida) a mais em relação à amostra A_{TLTD} ; para água de torneira o percentual é de 62,5% a mais e, para a água destilada,

77%.

Na Tabela 4.28 apresenta-se a relação dos resultados para análise da dureza, onde A_{des} água destilada, A_{tor} água de torneira e A_{aci} água ácida.

Tabela 4.28– Relações dos resultados da dureza entre as amostras

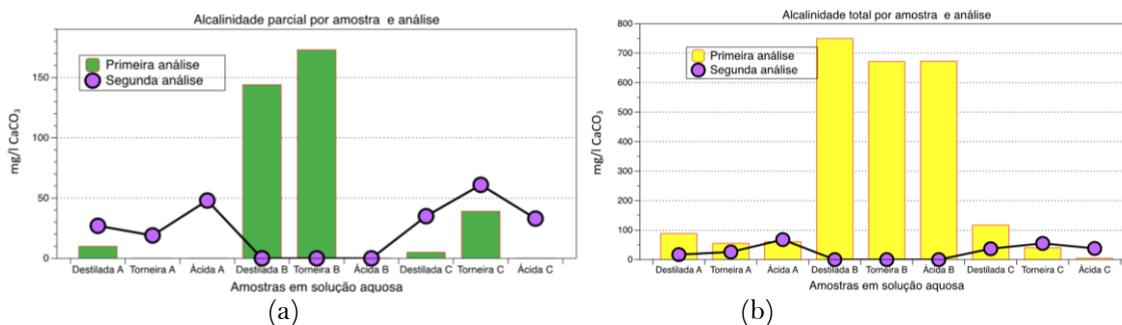
Dureza	Tipo de água analisada			Análise
	A_{des}	A_{tor}	A_{aci}	
D_T	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	2 ^a
D_{Ca}	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	2 ^a
D_{Mg}	$A_{TLD} > C_{NTAF} > B_{NTLD}$	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$A_{TLD} > C_{NTAF}$	2 ^a

Os resultados das análises para alcalinidade estão representados nos gráficos da Figura 4.35: alcalinidade parcial A_p , alcalinidade total A_t , alcalinidade por hidróxidos A_{Hr} , alcalinidade por carbonatos A_{Car} e alcalinidade por bicarbonatos A_{Bi} .

Na Figura 4.25a apresenta-se na primeira análise, que a A_p é bem mais intensa na BNTLD, exceto para a água ácida, onde não apresentou alcalinidade parcial. Na Figura 4.35b estão representados os resultados da A_t . Os valores alcançados para a BNTLD, primeira análise, são bem mais elevados ao comparar com as demais amostras. Na segunda análise, houve diminuição nas ATLD e CNTAF, exceto para água ácida.

Com a determinação da A_t e A_p obteve-se as A_{Hr} , A_{Car} e A_{Bi} . Na Figura 4.25c, a A_{Hr} , na primeira análise, apresentou-se somente na BNTLD. Surgiu na segunda análise para as ATLD e CNTAF com valores bem superiores. Na segunda análise, o método adotado não foi eficiente para a BNTLD. Para a A_{Car} , Figura 4.25d, novamente os maiores valores pertencem à BNTLD, na primeira análise, bem superiores às demais amostras. Na segunda análise, há um pequeno incremento para as ATLD e CNTAF. Inferindo-se, na segunda análise para a BNTLD, ocorreria, também, um incremento.

Em relação à A_{Bi} , Figura 4.25e, apareceu somente na primeira análise, e bem mais representativa na BNTLD. A água enriquecida com bicarbonato de cálcio evapora por causa das temperaturas moderadas, e o CO_2 escapa para a atmosfera. Isso faz com que o $CaCO_3$ ($CaO_{livre} + H_2O$) se precipite.



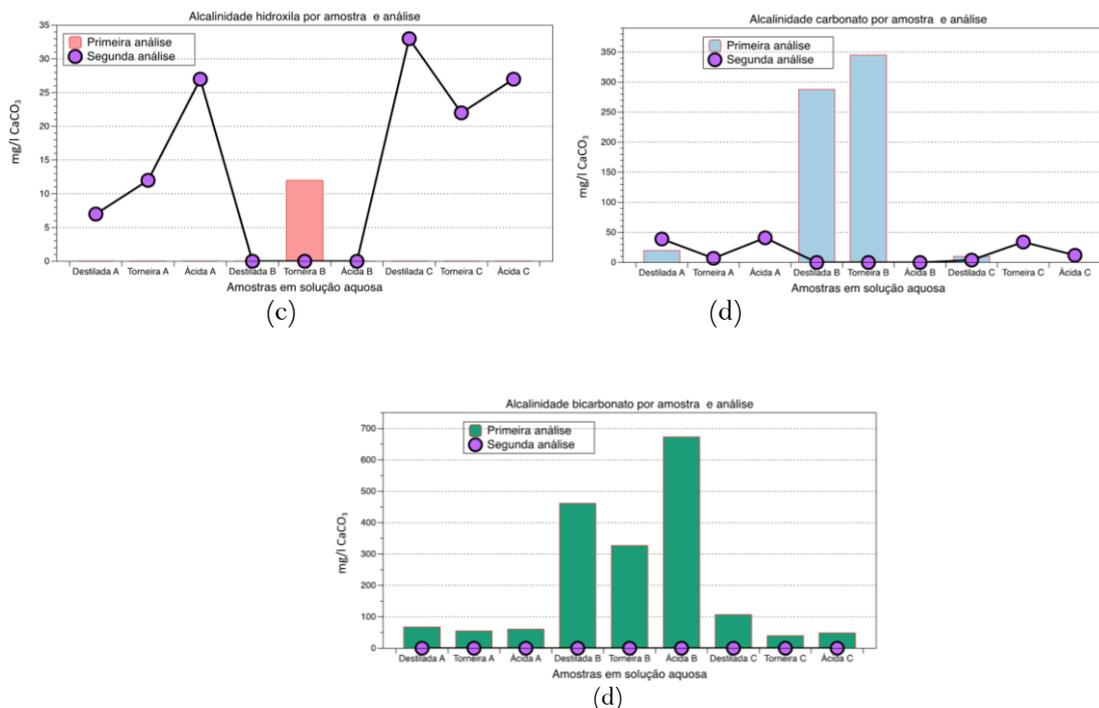


Figura 4.25 – Alcalinidade: a) parcial; b) total; c) por hidróxilas; d) por carbonatos; (e) por bicarbonatos

Essa reação explica o desaparecimento da A_{Bi} com o tempo e o aumento da A_{Hr} e A_{Car} . Devido a essas reações, infere-se que os valores da B_{NTLD} se elevariam com o tempo.

Os resultados estão descritos na Tabela 4.29, para cada amostra e tipo de água. A primeira linha de cada análise refere-se à realizada em 18 de julho de 2017, após sete dias de imersão; a segunda linha de cada análise refere-se à realizada no dia 06 de dezembro de 2017, após 148 dias das amostras imersas em água.

Na Tabela 4.29: A_p alcalinidade parcial (mgCaCO₃); A_T alcalinidade total (mgCaCO₃); A_{Hr} alcalinidade por hidróxidos (mgCaCO₃); A_{Car} alcalinidade por carbonatos (mgCaCO₃); A_{Bi} alcalinidade por bicarbonatos (mgCaCO₃); e (NT) é amostra não titulada.

A análise na Tabela 4.29 apresenta a B_{NTLD} com os maiores valores para todos os tipos de alcalinidades. A presença de alcalinidade deve-se aos sais do ácido carbônico (bicarbonatos e carbonatos, e os hidróxidos). Os bicarbonatos são os menos representativos, pois são mais solúveis na presença de água; já os carbonatos e os hidróxidos são menos solúveis em presença do gás carbônico.

Tabela 4.29 - Resultados das alcalinidades A_p , A_T , A_{Hr} , A_{Car} e A_{Bi} das amostras

Análise	Água Destilada			Água Torneira			Água Ácida		
	A _{TLD}	B _{NTLD}	C _{NTAF}	A _{TLD}	B _{NTLD}	C _{NTAF}	A _{TLD}	B _{NTLD}	C _{NTAF}
A_p [mg/l CaCO ₃]	10	144	5	0	173	0	0	0	0
	27	NT	35	19	NT	39	48	NT	33
A_T [mg/l CaCO ₃]	88	750	117	55	672	40	61	673	5
	47	NT	37	26	NT	55	68	NT	38
A_{Hr} [mg/l CaCO ₃]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	-	33	12	-	22	27	-	27
A_{Car} [mg/l CaCO ₃]	20	288	10	0	345	0	0	0	0
	39	-	4	7	-	34	41	-	12

Tabela 4.29 - Resultados das alcalinidades A_p , A_T , A_{Hr} , A_{Car} e A_{Bi} das amostras - continuação

Análise	Água Destilada			Água Torneira			Água Ácida		
	A _{TLD}	B _{N_{TLD}}	C _{N_{TAF}}	A _{TLD}	B _{N_{TLD}}	C _{N_{TAF}}	A _{TLD}	B _{N_{TLD}}	C _{N_{TAF}}
A_{Bi} [mg/l CaCO ₃]	68	462	107	55	327	40	61	673	49
	0	-	0	0	-	0	0	-	0

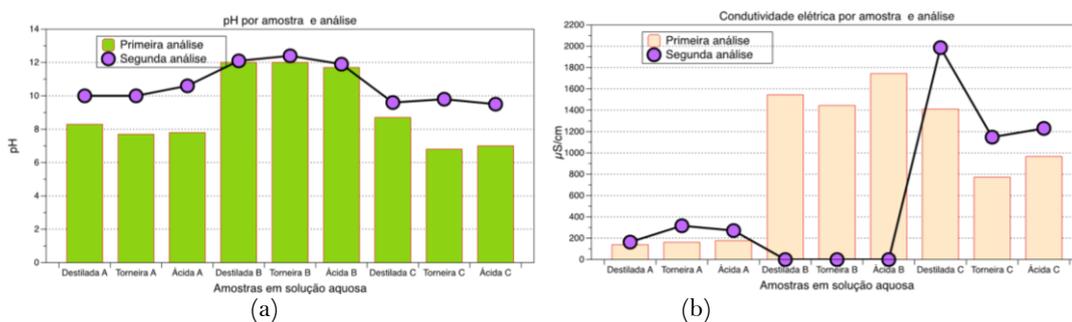
Na Tabela 4.30, apresenta-se a relação dos resultados para análise da alcalinidade, onde A_{des} água destilada, A_{tor} água de torneira e A_{aci} água ácida.

Tabela 4.30 – Relações dos resultados da alcalinidade entre as amostras

Alcalinidade	Tipo de água analisada			Análise
	A_{des}	A_{tor}	A_{aci}	
A_p	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	B_{NTLD}	-	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	2 ^a
A_T	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	1 ^a
	$A_{TLD} > C_{NTAF}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	2 ^a
A_{Hr}	-	-	-	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$A_{TLD} = C_{NTAF}$	2 ^a
A_{Car}	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	B_{NTLD}	-	1 ^a
	$A_{TLD} > C_{NTAF}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$A_{TLD} > C_{NTAF}$	2 ^a
A_{Bi}	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	1 ^a
	-	-	-	2 ^a

Outros valores na análise das águas: pH , CE e a quantidade de ferro presente nas águas das amostras imersas. Os gráficos da Figura 4.26 apresentam os valores gerados.

No gráfico da Figura 4.26a, verifica-se que os valores do pH aumentaram com o decorrer do tempo. O pH mais alcalino é da B_{NTLD} . O aumento do pH no meio aquoso deve-se à presença de $CaCO_3$. Valores acima de 11 possuem grandes concentrações de CO_2 que, ao reagir com H_2O , formam ácido carbônico, que reage com $Ca(OH)_2$ e forma o bicarbonato de cálcio $Ca(HCO_3)_2 + H_2O$. O $CaCO_3$ sofre hidrólise em solução aquosa, $CaO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + Ca(OH)_2$, pouco solúvel em água, que se precipita e acumula no fundo.



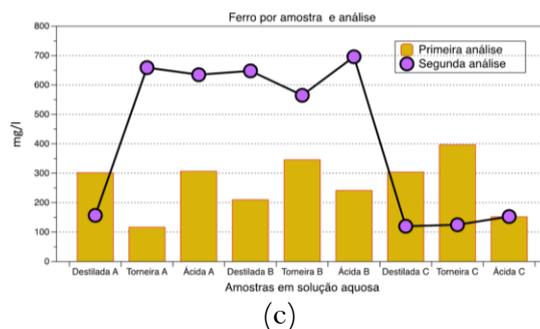


Figura 4.26– a) valores pH ; b) valores CE ; c) quantidade de ferro.

O gráfico da CE , Figura 4.26b, seguiu a tendência dos demais resultados; a B_{NTLD} , na primeira análise apresentou os maiores valores e aumentou com o decorrer do tempo. A CE indica o grau de sais ou outros compostos em solução. Em água doce, relaciona-se principalmente com as concentrações de íons determinantes de salinidade, que são Ca , Mg , Na , K , CO_3 , SO_4 e Cl_2 . Como exemplo, a água potável apresenta condutividade entre (20 e 70 $\mu S/cm$) (Fatma, 2007). Os resultados alcançados para CE , para todas as amostras, foram acima do limite para água potável.

A não recomendação do consumo de água com alta CE está associada à alta mineralização que se manifesta sob a forma de sabor desagradável. A água apresenta excelente qualidade para CE até 400 $\mu S/cm$ (MENDES E OLIVEIRA, 2004). Somente à A_{TLD} , os resultados encontrados para CE estão dentro do limite, água de excelente qualidade.

Na Figura 4.26c, apresenta-se os valores obtidos para a quantidade de ferro presente na solução aquosa. Os resultados variavam bastante para os tipos de água na mesma amostra e, com o decorrer do tempo, ocorreu acréscimo expressivo para A_{TLD} e B_{NTLD} . Na amostra C_{NTAF} , reduziu-se com o decorrer do tempo.

Quando o pH do meio eleva, aumenta a concentração do ferro, que se precipita, tornando o meio oxidante. A $Fe(OH)_2$ permanece em solução até o pH de 7,5. Acima desse valor ocorre a precipitação. Através da análise, o elemento químico Fe se precipitou, o que pode desencadear o fenômeno da expansão.

A Tabela 4.31 apresenta os valores do pH , CE , Fe , medidos nas águas analisadas por tipo de água e amostra. Na Tabela 4.31, pH é potencial de hidrogênio; CE é condutividade elétrica ($\mu S/cm$); Ferro é quantidade de ferro em (mg/l); e NI é valor não identificado.

Para cada ensaio realizado, Tabela 4.31 temos: na primeira linha de cada análise o resultado refere-se ao ensaio realizado em 18 de julho de 2017, após sete dias de imersão; a segunda linha de cada análise refere-se ao ensaio realizado no dia 06 de dezembro de 2017, após 148 dias de das amostras imersas em água.

Tabela 4.31- Resultados pH , CE e Fe nas amostras.

Análise	Água Destilada			Água Torneira			Água Ácida		
	A_{TLD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}	A_{TLD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}	A_{TLD}	B_{NTLD}	C_{NTAF}
pH	8,3	12,0	8,7	7,7	11,9	6,8	7,8	11,7	7,0
	10,0	12,1	9,6	10,0	12,4	9,8	10,6	11,9	9,5
CE [$\mu S/cm$]	140	1544	1410	161	1445	772	178	1744	966
	164	NI	1987	317	NI	1148	272	NI	1230
Ferro	302	210	304	117	346	397	307	242	152
	157	648	120	659	565	125	635	696	153

Observa-se, na Tabela 4.31, que o pH da amostra é semelhante para os tipos de água. Na B_{NTLD} , entre a primeira e a segunda análise, não ocorreu alteração.

Verifica-se, na Tabela 4.31, que na segunda análise das águas, para a amostra B_{NTLD} , não se obteve leitura para a CE . Pode-se inferir que a quantidade elevada, presente na amostra, impossibilitou o registro pelo Condutivímetro utilizado.

A amostra B_{NTLD} é uma escória siderúrgica, proveniente de forno conversor a oxigênio; portanto, é uma escória tipo LD. Como não recebeu tratamento de cura (Capítulo 2, subitem 2.6), pode-se inferir que a amostra apresenta quantidade expressivas do CaO que, com o tempo, precipitou, impedindo a eficiência do método adotado na obtenção da dureza, da alcalinidade da água e da condutividade elétrica.

Os valores obtidos para a quantidade de ferro presente na solução aquosa, estão descritos na Tabela 4.31. Os resultados variavam bastante para os tipos de água na mesma amostra e, com o decorrer do tempo, ocorreu acréscimo expressivo para A_{TLD} e B_{NTLD} . Na amostra C_{NTAF} , reduziu-se com o decorrer do tempo.

Na Figura 4.27 apresenta-se os sais insolúveis formando uma nata, apresentado nas amostras A_{TLD} e B_{NTLD} enquanto submersas, indicando a presença de CaO na água. Também, a nata apareceu em amostras armazenadas em tambores inundadas pelas águas das chuvas, como uma espessa camada de sal.

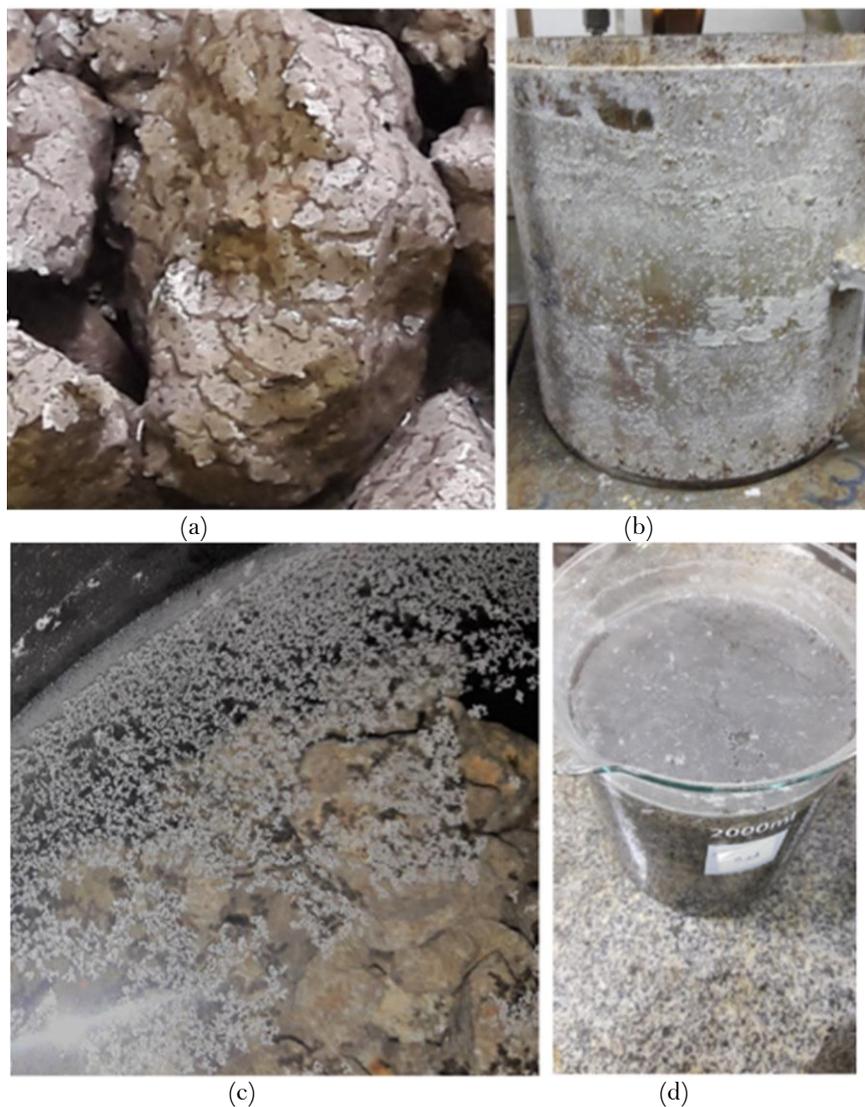


Figura 4.27 – Formação de nata e incrustações: a) amostra saturada no permeâmetro; b) cilindro de proctor imerso em água na estufa - ensaio de expansão; c) formação de sais em amostra imersa; d) nata - amostra de agregado imerso em *becker*.

Na Tabela 4.32, apresenta-se a relação dos resultados para análise *pH*, *CE* e Ferro, onde A_{des} água destilada, A_{tor} água de torneira e A_{aci} água ácida.

Tabela 4.32- Relações dos resultados *pH*, *CE* e Fe entre as amostras

Alcalinidade	Tipo de água analisada			
	A_{des}	A_{tor}	A_{aci}	Análise
<i>pH</i>	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	1 ^a
	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	2 ^a
<i>CE</i>	$B_{NTLD} > C_{NTAF} > A_{TLD}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	1 ^a
	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	$C_{NTAF} > A_{TLD}$	2 ^a
Ferro	$C_{NTAF} > A_{TLD} > B_{NTLD}$	$C_{NTAF} > B_{NTLD} > A_{TLD}$	$A_{TLD} > B_{NTLD} > C_{NTAF}$	1 ^a
	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	$A_{TLD} > B_{NTLD} > C_{NTAF}$	$B_{NTLD} > A_{TLD} > C_{NTAF}$	2 ^a

Conclui-se com a análise das águas que:

- A água dura indica presença de carbonatos e hidróxidos. A água, ao aquecer, precipita $CaCO_3$ e $Ca(OH)_2$ em presença de CO_2 (dureza temporária), que causa entupimento nas tubulações. Por outro lado, os sulfatos não são eliminados pela ebulição (dureza permanente).
- A amostra C_{NTAF} apresentou maior D_T na segunda análise, porém, esta amostra apresenta dureza temporária pela presença de $CaCO_3$ e, também, a dureza permanente pela presença do $CaSO_4$; maior *CE* e maior A_{Hr} ;
- Em relação à A_{TLD} e B_{NTLD} , apresentam, somente a dureza temporária, $CaCO_3$ e $Ca(OH)_2$;
- Os valores da alcalinidade com o decorrer do tempo aumentaram, sendo: por hidróxidos $C_{NTAF} > A_{TLD}$; por carbonatos $A_{TLD} > C_{NTAF}$.
- Os hidróxidos, ao entrar em contato com o CO_2 , originam o $CaCO_3$, decompondo-se e depositando no fundo, provavelmente formando as tufas com o decorrer do tempo.
- As amostras são propensas à formação de incrustações devido ao grau de dureza, e a presença de $Ca(OH)_2$ por A_{Hr} e, $CaCO_3$ por A_{car} são pouco solúveis e se precipitam.
- A análise identificou que houve aumento da *CE* após 148 dias de imersão das amostras, o que comprova que a salinidade das águas aumentou com o tempo.

Para o objeto desta pesquisa, em que o material será empregado como material drenante, dificilmente se manterá imerso em água parada por um tempo maior que sete dias, período em que ocorreu a primeira análise das águas.

Com os resultados obtidos na caracterização química, é possível realizar correlações entre os ensaios:

- Nas análises químicas das amostras FRX e MEV foram identificados elementos químicos responsáveis pelo fenômeno da expansão e a formação de tufa: CaO , FeO e MgO .

- Os pontos com maior % identificados pela análise FRX foram os mesmos de maior intensidade nos espectros identificadas pela MEV. Nas A_{TLD} e B_{NTLD} , o CaO e FeO e, na C_{NTAF} , o CaO e SiO_2 .
- A C_{NTAF} possui maior % de MgO e menor % nos FeO e MnO. Essa desproporcionalidade a caracterizou como amostra instável em relação ao MgO. Essa instabilidade representa o MgO_{livre} , responsável pela instabilidade volumétrica, podendo ocasionar a expansibilidade.
- As três amostras apresentaram suscetibilidade à desintegração na relação do CaO com demais óxidos presentes, inequações Pablo Gaibros.
- Nas análises das águas, os valores alcançados na alcalinidade confirmaram a existência de A_{Car} e A_{Hx} desenvolvidos no decorrer do tempo, além da dureza total da água D_T .
- A elevada D_T nas águas analisadas deve-se à presença do $CaCO_3$, que eleva o pH , e com isto surgem a A_{Car} e A_{Hx} . Esses compostos reafirmam a possibilidade de desencadear a expansibilidade e a deposição da calcita, responsável pela formação de tufa.
- Com a análise visual das amostras, imersas em água, identificaram-se fraturas e posterior desintegração, tendo como provável causa a expansão do CaO ocluso e/ou CaO_{livre} , a oxidação FeO e Fe_2O_3 . Visualizou-se, também, a formação de sais nas águas imersas, identificados no ensaio CTC, nos elevados valores da CE e, as incrustações no cilindro metálico.
- As perdas de massa identificadas pela TG/DTG correlacionam-se com os óxidos CaO e FeO identificados pela análise FRX. Nas três amostras, A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} , ocorreu decomposição do $CaCO_3$; e a decomposição $Ca_2Fe_2O_5$ para as amostras A_{TLD} e B_{NTLD} .
- O maior percentual de CaO_{livre} obteve-se para a B_{NTLD} e, na análise TG/DTG, obteve maior perda do $CaCO_3$, podendo haver correlação entre eles, pois a decomposição do $CaCO_3$ resulta em $(CaO_{livre} + CO_2)$. O CO_2 reage com outros elementos, e o CaO é depositado.
- Os maiores responsáveis pelo fenômeno da expansão: CaO_{livre} e MgO_{livre} , provocam a desintegração e o enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações, e a oxidação e a corrosão, pela presença do FeO e Fe^0 , elementos identificados na análise FRX, TG/DTG e nas análises das águas.
- Na análise da FRX identificaram-se o CaO, MgO e FeO. Na A_{TLD} , identificou-se o % de expansão, proveniente desses óxidos expansivos. Nas B_{NTLD} e C_{NTAF} não houve expansão na média acumulada.
- Observa-se, também, que, apesar do % de expansão ter apresentado valores inferiores ao limite especificado por norma, a amostra expandiu (desintegrou), apresentado no próximo item 4.4 deste capítulo, o que leva a inferir que o limite % adotado pela norma é inadequado ou a metodologia deve ser revista.
- As A_{TLD} e B_{NTLD} apresentaram somente a dureza temporária proveniente do $CaCO_3$ e $Ca(OH)_2$ que, quando precipitados, formam a tufa. Outro composto presente que pode desencadear a tufa é $Ca_2Fe_2O_5$.
- A A_{Hx} aumenta com a elevação do pH , que, por sua vez, aumenta pela presença do $CaCO_3$ em meio aquoso, por se um sal que possui característica básica. Para meios aquosos com $pH > 8,3$ ocorre maior presença de insolúveis ou pouco solúveis nesse meio. Os hidróxidos, além de insolúveis, apresentam características cáusticas.
- Dos valores alcançados para CTC nas amostras, pode-se inferir estarem presentes no parâmetro obtido de D_T , onde a classificou como água dura e moderadamente dura. Sabe-se que a D_T da água está associada à presença de cátions

no meio aquoso.

- A C_{NTAF} apresentou elevado valores de D_r , porém, esta amostra apresenta dureza temporária pela presença de $CaCO_3$, e, também, a dureza permanente pela presença do $CaSO_4$, identificada pela análise DRX.
- A C_{NTAF} apresentou o CaO combinado com SiO_2 (DRX), elemento que neutraliza a ação expansiva do CaO , além de outros compostos estáveis. Nessa amostra, FeO (DRX) não está presente, composto que responde pela oxidação do ferro em presença da água.
- Embora a verificação do CaO_{livre} e do potencial de expansão ter resultados inferiores aos limites estabelecidos nas normas, os ensaios de Termogravimetria, Análise de Águas, evidenciaram a existência dos compostos químicos responsáveis pelo fenômeno expansivo (fratura e desintegração das amostras) e formação de tufa.

4.4 AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO

A colmatação é o processo de retenção que pode reduzir a condutividade hidráulica dos filtros e drenos, responsável pela obstrução dos dispositivos de drenagem.

Como citado no Capítulo 2 item 2.2.6, observa-se na prática que a colmatação devida a depósitos de carbonatos de cálcio ($CaCO_3$) é a causa mais comum e importante da obstrução de drenos. O tempo que leva para entupir depende de alguns parâmetros, tais como minerais solúveis, velocidade do fluxo e o pH .

O processo de colmatação pode ocorrer pela precipitação dos carbonatos de cálcio e magnésio presente nas amostras (colmatação química), ou pela desintegração dos agregados (colmatação física) provenientes da presença de óxidos de cálcio, magnésio e ferro.

Na análise das águas, identificou-se a possibilidade de precipitação dos carbonatos e do ferro, compostos que ocasionam a formação de tufa e oxidação, respectivamente, favorecidos pela elevação do pH nas amostras. Na Figura 4.28, apresentam-se alterações ocorridas nas amostras após imersão em água.

Na Figura 4.28a, observam-se partículas que foram lascadas em sua superfície (1); fraturas ocorridas nas partículas, identificadas pelo (2), de várias dimensões; a desintegração das partículas após serem fraturadas (3). Além do processo de expansão, observou-se, também, a oxidação dos grãos (4). A oxidação, com o decorrer do tempo, desintegrará a amostra, ocasionando sedimentação no fundo.

Na Figura 4.28b ampliou-se a imagem do grão da partícula no processo de oxidação. É possível visualizar o início de fissuras no grão, proveniente da oxidação. Na sequência, na Figura 4.38c, na imagem ampliada, identificam-se as trincas, fissuras e processo de desintegração da amostra.



Figura 4.28 – Alterações das amostras - LD, após imersão em água: a) fratura, desintegração e oxidação; b) imagem ampliada do processo de oxidação; c) imagem ampliada do processo de oxidação seguida de fratura e desintegração da amostra

Pode-se inferir, pela dimensão das fraturas e desintegração dos grãos, que, na amostra analisada, há presença da cal residual enclausurada nos poros internos, do agregado siderúrgico, bem como grãos do óxido de cálcio livre não hidratados, como identificados por Yildirim e Prezzi em 2009.

De acordo com Montgomery e Wang, Capítulo 2, item 2.4.4, inequações 2.1 e 2.2, a C_{NTAF} possivelmente apresenta formação de solução sólida instável do MgO com FeO e MnO . Analisando as inequações 2.3 e 2.4 de Pablo Gaibros, Capítulo 2, item 2.2.4, para as três amostras, é possível a ocorrência da desintegração das mesmas.

Na Figura 4.29 apresenta-se o resultado do processo de desintegração das amostras, evidenciadas na Figura 4.28. Na Figura 4.29a apresenta-se os resíduos acumulados no fundo do recipiente onde as amostras estavam imersas, resultante do processo de desintegração. Por outro lado, na Figura 4.29b observa-se a sedimentação de material resultante do processo de oxidação da amostra após a imersão em água. Observa-se, também, a mudança de coloração da água para avermelhada, evidenciando a presença de ferro nas amostras.

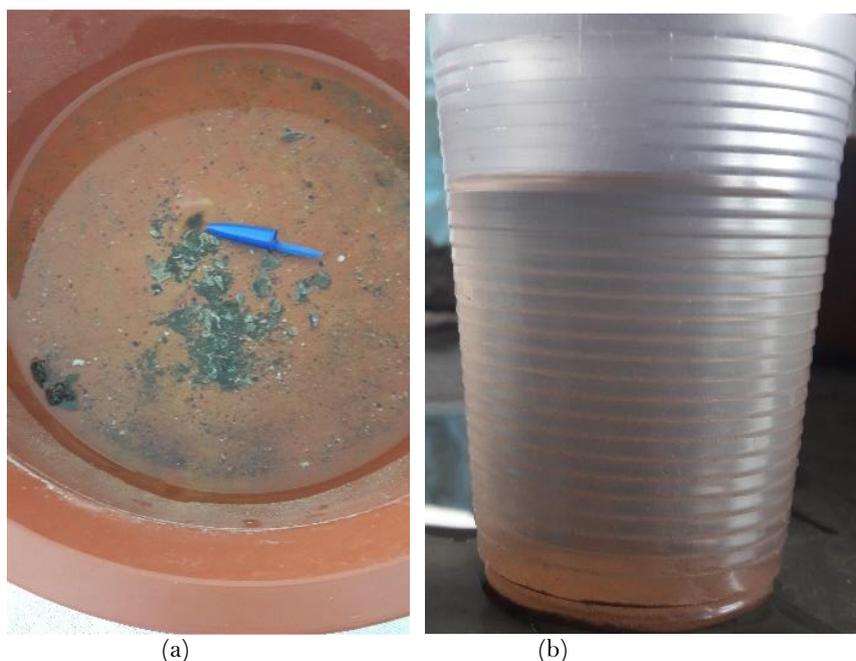


Figura 4.29 – a) resíduos das amostras imersas em água após desintegração; b) sedimentação e alteração da coloração das águas

No Capítulo 3 na Tabela 3.6, estão descritas as massas de cada amostra inseridas nos *beckers* imersas em água. O objetivo era identificar pelas diferenças de massas em qual intervalo de diâmetro, haveria maior desintegração. Após os 148 dias de imersão as amostras foram retiradas dos *beckers*, secas em estufas e medidas as massas.

Analysaram-se as perdas de massa, diferença entre as massas das amostras antes e depois da imersão e, concluiu-se não ser possível uma análise linear.

Em geral, a perda nas amostras graúdas foi menor que 0,5% para todos os tipos de água; para a granulação fina na ATLD e BNTLD obteve-se 2% de perda e, na CNTAF a perda ficou em torno de 1,5% para todos os três tipos de águas analisadas. Em relação à amostra total, na BNTLD na água de torneira e destilada e, na CNTAF na água ácida tiveram maior perda de massa (1%).

Portanto, com as evidências apresentadas neste item as amostras analisadas apresentam indícios de desintegração e de deposição de calcita, fatores responsáveis pelo fenômeno de expansão e formação de tufa mas, não se pode afirmar que o fenômeno da colmatção ocorrerá ao longo do tempo e que obstruirá os dispositivos drenantes.

CAPÍTULO 5

5. PROPOSTA DE DIMENSIONAMENTO DO COLCHÃO DRENANTE

5.1 METODOLOGIA CLÁSSICA DE DIMENSIONAMENTO DO COLCHÃO DRENANTE

Segundo DNIT (2006b), justifica-se a construção de um sistema de drenagem em rodovias federais quando ocorre na região índice pluviométrico anual acima de 1500 mm e, há volume médio diário de veículos comerciais acima de 500. No Brasil, a maior parte do território brasileiro, apresenta altura pluviométrica acima 1500 mm e, um tráfego de veículos comerciais nas rodovias federais, acima de 500 diariamente.

Segundo Moulton (1980), o sistema de drenagem de águas subterrâneas é baseado em

regras de ouro empíricas, que se desenvolveram por tentativas e erros ao longo dos anos, ou na técnica gráfica, bastante tendenciosa, envolvendo o uso de redes de fluxo.

Suzuki *et al.* (2013) citam que as rupturas precoces dos pavimentos podem ser evitadas, com a concepção adequada de projeto e dimensionamento dos sistemas de drenagem. Das fontes de águas que podem penetrar na estrutura rodoviária, duas contribuições que merecem maior atenção, as águas que escoam sobre a superfície do solo, e a parcela que se infiltra no solo, podendo formar os lençóis subterrâneos.

Pereira (2003) concluiu que os métodos e procedimentos de dimensionamento estrutural de pavimentos, empregados no meio técnico nacional, não utilizam ainda, explicitamente, nenhum coeficiente para levar em consideração os efeitos deletérios da presença de água livre na estrutura. Estas águas movimentam-se, como o próprio nome diz, de forma livre dentro dos pavimentos obedecendo apenas às leis da hidráulica.

O nível do lençol freático pode elevar-se em função das precipitações e das variações climáticas sazonais, ocasionando a perda de suporte da sub-base ou a diminuição do módulo de resiliência dos materiais constituintes das camadas estruturais e, conseqüentemente um desempenho insatisfatório do pavimento.

Nesta perspectiva, conclui-se que a água livre no interior da estrutura afeta a resistência dos materiais e, a sua remoção deve ser promovida em breve intervalo de tempo, através de fluxos hidrodinâmicos metodologicamente adequados, empregando colchão drenante, os quais devem ser partes integrantes do processo de dimensionamento estrutural dos pavimentos.

Diante do contexto pode-se considerar que:

- A redução da vida útil do pavimento tem uma de suas causas relacionadas à infiltração de água na estrutura (Figura 2.1);
- Uma das maiores parcelas de contribuição de água para a drenagem subterrânea são as águas de infiltração superficial dos pavimentos proveniente das precipitações (DNIT, 2006b);
- A falta de drenagem adequada reduz a capacidade de suporte da sub-base, em virtude da sua saturação originada pelas águas de infiltrações;
- As estruturas que previnem danos causado pelas águas provenientes de lençóis e do fenômeno conhecido como “franja capilar”, são chamadas de dispositivos de drenagem subterrânea (DNIT, 2006b);
- O colchão drenante intercepta as águas que possam atingir a sub-base e rebaixar o lençol freático;
- O Manual de Drenagem do DNIT não apresenta metodologia de dimensionamento para o colchão drenante.

5.1.1 DEFINIÇÕES E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A proposta de dimensionamento do colchão drenante é fornecer uma metodologia prática de modo que, o usuário, o engenheiro projetista, tenha um instrumento de análise numérica que, diminua a incerteza de projeto quanto, ao desempenho desse dispositivo de drenagem.

5.1.1.1 Características do Colchão Drenante

O colchão drenante, do ponto de vista físico, é uma camada drenante, logo abaixo da sub-base, com capacidade de receber e transportar todo o fluxo, não confinado, derivado das infiltrações que possam atingir a camada de sub-base e, da elevação do lençol freático que, alcança esse dispositivo de drenagem.

Na Figura 5.1 detalha-se um perfil geométrico de colchão drenante. Nota-se que a área que recebe o fluxo é determinada por B (frente do colchão drenante, perpendicular ao fluxo) e

espessura do colchão drenante - t_{LCL} . A declividade β - define o gradiente hidráulico.

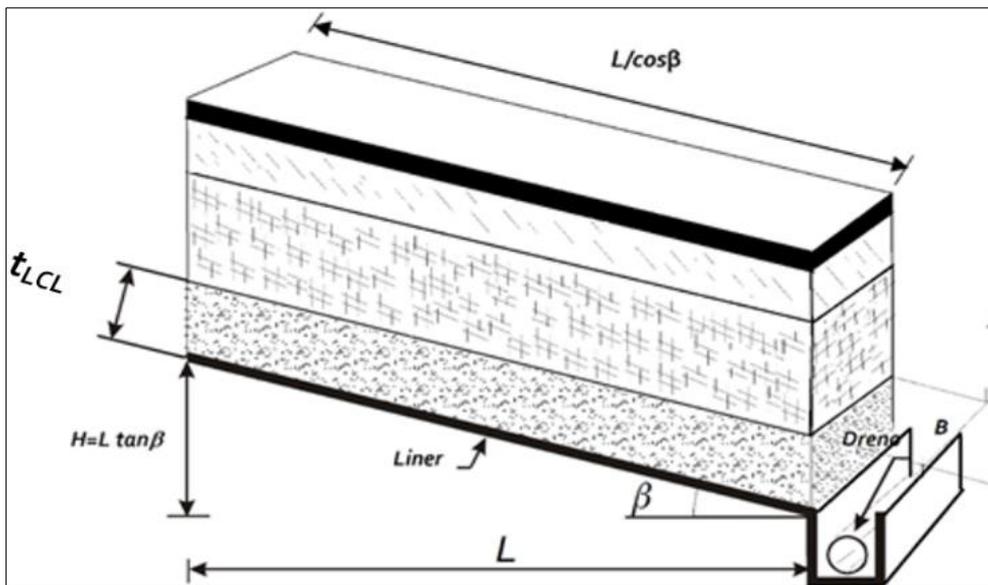


Figura 5.1 – Esquema geométrico do colchão drenante - Modificado de Giroud *et al.*, 2000

Analiticamente, o fluxo é considerado não confinado e, pode ser tipificado como visto na Figura 5.2. O fluxo é caracterizado pela espessura de percolação - t , medida na direção perpendicular ao talude $[L]$ e, por sua vez, a profundidade - D $[L]$ medida verticalmente. Quando o fluxo é paralelo ao talude obtém-se as relações:

$$t = D \cos b \quad (5.1)$$

$$t = \frac{h}{\cos b} \quad (5.2)$$

$$h = D \cos^2 b \quad (5.3)$$

onde: β (%) a declividade transversal; h , a carga hidráulica $[L]$; D , a profundidade da camada drenante $[L]$.

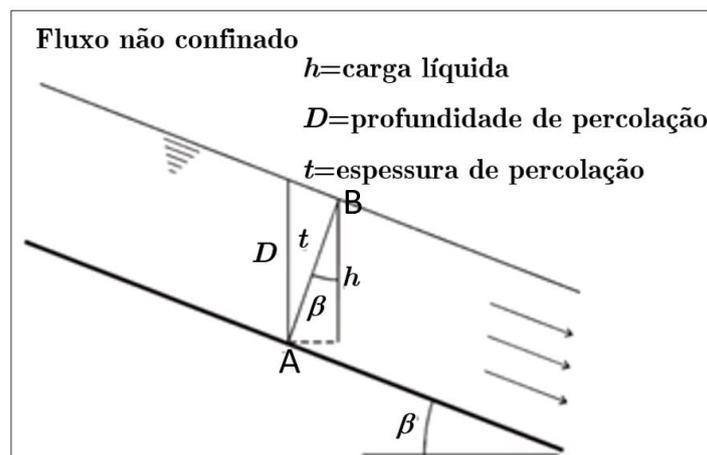


Figura 5.2 – Carga hidráulica, profundidade e espessura da camada em um colchão drenante, com fluxo não confinado e paralelo à declividade do *liner* - Modificada de Giroud *et al.*, 2000

A carga hidráulica ou altura de carga - h é dada pela diferença entre dois pontos, localizados sobre a mesma superfície equipotencial, (A e B, formam uma linha equipotencial porque esta é perpendicular à linha de fluxo), o ponto B é a superfície do fluxo, outro ponto, A é o próprio *liner*.

5.1.1.2 Taxa de Infiltração no Colchão Drenante

Não se tem conhecimento da existência de um método discreto que defina a quantidade de água que se infiltra no meio poroso. Moulton (1980) assinala que, estimar a quantidade de líquido que forma a contribuição de um colchão drenante é muito complexa. Duas recomendações no *Highway Subdrainage Design*, publicado FHWA (FHWA-TS-80-224) oferecem uma pista dessa complexidade. A primeira de Cedergren (1973), que leva em conta o índice pluviométrico, a taxa de infiltração, o tipo e o estado do revestimento em relação ao trincamento da superfície.

A segunda, de Ridgeway (1976), quantifica o volume de água que infiltra no pavimento em função de fissuras e juntas e, da geometria da plataforma com o emprego de valores empíricos obtidos pelo pesquisador.

Giroud *et al.* (2000) anotam que teoricamente todo volume de água dividido pela área superficial, é a taxa de infiltração - q_h , evidentemente, essa é uma maneira simplificada de estimar q_h que pode ser representada pela formulação a seguir:

$$q_h = \frac{Q_h}{A_h} \quad (5.4)$$

onde, q_h a taxa de infiltração [$L.T^{-1}$] que, corresponde à relação da vazão ou fluxo Q_h [$L^3.T^{-1}$] pela área do fluxo A_h [L^2].

Considerando que a vazão Q_h oriunda da precipitação pode ser medida por coletor de área de fluxo unitária A_h , com altura definida, no tempo de um dia e desse modo, pode-se afirmar que a precipitação é uma taxa de volume pelo tempo [$L^3.T^{-1}$], onde D_L altura do líquido coletado [L] durante o tempo Δ_t [T], Figura 5.3, tem-se:

$$Q_h = A_h \frac{D_L}{\Delta_t} \quad (5.5)$$

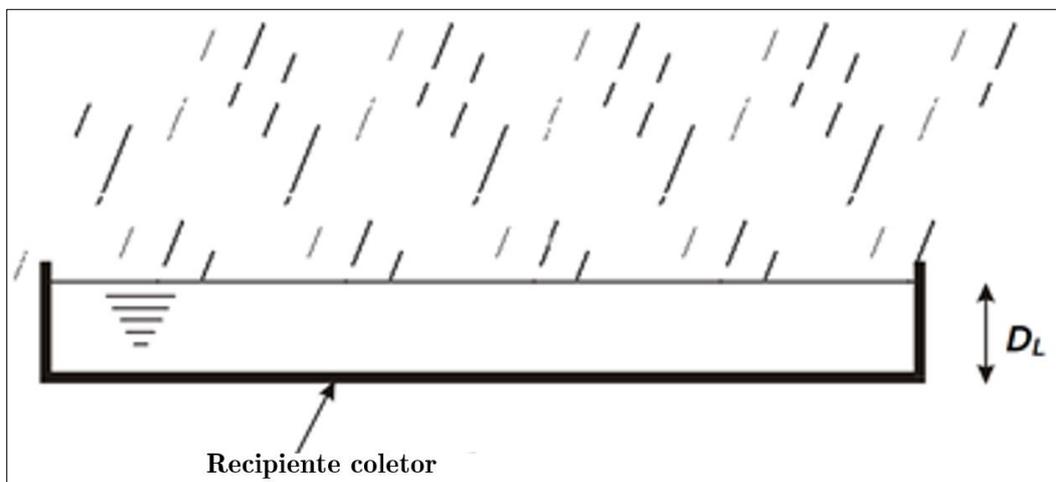


Figura 5.3 – Esquema de coleta de precipitação – Modificada de Giroud *et al.* 2000

Combinando a Equação 5.4 e 5.5, tem-se que a taxa de infiltração q_h [LT^{-1}] é a relação entre D_L altura do líquido coletado durante o tempo Δ_t :

$$q_h = \frac{D_L}{\Delta_t} \quad (5.6)$$

Portanto, Giroud *et al.* (2000) estabeleceu para a medida de taxa de infiltração de 1 dia, considerando área de influência de $1m^2$:

- para $q_h = 50 \text{ mm/dia} = 5,78.10^{-7} \text{ m/s}$;

- para $q_i = 100 \text{ mm/dia} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$;
- para $q_i = 150 \text{ mm/dia} = 1,74 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$;
- para $q_i = 200 \text{ mm/dia} = 2,32 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$;

5.2 METODOLOGIA PROPOSTA

Várias propostas de dimensionamento tomam por base as metodologias apresentadas por Giroud *et al.* (2000) no artigo intitulado “*Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers*”, onde os autores apresentam uma série de equações, para o cálculo da espessura líquida máxima (t_{max}), em uma camada drenante, a partir da caracterização dos tipos de escoamentos, utilizando diversas teorias e modelos matemáticos, empíricos e numéricos.

O dimensionamento adotado por Giroud *et al.*, 2000 segue duas abordagens:

- Cálculo da espessura admissível do colchão drenante (t_{cl}), que consiste no cálculo da espessura líquida máxima de percolação (camada drenante);
- Características hidráulicas, que por sua vez, versa sobre o cálculo da condutividade hidráulica, necessária para uma dada camada drenante com a fixação de uma espessura previamente escolhida.

Nesta Tese adotou-se a primeira abordagem, por estar mais alinhada ao propósito de dimensionamento.

Uma vez determinada a espessura líquida máxima (t_{max}) encontra-se a espessura admissível para o colchão drenante (t_{cl}). Para tal dimensionamento considera-se um fator de segurança hidráulico (FSH), estimado através da análise do decréscimo da capacidade de percolação a longo prazo, do material drenante e das possíveis incertezas de cálculo.

Reitera-se que a degradação química do material drenante pode alterar a faixa granulométrica, bem como, a condutividade hidráulica do material granular, por isso, a seleção de um material adequado é de suma importância para o dimensionamento do colchão drenante.

Portanto, no caso de se utilizar camadas drenantes, a única possível redução relevante da capacidade de percolação é devida ao processo de colmatação (obstrução do sistema drenante). Desse modo, para assegurar que o fenômeno de colmatação não inviabilize o projeto da camada drenante, por redução da capacidade de percolação do material drenante, define-se um Fator de Segurança Hidráulico (FSH).

Como dados de entrada para realizar o dimensionamento do colchão drenante, deve-se conhecer os parâmetros: geométricos, hidráulicos e hidrológicos.

5.2.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Os parâmetros geométricos de entrada são a inclinação do colchão drenante (β) e o comprimento horizontal do colchão L , (Figura 2.4). O valor usual adotado para a inclinação do colchão drenante é 2% do (L) (DNIT, 2006a). Portanto fixa-se esse valor.

O comprimento horizontal do colchão drenante (L) depende da seção transversal da rodovia e, é primordialmente determinado pelo número de faixas de rolagens de cada rodovia, que em média possui 3,6 m cada, de acordo com a norma vigente atualmente, IPR 742 (DNIT, 2010). Portanto considera-se (L) como:

$$L = 3,6f \quad (5.7)$$

onde f é o número de faixas de trânsito da seção a ser projetada.

5.2.2 PARÂMETRO HIDRÁULICO

Como exposto no Capítulo 2 é de suma importância que a escolha do material adotado

siga critérios, para que, a longo prazo não ocorra perda da capacidade de percolação e, posterior redução da condutividade hidráulica, para isso, os critérios granulométricos ratificados pelo Manual de Drenagem do DNIT (2006a) e, estabelecidos pelo processo de Terzaghi (1996), pelas determinações do *Bureau of Reclamation* e do *Soil Conservation Service*, devem ser respeitados, (Tabela 3.2).

Além disso, outros parâmetros devem ser obtidos e avaliados, (Capítulo 3), com objetivo de determinar se o material tem potencial para uso como material drenante, em especial em relação a possibilidade de colmatar (Capítulo 2, subitem 2.4.6). É um processo que ocorre ao longo do tempo, comprometendo a eficiência do sistema drenante.

O parâmetro hidráulico de entrada depende do material a ser utilizado para a camada drenante, e é caracterizado pela condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade (k). Utilizou-se os valores alcançados na caracterização física dos materiais pesquisados das faixas granulométricas definidas para o colchão drenante (C1 e C4).

5.2.3 PARÂMETRO HIDROLÓGICO

O principal parâmetro hidrológico aqui utilizado é a taxa de infiltração (q_h), que representa a velocidade de fluxo que possa infiltrar na estrutura do pavimento. Porém, a determinação deste parâmetro depende de diversos fatores que o influenciarão, tais como: precipitação média da região onde a rodovia será construída, elevação do lençol freático, características geológicas, geotécnicas e topográficas do talude.

Recomenda-se também a análise probabilística da q_h com um tempo de retorno fixado, de maneira a aprimorar a taxa de infiltração a partir da infiltração média de água para uma determinada precipitação definida em projeto.

5.2.4 CÁLCULO DAS ESPESSURAS

Apresenta-se sintetizado as formulações dos cálculos das espessuras líquidas máxima - $t_{máx}$, para o dimensionamento da camada drenante, descritas em (Giroud *et al.*, 2000), a saber:

- a) Solução de Giroud – adota um parâmetro característico - λ que é função da taxa de infiltração - q_h , da condutividade hidráulica - k do material drenante e, da declividade da camada drenante - β . Apresenta três formulações:
 - Solução simplificada de Giroud;
 - Solução simplificada de Giroud para β tendendo a zero;
 - Solução simplificada de Giroud para λ muito pequeno.
- b) Solução analítica de McEnroe - que utiliza outro fator adimensional R , função do parâmetro característico de escoamento λ . O valor de R , assume três condições de contorno:
 - Solução analítica de McEnroe para $R < 0,25$;
 - Solução analítica de McEnroe para $R = 0,25$;
 - Solução analítica de McEnroe para $R > 0,25$.
- c) Solução analítica transformada de McEnroe em função de λ - o parâmetro característico λ tem papel central. Utiliza as três condições de contorno para dimensionamento de camada drenante definida por Giroud *et al.*, 2000.
 - Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda < 0,25$;
 - Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda = 0,25$;
 - Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda > 0,25$.

- d) Solução empírica de McEnroe baseada em resultados numéricos - utiliza resultados numéricos aplicados a formulações empíricas.

A seguir, descreve-se cada solução citada, a formulação, os parâmetros utilizados para cada formulação, as condições de contorno, o gráfico resultante e a análise.

5.2.4.1 Fator Característico de Giroud

A primeira formulação, mostrada na Equação 5.8, tem por base o que Giroud *et al.* (2000) denominaram de fator característico λ , adimensional, que é função da taxa de infiltração q_h , da declividade da camada drenante β e da condutividade hidráulica do material da camada drenante k .

$$l = \frac{qh}{k \tan^2 b} \quad (5.8)$$

Giroud *et al.* (2000) estabeleceram três condições de contorno para o fluxo em uma camada drenante em função do fator característico λ , Figura 5.4. Esse fator governa a espessura líquida em um fluxo que varia ao longo da camada drenante, entre o topo e a base dessa camada, com uma espessura líquida máxima t_{max} , Equação 5.9, que pode estar mais próxima ao centro da largura da camada, da base ou muito próxima à base.

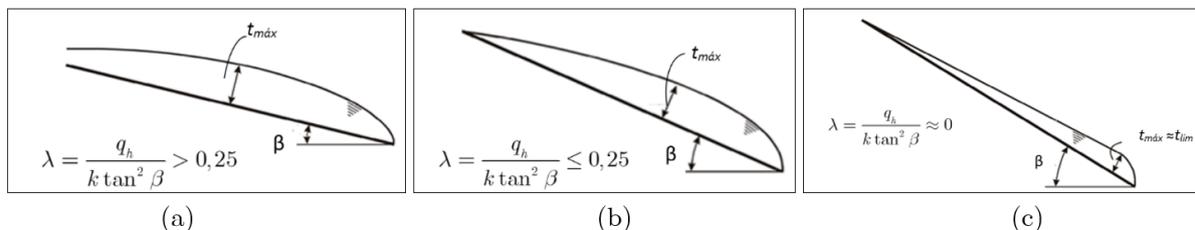


Figura 5.4 – Parâmetro característico: a) $\lambda > 0,25$; b) $\lambda < 0,25$; c) $\lambda \approx 0,25$ - Giroud *et al.*, 2000

$$t_{\max} = \frac{\sqrt{1+4l} - 1}{2 \cos b} \frac{1}{\tan b} \quad (5.9)$$

Essas condições de contorno consideram que:

- Para $\lambda > 0,25$ - a espessura líquida máxima t_{max} atinge seu maior valor próxima ao centro da largura da camada drenante, Figura 5.4a. Nesse caso com baixa declividade da camada drenante β ;
- Para $\lambda \leq 0,25$ - a espessura líquida máxima t_{max} tem seu valor máximo entre o meio do comprimento da largura da camada, e a sua base, Figura 5.4b. A declividade da camada drenante β , um pouco maior que a da condição anterior;
- Para $\lambda \approx 0$ - a espessura líquida máxima t_{max} , nessa condição de contorno, concentra-se junto à base da camada drenante, Figura 5.4c. A declividade β é extremamente elevada.

Um outro fator adimensional é recorrente entre as formulações do dimensionamento da camada drenante, discutidas a seguir. Trata-se de R , adotada por McEnroe na solução analítica, função, também, da taxa de infiltração q_h e da declividade da camada drenante β , a seguir:

$$R = \frac{qh}{\text{sen}^2 b} \quad (5.10)$$

5.2.4.2 Dimensionamento Considerando a Solução de Giroud

São apresentadas três formulações para cálculo da espessura líquida máxima (t_{max}), isto é, sem considerar o fator de segurança:

a) Solução simplificada de Giroud

A Figura 5.5, representa a formulação da Equação 5.11 que calcula a espessura líquida máxima (t_{max}) em função de λ e β para uma variação da condutividade hidráulica do material drenante ($k_{corr20^\circ C}$) de $(1.10^{-3} \text{ m/s a } 1.10^{-1} \text{ m/s})$ e com taxas de infiltrações (q_h) de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia. A largura da camada drenante (L) foi fixada em 7,20 m e a declividade da camada drenante (β) em 2%.

$$t_{max} = \frac{\sqrt{1 + 4l} - 1}{2 \cos b} \frac{L}{\tan b} \quad (5.11)$$

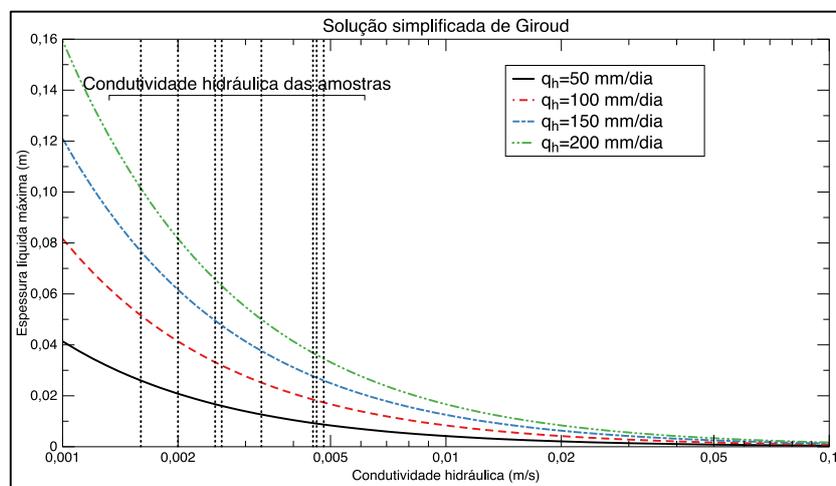


Figura 5.5 – Solução simplificada de Giroud para camada drenante

A Figura 5.5 mostra a k das amostras ensaiadas, das faixas construídas nesta pesquisa, representada nas linhas verticais. Para a situação mais crítica, com q_h de 200 mm/dia e, a menor k , para a C4 $2,6.10^{-3} \text{ m/s}$, a $t_{max} < 0,07 \text{ m}$.

b) Solução de Giroud para β tendendo a zero

A formulação expressa pela Equação 5.12 calcula a t_{max} para λ e β para uma variação da k do material drenante de $1.10^{-3} \text{ m/s a } 1.10^{-1} \text{ m/s}$ e q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia. A L fixada em 7,20 m porém, negligência a relação de λ , ao desprezar a β , vista na Equação 2.7.

$$t_{max} = \sqrt{\frac{q_h L}{k}} \quad (5.12)$$

A Figura 5.6 mostra a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. Para a situação mais crítica, com q_h de 200 mm/dia e, a menor k para a C4, $2,6.10^{-3} \text{ m/s}$, a $t_{max} > 0,20 \text{ m}$. Verifica-se que, o dimensionamento da t_{max} , tem resultados conservadores em relação a solução simplificada de Giroud, por negligenciar a declividade.

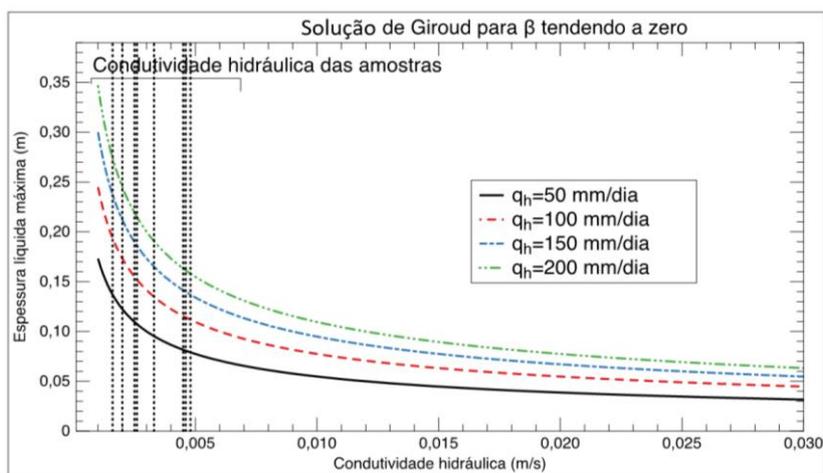


Figura 5.6 – Solução de Giroud para β tendendo a zero

c) Solução de Giroud para λ muito pequeno

A Equação 5.13 representada na Figura 5.7 é uma solução para os casos em que a t_{max} se concentra na base da camada drenante, quando o λ tende a zero. Utilizou-se a k do material drenante de 1.10^{-3} m/s a 1.10^{-1} m/s e q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia. A L fixada em 7,20 m e a β em 2%.

$$t_{max} \gg \frac{l L \sin b}{\cos^2 b} = \frac{l L \tan b}{\cos b} = \frac{q_h L}{k \sin b} \quad (5.13)$$

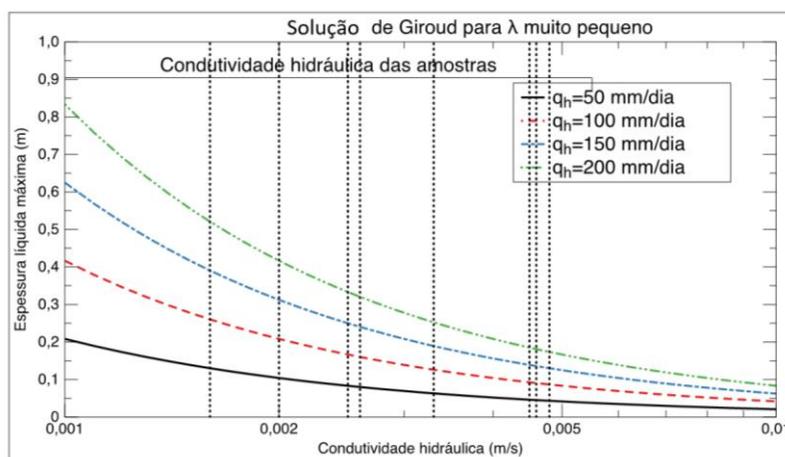


Figura 5.7 – Solução de Giroud para λ muito pequeno

A Figura 5.7 mostra a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. Para a situação mais crítica, com q_h de 200 mm/dia e a menor k desta pesquisa, para a C4, $2,6.10^{-3}$ m/s, a t_{max} está próxima de 0,035 m. O dimensionamento é pouco conservador.

5.2.4.3 Dimensionamento Considerando a Solução Analítica Proposta por McEnroe

Nesta seção será abordada as propostas de McEnroe (1994) que utiliza o valor de R , função λ definida na Equação 2.9. O valor de R , assume três condições de contorno, citadas anteriormente e analisadas a seguir:

a) Solução Analítica Proposta por McEnroe com $R < 0,25$

Na Figura 5.8 apresenta-se os resultados para t_{max} pela Equação 5.14. Adotou-se os valores da k do material drenante de 1×10^{-5} m/s a 5×10^{-2} m/s, a q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia;

150 mm/dia e 200 mm/dia. A L em 7,20 m e a β em 2%.

$$t_{\max} = L \sin b \frac{R - R \tan b + (R \tan b)^2}{1 - A - 2R} \cdot \frac{1}{(1 - A - 2R \tan b)^{1/2}} \quad (5.14)$$

Os valores de A^* é definido como:

$$A^* = \sqrt{1 - 4R} \quad (5.15)$$

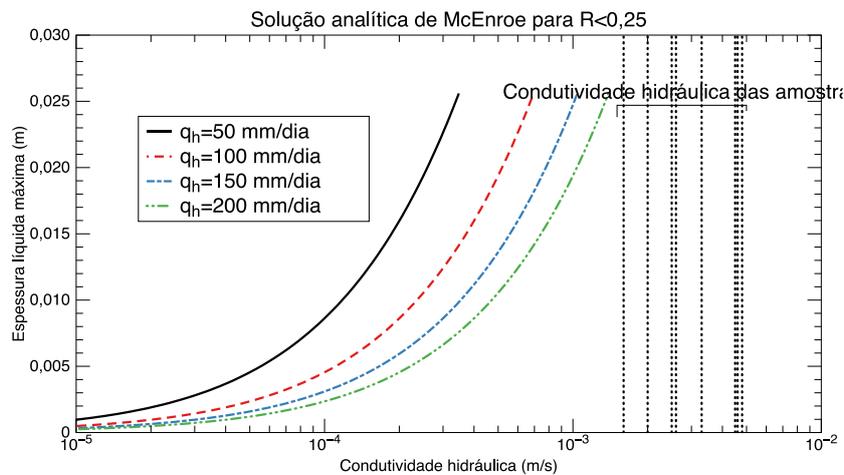


Figura 5.8 – Solução analítica de McEnroe para $R < 0,25$

A Figura 5.8 mostra a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. Observa-se que as k das amostras, nessa condição de $R < 0,25$, não são previstas para essa formulação.

b) Solução Analítica Proposta por McEnroe com $R = 0,25$

Para essa condição não considera o fator característico de escoamento que toma os parâmetros hidrológicos, q_i e k , de modo direto, mas, toma o valor de R fixado em 0,25. Para este caso os elementos físicos, a largura e a declividade são governantes na formulação.

A Equação 5.16 que representa a solução de McEnroe para $R = 0,25$ é mostrada na Figura 5.9 e toma em conta uma variação da declividade de 0,1% a 5%, mantendo fixa a largura em 7,20 m.

$$t_{\max} = L \sin b \frac{R(1 - 2R \tan b)}{1 - 2R} \cdot \exp \left[\frac{2R(\tan b - 1)}{(1 - 2R \tan b)(1 - 2R)} \right] \quad (5.16)$$

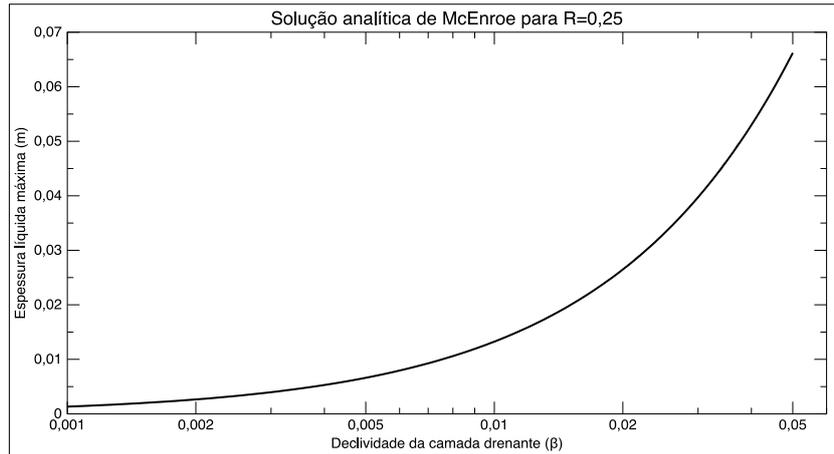


Figura 5.9– Solução analítica de McEnroe para R=0,25

Portanto, esta solução não considera a k do material drenante, não aplicada ao objetivo da Tese.

c) Solução Analítica Proposta por McEnroe com R>0,25

A condição de $R > 0,25$, formulada na Equação 2.16 e vista na Figura 5.10, assumiu k da camada drenante de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s a $1 \cdot 10^{-2}$ m/s, q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia; L em 7,20 m e a β em 2%.

$$t_{\max} = L \cdot \exp\left(\frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{2R \tan b - 1}{B}\right) + (R \tan b)^2 \frac{L}{u} \quad (5.17)$$

O valor de B^* definido como:

$$B^* = \sqrt{4R - 1} \quad (5.18)$$

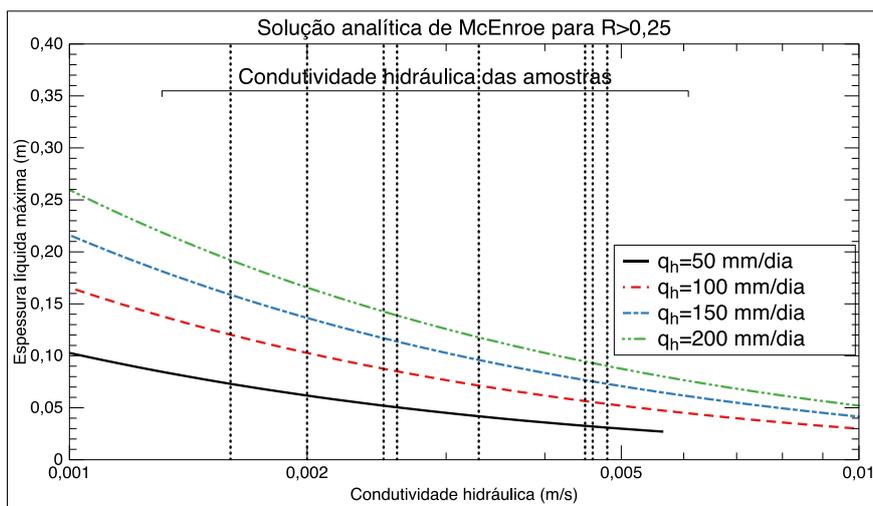


Figura 5.10– Solução analítica de McEnroe para R>0,25

A Figura 5.10 mostra a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. Para a situação mais crítica, com q_h de 200 mm/dia e a menor k para a C4, $2,6 \cdot 10^{-3}$ m/s, a $t_{\max} <$ de 0,20 m. As t_{\max} das amostras representam um dimensionamento mais conservador que a solução

simplificada de Giroud.

5.2.4.4 Dimensionamento Considerando a Solução Analítica Transformada de McEnroe

McEnroe (1994) apresenta três condições de contorno para dimensionamento e λ tem papel central. A seguir são apresentadas essas soluções:

a) Solução Analítica Transformada de McEnroe para $\lambda < 0,25$

A Equação 5.19 está representada na Figura 5.11. Os mesmos dados de dimensionamento para as demais propostas foram adotados, k do material drenante de $1 \cdot 10^{-3}$ m/s a $1 \cdot 10^{-2}$ m/s, q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia; L fixada em 7,20 m e a β em 2%.

$$t_{\max} = L \frac{\tan b}{\cos b} \left[\frac{1 - \tan b}{1 + \tan b} + (1 + \tan b)^2 \right]^{1/2} \cdot \frac{(1 - A' - 2l)(1 + A' - 2l \tan b)^{1/(2A')}}{(1 + A' - 2l)^{1/A'} (1 - A' - 2l \tan b)^{1/(2A')}} \quad (5.19)$$

A' dado por:

$$A' = \sqrt{1 - 4l} \quad (5.20)$$

Como nas situações anteriores, a Figura 5.11 mostra a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. O dimensionamento da camada drenante por essa formulação não contempla as condutividades das amostras. Essa solução é inconsistente para domínios entre $9 \cdot 10^{-2}$ m/s a $1 \cdot 10^{-2}$ m/s, da condutividade hidráulica.

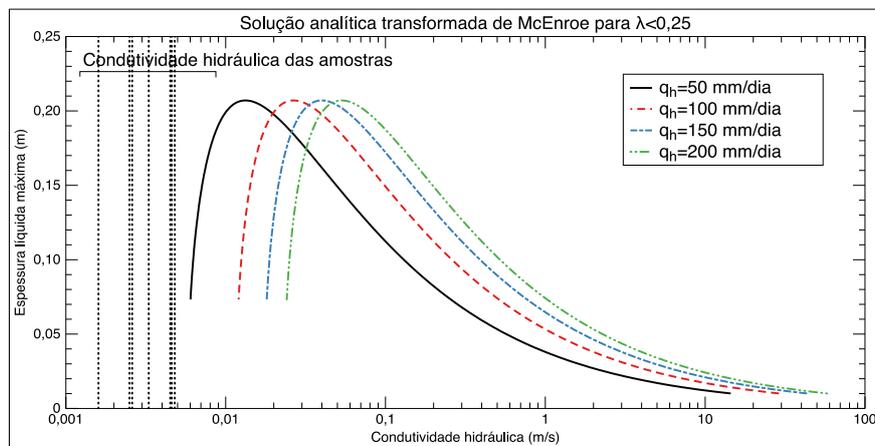


Figura 5.11 – Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda < 0,25$

b) Solução Analítica Transformada com $\lambda = 0,25$

A Equação 5.21 está representada na Figura 5.12. Os dados de entrada geométricos L fixada em 7,20 m e a β foram estabelecidos para uma faixa de 0,1% a 5%, com intervalo 0,1%.

$$t_{\max} = \frac{L \tan b}{2 \cos b} \left[\frac{1 - \tan b}{1 + \tan b} + (1 + \tan b)^2 \right]^{1/2} \exp \left[\frac{\tan b - 1}{0,5 \tan b} \right] \quad (5.21)$$

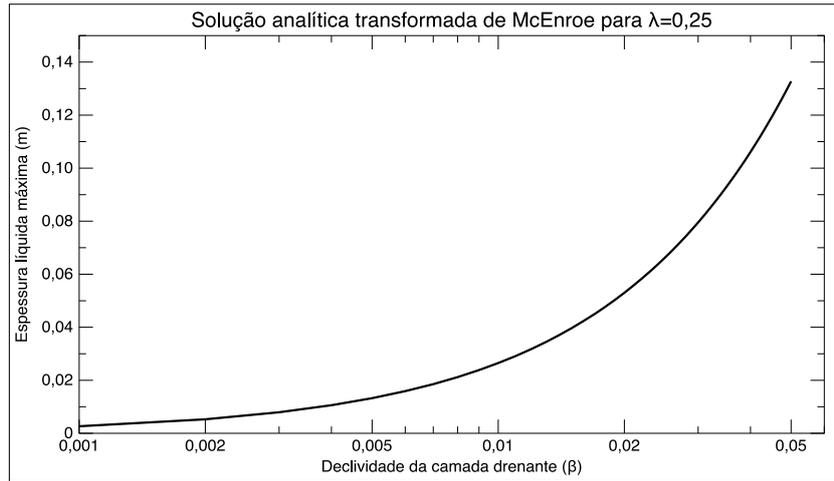


Figura 5.12 – Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda=0,25$

Nesta formulação os parâmetros hidrológicos e hidráulicos não são computados. A declividade é a governante da t_{max} . Não se aplica nesta pesquisa.

c) Solução Analítica Transformada com $\lambda > 0,25$

A Equação 5.22 está representada na Figura 5.13. Os dados de entrada, foram adotados, k de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s a $1 \cdot 10^{-2}$ m/s, q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia; L fixada em 7,20 m e a β da camada drenante em 2%.

$$t_{max} = \frac{L \tan b}{\cos b} \frac{1}{\beta} - l \tan b + (l \tan b)^2 \frac{\beta^2}{4} \cdot \exp\left\{ \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{2l \tan b - 1}{B'} - \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{2l - 1}{B'} \right\} \quad (5.22)$$

B' dado por:

$$B' = \sqrt{4l - 1} \quad (5.23)$$

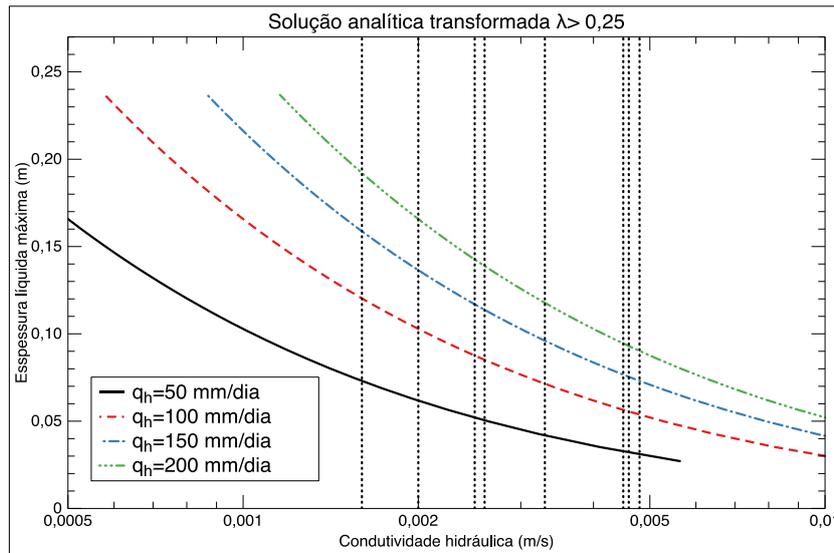


Figura 5.13 – Solução analítica transformada de McEnroe para $\lambda > 0,25$

As evoluções das curvas de condutividade hidráulica versus espessura líquida máxima atendem a todas as amostras da Tese. Para a menor k entre as amostras, $2,6 \times 10^{-3}$ m/s versus a maior q_h , 200 mm/dia a $t_{max} < 0,15$ m.

5.2.4.5 Dimensionamento Considerando a Solução Empírica Baseada em Resultados Numéricos

Proposta por McEnroe, essa solução utiliza resultados numéricos aplicados a formulações empíricas. A Equação 5.24 está representada na Figura 5.14 com dados geométricos k de 1.10^{-3} m/s a 1.10^{-1} m/s, q_h de 50 mm/dia; 100 mm/dia; 150 mm/dia e 200 mm/dia; L fixada em 7,20 m e a β em 2%.

$$t_{\max} = \frac{\sqrt{\tan^2 b + \frac{4q_h}{k}} - \tan b}{2 \cos b} \cdot 1 - 0,12 \cdot \exp\left(-\frac{0,8 \frac{q_h}{k} \cdot L}{5 \tan^2 b}\right) \quad (5.24)$$

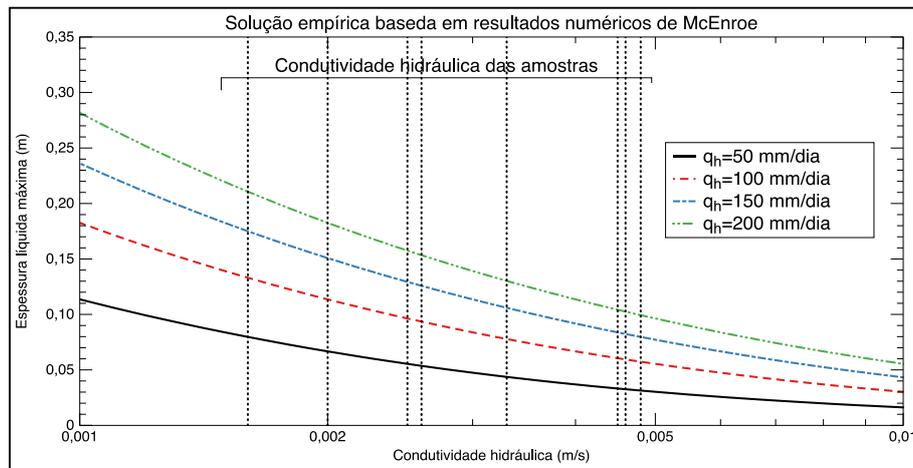


Figura 5.14 – Solução empírica baseada em resultados numéricos

Na Figura 5.14 apresenta a k das amostras ensaiadas, representada nas linhas verticais. Para a situação mais crítica, com q_h de 200 mm/dia e a menor k para a C4 e $2,6.10^{-3}$ m/s, a $t_{\max} <$ de 0,20 m. As condutividades das amostras representam um dimensionamento mais conservador que a solução simplificada de Giroud.

5.2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O DIMENSIONAMENTO

Apresentou-se 10 soluções propostas de dimensionamento para o colchão drenante, 06 apresentaram inconsistência com os valores de condutividade alcançados nesta pesquisa.

Solução simplificada de Giroud para β tendendo a zero, não considera a declividade da camada drenante e, a Solução simplificada de Giroud para λ muito pequeno, ao contrário, a declividade é muito elevada. Dessa forma, não se aplicam à esta Tese.

Outras soluções não aplicáveis nesta pesquisa, trata-se da Solução analítica com $R < 0,25$ e a Solução analítica transformada com $\lambda < 0,25$, ambas propostas por McEnroe (1994). Não atendem as k das amostras, a primeira por inaplicabilidade e a segunda por inconsistência da curva de evolução da t_{\max} em relação à condutividade hidráulica. As soluções para $R = 0,25$ e $\lambda = 0,25$, também propostas McEnroe (1994) não levam em consideração a condutividade hidráulica do material drenante.

As formulações aplicáveis neste trabalho são:

- Solução simplificada de Giroud;
- Solução analítica proposta por McEnroe (1994) com $R > 0,25$;

- Solução analítica transformada proposta por McEnroe (1994) com $\lambda > 0,25$;
- Solução empírica de McEnroe (1994) baseada em resultados numéricos.

Os valores, para as soluções aplicáveis, da espessura máxima líquida (t_{max}) e a espessura admissível do colchão drenante (t_{cl}), acrescida por um fator de segurança hidráulica (FSH) igual a 10 estão apresentados na Tabela 4.17. Os valores de $k_{corr20^{\circ}C}$, refere-se aos obtidos na C1 ($4,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³) e C4 ($2,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³), Tabela 4.15.

Na Tabela 5.1, SG, Solução simplificada de Giroud; $SA_{R>0,25}$, Solução analítica proposta por McEnroe com $R > 0,25$; $ST_{\lambda > 0,25}$, Solução analítica transformada proposta por McEnroe com $\lambda > 0,25$ e, SEM, Solução empírica baseada em resultados numéricos.

Tabela 5.1 - Valores da espessura líquida máxima do colchão drenante.

Soluções	($k_{corr20^{\circ}C}$) (m/s)	q_h (mm/dia)	t_{max} (m)	$t_{cl} = t_{max} \cdot FSH$ (m)
SG	$4,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,02	0,2
		200	0,04	0,5
	$2,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,02	0,2
		200	0,07	0,7
$(SA_{R>0,25})$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,05	0,5
		200	0,10	1,0
	$2,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,05	0,5
		200	0,14	1,4
$ST_{\lambda > 0,25}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,08	0,8
		200	0,10	1,0
	$2,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,06	0,6
		200	0,15	1,5
SEM	$4,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,03	0,30
		200	0,12	3,6
	$2,6 \cdot 10^{-3}$	50	0,05	0,5
		200	0,15	1,5

Analisando a Tabela 5.1, observa-se que as propostas de McEnroe (1994), aplicáveis nesta pesquisa, são as mais conservadoras em relação ao dimensionamento da espessura líquida máxima. Contudo, a Solução simplificada de Giroud é a menos conservadora e, a mais fácil do ponto de vista operacional matemático. Desse modo, adota-se nesta Tese, o dimensionamento da Solução simplificada de Giroud, apresentada na Equação 5.11 e no gráfico da Figura 5.5.

Portanto, a espessura admissível do colchão drenante (t_{cl}), para as amostras tem-se:

- Para C1, q_h de 50 mm/ dia ; k de $4,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ $t_{cl} = 0,2$ m;
- Para C1, q_h de 200 mm/ dia ; k de $4,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ $t_{cl} = 0,5$ m;
- Para C4, q_h de 50 mm/ dia ; k de $2,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ $t_{cl} = 0,2$ m;
- Para C4, q_h de 200 mm/ dia ; k de $2,6 \cdot 10^{-3}$ kg/m³ $t_{cl} = 0,7$ m.

No entanto, recomenda-se que se observe o contexto da condutividade hidráulica versus a taxa de infiltração para a escolha da melhor proposta de dimensionamento para cada caso de obra. Caso tenha mais ensaios, caracterização física, mineralógica e química, o dimensionamento deverá ser revisto e, a espessura admissível do colchão drenante poderá ser variado conforme abordagem no Capítulo 6 desta Tese – onde os resultados da caracterização química ampliam a confiabilidade do uso das escórias e agregados siderúrgicos como material drenante.

CAPÍTULO 6

6 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS COM FATOR DE SEGURANÇA VARIÁVEL

Neste Capítulo aborda-se a integração dos resultados obtidos nas caracterizações física, mineralógica e química para fins de dimensionamento do colchão drenante, aplicado a drenagem rodoviária subterrânea.

Reitera-se que as caracterizações foram realizadas para: identificar as propriedades físicas drenantes; os elementos combinados responsáveis por desencadear os fenômenos expansivos e tufóricos e, o comportamento dos elementos químicos, em relação a expansão e tufa.

A caracterização física resultou na obtenção das condutividades hidráulicas das amostras A_{TLD} , B_{NTLD} e C_{NTAF} . Para tanto, foi construído, especialmente para esta Tese um permeâmetro de paredes rígidas de grandes dimensões.

De modo a garantir a potencialidade das amostras como material drenante, devido à sua origem, indústria siderúrgica, a caracterização física não foi suficiente. Além disso, foi feita a caracterização mineralógica nas três amostras, por meio da difratometria de Raio X (DRX), especificamente para identificar a existência de minerais que pudessem desencadear o fenômeno de expansão e ou de formação de tufa.

A investigação mineralógica identificou combinações instáveis, responsáveis no desencadeamento dos fenômenos de expansibilidade e tufa por hidratação, carbonatação e oxidação. No caso específico da expansibilidade e ou formação de tufas, a simples presença de minerais não garante que os referidos fenômenos se concretizem. Foram feitas, então, análises

isoladas e combinadas desses minerais.

A caracterização química ocorreu pelas análises de fluorescência de raios X (FRX), microscopia de raios X (MEV), termogravimetria (TG/DTG), resistência à sulfatos, capacidade de troca catiônica (CTC), teor de óxido de cálcio livre, análise das águas e percentual de expansão.

Realizadas as caracterizações das amostras foi tomada a decisão da proposição de dimensionamento do colchão drenante que considerasse a magnitude das condutividades hidráulicas das amostras (k), mensuradas nesta Tese e das características mineralógicas e químicas que tivessem a possibilidade de influenciar nos resultados do dimensionamento desse elemento de drenagem. Das soluções propostas para o dimensionamento do colchão drenante, adotou-se a Solução Simplificada de Giroud com um fator de segurança (FSH) igual a 10 e espessuras admissíveis variando de 0,2 m a 0,7 m.

Na seção seguinte, apresenta-se a análise integrada dos resultados alcançados nesta pesquisa.

6.1 ANÁLISE INTEGRADA PARA DIMENSIONAMENTO DO COLCHÃO DRENANTE

O dimensionamento do colchão drenante aplicado à drenagem subterrânea é um assunto crucial na vida útil da estrutura rodoviária. A caracterização física garante que esse dispositivo mantenha sua capacidade drenante ao longo do tempo, isso é o que corriqueiramente se faz no âmbito da engenharia. Contudo, a incerteza é grande tendo em vista que se caracteriza fisicamente o material drenante, sem a mensuração da condutividade hidráulica das faixas granulométricas escolhidas. Por isso, é comum a adoção de fatores de segurança de até 30 vezes a espessura líquida admissível. No caso desta Tese, assumiu-se o dimensionamento com base na mensuração das condutividades hidráulicas medidas em permeâmetro de parede rígida de grande dimensão.

As escórias e os agregados siderúrgicos, utilizados nesta Tese, são provenientes do processo produtivo do ferro gusa e do aço que contêm elementos com potenciais para desencadear o depósito de materiais pelo fenômeno de expansão e a formação de tufa, responsável pela colmatção dos dispositivos de drenagem.

Dessa forma, para atender o objetivo geral deste estudo analisou-se conjuntamente todas as caracterizações laboratoriais e o modelo de dimensionamento de colchão drenante adotado, a fim de definir, quais as caracterizações mínimas que deveriam ser feitas para a proposta de dimensionamento do colchão drenante, de modo a reduzir os efeitos da formação de depósitos de materiais e colmatção no transporte da camada líquida no colchão drenante.

A análise integrada dos resultados alcançados nesta pesquisa, devido as características das amostras, foi uma ferramenta auxiliar para a análise correta do dimensionamento do colchão. No Quadro 6.1, tem-se o nome de cada ensaio com suas respectivas finalidades.

Quadro 6.1 – Nome dos ensaios com o tipo de caracterização e suas finalidades

Tipos das Caracterizações		
Nº do Ensaio	Nome do Ensaio	Tipo de Caracterização/Finalidade
1	Distribuição Granulométrica	Física Determinar a condutividade hidráulica
2	Absorção	
3	Massa específica seca	
4	Massa unitária do agregado seco	

5	Índice de vazios		
6	Porosidade		
7	Permeabilidade hidráulica		
8	Massa específica dos grãos sólidos		
9	Teor de óxido de cálcio livre	<p align="center">Química</p> <p align="center">Identificar a possibilidade de depósito de materiais e o fenômeno de colmatção</p>	
10	Resistência à sulfatos		
11	Potencial de expansão		
12	Capacidade de troca catiônica		
13	FRX		
14	MEV-EDS		
15	TG/DTG		
16	Análise das águas		
17	DRX		<p align="center">Mineralógica</p> <p align="center">Identificar os compostos responsáveis pelo fenômeno de expansão e formação de tufas</p>

Para analisar a potencialidade do agregado siderúrgico, aplicado ao dimensionamento do colchão drenante para estruturas rodoviárias, definiu-se uma sequência de execução das caracterizações.

Para o dimensionamento físico do colchão drenante, determinou-se a condutividade hidráulica (k) por meio dos ensaios 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. A redução da k do colchão drenante, correlaciona com a deposição de materiais identificados pelos ensaios teor de óxido de cálcio livre, potencial de expansão, capacidade de troca catiônica, termogravimetria e análise das águas.

A formação do depósito pode ocasionar a colmatção, que interferirá na competência do colchão drenante, ao reduzir a k . A possibilidade de colmatção é identificada pelos ensaios teor de óxido de cálcio livre, potencial de expansão, capacidade de troca catiônica, termogravimetria e análise das águas.

Caso ocorra a colmatção a condutividade hidráulica será reduzida. Os ensaios que identificam a diminuição da condutividade hidráulica são: permeabilidade, teor de óxido de cálcio livre, potencial de expansão.

A presença de materiais depositados, poderá diminuir a condutividade hidráulica. Para caracterizar se haveria deposição de materiais foram realizados os ensaios: 9, 11, 12, 15, 16 e 17.

A seguir é feita uma descrição dos compostos químicos que podem causar colmatção e a formação de tufa. Reitera-se que ambos os fenômenos são possíveis, mas até a presente edição desta Tese não constatada em relatos científicos. O óxido de cálcio livre ($\text{CaO}_{\text{livre}}$) é um dos elementos responsáveis pela expansão e formação de tufa. A presença de óxido de cálcio livre irá gerar expansão e conseqüentemente, ocorrerá depósito de material e, ao reagir com água e o dióxido de carbono, irá depositar a calcita.

A análise do potencial de expansão, com valores acima de 3%, indica a ocorrência de uma expansão prejudicial na aplicação das amostras, com uma quantidade de detritos capazes de formar depósitos, para preencher os vazios da camada drenante e, reduzir a condutividade hidráulica. Outra consequência negativa é que, ocorrendo a desintegração dos grãos, altera-se a granulometria da faixa, com aumento de diâmetros menores dos grãos, conseqüentemente, aumento da superfície específica e redução da condutividade hidráulica.

O percentual de expansão volumétrica, avaliado nesta Tese, atendeu o limite normativo, ME 113 (DNIT, 2009), inferior a 3%. No entanto, se evidenciou a desintegração da amostra

ao ser imersa em água, (Capítulo 4). Deve-se anotar que a construção geométrica do colchão drenante não permite a deposição de líquido no seu bojo, o que concorre para a afirmação de que a colmatação é possível, porém não factível se forem tomadas as medidas de execução de projeto.

A troca catiônica, relaciona com a quantidade de sais que geram uma película espessa que ocasiona depósito de material. A quantidade de carbonatos presentes, aumenta o percentual de sais no meio aquoso que ao depositar, preencherá os vazios existentes entre as amostras e, reduzirá a condutividade hidráulica. Cabe, contudo, uma ressalva quanto ao verificado no ensaio e a realidade da execução do colchão drenante. No ensaio o material drenante ficou imerso em água por 148 dias, impensável no desempenho prático do colchão drenante.

A análise termogravimétrica apresenta a decomposição de carbonato de cálcio (CaO_3) e da srebroldoskita ($\text{C}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) que geram o depósito de $\text{CaO}_{\text{livre}}$ e, o $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ se decompõe em CaCO_3 e, em $\text{FeO}(\text{OH})$ que em contato com o CO_2 precipita-se e oxida-se, porém em temperaturas acima de 400°C . É necessário explicitar que essa temperatura não ocorre no desempenho do colchão drenante.

Os resultados das análises das águas indicaram presença das alcalinidades por carbonatos, por hidróxidos e, por bicarbonatos que por reações formam depósitos de calcita. Os carbonatos (CaCO_3) e os hidróxidos ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) são pouco solúveis, se precipitam e acumulam $\text{CaO}_{\text{livre}}$ no fundo. Constatou-se, também, a formação de sais nas águas imersas e a oxidação das amostras.

Observa-se que, na aplicação do material em colchão drenante, a camada drenante não fica em imersão por período superior a sete dias, a saber que o período sazonal chuvoso não apresenta no Brasil períodos de chuvas superior a um dia de modo ininterrupto. Além dos ensaios químicos, foi feita a análise mineralógica (DRX) que informou, também, a presença de compostos que podem desenvolver a deposição de materiais.

A seguir é apresentada o potencial da condutividade hidráulica do material drenante e sua implicação direta no dimensionamento do colchão drenante.

Para caracterizar a condutividade hidráulica do material pesquisado foram realizados os ensaios: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Para verificar o potencial deste material para aplicação em drenagem, definiu-se faixas granulométricas que atendessem aos limites recomendados para fins drenantes $2 \leq C_U \leq 20$, $0,63 \leq C_C \leq 1,64$ e máximo de 5% passando peneira 0,075 mm.

Segundo Terzaghi *et al.* (1996) a condutividade hidráulica depende diretamente da faixa granulométrica, formato dos grãos, índice de vazios, porosidade, e composição mineralógica do material. Além desses parâmetros a absorção da amostra, massa específica seca, massa unitária do agregado seco, massa específica dos grãos sólidos, influenciam a condutividade hidráulica.

A capacidade drenante está diretamente relacionada com a granulometria, que deve atender aos limites de C_U , C_C e % finos passantes # 0,075 mm. Quanto menor a superfície específica (SE) das faixas granulométricas maior a condutividade hidráulica. A menor SE, irá resultar em menor valor de absorção (a).

A massa unitária, determina o índice de vazios, que define a porosidade (n), e depende, também, da morfologia dos grãos. Quanto maior a porosidade maior a condutividade hidráulica;

A presença de ferro na composição mineralógica das amostras, reflete nos valores de absorção. Quanto maior o percentual de Fe, menor é a absorção da amostra.

Os elevados valores de massa específica seca (ρ_d) e massa específica dos grãos sólidos (ρ_s) resulta em maior estabilidade da faixa granulométrica. São influenciados pela morfologia dos grãos e composição química.

Com a caracterização física obteve-se as condutividades hidráulicas as quais foram avaliadas nas propostas de dimensionamento do colchão drenante, apresentadas no Capítulo 5. A espessura líquida máxima obtida por meio das soluções apresentadas foram multiplicadas por um fator de segurança hidráulico de modo a obter a espessura admissível do colchão drenante. Apresenta-se três alternativas:

- a) a primeira levando em conta o valor paramétrico da condutividade hidráulica medida. Nesse caso adota-se o fator de segurança hidráulico (FSH) igual a 10;
- b) a segunda aplicar-se-ia quando conhecida apenas a faixa granulométrica e a condutividade hidráulica é estimada. Nesse caso o FSH igual a 30;
- c) a terceira poderia se aplicar quando o projetista utilizasse a condutividade hidráulica medida e o impacto dos efeitos químicos da possibilidade de colmatção que conduziria uma redução de até 80% do parâmetro de dimensionamento, ou seja, da condutividade hidráulica. Neste caso, os ensaios mínimos são o de teor de óxido de cálcio livre e o de potencial de expansão e, o fator de segurança hidráulico poderia estar na faixa $5 < FSH < 10$.

Em relação ao item (a) adota-se os valores verificados para a condutividade hidráulica nesta Tese com a efetivação do dimensionamento do colchão drenante adotado, Solução simplificada de Giroud. Em relação ao item (b) a condutividade estimada pela faixa granulométrica também seria utilizada como parâmetro no dimensionamento adotado nesta Tese. Em relação ao item (c) foi feita uma estimativa de redução da condutividade hidráulica medida de até 20%, como sugestão, que implica em estudos específicos e quantitativos dos efeitos da colmatção.

CAPÍTULO 7

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO FUTURA

Neste capítulo descreve-se os resultados das caracterizações das amostras, do dimensionamento do colchão drenante e, as recomendações para pesquisas futura. O estudo desenvolvido ao longo desses anos, apresenta as seguintes contribuições:

- Definição de três faixas granulométricas, para aplicação em obras de drenagem rodoviárias subterrânea, especificamente, duas para colchão drenante e uma para dreno longitudinal profundo;
- Construção de permeâmetro à carga constante para grandes dimensões;
- Proposta para o dimensionamento do colchão drenante e quais caracterizações devem ser realizadas com aplicação de agregado siderúrgico;

Analisando os resultados alcançados nos ensaios de caracterização física, realizados para obter a condutividade hidráulica das amostras de aciaria tipo LD, e da escória de alto forno AF, verificou-se claramente uma diferença nos parâmetros da A_{TLD} (tratada) ao comparar com a B_{NTLD} (não tratada) de origem (LD) e, entre as amostras LD (A_{TLD} e B_{NTLD}) em relação a amostra AF (C_{NTAF}) devido ao processo de geração do material.

Do ponto de vista físico, definiu-se três faixas granulométricas, nos limites permeáveis recomendados por Terzaghi (1996) e Suzuki *et al.* 2013.

Obteve-se a condutividade hidráulica k para todas as amostras e faixas granulométricas desta Tese. Os valores da $k_{corriço}$ não variaram na ordem de grandeza entre as faixas C1 e C4 e tipos de amostras (10^{-3} m/s). Em termos de valor absoluto, a maior condutividade hidráulica para colchão drenante ocorreu para a A_{TL}D com o valor $4,6 \times 10^{-3}$ m/s para a C1 e $2,6 \times 10^{-3}$ m/s para a C4.

Do ponto de vista mineralógico a caracterização identificou os compostos com caráter expansivo e propensos à formação de tufa, importantes para investigar se a presença desses compostos, desencadeariam os fenômenos que restringem a aplicação do agregado siderúrgico.

Do ponto de vista químico a análise das águas contribuiu com dados e informações da existência de alcalinidade por carbonatação, por hidróxido e por bicarbonato, compostos que ao reagirem na presença de CO₂ e H₂O, se desintegram e depositam óxido de cálcio livre. Houve precipitação Fe(OH)₂ na presença de pH acima de 11 e formação dos sais que se cristalizaram e formaram película na superfície que, ao longo do tempo se depositam, e futuramente poderá ou não colmatar o sistema drenante.

O percentual de expansão apresentou no final do ensaio, para a amostra tratada, valor inferior ao limite definido em norma porém, a curva de expansão apresentou curva crescente. Portanto, o período de 14 dias definido para o ensaio, não foram suficientes para estabilizar a expansão da amostra. As amostras não tratadas, apresentaram retração no ensaio de potencial de expansão.

A amostra tratada, após 118 dias de imersão apresentou desintegração por expansão, oxidação e formação de depósitos, identificados visualmente.

Do ponto de vista do dimensionamento do colchão drenante, propôs-se uma metodologia que, até então, não se encontra na literatura geotécnica. Atribuiu-se parâmetros geométricos, hidrológico e hidráulico, com material alternativo que contribuirá com o destino ambientalmente correto e reduzirá a exploração das pedreiras,

Das soluções propostas 05 apresentaram inconsistência com os valores de condutividade desta Tese. A proposta menos conservadora e adotada foi a Solução Simplificada de Giroud, com uso de *FSH* variável (Capítulo 6) desde que se faça a caracterização física, mineralógica e química. Caso contrário, deve-se usar o *FSH* adotado no Capítulo 5.

As Recomendações de pesquisa são:

- Sugere-se à indústria siderúrgica que o tratamento de cura dos agregados siderúrgicos seja intensificado e/ou aprimorado;
- Regulamentar por meio de normativas do DNIT as faixas definidas para aplicação nos dispositivos de drenagem;
- Realizar estudo do comportamento do material por meio do ensaio de umedecimento e secagem;
- Definir norma de permeabilidade que atenda as faixas granulométricas de grandes dimensões com diâmetros de 0,075 mm até 50 mm.
- Investigar limites dos parâmetros geotécnicos ao uso dos agregados siderúrgicos como material drenante;
- Pesquisar a influência da absorção nos fenômenos expansivos aliada a mineralogia dos agregados siderúrgicos para uso como material drenante;
- Intensificar o estudo do fenômeno da colmatação proveniente de tufa, expansão e precipitação do ferro;
- Adequar metodologias dos ensaios de expansão, de teor de óxido de cálcio livre, para uso como material drenante, do agregado de origem LD e AF;

- Avaliar a expansão dos agregados siderúrgicos, contemplando diâmetros superiores a 12,5mm.
- Estudar a natureza dos sais que se formam nas águas quando os agregados ficam submersos, quais consequências para o sistema de drenagem;
- Acompanhar o desempenho de um colchão drenante, com a solução do dimensionamento proposto, a faixa granulométrica definida (C1 e C4) em campo com aplicação do material pesquisado;
- Acompanhar o desempenho de dreno longitudinal profundo utilizando a faixa C12, definida nesta Tese com aplicação do material estudado;
- Desenvolver modelo analítico de dimensionamento do colchão drenante em que os ensaios mais relevantes sejam contemplados, com seus respectivos pesos *e.g.* nesta Tese, os ensaios de permeabilidade, teor de óxido de cálcio livre, potencial de expansão e capacidade de troca catiônica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

-
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1987). NBR 7418: Lastro padrão: Determinação da massa específica aparente, da absorção de água e da porosidade aparente do material: Método de ensaio. Rio de Janeiro.
 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1990). NBR MB 3324: Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 10 p.
 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). NBR 11804-EB 2103: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizadas granulometricamente - Especificação. Rio de Janeiro, 2 p.
 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1991). NBR MB 3388: Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro, 10 p.
 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1995). NBR 13292: Solo – Determinação do índice de coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 8 p.
 - ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1995). NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 18 p.
 - ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 13934: Determinação de ferro – Método colorimétrico da ortofenantrolina. Método de Ensaio Rio de Janeiro. 3p.

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10.004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10.005: Lixiviação de Resíduos – Procedimento, Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10.006: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). NBR 10007: Amostragem de resíduos: Procedimento. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2006). NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 8 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 14 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). NBR NM 13: Cimento Portland – Análise química – Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno-glicol. Rio de Janeiro, 10 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2012). NBR NM 13: Cimento Portland: Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol: Análise química. Rio de Janeiro, 6 p.
- AGAB, A.F. (2005). *Hydraulic and Thermal Conductivities of Soils*. University of Newcastle, 190p.
- ALDASORO, J.C. (1985). Extracción y procesamiento de escórias. In: Memória Técnica de las primeras Jornadas Técnicas de Escorias Siderúrgicas, SOMISA, Buenos Aires, Argentina, p. 33-37.
- ALMEIDA, J.A. (2009). Influência da adição de resíduo siderúrgico na performance do concreto. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, MG, 76 p.
- ALMEIDA, R., ROQUE, A.J. e SILVA, A.P.F. (2014). Study of the hydraulic behaviour of steel slag and CDW recycled aggregates to MSW landfill leachate. <http://scholar.google.com.br>. acessado em 15 fevereiro 2016.
- ALMEIDA, R.P., LEITE, A.L. e SOARES, A.B. (2015). Reduction of acid rock drainage using steel slag in cover systems over sulfide rock waste piles. *Waste Management Research*, 33(4): 353-362.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1995). ASTM D 4792: Standard Test Method for Potential Expansion of Aggregates from Hydration Reactions. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2011). ASTM D 2487: Standard Practice for Classification of Soils for engineering Purposes (Unified Soil Classification Systems). Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2014). ASTM D 5550: Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids Gas Pycnometer. Philadelphia.
- ANDRADE, R.M.A. (2015). Caracterização Laboratorial de Misturas Betuminosas com Incorporação de Agregado Siderúrgico Inerte para Construção Civil (ASIC). Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, ISEL, Lisboa, Portugal, 138 p.
- ARCELOR MITTAL (2015) <http://tubarao.arcelormittal.com/produtos/> Acessado em julho 2016, 21h00.

- AREMA. (2001). *Manual for Railway Engineering*. Lanham: American Railway Engineering and Maintenance Association – V. I-IV.
- ARIKA, C. N.; CANELON, D. J.; NIEBER, J. L. (2009). *Subsurface Drainage Manual for Pavements in Minnesota*. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering University of Minnesota. Minnesota Department of Transportation Research Services Section Transportation .Bldg. St. Paul, Minnesota, 194p.
- BARBOSA, M.R. (2013). *Caracterização geoambiental das escórias de aciaria de cinco estados brasileiros*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 157 p.
- Brasil. (1988). Ministério dos Transportes. *Escórias siderúrgicas – material de múltiplas aplicações*. Brasília: DNER – Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 50p.
- BS 6543. (1985). *Guide to use of industrial by-products and waste materials in building and civil engineering*. British Standards Instituto
- CARVALHO, C.L. (2010). *Avaliação do processo de colmatação de filtros geotêxtis utilizados em sistemas de drenagem de aterros sanitários*. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 153 p.
- CASTELO BRANCO, V.T.F. (2004). *Caracterização de Misturas Asfálticas com o Uso de Escoria de Aciaria como agregado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 135 p.
- CDOT – Drainage Design Manual. (2004). *Colorado Department of Transportation*. Acessado em 20 de março de 2014, às 20h30. www.codot.gov.com.
- CEDERGREN, H. R. (1973). *Development of Guidelines for the Design of Subsurface Drainage Systems for Highway Administration, Washington, D.C.* John Wiley e Sons, New York, USA, 195p.
- CEDERGREN, H. R. (1974). *Drainage of highway and airfield pavements*. John Wiley e Sons, New York, USA, 285p.
- CHESNER, W.; COLLINS, R.; MACKAY, M.; EMERY, J. (2001). *User guidelines for waste by product material in pavement construction*. FHA Washington, USA. Publication Number: FHWA-RD-97-148. 105-113p. <http://www.tfhrc.gov/hnr20/recycle/waste/begin.htm>. 13/02/2015.
- COLMANETTI, J.P. (2000). *Comportamento de Filtros Geotêxtis em Sistemas de Drenagem para Resíduos Sólidos Municipais*. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, 126 p.
- CONAMA 313 (2002) – Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente No 313, 29/10/2002, “Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Industriais.”
- CONINFRA (2009). www.andit.org.br/consulta. Infiltrações de projeto para dimensionamento. ANDIT.
- CORRÊA, M.L.T. (2006). *Utilização de escória de aciaria como corretivo da acidez de solos para cultivos de soja e cana-de-açúcar e avaliação da contaminação ambiental*. Tese de Doutorado, UFV, Viçosa, MG, 187 p.
- DAS, B.M. (2009). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 709p
- DAS, B.M. (2011). *Fundamentos de engenharia geotécnica*. Cengage Learning, São Paulo, SP, 612p.
- DAYRELL, F.O. (2013). *Metodologia geotécnica sustentável para credenciamento da escória de aciaria como lastro ferroviário*. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 177 p.

- DMA-1/DER-MG. (1992). PTM 130/78, Método PTM 130/78 adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, Minas Gerais, 1992
- DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, 1998, **ME 083**. “Agregados – análise granulométrica”. 5p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem, (1994), **EM 260**. Escórias de alto forno para pavimentos rodoviários. 4p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem, (1994), **EM 262**. Escórias de Aciaria para Pavimentos Rodoviários. 4p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem, (1994), **ME 089**. Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de solução de sulfato de sódio ou de magnésio. 6p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem, (1994), **PRO 261**. Emprego de escórias de alto forno em pavimentos rodoviários. 3p.
- DNER – Departamento Nacional de Rodagem, (1994), **PRO 263**. Emprego de escórias de aciaria em pavimentos rodoviários. 3p.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (2006). **ES 015**, Drenagem - Drenos subterrâneos - Especificação de serviço– Rio de Janeiro, 10p.
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. (2006a). Manual de Drenagem de Rodovias. 2ª edição. Publicação IPR – 724, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. Acessado em 28 set. 2014, 13h05. 337p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (2009). **ES 115**, Pavimentação rodoviária – Base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® Especificação de Serviço, 10p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, 2009, **ME 113**, Pavimentação rodoviária – Agregado artificial – Avaliação do potencial de expansão de escória de aciaria - Método de ensaio, 12p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, 2009, **ES 114**, Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com escória de aciaria – ACERITA® Especificação de Serviço, 9p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, 2017, **ES 406**, Pavimentação rodoviária Pavimentação rodoviária - Base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço, 10p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes, 2017, **ES 407**, Pavimentação rodoviária Pavimentação rodoviária – Sub-base estabilizada granulometricamente com Açobrita® - Especificação de serviço, 10p.
- DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. (2010). **IPR 742**, Manual de Implantação Básica de Rodovia Rio de Janeiro, RJ. 617p.
- DNIT - Manual de pavimentação Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Ministério dos Transportes. (2006b). Publicação IPR – 719, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. Acessado em 28 set. 2014, 14h05. 278p.
- DOURADO, K.A. (2003). Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida. USP, São Paulo, SP. 89p.
- DUTRA, F.C. et al (1999). “Meio Ambiente e Gerenciamento de Resíduos Industriais” – Seminário Anual da Divisão de Redução e Matérias-primas da ABM, 1999
- DWECK, J.; BUCHLER, P.M.; COELHO, A.C.V.; CARTLEDGE F.K. Hydration of a Portland Cement Blended with Calcium carbonate. *Thermochimica Acta*, v. 346, p. 105- 113, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2011) – EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisa de Solos - Ministério da Agricultura e do Abastecimento; **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª Ed. EMBRAPA SOLOS, Rio de Janeiro, 2011
- FARIA, R. A. F. (2007). Contribuição ao Estudo das Propriedades Mecânicas e da

Durabilidade de Concretos com Escória de Aciaria Elétrica (EAF) como Agregado Graúdo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharias, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 146 p.

▪ FATMA (2007)- Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina. Núcleo de Unidades de Conservação. Disponível em <http://www.fatma.sc.gov.br>. Acessado em 05.12.2007 .

▪ FERNANDES, D.P. (2010). Estudo de estabilização química, Geo-Mecânica e Ambiental das Escórias de Aciaria LD para Fins de Aplicação como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG, 142 p.

GEISELER, J. (1996). *Use of steelworks slag in Europe*. Waste Management. Vol. 16, Nos 1-3, pp. 59-63

▪ GEYER, R.M.T., DAL MOLIN, D.C.C. e VILELA, A.C.F. (1995). Caracterização e aplicações das escórias siderúrgicas na indústria da construção civil. V Encontro Regional Meio Ambiente na Indústria Siderúrgica, Vitória, ES, p. ST V-1/1-1/2.

GIROUD, J. P; ZORNBERG, J.G.; ZHAO, A. (2000). Hydraulic Design of Geosynthetic and Granular Liquid Collection Layers. 2000, Geosynthetics International, Special Issue on Liquid Collection System, Vol 7, pp 285-380.

▪ GONÇALVES, W.M. (2005). Adequação do Processo de Fabricação de Aço LD, Utilizando Ferro-Gusa Líquido com Baixo Teor de Silício. Dissertação de Mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 87 p.

▪ GONTIJO, P.R.A. (2006). Pavimentos compostos com escorias de aciaria. Revista Pavimentação, ano 1, n. 3 (Julho): 42-54.

▪ GUMIERI, A.G. (2002). Estudo da viabilidade técnica da utilização de escórias de aciaria do processo LD como adição em cimentos. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre, RS, 251 p.

▪ GUPTA, J. D., KNELLER, W. A., TAMIRISA, R., SKRZYPCZAK-JANKUN, E. (1994). *Characterization of Base and Surface Iron and Steel Slag Aggregates Causing Deposition of Calcareous Tufa in Drains*. Transportation Research Board. 9p.

▪ HARR, M. E. (2012). *Groudwater and seepage*. Courier Corporation.. John Wiley e Sons New York 584p.

▪ HEATON, B. S. (1996). *Developments in the uses of slags from iron e steel plants in road pavements*. The University of Newcastle, 9p.

▪ HORII, K.; TSUTSUMI, N.; KATO, T. (2013). Processing and Reusing Technologies for Steelmaking Slag. Nippon Steel Technical Report, N. 104, August, 123-18p.

▪ HURD, J. O. (1988). *Effect of slag type on tufa precipitate formation*. Transportation research record, N.1192, P.35-49.

▪ IABr (2015). Instituto Aço Brasil (2015). Estatísticas. Disponível em: < <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>> Acesso em: 5 de fevereiro de 2015.

▪ JAPAN INSTITUTE STANDARD – **JIS A 5015**: Escória siderúrgica para construção de estradas. 1992, 48p. (tradução em português).

▪ KNELLER, W. A.; GUPTA, J.; BORBOWSKI, M. L.; DOLLIMORE, D. (1994). *Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis*. Transportation research record 1434, p. 17-22.

▪ LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. *Soil Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology, John Wiley & Sons, Nova York, pp. 1-553, 1969.

▪ LEE, A. R. (1974). *Blast furnace and steel slags production, properties and uses*. Eward Arnold Ltda, London. England. 119 p.

▪ LI, B.; GARGA, V. K.; DAVIES, M. A. (1998). *Relationships for Non-Darcy Flow in Rockfill*. J. Hydraulic. Eng. N. 124, 124-206p.

▪ MACHADO, A.T. (2000). Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, SP. 153

P.

▪ MANCIO, M.(2001). Caracterização e avaliação das escórias de aciaria elétrica. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola Engenharia. UFRGS, Porto Alegre. 160p.

▪ MASUERO, A. B., VILELA, A. C., DAL MOLIN, D. (2000). Emprego de escórias de aciaria elétrica como adição a concretos. Seminário Nacional sobre Reuso/ Reciclagem de Resíduos Sólidos Industriais, São Paulo, SP, agosto, 28-31p. acesso em outubro 2014. Disponível em: <ftp://ftp.cefetes.br

▪ MASUERO, A.B. (2001). Estabilização das Escórias de Aciaria Elétrica com Vistas a sua Utilização como Substituição ao Cimento. Tese de Doutorado, UFRS, Porto Alegre, RS, 264 p.

▪ MENDES, B; OLIVEIRA, J. F. S. (2004). Qualidade da água para consumo humano. Editora Técnicas, Lisboa, Portugal. 640p.

▪ MINISTÉRIO DA SAÚDE (2005). Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS N.º 518/2004- Brasília: Editora do Ministério da Saúde,

▪ MINISTÉRIO DA SAÚDE (2011). Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Portaria N.º 2914, de 12 de dezembro. 38p.

▪ MITCHELL, J. K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. Second edition, John Willey & Sons, Inc., New York

▪ MONTGOMERY, D., e WANG, G. (1991). Instant-chilled Steel Slag Aggregate in Concrete – strength related properties. Cement and Concrete Research, New York, v. 21, n.6, p. 1083-1091.

▪ MOREIRA, C. C. (2006). Característica e Desempenho da Escória de Alto Forno como Agregado para Utilização em Camadas Granulares de Pavimento. 37ª Reunião Anual de Pavimentação. 11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. 37ª RAPv/11º ENACOR. Goiânia/GO – Brasil. 13p.

▪ MOTTA, L. M. G., ALMEIDA, M. S., BARBOSA, M. C. (2006). Parecer sobre Uso de escória Siderúrgica em Pavimentos sem Cobertura, Projeto COPPETEC, PEC n.º 6706. Rio de Janeiro.

▪ MOTZ, H., GEISELER, J. (1998) "*The Steel Slags - Characteristics, Properties and Quality Assurance*", In: *AFOCO - European Conference on Slags*, Marseilles, France, March, 25-27p.

▪ MOTZ, H.; GEISELER, J. (2001). *Products of steel slags a opportunity to save natural resources*. Waste Management. n. 21, p. 285-293.

▪ MOULTON, L. K. (1980). *Highway Subdrainage Design*. FHWA – TS – 80 – 224. Washington D.C., USA, 80-224p. www.fhwa.dot.gov, acessado 25 de abril, 2014.

▪ NATIONAL SLAG ASSOCIATION. (2013). *Blast Furnace Slag*. www.nationalslag.org, acesso em 08 setembro de 2017.

▪ NOGUEIRA, J. (1986) Colmatção Química dos Drenos de Barragens por Compostos de Ferro. Artigo Técnico. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE, São Paulo, SP, N 10, 1-20p.

▪ OLIVEIRA, V. H.S; TARAZONA, N; RIBEIRO, L.F. M; CAVALCANTE, A.L.B. (2018). Evaluation of Steel Aggregate Expansion Potential in Layers of Road Pavements. Journal of Environmental Engineering – JEE (ASCE).

▪ ONUBR- Nações Unidas no Brasil. (2015). Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis. <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>.

▪ ORTIGÃO, J. A. (1995). Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos . LTC., 378p.

▪ OSAKO, C.I. (2002). A Manutenção dos Drenos nas Fundações de Barragens: O Caso da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade

Federal do Paraná, Curitiba, PR, 126 p. OK

▪ PALMEIRA, E. M. (2003). *Fatores Condicionantes do Comportamento de Filtros Geotêxteis*. IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, Volume 1, Porto Alegre, pp.49-67.

▪ PALMEIRA, E.M. and Gardoni, M.G. (2000). "The Influence of Partial Clogging and Pressure on the Behaviour of Geotextiles in Drainage Systems". *Geosynthetics International* (in press).

▪ PEREIRA, A.C.O. (2003). Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes. USP, São Paulo, SP, 199 p.

▪ PINTO, C.S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos (16 Aulas). Oficina de Textos, São Paulo, SP, 359 p.

▪ POLESE, M.O. (2007). Estudo da expansibilidade e da microestrutura de escórias de aciaria LD e EAF. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 271 p. OK

▪ PROCTOR, D.M.; SHAY, E.C.; FICHLING, K.A.; FINLEY, B.L. (2002) – Assessment of Human Health and Ecological Risks Posed by the Uses of Steel-Industry Slags in the Environment. Human and Ecological Risk Assessment. V.8, n. 4. pp. 681-711.

▪ PTM – Pennsylvania Testing Method 130 (1978). Método de Ensaio para Avaliação do Potencial de Expansão de Escoria de Aciaria, adaptado pelo Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais, DMA-1/DER-MG/92.

▪ RIDGEWAY, H.H. (1976) *Infiltration of Water Through The Pavement Surface*. Transportation Research Record,. 616,98-100p.

▪ ROCHA, F. L. L. (2011). Utilização do agregado siderúrgico (escória de aciaria) em revestimento asfáltico tipo tratamento superficial. Dissertação de Mestrado, NUGEO, UFOP. 137p.

▪ RODHE, L. (2002). Escoria de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos – Estudo Laboratorial. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 101 p. OK

▪ RODRIGUES, G.L.C. (2007). Caracterização e avaliação da expansibilidade de escórias de aciaria LD não tratadas e tratadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 147 p. OK

▪ SAMARIS, 2006. *Sustainable and advanced materials for road infrastructures*. Project funded by the European Commission under the Transport RTD Programme of the 5th Framework Programme.: s.n.

▪ SBRIGHI, C. N. e BATTAGIN, I. L. S. (2002). Precauções e limitações do uso de escórias como agregados na construção civil, CPTI, São Paulo, 40 p.

▪ SHI, C. (2004). Steel slag-its production, processing, characteristics, and cementitious properties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(3), 230-236

▪ SILVA, E. A., MENDONÇA, R. L., DOBELE, C. H. M., SIQUEIRA, M., SOARES, J.B. (2003). Uma experiência Inédita: Uso da Escoria de Aciaria LD em Todas as Camadas do Pavimento. In: Reunião Anual de Pavimentação. Campinas. 238-244p.

▪ SILVA, E. B.; VALENTINI, A. (2015). EFEITO DO DIOXIDO DE CARBONO SOBRE A ESTABILIDADE DA FASE $Ca_2Fe_2O_5$ APLICADA NO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO FOTOCATALITICO DO AZUL DE METILENO. "Química Nova," 38(10), 1265-1272p.

▪ SILVA, P.D.E.A. (2001). Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (*Whitetopping*) na Pista Circular Experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ,376p.

▪ SILVA, R.G.O. (2010). Estudo laboratorial do desempenho mecânico de misturas asfálticas com resíduos industriais de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG, 132 p.

- SOUSA, G.M. (2007). Estudo Experimental de Escorias de Aciaria para Fins de Caracterização Tecnológica como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 124 p. OK
- SUZUKI, C.Y.; AZEVEDO, A.M.; KABBACH Junior, F.I. (2013). Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento. Oficina de Textos, São Paulo, 240 p.
- TARAZONA, N.D.B. (2016). Aplicabilidade agregado siderúrgico açobrita misturado com solo em camadas de pavimentos rodoviários. Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, DF, 99p.
- TAVARES, D.S. (2012). Avaliação Laboratorial de Mistura Asfáltica do Tipo SMA com Agregado Siderúrgico. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 138 p.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. 3rd ed. New York. USA.
- WANG, G., WANG, Y., e GAO, Z. (2010). Use of steel slag as a granular material: volume expansion prediction and usability criteria. *Journal of Hazardous Materials*, 184(1), 555-560.
- YILDIRIM, I. Z.; PREZZI, M. (2009). *Use of Steel Slag in Subgrade Applications Joint Transportation Research Program*. FHWA/IN/JTRP. 274p

APÊNDICE A- CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DAS AMOSTRAS

A.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS ORIGINAIS

Na Tabela A.1 estão apresentados os resultados do ensaio de granulometria, da amostra de agregado siderúrgico, da indústria A, denominadas (A1, A2 e A3).

Tabela A.1 – Resultado granulométrico das amostras originais tipo A - LD

Peneiras (mm)	Amostra A1		Amostra A2		Amostra A3	
	% retida	% passante	% retida	% passante	% retida	% passante
75	0	100	0	100	2,8	97,2
50	0	100	0	100	20,8	76,4

37,5	0	100	14,3	85,7	20,2	56,3
25	0	100	65,9	19,8	28,0	28,3
19	83,9	16,1	16,9	2,9	6,8	21,6
12,5	15,7	0,34	2,5	0,45	5,2	16,3
9,5	0	0,34	0	0	2,4	16,3
4,75	0	0,34	0	0	4,3	14,0
2,36	0,04	0,30	0,25	0,02	3,9	5,7
0,075	0,02	0,18	0,14	0,05	4,7	1,0
Fundo	0,14	0,00	0,05	0,00	3,8	0

Com os valores da Tabela A.1 geraram-se as curvas correspondentes das amostras A1, A2 e A3, Figura A.1. Observa-se na Tabela e nas curvas das amostras A1 e A2, concentração de grãos de diâmetros de 19 mm, A1 e, de 25 mm A2.

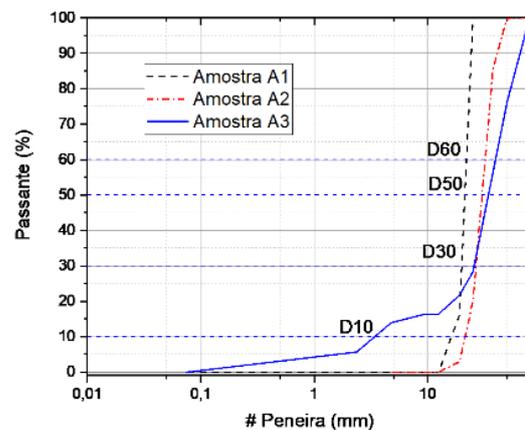


Figura A.1 - Curvas granulométricas das amostras A1, A2 e A3 - LD

Os resultados do ensaio granulométrico das amostras, da siderúrgica B, denominadas B1, B2 (LD) e B3, B4 (AF) estão apresentados na Tabela A.2.

Tabela A.2 – Resultado granulométrico das amostras originais tipo B – LD e AF

Peneira (mm)	Amostra B1		Amostra B2		Amostra B3		Amostra B4	
	% retida	% passante	% retida	% passante	% retida	% passante	% retida	% passante
75	0	100	0	100	0	100	0	100
50	0	100	43,4	56,6	0	100	28,0	72,0
37,5	0	100	30,6	26,0	0	100	30,3	41,6
25	36,5	63,5	24,3	1,7	24,6	75,4	27,3	14,3
19	43,3	20,2	6,7 $\times 10^{-1}$	1,0	38,4	36,9	2,9	11,4
12,5	14,5	5,7	9,9 $\times 10^{-1}$	0,91	13,7	23,2	1,9	9,5
9,5	0,92	4,7	6,2 $\times 10^{-2}$	0,85	1,5	21,7	7,0 $\times 10^{-1}$	8,8
4,75	1,0	3,7	7,4 $\times 10^{-2}$	0,85	3,5	21,7	7,0 $\times 10^{-1}$	8,8
2,36	0,55	3,2	6,4 $\times 10^{-2}$	0,71	4,0	14,3	1,2	6,3

0,075	2,2	0,93	$5,1 \times 10^{-1}$	0,20	12,6	1,7	5,3	1,0
Fundo	0,93	0,00	$2,0 \times 10^{-1}$	0,00	1,7	0	$9,0 \times 10^{-1}$	0

Com os valores da Tabela A.2 geraram-se as curvas correspondentes das amostras B1, B2, B3 e B4, Figura A.2. Observa-se na Tabela e nas curvas das amostras B1 e B2, que em torno de 70 % dos grãos estão entre 25 mm e 19 mm; ente 50 mm a 37,5 respectivamente. As amostras B3 e B4, os intervalos dos grãos concentram em torno de 50% entre 25 mm e 19 mm; entre 50 mm e 37,5 respectivamente.

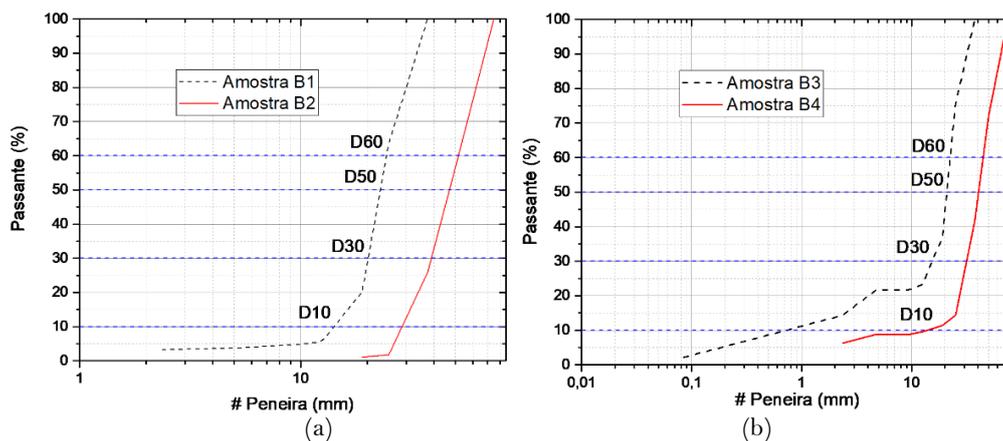


Figura A.2 -Curvas granulométricas: (a) amostras originais B1 e B2 - LD; (b) amostras originais B3 e B4 - AF

Observa-se que, em sua maioria, as amostras concentram percentual de determinado intervalo de grão, que pela tabela de classificação do Sistema Unificado de Classificação (S.U.C.) a amostra constitui-se de pedregulhos (76,2 mm a 4,75 mm), (DAS, 2011) .

Das curvas granulométricas geradas retiraram-se D_{10} em mm, diâmetro efetivo dos grãos, corresponde a porcentagem onde passa apenas 10% em massa, das partículas na curva granulométrica; D_{30} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 30% em massa, das partículas na curva granulométrica; D_{60} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 60% em massa, das partículas na curva granulométrica valores para verificação dos parâmetros C_U e C_C descritos no Capítulo 2. Os resultados encontram-se na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Parâmetros das amostras originais

Parâmetros	Amostras						
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	B4
C_U	1,3	1,5	1,7	1,7	1,8	17,1	3,2
C_C	1,1	1,1	3,2	1,2	1,0	8,3	1,6
D_{10}	16,5	21,5	5,1	14,4	29,3	1,3	14,1
D_{30}	20,0	26,9	25,8	20,4	39,1	15,7	32,2
D_{60}	22,1	32,6	39,8	24,5	52,0	22,6	45,1

Dos resultados apresentados na Tabela A.3, verifica-se que apenas a amostra B4 atendeu aos parâmetros de coeficiente de não-uniformidade e coeficiente de curvatura [$2 < C_U < 20$]; [$0,64 < C_C < 1,63$].

Diante destes resultados, realizou-se centenas de combinações lineares com as amostras originais, e obteve novas faixas granulométricas. O processo ocorreu conforme descrito no

subitem 2.7, e os resultados, encontram-se na Tabela A.4, que apresenta os percentuais de cada amostra que participaram na definição das novas faixas granulométricas.

A amostra A3* compreende a granulometria recebida pelo IABr, denominada A3, excluindo o diâmetro de 75 mm. Nesta tabela, a combinação é identificada com a letra C, sendo C1= combinação 1 e assim por diante C2, C3 ...C11.

Tabela A.4 – Combinação linear das amostras originais

Faixa granulométrica	Amostras Originais [%]					
	A1	A2	A3*	B1	B2	B3
C1	-	-	100	-	-	-
C2	30	10	60	-	-	-
C3	10	30	60	-	-	-
C4	-	-	-	70	-	30
C5	-	-	-	60	10	30
C6	-	-	-	-	60	40
C7	-	-	-	60	20	20
C8	-	-	-	40	60	-
C9	-	-	-	70	30	-
C10	-	-	-	50	20	30
C11	10	40	50	-	-	-

As faixas resultantes da combinação linear, encontram-se na Tabela A.5. observa-se que somente a C4 não possui em sua composição diâmetros de 50 mm e 37,5 mm.

Tabela A.5 – Granulometria da combinação linear - % Retida

Faixa granulométrica	Peneiras (mm)								
	50,0	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,36	0,075
C1	16,5	15,5	26,2	23,2	7,0	1,7	3,0	2,8	3,4
C2	14,1	13,5	23,4	30,9	8,1	1,5	2,6	2,4	2,9
C3	14,1	16,4	36,5	17,5	5,4	1,6	2,6	2,4	2,9
C4	0,0	0,0	33,0	41,9	14,3	1,1	1,8	1,6	5,3
C5	4,3	3,1	31,7	37,6	12,8	1,0	1,7	1,5	5,2
C6	26,1	18,3	24,5	15,8	5,5	0,6	1,4	1,6	5,3
C7	8,7	6,1	31,7	33,8	11,5	0,9	1,3	1,1	4,0
C8	26,1	18,3	29,2	17,7	5,9	0,4	0,5	0,3	1,2
C9	30,4	21,4	24,4	12,0	4,2	0,5	1,1	1,2	4,1

C10	8,7	6,1	30,5	33,3	11,4	0,9	1,6	1,5	5,0
C11	11,8	15,8	40,4	18,5	5,2	1,4	2,2	2,1	2,4

Com as novas faixas obtidas, apresentadas na Tabela A.5, obteve-se os parâmetros descritos na Tabela A.6, onde, D_{10} em mm, diâmetro efetivo dos grãos, corresponde a porcentagem onde passa apenas 10% em massa, das partículas na curva granulométrica; D_{30} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 30% em massa, das partículas na curva granulométrica; D_{60} em mm, diâmetro abaixo do qual se situam 60% em massa, das partículas na curva granulométrica valores para verificação dos parâmetros C_U e C_C descritos no Capítulo 2.

Tabela A.6 – Parâmetros das faixas granulométricas.

Faixa granulométrica	C_U	C_C	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	(%) Passante # 0,075 mm
C1	3,4	1,5	9,8	21,9	33,7	0,7
C2	2,5	1,2	12,5	21,3	30,9	0,7
C3	2,7	1,3	12,5	24,0	34,3	0,6
C4	2,4	1,6	9,9	19,7	24,0	1,2
C5	2,2	1,5	11,1	20,1	24,9	1,1
C6	3,2	1,2	12,7	24,6	40,5	0,8
C7	2,1	1,2	13,5	20,8	27,6	0,9
C8	2,1	0,9	19,5	26,5	40,5	0,5
C9	2,7	1,1	16,2	28,2	44,4	0,7
C10	2,2	1,2	12,5	20,6	27,2	1,0
C11	2,3	1,21	14,5	24,3	33,7	0,5

Observa-se na Tabela A.6 que os valores obtidos para os C_U , C_C e o % passante na # 0,075 mm, encontram-se nos limites estabelecidos para fins de drenagem, Tabela 2.15, onde:

- C_U [2 a 20];
- C_C [0,64 a 1,63];
- % passante na # 0,075 mm < 5%.

Os C_C e C_U apresentados na Tabela A.6, variaram poucos entre si. Desses resultados, escolheu-se a C1 por conter grãos de [0,075 mm a 50 mm] e, os maiores valores dos C_U e C_C e, a faixa C4 por apresentar intervalos de grãos de [0,075 mm a 25 mm]. Dessa forma, a Tese contribuiu com duas opções de faixas granulométricas, para uso em colchão drenante.

A.2 Massa Unitária Seca

Este ensaio inicialmente realizou-se para a amostra A_{TLD} , faixa granulométrica C1 no estado solto e compacto. O resultado para massa unitária no estado solto foi de 1900 kg/m³ e no estado compacto e, obteve-se o resultado de 1800 kg/m³.

A pequena diferença entre as massas unitárias no estado solto e compacto, na prática, implica na pouca variabilidade do coeficiente de permeabilidade, uma vez que, estes parâmetros, são utilizados para o cálculo do índice de vazios máximo e mínimo.

A Figura A.3 nos mostra imagens da realização do ensaio de massa específica unitária sendo que, na Figura A.3a encontra-se o recipiente com amostra solta para o ensaio massa

unitária no estado solto e, na Figura A.3b o recipiente com a amostra sendo compactada para obter a massa unitária no estado compacto. A amostra ensaiada é a do tipo A, faixa C1.

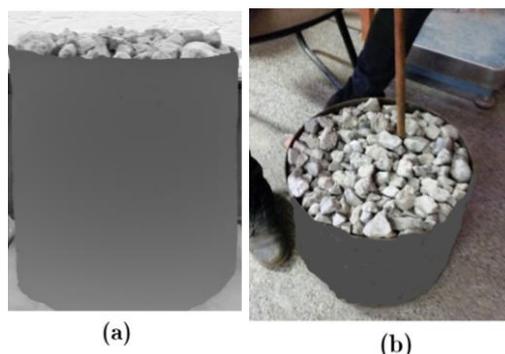


Figura A.3 – Massa unitária: (a) estado solto; (b) estado compacto

A.3 Índice de Vazios

Inicialmente utilizou-se o método da MB 3324 (ABNT, 1990) e MB 3388 (ABNT, 1991). Após a vibração ocorrida, orientada pela norma, percebeu-se que não ocorreu mudanças de acomodação do agregado siderúrgico. A Figura A.4 apresenta etapas da realização do ensaio. Na Figura A.4a encontra-se o recipiente após a realização do ensaio do índice de vazios máximo; a Figura A.4b apresenta o ensaio do índice de vazios mínimo com amostra úmida e, na Figura A.4c encontra-se o conjunto completo para a realização do ensaio sobre a mesa vibratória.

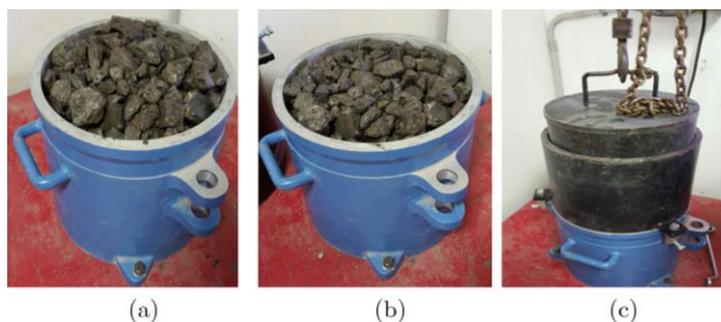


Figura A.4 – Ensaio de índice de vazios: (a) Índice de vazios máximo após vibração; (b) Índice de vazios amostra úmida após vibração; (c) Conjunto completo para realização do ensaio índice de vazios máximo e mínimo

Diante dos resultados apresentados e, por se tratar de agregado graúdo, resolveu-se utilizar o prescrito na norma NM 45 (ABNT, 2009) para obter o índice de vazios, somente para índice de vazios máximo, Capítulo 4, item 4.1.5.

APÊNDICE B - LEI DE DARCY OU FLUXO DARCYANO

B.1 VALIDAÇÃO DA LEI DE DARCY OU FLUXO DARCYANO

Os vazios presentes em meios porosos se comunicam de modo que a água possa fluir de pontos de alta energia para baixa energia. Estudar o fluxo através dos meios porosos é fundamental na Mecânica do Solos para que se possa estimar a percolação, sob variadas condições hidráulicas, e investigar problemas geotécnicos causados por forças oriundas da percolação.

A Mecânica dos Fluidos apresenta a equação de Bernoulli, no qual se observa que a carga hidráulica total de qualquer ponto na água em movimento (h) é dada pela soma das cargas piezométrica (primeiro termo), cinética (segundo termo) e altimétrica (terceiro termo).

$$h = \frac{u_w}{g_w} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (\text{B.1})$$

onde h é a carga hidráulica do fluido $[\text{L}]$, u_w corresponde ao valor da poropressão da água $[\text{F.L}^{-2}]$, v a velocidade de fluxo ou descarga da partícula de água $[\text{L.T}^{-1}]$, g a aceleração da gravidade $[\text{L.T}^{-2}]$ e γ_w o peso específico da água $[\text{F.L}^{-3}]$. A carga altimétrica z $[\text{L}]$, é a cota vertical do ponto considerado com relação a um dado referencial padrão.

Dos três termos que compõe a Equação B.1 pode-se eliminar o termo que tem a velocidade no numerador, o fluxo no solo, via de regra, apresenta baixíssima velocidade, desse modo pode-se reescrever a Equação B.1 como:

$$h = \frac{u_w}{g_w} + z \quad (\text{B.2})$$

A Figura B.1 mostra que a seção transversal de um meio poroso é igual a (A) , para um fluxo igual a (q) . As seções A e B podem ser determinadas pela carga total, como:

$$\text{seção A} \quad A = z_A + h_A \quad (\text{B.3})$$

$$\text{seção B} \quad B = z_B + h_B \quad (\text{B.4})$$

onde as alturas de carga são $(z_A$ e $z_B)$ e as pressões ou cargas são $(h_A$ e $h_B)$. A perda e carga (Δh) entre as seções A e B é dada pela expressão:

$$Dh = (z_A + h_A) - (z_B + h_B) \quad (\text{B.5})$$

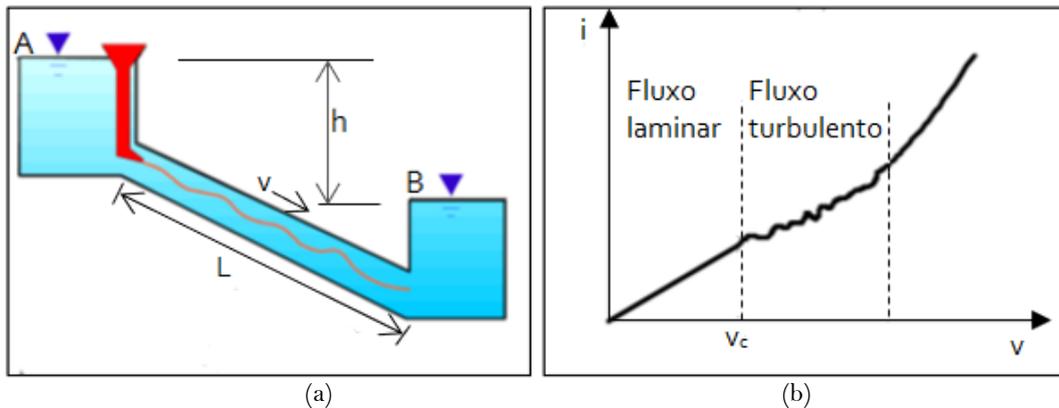


Figura B.1 - Experiência de Reynolds: (a) montagem; (b) resultados - Modificada Ortigão, 1995

Nota-se que a velocidade de descarga (v) é perpendicular às seções A e B e desse modo tem-se o gradiente hidráulico:

$$i = \frac{Dh}{L} \quad (\text{B.6})$$

onde a distância (L) $[\text{L}]$ é entre as seções A e B. Das (2009) e Das (2011) informa que Darcy (1856) simplificou a velocidade de descarga (v) $[\text{LT}^{-1}]$ em função do gradiente hidráulico (i) :

$$v = ki \quad (\text{B.7})$$

onde o coeficiente hidráulico (k) $[\text{LT}^{-1}]$

Desse modo a vazão (q) pode ser dada por:

$$q = kiA \quad (\text{B.8})$$

B.1.1 Cálculo da Velocidade Crítica pelo Número de Reynolds

A lei de Darcy é válida para um fluxo laminar. Para Ortigão (1995), as bases teóricas sobre o regime de escoamento em condutos forçados foram estabelecidas por Reynolds, em 1883 (*An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels*, Phil Trans, The Royal Society, London).

Experiência de Reynolds

Reynolds (1883) comprovou que o regime de escoamento sob condições distintas pode ser linear ou turbulento. Ortigão (1995) descreve que esta experiência, Figura B.1a, consistiu em permitir o fluxo de água através de uma tubulação transparente e, por meio de um pequeno funil instalado no tanque superior, introduziu um corante no fluxo: se o corante escoasse com uma trajetória retilínea, o regime de escoamento seria laminar, pois as partículas têm trajetórias paralelas; caso contrário, o regime seria turbulento.

Reynolds variou o diâmetro (D) e o comprimento (L) do conduto e a diferença de nível (h) entre os reservatórios, medindo a velocidade de descarga (v). Os resultados constam da Figura B.1b, onde estão gerados o gradiente hidráulico $i = h/L$ versus a velocidade de descarga (v). Verifica-se que há uma velocidade crítica (v_c) abaixo da qual o regime é laminar, havendo proporcionalidade entre gradiente hidráulico e velocidade de descarga. Para velocidades acima da velocidade crítica (v_c), a relação não é linear e o regime de escoamento é turbulento. Ainda segundo Ortigão (1995), o valor de (v_c) é relacionado teoricamente com as demais grandezas que governam através da expressão:

$$R_e = \frac{v_c D \gamma_w}{\mu g} \quad (\text{B.9})$$

onde, o número de Reynolds adimensional (R_e) é igual a 2000; a velocidade crítica (v_c) [L.T^{-1}]; o diâmetro do conduto (D) [L]; o peso específico do fluido (γ_w) [FL^{-3}]; coeficiente de viscosidade do fluido (μ) [M.T.L^{-2}] e, a aceleração da gravidade (g) [L.T^{-2}].

Das (2008) apresenta o valor de número de Reynolds (Re) como menor ou igual a 1 para a formulação:

$$Re = \frac{v D r}{\mu} \quad (\text{B.10})$$

onde, v é a velocidade de descarga em [L.T^{-1}]; D é o diâmetro médio da partícula do solo em [L]; ρ é a massa específica do fluido [M.L^{-3}]; μ é o coeficiente de viscosidade em [M.T.L^{-2}].

Verificação do número de Reynolds e validação

Harr (2012), informa que vários pesquisadores estabelecem uma faixa para a qual o regime laminar muda para turbulento, no caso de 1 a 12; para Keith e Mays (2005), essa faixa estaria entre 1 e 10. Desse modo para Harr (2012) tem-se a Equação B.11 para o cálculo do Número de Reynolds:

$$R_e = \frac{v D r}{\mu} \quad (\text{B.11})$$

onde v é a velocidade de descarga [L.T^{-1}]; D é o diâmetro médio da partícula do solo [L]; ρ é a massa específica do fluido [M.L^{-3}]; μ coeficiente de viscosidade [M.T.L^{-2}].

Quando se calcula o Número de Reynolds para cada amostra e faixa, este ultrapassa o limite de 12 (Harr, 2012), Figura B.1. Para o cálculo de fluxo não darcyano, vários autores (Ergun, 1952; Stephenson, 1979; Gent, 1991; Li *et al.* (1998), desenvolveram fórmulas para o cálculo do gradiente (i), que permite o cálculo do coeficiente de permeabilidade em fluxos

turbulentos em enrocamento.

Li *et al.* (1998) sugerem que:

$$i = \frac{800n}{d^2gn}V + \frac{4}{dgn^2}V^2 \quad (\text{B.12})$$

onde, n é a viscosidade cinemática da água [L.T⁻¹]; d é o diâmetro médio da partícula de rocha [M]; g é a aceleração gravitacional [L.T⁻²]; n é a porosidade do meio; V é a velocidade no meio poroso [L.T⁻¹].

Adotou-se:

$n = 1 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$ a 20°C;

$d = D_{50}$ para esta tese;

$g = 9,806 \text{ m/s}^2$;

n = porosidade do meio;

V = velocidade no meio poroso (k);

De posse do gradiente hidráulico, tem-se:

$$k = \frac{V}{i} \quad (\text{B.13})$$

E calcula-se o coeficiente de permeabilidade do enrocamento para fluxos turbulentos, Tabela B.1.

Tabela B.1 - Valores da k_{corr} – Formulação Stephenson

Amostras	Faixas	e	n	$k_{\text{médio}}$ [m/s]	$k_{20^\circ\text{C}}$ [m/s]	V [m/s]	D_{50} [m]	i_{corr}	k_{corr} [m/s]
A _{TLD}	C1	1,00	0,50	$5,30 \cdot 10^{-3}$	$4,80 \cdot 10^{-3}$	$5,48 \cdot 10^{-3}$	0,029	1,09	$5,04 \cdot 10^{-3}$
	C4	1,00	0,50	$2,90 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-3}$	$4,65 \cdot 10^{-3}$	0,022	1,60	$2,90 \cdot 10^{-3}$
	C12	1,00	0,50	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$4,60 \cdot 10^{-3}$	$5,30 \cdot 10^{-3}$	0,045	0,44	$1,2 \cdot 10^{-2}$
B _{N_{TLD}}	C1	1,00	0,50	$3,60 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$	$4,32 \cdot 10^{-3}$	0,029	0,86	$5,04 \cdot 10^{-3}$
	C4	1,00	0,50	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$	0,022	1,27	$2,90 \cdot 10^{-3}$
	C12	1,00	0,50	$4,70 \cdot 10^{-3}$	$4,40 \cdot 10^{-1}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	0,045	0,42	$1,21 \cdot 10^{-2}$

Tabela B.1 - Valores da k_{corr} – Formulação Stephenson - continuação

Amostras	Faixas	e	n	$k_{\text{médio}}$ [m/s]	$k_{20^\circ\text{C}}$ [m/s]	V [m/s]	D_{50} [m]	i_{corr}	k_{corr} [m/s]
C _{NTAF}	C1	1,00	0,50	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$2,50 \cdot 10^{-3}$	$3,33 \cdot 10^{-3}$	0,029	0,65	$5,04 \cdot 10^{-3}$
	C4	1,00	0,50	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$1,60 \cdot 10^{-1}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	0,022	0,99	$3,00 \cdot 10^{-3}$
	C12	1,00	0,50	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$4,70 \cdot 10^{-1}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$	0,045	0,43	$1,21 \cdot 10^{-2}$

APÊNDICE C – IMAGENS MEV/EDS

Neste Apêndice encontra-se as demais imagens geradas pelo ensaio MEV/EDS. No Capítulo 4, Resultados, foram inseridas imagens referentes a dois pontos analisados por amostra. Cada amostra foi dividida em áreas, e cada área, em pontos. A seguir, apresentam-se as demais áreas e pontos analisados.

C.1 Imagens Amostra A_{TLD}

C.1.1 Área 1

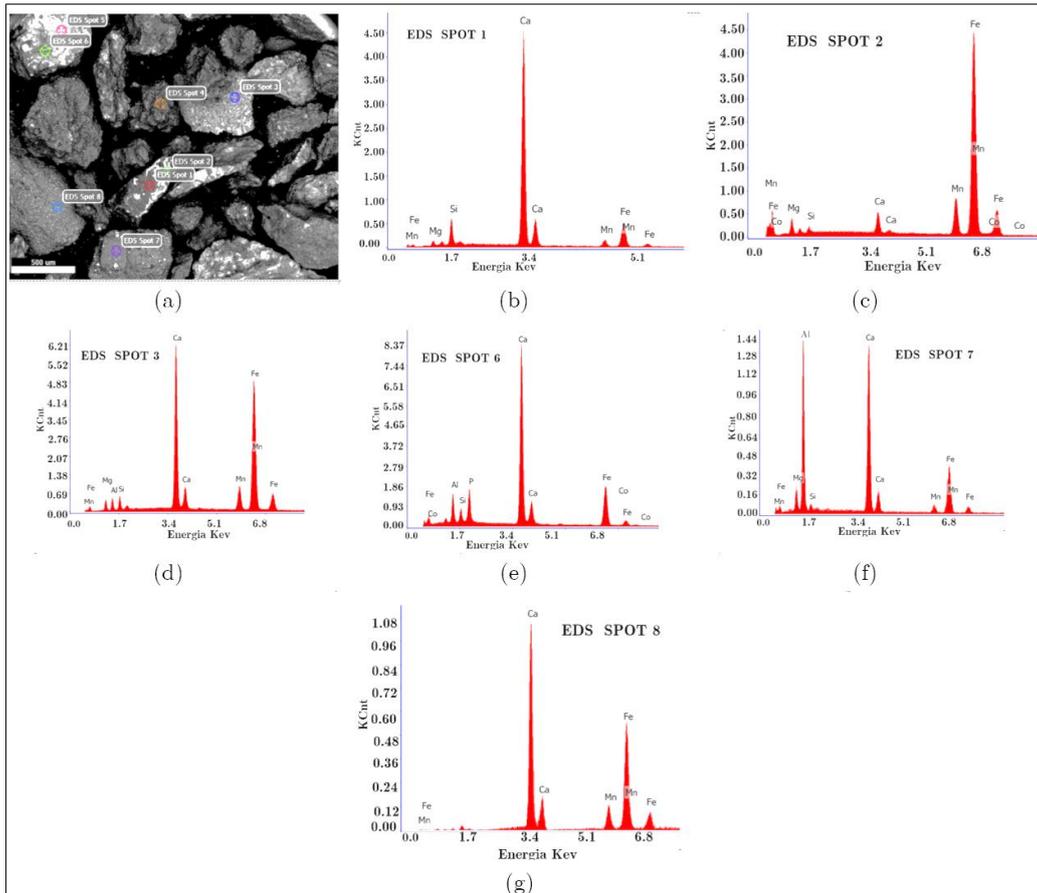


Figura C.1 – a) imagem área 1 da ATLD; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2; d) espectro ponto 3; e) espectro ponto 6; e) espectro ponto 7; f) espectro ponto 8

C.1.2 Área 2

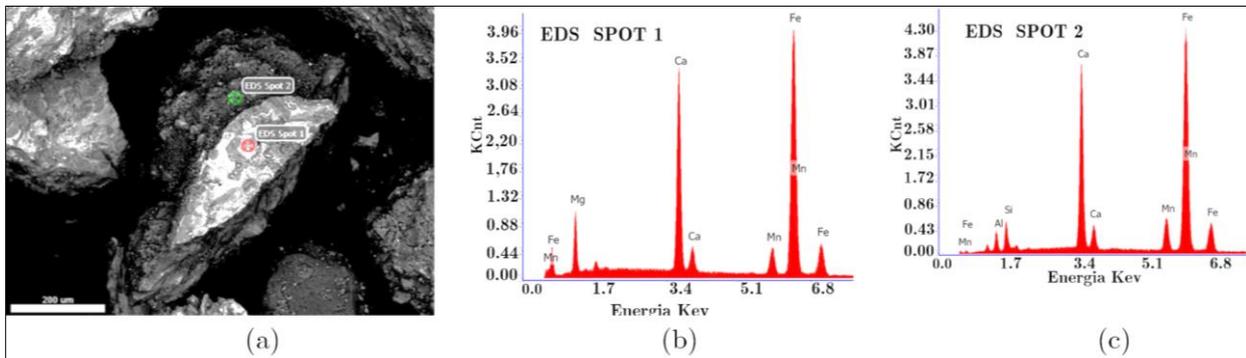


Figura C.2 – a) imagem área 2 da ATLD; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2

C.1.3 Área 3

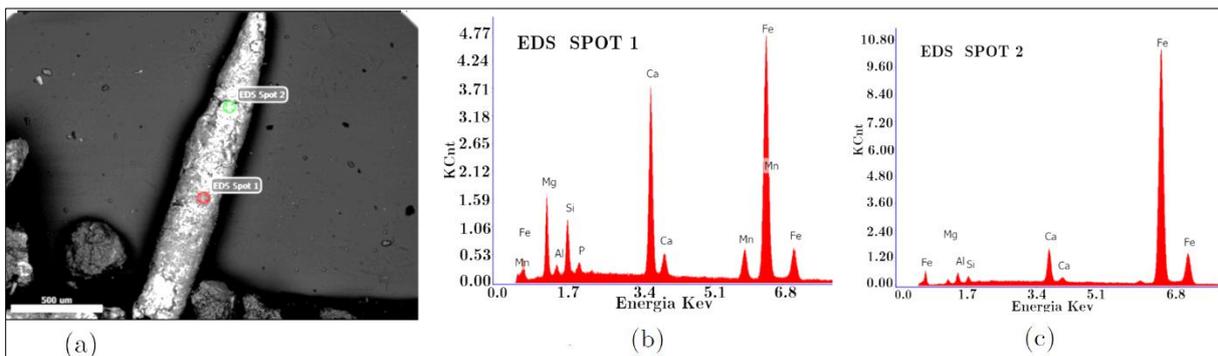


Figura C.3 – a) imagem área 3 da A_{TLD} ; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2

C.1.4 Imagens Morfológicas

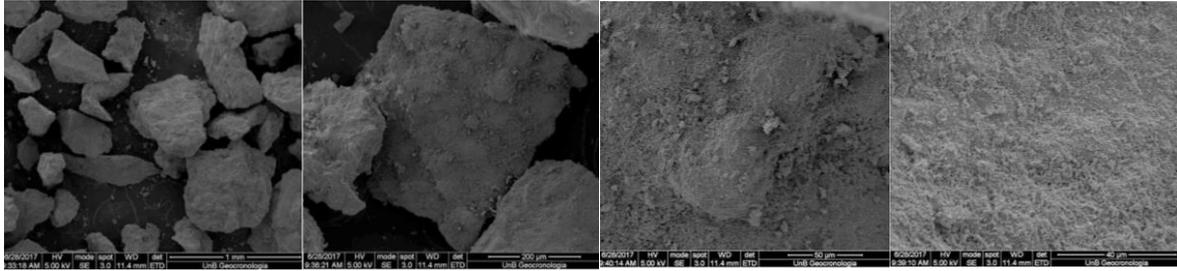


Figura C.4 – Imagens morfológicas - A_{TLD}

C.2 Imagens Amostra B_{NTLD}

C.2.1 Área 1

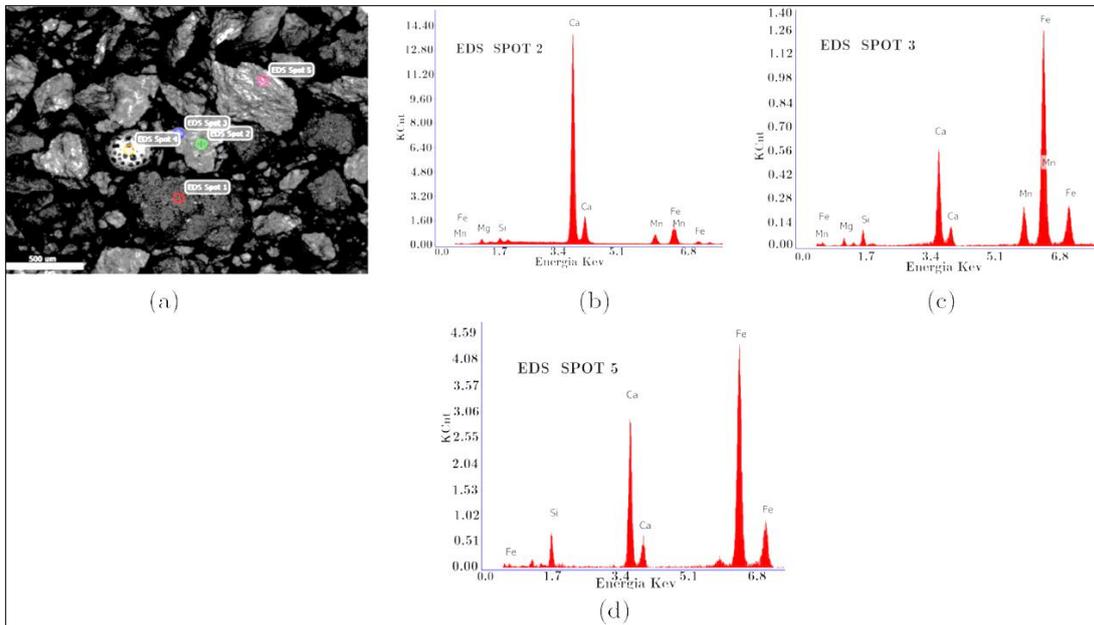


Figura C.5 – a) imagem área 1 B_{NTLD} ; b) espectro ponto 2; c) espectro ponto 3; d) espectro ponto 5

C.2.2 Área 2

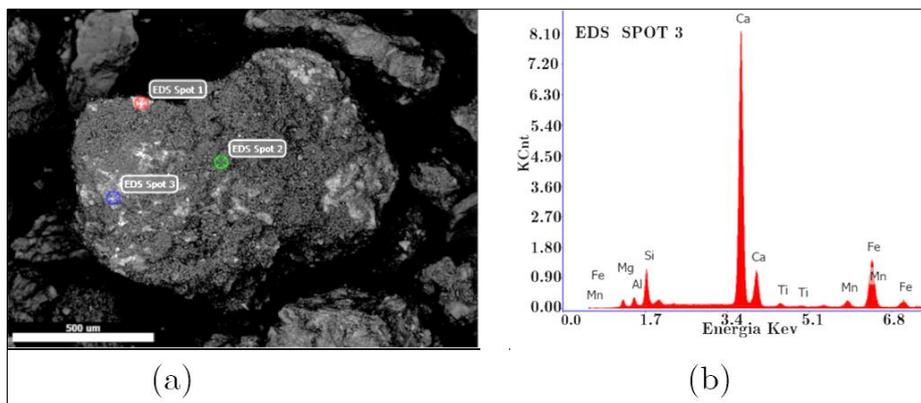


Figura C.6 – a) imagem área 2 da B_{NTLD} ; b) espectro ponto 3

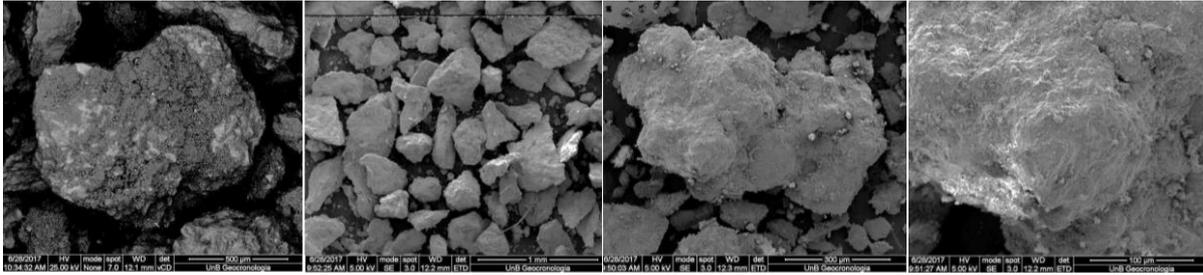


Figura C.7 – Imagens morfológicas da B_NTLD

C.3 Imagens Amostra C_{NTAF}

C.3.1 Área 1

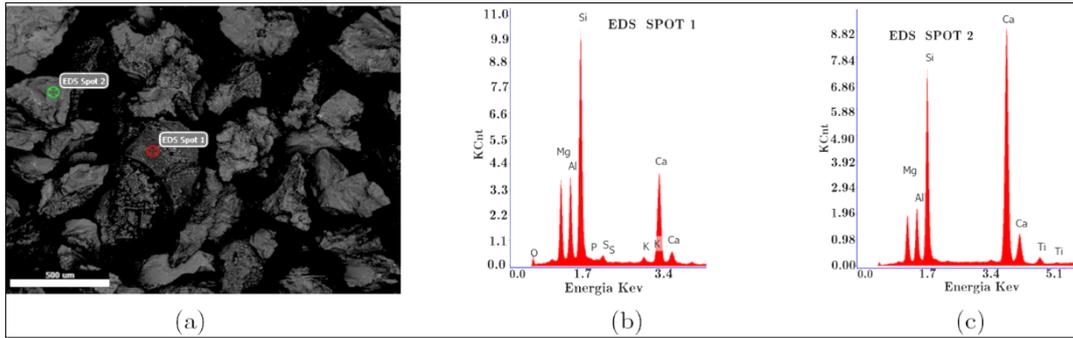


Figura C.8 – a) imagem área 1 da C_{NTAF}; b) espectro ponto 1; c) espectro ponto 2

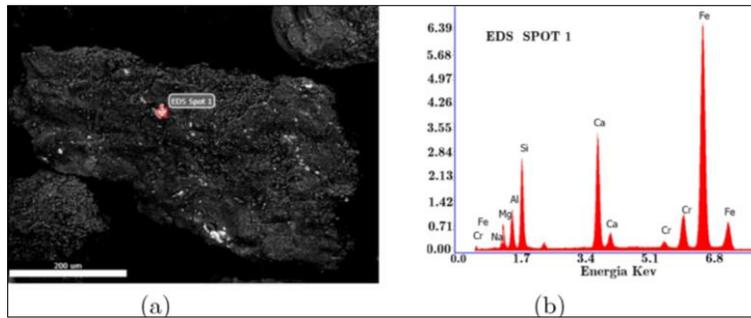


Figura C.9 – a) imagem área 2 da C_{NTAF}; b) espectro ponto 1

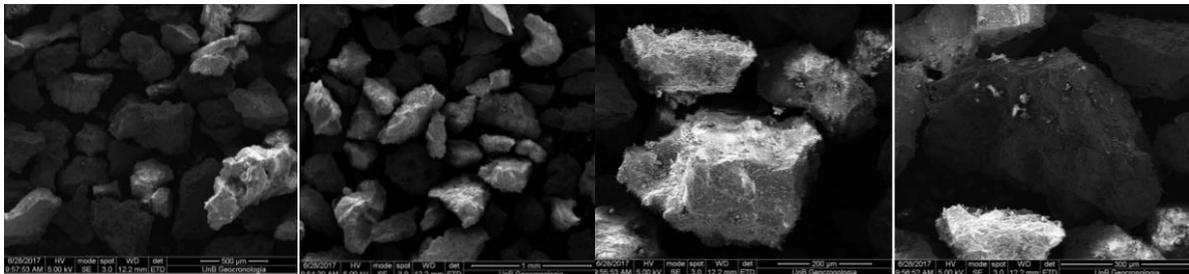


Figura C.10 – Imagens morfológicas da C_{NTAF}