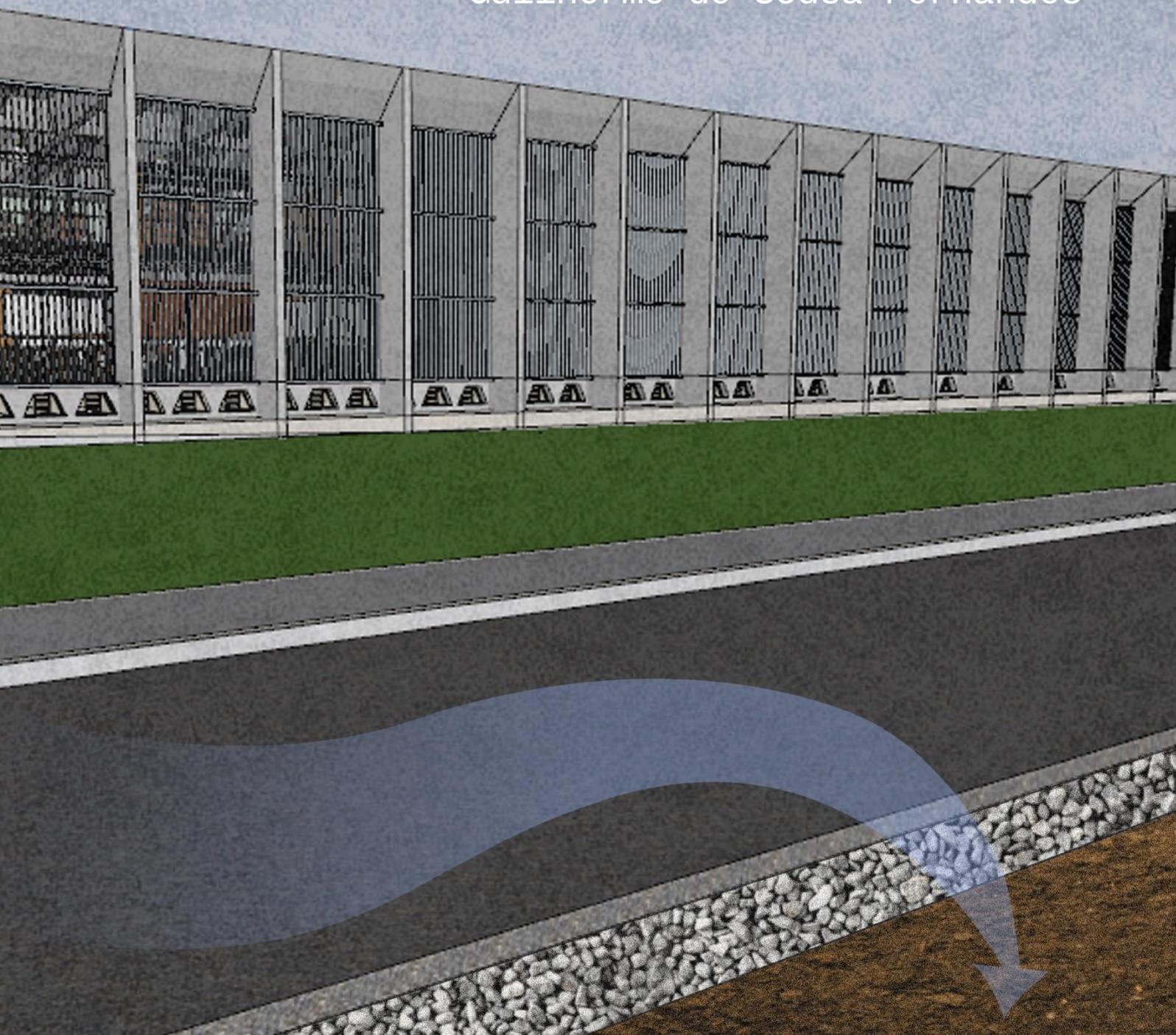


Utilização de pavimento permeável de concreto com agregados de RCD na mitigação de alagamentos:

Estudo de caso do estacionamento do
Instituto Central de Ciências da UnB

Guilherme de Sousa Fernandes



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO

**Utilização de pavimento permeável de concreto com agregados de
RCD na mitigação de alagamentos: estudo de caso do
estacionamento do Instituto Central de Ciências da UnB.**

ENG° GUILHERME DE SOUSA FERNANDES

ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO LUNA DE MELO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF: JULHO - 2020

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E
URBANISMO**

**UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL DE CONCRETO COM
AGREGADOS DE RCD NA MITIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS: ESTUDO
DE CASO DO ESTACIONAMENTO DO INSTITUTO CENTRAL DE
CIÊNCIAS DA UNB.**

ENGº GUILHERME DE SOUSA FERNANDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

Prof. Carlos Eduardo Luna de Melo, Dr. (PPG-FAU/UnB)
(Orientador)

Prof. Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, Dr.
(ENC/FT/UnB)
(Examinador Externo)

Profa. Maria do Carmo de Lima Bezerra, Dra. (PPG-FAU/UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF, 01 DE JULHO DE 2020

“Não entre em pânico”

Douglas Adams

AGRADECIMENTOS

Ao professor Carlos Eduardo Luna de Melo pelo excelente trabalho como orientador e cuja ajuda permitiu a realização deste trabalho;

Ao professor Sérgio Koide e à Anne Araújo pela ajuda e conhecimento transmitido em hidrologia, simulações hidrológicas e com o programa EPA-SWMM;

Ao professor Jairo Furtado por todo auxílio e prestatividade que me permitiram a realização dos ensaios dos agregados;

Ao professor Elton Bauer e os técnicos Patrícia e Gabriel que muito me ajudaram na execução dos concretos e seus ensaios;

Ao Areal Bela Vista pelo fornecimento do agregado de RCD;

À Engemix/Votorantim Cimentos pelo fornecimento da brita, da areia, do cimento e do aditivo;

À CAPES pelo auxílio financeiro;

Aos meus pais, André e Célia, e minhas irmãs, Julia e Giovana, por todo suporte durante esse período;

À Isabella, pelo trabalho primoroso na capa deste trabalho e cuja influência me fez entrar no mestrado;

À Rafaella pela ajuda na revisão do trabalho;

À toda equipe do LACIS/PISAC, trabalhar com vocês me fez crescer como pessoa e como pesquisador. Todo dia é uma experiência nova e um aprendizado novo;

Um agradecimento especial aos meus amigos que me propiciaram bons momentos fora e dentro da pesquisa ao longo desses anos. Vocês são muitos, então peço desculpas por não os citar diretamente. Esses momentos me mantiveram com a cabeça no lugar;

E por último, gostaria de agradecer a minha namorada Camille por ter me ajudado a manter paz de espírito nesse tempo, e por fazer dos meus dias mais tranquilos e felizes. Sem seu apoio eu não teria chegado aqui.

RESUMO

A indústria da construção civil é importante para o crescimento econômico e social do país. Entretanto, o impacto ambiental causado é grande, tanto pelo consumo de recursos naturais como pela geração de resíduos. Com o constante crescimento da mancha urbana dada a urbanização dispersa das cidades brasileiras, está cada vez mais difícil ter um espaço para a correta destinação desses resíduos. Por outro lado, essa urbanização tem ocorrido de forma tradicional e/ou irregular o que tem implicado em um aumento de áreas impermeáveis e com isso dos alagamentos. Buscando uma maneira de mitigar tanto o problema da deposição dos resíduos como dos alagamentos, esse trabalho propõe um concreto permeável produzido com resíduos da construção e demolição. Foram produzidos concretos permeáveis com variação dos teores de argamassa em 35% e 40% e variação dos teores de substituição de agregados de RCD em 15% e 30%. Os ensaios realizados foram: resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, absorção de água, índice de vazios e permeabilidade. Os ensaios mostraram boa capacidade mecânica dos concretos permeáveis, com todos os concretos estudados atingindo resistências à compressão e à tração satisfatórias. Do ponto de vista da permeabilidade, atingiu-se o valor mínimo de 1,0 mm/s requisitado pela ABNT NBR 16416:2015. Posteriormente, foram feitas simulações no *software* EPA-SWMM 5.0 com os dados obtidos nos ensaios, para avaliar o impacto no escoamento superficial e na rede de drenagem da substituição do pavimento convencional por pavimentos permeáveis. As simulações foram feitas para chuvas de 24 horas de duração e tempos de retorno de 1 ano, 2 anos, 5 anos e 10 anos. As simulações mostraram que os pavimentos permeáveis reduziram até 48% o volume de escoamento superficial na área estudada e eliminou a inundação nos pontos de captação da rede.

Palavras-chave: Concreto Permeáveis; Resíduo da construção e demolição; Drenagem urbana; Pavimento permeável.

ABSTRACT

The construction industry is important for the country's economic and social growth. However, it causes great environmental impact, both as a result of the consumption of natural resources and because of waste generation. As cities grow, it becomes increasingly difficult to find space for an appropriate waste disposal. This fast urbanization is also associated with recurrent floods that urban spaces have been facing in recent years, since there is an increase of impervious areas and, thus, runoff. Seeking a way to mitigate both the waste disposal issue and that of floods, this work proposes a pervious concrete produced with construction and demolition residues. Pervious concrete was produced with a variation in mortar contents of 35% and 40% and variation in the replacement contents of C&DW aggregates of 15% and 30%. The performed tests were: compressive strength, tensile strength by diametral compression, water absorption, void ratio and permeability. The tests showed good mechanical capacity of pervious concrete samples, with all the studied samples reaching satisfactory compressive strengths and tensile strengths. As for the permeability, the minimum of 1,0 mm/s required by the ABNT NBR 16416:2015 was reached. Subsequently, simulations were carried out in the *EPA-SWMM 5.0* software with the data obtained in the tests, in order to evaluate the impact of replacing conventional pavement with permeable pavements on surface runoff and the drainage systems. The simulations were run for 24-hour-long rainfall and return periods of 1 year, 2 years, 5 years and 10 years. These simulations showed that the permeable pavements reduced runoff volume by up to 48% in the studied area and eliminated the flooding in the network catchment points.

Keywords: Pervious Concrete; Construction and Demolition Waste; Urban Drainage; Permeable Pavement.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Hipótese	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Revestimento permeável de concreto	5
2.2	Drenagem urbana no Distrito Federal	17
2.2.1	Modelagem hidráulica e hidrológica	23
2.3	Resíduos da construção e demolição	24
3	MATERAIS E MÉTODOS	28
3.1	Caracterização dos materiais constituintes do concreto	28
3.1.1	Agregados graúdos natural e reciclado.....	28
3.1.2	Agregado miúdo	32
3.1.3	Cimento.....	34
3.1.4	Aditivo.....	35
3.2	Definição dos traços	35
3.3	Preparo e moldagem dos corpos de prova	36
3.4	Ensaio físico-mecânico	40
3.4.1	Resistência à compressão.....	40
3.4.2	Índice de vazios, absorção e massa específica.....	42
3.4.3	Permeabilidade.....	44
3.4.4	Resistência à tração do concreto	47
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
4.1	Resistência à compressão do concreto	49
4.2	Índice de vazios, absorção e massa específica do concreto	57
4.3	Permeabilidade do concreto	61
4.4	Resistência à tração do concreto	65
5	SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA	67
5.1	Caracterização da área de estudo	70
5.1.1	Clima	70
5.1.2	Tipo de solo	71
5.1.3	Hydrografia	73
5.1.4	Uso e ocupação do solo.....	73
5.1.5	Topografia	76
5.1.6	Rede de drenagem.....	77
5.2	Dados inseridos no EPA-SWMM	78
5.2.1	Série temporal.....	78
5.2.2	Controle por dispositivo de baixo impacto (LID).....	81
5.2.3	Sub-bacias.....	84
5.2.4	Rede de drenagem e poços de visitas	90
5.3	Resultados da modelagem hidráulica e hidrológica	92
6	CONCLUSÃO	103
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	105
7	BIBLIOGRAFIA	107
	ANEXO A – REDE DE DRENAGEM EXISTENTE	118
	APÊNDICE A – PERFIL LONGITUDINAL DAS REDES DE DRENAGEM SIMULADAS	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do pavimento permeável com o pavimento impermeável.....	5
Figura 2 - Tipos de sistemas de infiltração em pavimentos permeáveis.....	7
Figura 3 - Tipos de revestimentos permeáveis: (A) Peças de concreto com junta alargada; (B) Peças de concreto com áreas vazadas; (C) Peças de concreto permeável; (D) Placas de concreto permeável; (E) Concreto permeável.....	8
Figura 4 - Relação entre porosidade e permeabilidade da literatura para permeâmetros de carga constante e carga variável.	10
Figura 5 - Correlação entre resistência à compressão e porosidade para uma variedade de concretos permeáveis encontrados na literatura.	12
Figura 6 - Imagens representativas de seções 2D dos espécimes de concreto poroso feitos com: (a) 100% 2,36 mm; (b) 100% 4,75 mm; e (c) 100% 9,5 mm (as áreas em preto são os poros).....	12
Figura 7 - Alagamento no Pistão Sul em Taguatinga.....	17
Figura 8 - Alagamento na 401 Norte.....	18
Figura 9 - Chuva acumulada mensal em 2019 X Chuva (Normal Climatológica 61-90) para Brasília (DF).....	18
Figura 10 - Características dos leitos do rio.	20
Figura 11 - Escoamento antes e depois da urbanização.....	20
Figura 12 - Divisão administrativa e evolução urbana do DF.	20
Figura 13 - Pontos de alagamento no DF.	22
Figura 14 - Produção dos agregados reciclados.....	29
Figura 15 -(a) Agregado graúdo natural e (b) agregado graúdo de RCD (esquerda) utilizados na confecção dos concretos estudados.....	30
Figura 16 - Curva granulométrica dos agregados graúdos estudados.	32
Figura 17 - Agregado miúdo utilizado.....	33
Figura 18 - Curva granulométrica do pó de pedra.	34
Figura 19 - Betoneira utilizada para moldagem dos concretos.....	37
Figura 20 - (a) Concreto permeável em estado fresco; (b) ensaio de abatimento de tronco de cone.	38
Figura 21 - Corpos de prova após serem desmoldados.....	39
Figura 22 - Máquina de ensaio de resistência à compressão.	40
Figura 23 - Ensaio de resistência à compressão (a) cilindro (b) <i>paver</i>	41
Figura 24 - Capeamento com gesso dos corpos de prova.	42
Figura 25 - Pesagem de corpo de prova em balança hidrostática.	43
Figura 26 - Equipamento para o ensaio de permeabilidade a carga variável.....	44
Figura 27 - Equipamento de permeabilidade montado para a pesquisa.....	45
Figura 28 - Preenchimento do equipamento para ensaio de permeabilidade.	46
Figura 29 - Resistência à compressão x teor de argamassa, para os corpos de prova cilíndricos.....	51
Figura 30 - Resistência à compressão x substituição de agregados naturais por RCD, para corpos de prova cilíndricos.	52
Figura 31 - Resistência à compressão x teor de argamassa para os <i>pavers</i>	54
Figura 32 - Resistência à compressão x substituição de agregado natural por RCD, para os <i>pavers</i>	55
Figura 33 - Resistência à compressão dos <i>pavers</i> x resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos dos concretos estudados, em MPa.	56
Figura 34 - Média da resistência à compressão dos <i>pavers</i> x médias da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos dos concretos estudados, em MPa.....	57
Figura 35 - Massa específica seca x porcentagem de substituição de agregado natural por agregado de RCD para os teores de argamassa 35% e 40%.....	58
Figura 36 - Índice de vazios x teor de argamassados concretos estudados.	59

Figura 37 – Resistência à compressão x índice de vazios dos concretos estudados.....	60
Figura 38 – Permeabilidade em função da substituição de agregado natural por agregado reciclado para os teores de argamassa 35% e 40%.....	62
Figura 39 – Índice de vazios x permeabilidade dos concretos estudados.....	63
Figura 40 – Resistência à compressão x permeabilidade dos concretos estudados.....	64
Figura 41 – Alagamento no subsolo do ICC.....	67
Figura 42 – Localização da área de estudo no DF.....	68
Figura 43 – Área de estudo para simulação hidráulica e hidrológica (Sem escala).....	69
Figura 44 – Temperatura média mensal e média mensal das temperaturas máximas e mínimas de Brasília.....	70
Figura 45 – Umidade relativa média mensal e média mensal das umidades relativas máximas e mínimas de Brasília.....	71
Figura 46 – Mapa de solos do Distrito Federal com indicação das classes de solos.....	72
Figura 47 – Bacias hidrográficas do DF.....	73
Figura 48 – Mapa do uso e ocupação da área de estudo (Sem escala).....	74
Figura 49 – Topografia da área de estudo (Sem escala).....	77
Figura 50 - Hietograma para TR = 1 ano, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).....	79
Figura 51 – Hietograma para TR = 2 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).....	79
Figura 52 – Hietograma para TR = 5 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).....	80
Figura 53 – Hietograma para TR = 10 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).....	80
Figura 54 – Chuva acumulada em 24 para o período de novembro de 2019 na estação Brasília do INMET.....	81
Figura 55 – Detalhamento das camadas do pavimento permeável utilizadas na simulação e o subleito.....	81
Figura 56 – Divisão das sub-bacias (sem escala).....	85
Figura 57 – Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução do LID (<i>Low Impact Development</i> – Dispositivo de baixo impacto).....	89
Figura 58 - Rede de drenagem do estacionamento norte (lado esquerdo) e rede de drenagem do estacionamento sul (lado direito).....	90
Figura 59 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 1 ano.....	93
Figura 60 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 2 anos.....	94
Figura 61 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 5 anos.....	95
Figura 62 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 10 anos.....	96
Figura 63 – Rede de drenagem do estacionamento do ICC Sul.....	119
Figura 64 – Rede de drenagem do estacionamento do ICC Norte.....	120
Figura 65 – Rede de drenagem da região central do ICC.....	121
Figura 66 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 1 ano.....	122
Figura 67 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 1 ano.....	123
Figura 68 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 2 anos.....	124
Figura 69 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 2 anos.....	125
Figura 70 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 5 anos.....	126
Figura 71 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 5 anos.....	127
Figura 72 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d’água para pavimento permeável e impermeável para TR = 10 anos.....	128

Figura 73 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 10 anos 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de permeabilidade para diferentes tipos de solo.	7
Tabela 2 - Classificação quanto à forma de infiltração no solo.	8
Tabela 3 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.	9
Tabela 4 - Consumo e proporções típicas utilizados em concreto permeável.	10
Tabela 5 - Resistência à compressão do concreto endurecido.....	16
Tabela 6 - Coleta de RCD na região Centro-Oeste.....	25
Tabela 7 - Classificação e descrição dos resíduos.....	25
Tabela 8 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto.	26
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos.	31
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.	33
Tabela 11 - Nomenclatura dos traços utilizados.	35
Tabela 12 - Composição unitária dos traços.....	36
Tabela 13 - Consumo de cimento teórico dos traços elaborados	36
Tabela 14 - Ensaios a serem realizados e quantidades de corpos de prova e idades de ensaio.....	39
Tabela 15 - Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos para as idades de 7 e 28 dias, em MPa.	49
Tabela 16 - Relação entre as resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os corpos de prova cilíndricos.	50
Tabela 17 - Relação entre as resistências à compressão, em MPa, e os traços de referência, para os corpos de prova cilíndricos.	50
Tabela 18 - Resistência à compressão dos <i>pavers</i> para as idades de 7 e 28 dias, em MPa..	53
Tabela 19 - Relação entre as resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os <i>pavers</i>	53
Tabela 20 - Relação entre as resistências à compressão, em MPa, e os traços de referência, para os <i>pavers</i>	54
Tabela 21 - Resultados dos ensaios de índice de vazios, absorção e massa específica dos concretos estudados.	58
Tabela 22 - Resultados do ensaio de permeabilidade.	61
Tabela 23 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.	65
Tabela 24 - Resistência à tração e estimativa da resistência à tração na flexão dos concretos estudados.....	65
Tabela 25 - Detalhamento da área e do percentual de cada uso e ocupação.	75
Tabela 26 - Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.....	75
Tabela 27 - Classificação dos solos para o modelo SCS.	76
Tabela 28 - Valores adotados para os parâmetros de cada camada.	82
Tabela 29 - Altura da camada de armazenamento para diferentes tempos e intensidades de chuva.....	83
Tabela 30 - Detalhamento dos usos das sub-bacias.	86
Tabela 31 - Valores dos parâmetros adotados no SWMM para as sub-bacias	87
Tabela 32 - Valores atribuídos no SWMM aos pavimentos permeáveis aplicados nas sub- bacias.	88
Tabela 33 - Percentual da área impermeável ajustada no SWMM para cada sub-bacia	89
Tabela 34 - Parâmetros dos poços de visita.....	91
Tabela 35 - Parâmetros das redes de drenagens.....	91
Tabela 36 - Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 1 ano.....	93
Tabela 37 - Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 2 anos	94
Tabela 38 Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 5 anos	95

Tabela 39 – Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 10 anos.....	96
Tabela 40 – Total precipitado, infiltrado e escoado somente nas áreas com pavimento permeável para os TR simulados.	98
Tabela 41 – Coeficiente de escoamento superficial.....	98
Tabela 42 – Vazões máximas e capacidade das redes considerando os cenários com pavimento impermeável e permeável para todos os tempos de retorno estudados.	100
Tabela 43 – Vazão máxima e volume inundado	102

LISTA DE ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACI – American Concrete Institute

ADASA – Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal

ARC – Agregado de Resíduo de Concreto

ARM – Agregado de Resíduo Misto

ASTM – American Society for Testing and Materials

CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNER-ME – Departamento Nacional de Infraestrutura Rodoviária – Método de Ensaio

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura Terrestre

ELETRORBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LEM – Laboratório de Ensaio de Materiais

NBR – Norma Brasileira

NM – Norma Mercosul

NOVACAP – Companhia Urbanizadora da Nova Capital

PDDU – Plano Diretor de Drenagem Urbana

RCC – Resíduo da Construção Civil

RCD – Resíduo da Construção e Demolição

SWMM – Storm Water Management Model

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

UnB – Universidade de Brasília

UniCEUB – Centro Universitário de Brasília

US EPA – United States Environmental Protection Agency

1 INTRODUÇÃO

É inegável a importância que a indústria da construção civil tem para o desenvolvimento do país. Contudo, para que ela continue crescendo e funcionando, é preciso de uma grande quantidade de recursos naturais, recursos esses que são finitos.

Além disso, há a geração de resíduos sólidos que é inerente ao processo construtivo. Junto a isso, há uma preocupação com a deposição do entulho e de sistemas que visem à redução de sua geração. Assim, tem-se uma indústria com alto consumo de recursos naturais e que gera quantidades cada vez maiores de resíduos sólidos.

De acordo com Olivier et al. (2016), para se ter uma ideia do nível de consumo da indústria da construção civil, só a indústria de produção de cimento produziu 4 bilhões de toneladas em 2016 e foi responsável por 8% das emissões de CO₂ globais.

Segundo ABRELPE (2019), em seu panorama dos resíduos sólidos de 2018, o total de resíduo da construção e demolição (RCD) recolhido no Brasil foi de aproximadamente 44,5 milhões de toneladas, sendo que desse número o Distrito Federal foi responsável por cerca de 902 mil toneladas. Diante desses números e com menos áreas para a correta destinação dos resíduos sólidos, devido ao crescimento das cidades, percebe-se que o sistema de coleta e disposição entrará em colapso caso as práticas atuais se perpetuem.

Uma forma de balancear a extração de recursos naturais e geração de resíduos seria a sua utilização na própria indústria, o que garantiria assim uma vida útil maior para os aterros e para as jazidas naturais, além de dar um maior significado ao RCD transformando-o em insumo, consequentemente reduzindo os impactos ambientais e provavelmente os custos.

Alguns resíduos da construção já são reutilizados há algum tempo na fabricação de blocos de concreto, guias, base na pavimentação e em concretos sem fins estruturais. Sabe-se que concretos com agregados reciclados possuem resistências e durabilidade menores que os concretos convencionais devido a sua maior porosidade. Tendo em vista esses usos dos resíduos, há a possibilidade de utilizá-los para mitigar um outro problema das cidades brasileiras, os alagamentos.

Os alagamentos nas cidades brasileiras têm-se tornado cada vez mais recorrentes devido a uma crescente impermeabilização do solo devido a novas construções e manutenção de padrões de ocupação do solo urbano de bases tradicionais. Isso aumenta o escoamento superficial e a magnitude do pico de cheia. As constantes alterações de ocupação do solo nas áreas urbanas já consolidadas, somada a falta de manutenção dos sistemas de drenagem e sua não desobstrução são também um grande aliado dos alagamentos.

A drenagem urbana, como é feita atualmente retira, rapidamente as águas das chuvas de um ponto e as direciona para outro. Isso não soluciona o problema dos alagamentos, só transfere o problema para jusante ou para o futuro.

Uma forma de mitigar os efeitos dos picos de chuva nos grandes centros urbanos seria a redução de volume da água, que vai para a rede de drenagem. Uma das formas de se fazer isso é por meio de pavimentos permeáveis, que permitem a infiltração da água para o solo e que a depender de seu volume pode ser direcionada para um reservatório de detenção.

Os revestimentos permeáveis podem ser compostos por: asfalto poroso, concreto poroso (pré-moldado ou moldado *in loco*) ou blocos de concreto para pavimentação. Em todos esses tipos, o RCD pode ser empregado tanto no revestimento como na base e sub-base.

Visando mitigar o problema de controle de alagamentos urbanos e de gestão de resíduos sólidos, este trabalho propõe a utilização de RCD como material alternativo para a confecção de revestimentos permeáveis.

Este trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa com foco na sustentabilidade e na racionalização construtiva, iniciada por Peixoto (2015), que buscou utilizar RCD como substituto de agregados de concretos utilizados na confecção de painéis de vedação pré-fabricados. Atualmente na linha de pesquisa, Silva e Melo (2020) estudam a influência do processo de britagem nas características físicas do agregado graúdo reciclado.

1.1 Hipótese

A utilização de resíduos da construção civil na fabricação de concreto permeável pode constituir uma solução para mitigar alagamentos urbanos, contribuindo para a redução de resíduos.

1.2 Objetivos

Avaliar o desempenho dos concretos permeáveis com resíduos de construção e demolição na mitigação de alagamentos, quando aplicados em áreas de tráfego leve.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudo das propriedades físico-mecânicas do concreto fabricado com diferentes porcentagens de resíduos da construção e demolição;
- Avaliação do desempenho do agregado reciclado frente ao natural;
- Simulação do desempenho quanto a sua redução do escoamento superficial e do impacto na rede de drenagem no estacionamento do ICC da UnB.

1.3 Metodologia

De modo a cumprir os objetivos propostos este trabalho se divide em três partes. A primeira parte consiste em realizar uma revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa para se saber em qual estado de desenvolvimento os concretos permeáveis se encontram.

A segunda parte envolve produzir concretos permeáveis com e sem resíduos de construção. Foram elaborados dois traços variando-se o teor de argamassa (35% e 40%), e para cada teor foram produzidos concretos com diferentes porcentagens de substituição de agregados naturais por agregados reciclados (0%, 15% e 30%).

Ainda nessa etapa foram feitos ensaios para se conhecer propriedades físico-mecânicas desses concretos, tais como: resistência à compressão e à tração indireta, absorção de água, índice de vazios, massa específica e permeabilidade.

A etapa seguinte consiste em fazer uma modelagem hidráulica e hidrológica, aplicando o concreto permeável nos estacionamentos do Instituto Central de Ciências da UnB, para avaliar o impacto no escoamento superficial e seu efeito na drenagem urbana.

Para isso foi feito um levantamento de dados da área como: planta da bacia, mapa planialtimétrico, uso e ocupação do solo, cadastro das redes de drenagem existentes e dados hidrológicos.

O modelo hidráulico e hidrológico foi feito no *software EPA-SWMM*. O resultado desse modelo foram hidrogramas para os cenários antes e após a aplicação do concreto permeável, que serviram para a validação do material como mitigador de alagamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em tópicos, sendo eles: resíduos da construção civil, drenagem urbana e pavimento permeável.

2.1 Revestimento permeável de concreto

A norma brasileira define pavimento permeável como aquele que “atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura” (ABNT NBR 16416:2015).

Os pavimentos permeáveis são uma forma de redução de volume de escoamento superficial controlando a sua geração na fonte e interceptando as águas pluviais. A Figura 1 ilustra o processo de percolação de água pelos poros de um pavimento permeável em comparação com um pavimento impermeável.

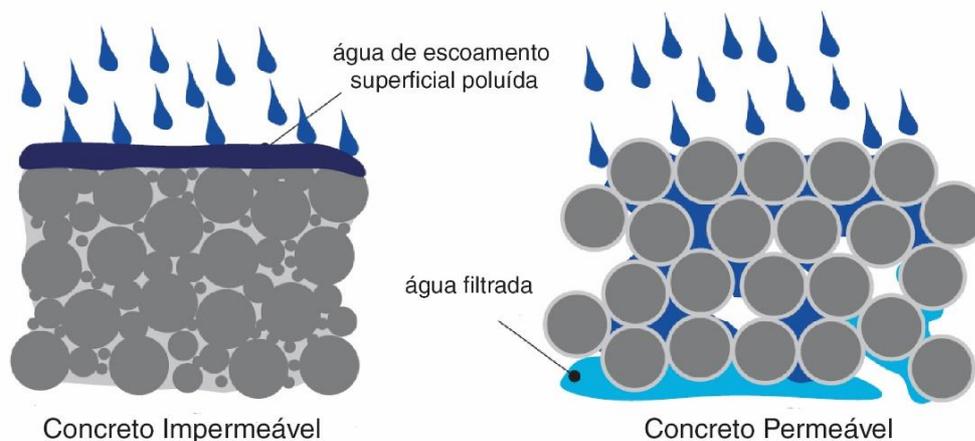


Figura 1 - Comparação do pavimento permeável com o pavimento impermeável.

Fonte: Adaptado de Zhong, Leng e Poon (2018).

Estudos sobre pavimentos permeáveis datam da década de 1980. Smith (1984) aplicou blocos intertravados de concreto vazados com grama em um estacionamento, e as conclusões a que ele chegou foram de que esse tipo de pavimento possui benefícios a longo prazo que compensam o custo inicial maior quando comparado com pavimentos convencionais.

Pratt, Mantle e Schofield (1989) executaram pavimentos permeáveis com diferentes tipos de sub-bases e com drenos para monitorar o volume de escoamento, vazão e qualidade da água. Os autores observaram que houve uma redução da vazão, atenuação do pico de escoamento e melhora na qualidade da água.

Pavimentos permeáveis podem afetar a qualidade da água através de mecanismos de sedimentação, filtração, adsorção e biodegradação, promovendo uma remoção de metais pesados e hidrocarbonetos (WOODS-BALLARD *et al*, 2007).

De acordo com Yang e Jiang (2003), os benefícios proporcionados pelo pavimento permeável de concreto são:

- Recarga dos lençóis freáticos em menos tempo pela infiltração da água da chuva mais rapidamente no solo;
- O solo consegue se manter úmido devido à permeabilidade do pavimento, o que aumenta o conforto térmico a nível do chão;
- O pavimento absorve os ruídos dos veículos, além de evitar acúmulo de água nas pistas, o que traz maior segurança aos motoristas;
- Os poros dos pavimentos podem acumular calor, assim esses pavimentos podem ajustar a temperatura e a umidade da região e mitigar as ilhas de calor.

As desvantagens desse tipo de pavimento são: baixa resistência mecânica e a necessidade de manutenção regular para evitar colmatação, que é o entupimento dos poros permeáveis e consequente redução da permeabilidade. Ferguson (2005) contraindica esse tipo de pavimento em lugares com uma inclinação muito alta, grande fluxo de carros, onde o *layout* favoreça o acúmulo de material suscetível a colmatar ou que contenham poluentes que não possam entrar em contato com o solo.

Pavimento permeável é toda a estrutura composta por base, sub-base, camada de assentamento (se for necessário) e revestimento permeável, sendo todos permeáveis. Dependendo do solo ou de condicionantes do projeto, por exemplo, risco de contaminação d'água, escolhe-se o sistema de infiltração, total, parcial ou sem infiltração (Figura 2).

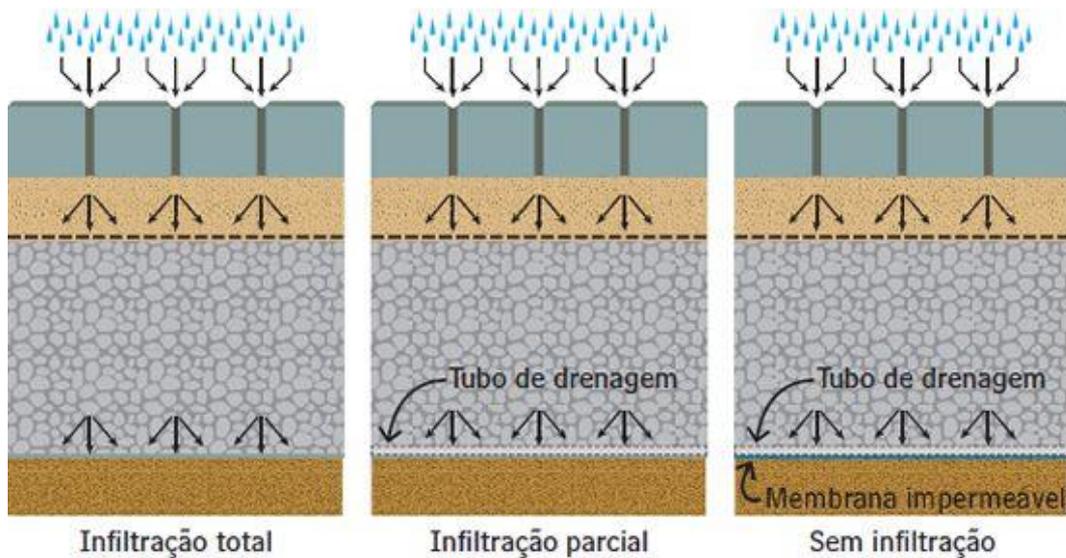


Figura 2 - Tipos de sistemas de infiltração em pavimentos permeáveis.

Fonte: Silva, 2012 (Revista *Téchne*, edição 190).

A permeabilidade de diferentes tipos de solos já é conhecida e estudada há anos. A Tabela 1 traz os valores típicos desse coeficiente para os diferentes solos. Na região do Distrito Federal, o solo possui característica predominantemente argilosa e siltosa.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de permeabilidade para diferentes tipos de solo.

Tipos de Solo	Coefficiente de Permeabilidade (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Pinto (2002).

A Tabela 2 traz alguns condicionantes para a escolha do tipo de infiltração, como a permeabilidade do solo, nível do lençol freático, presença de contaminantes e possibilidade de haver água no solo.

Tabela 2 – Classificação quanto à forma de infiltração no solo.

Condições locais		Infiltração total	Infiltração parcial	Sem infiltração
Permeabilidade do subleito definida pelo coeficiente de permeabilidade k (cm/s)	1×10^{-6} a 1×10^{-3}	✓	✓	✓
	1×10^{-8} a 1×10^{-6}	✗	✓	✓
	1×10^{-10} a 1×10^{-8}	✗	✗	✓
Máximo registro do lençol freático a uma distância máxima de 1 metro da camada inferior da base		✗	✗	✓
Presença de contaminantes no subleito		✗	✗	✓
Condições do solo em que a presença da água não é recomendada		✗	✗	✓

Fonte: Antunes (2017, *apud* Interpave (2010)).

A ABNT NBR 16416:2015 faz distinção entre 3 tipologias de revestimentos permeáveis de concreto: peças intertravadas (divididas em 3 categorias, junta alargada, área vazada e peça permeável), placas de concreto permeável e concreto permeável moldado *in loco* (Figura 3).

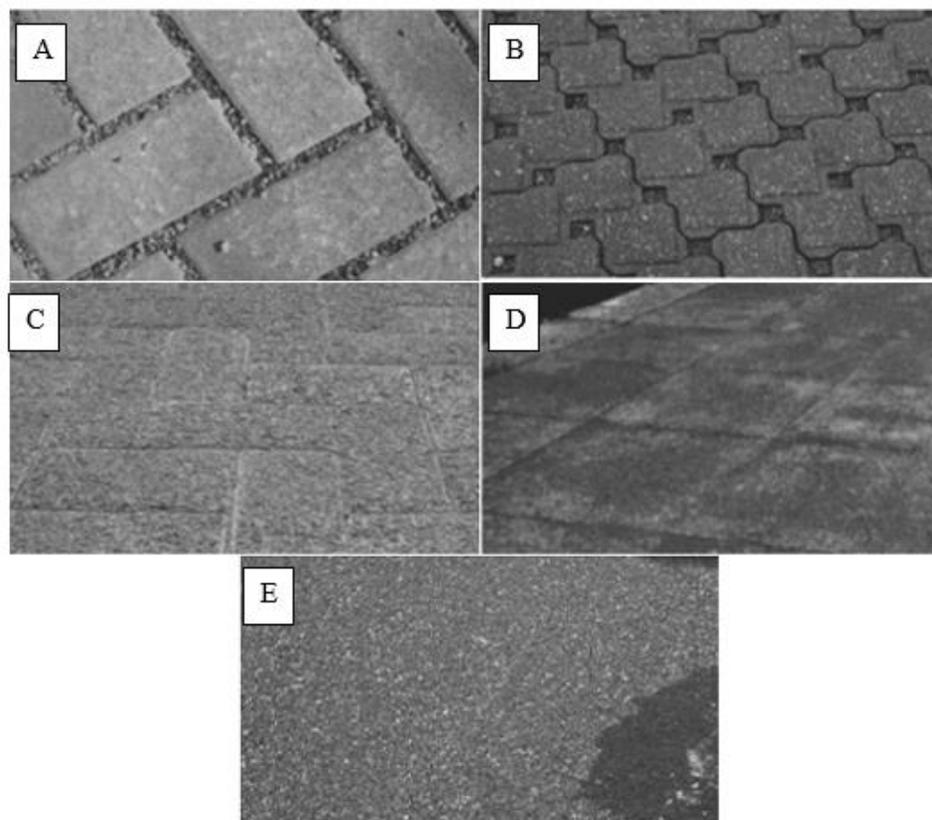


Figura 3 – Tipos de revestimentos permeáveis: (A) Peças de concreto com junta alargada; (B) Peças de concreto com áreas vazadas; (C) Peças de concreto permeável; (D) Placas de concreto permeável; (E) Concreto permeável.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 16416:2015.

Os requisitos de resistência para o concreto poroso são estabelecidos na ABNT NBR 16416:2015 (ABNT, 2015). De acordo com o tipo de revestimento, o método de ensaio para avaliação da resistência mecânica varia. Os valores da resistência mecânica necessária, bem como o método de ensaio e a espessura mínima para as respectivas tipologias de revestimento, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,0		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 20,0^a$	
	Tráfego leve	80,0		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,0		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$	
a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781 b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805 c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142				

Fonte: ABNT NBR 16416:2015.

O concreto poroso é descrito como tendo um abatimento nulo, ou próximo disso, de granulometria aberta, composto de cimento, agregados graúdos e pouco ou nenhum fino, que combinados resultam em um material endurecido que possui poros conectados e que permitem a passagem de água (ACI 522R-10). As quantidades típicas e dosagem dos materiais em concretos permeáveis são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo e proporções típicas utilizados em concreto permeável.

Materiais	Consumo/proporção
Ligante hidráulico (kg/m ³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m ³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agreg. miúdo/agreg. graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Batezini (2013).

A porosidade é um parâmetro valiosos para o concreto permeável. Ela está intimamente relacionada com a capacidade hidráulica e mecânica do material, pois o tamanho dos poros pode variar de 2 mm a 8 mm (DEO; NEITHALATH, 2010).

A essa capacidade de se permitir a passagem de água dá-se o nome de permeabilidade. A ABNT NBR 16416:2015 estipula que, para ser considerado um concreto poroso, a permeabilidade tem que ser de no mínimo de 1 mm/s. A ACI 522R-10 define que esse valor varia entre 1,4 mm/s e 12,2 mm/s.

A permeabilidade pode ser estimada de duas maneiras, ou pelo permeâmetro de carga variável ou pelo de carga constante. Ambos os testes consistem em medir quanto de água passa pelo espécime em um dado intervalo de tempo. Entretanto, os testes produzem valores distintos para a permeabilidade (Figura 4).

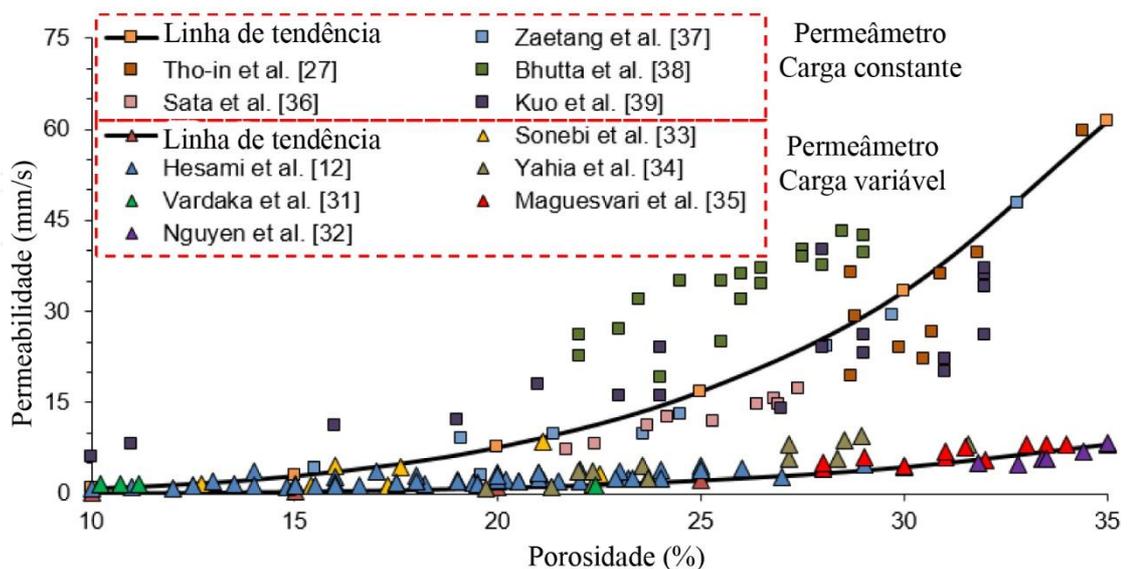


Figura 4 - Relação entre porosidade e permeabilidade da literatura para permeâmetros de carga constante e carga variável.

Fonte: Adaptado de Peralisi (2016).

Pieralisi (2016) atribui a diferença entre essas constantes à pressão de água aplicada durante o ensaio. A permeabilidade maior no ensaio de carga constante se deve ao fato de a pressão da água ser a mesma durante toda a duração do ensaio, o que não ocorre no ensaio de carga variável. É mais comum em pesquisas que se utilize o permeâmetro de carga variável (IBRAHIM et al, 2014; KEVERN, BIDDLE, CAO, 2014; ZHONG, WILLE, 2015).

Segundo Kuang *et al.* (2007) a permeabilidade em pavimentos de concreto permeáveis tende a diminuir com o passar do tempo, devido a colmatção, devendo-se adotar procedimentos de manutenção e restauração com periodicidade constante. Ao se utilizar o sistema de limpeza de pavimento a vácuo, por exemplo, consegue-se recuperar mais de 95% da capacidade inicial de condutividade hidráulica do revestimento.

Kia *et al.* (2017) ao fazerem uma revisão do estado da arte dos mecanismos de colmatção do concreto permeável, contestam a capacidade de recuperar a infiltração que os métodos atuais de manutenção promovem. Os autores também concluíram que a colmatção está ligada a tortuosidade dos poros e que o desenvolvimento de concretos permeáveis com menor tortuosidade dos poros seriam menos suscetíveis a colmatção.

A estrutura porosa desse concreto a qual lhe confere suas propriedades hidráulicas é também seu limitante, pois a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados graúdos dos concretos é mais fraca. Com isso, a resistência a esforços desse concreto é baixa. As resistências típicas desses concretos, com porosidade variando entre 15% e 30%, variam entre 7 MPa e 25 MPa (ZHONG; WILLIE, 2016). A Figura 5 mostra uma correlação entre porosidade e resistência à compressão baseada nos resultados de diversos autores.

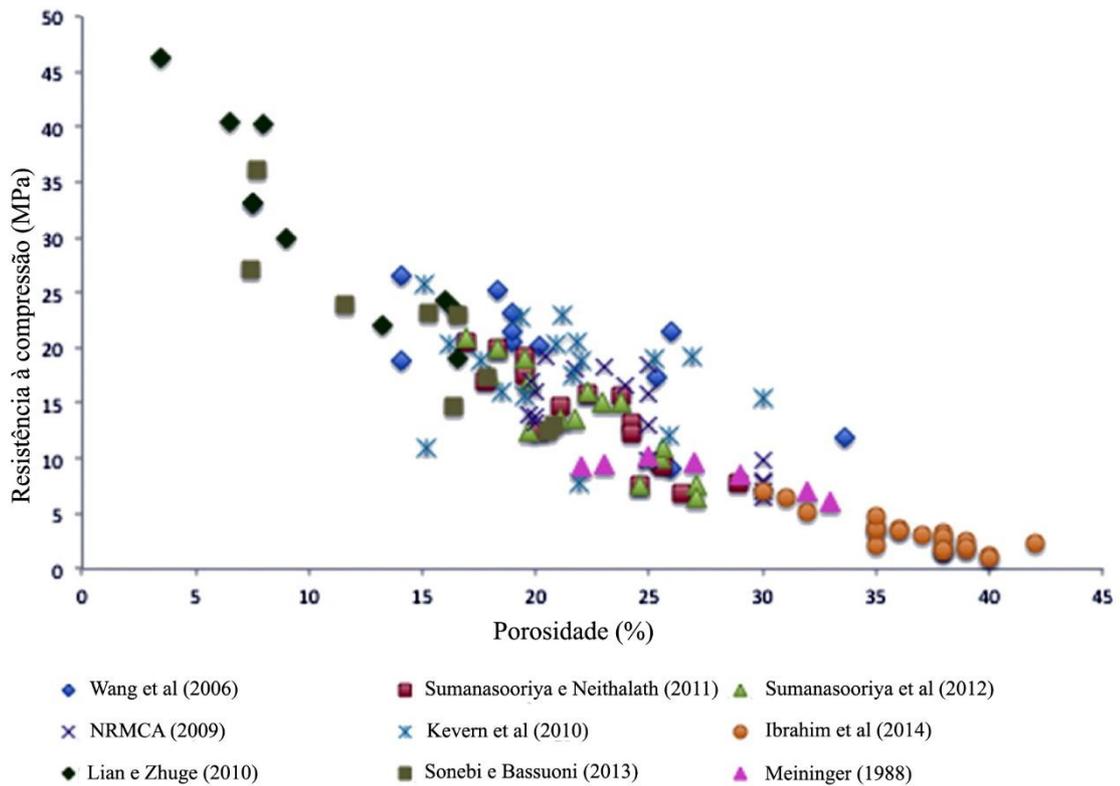


Figura 5 – Correlação entre resistência à compressão e porosidade para uma variedade de concretos permeáveis encontrados na literatura.

Fonte: Adaptado de Kia, Wong e Cheeseman (2017).

Além da porosidade, outro elemento que afeta a resistência à compressão do concreto poroso é a estrutura dos poros (DEO; NEITHALATH, 2010). Os autores trabalharam com concretos porosos com agregados de granulometria fixa e contínua (9,5 mm, 4,75 mm e 2,36 mm), o que eles concluíram foi que, aumentando o tamanho dos agregados, houve um aumento da resistência à compressão nos espécimes estudados e a isso eles atribuíram o maior número de poros envolvidos na danificação. Também foram feitas imagens da estrutura dos poros (Figura 6).

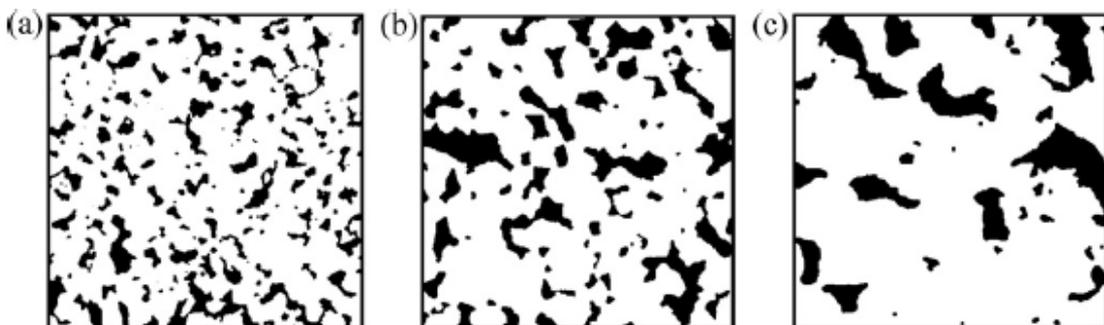


Figura 6 – Imagens representativas de seções 2D dos espécimes de concreto poroso feitos com: (a) 100% 2,36 mm; (b) 100% 4,75 mm; e (c) 100% 9,5 mm (as áreas em preto são os poros).

Fonte: Deo e Neithalath (2010).

Ibrahim *et al* (2014) também estudaram a influência de diferentes tamanhos de agregados (4,5 mm, 9,5 mm e 12,5 mm) e granulometrias nas propriedades dos concretos porosos. As granulometrias trabalhadas foram fixas ou combinações de 2 tamanhos de agregados nas proporções de 50% cada. Constatou-se que, entre as misturas com agregados de tamanho fixo, quanto maior o agregado, maior a resistência. Isso posto, a combinação que produziu a maior resistência foi a entre agregados de tamanho 4,5 mm e 12,5 mm, mas também foi a de menor permeabilidade. Os autores sugerem que isso ocorre pela modificação na estrutura dos poros.

A permeabilidade por ser aumentada incrementando o tamanho dos poros ou a porosidade, mas pode haver redução nas propriedades mecânicas do material. Uma correta escolha de tamanho de agregados pode aumentar a conectividade dos poros e aumentar a permeabilidade do concreto poroso (NEITHALATH; SUMANASOORIYA; DEO, 2010).

Esforços têm sido empreendidos de forma a melhorar a resistência dos concretos porosos sem reduzir sua porosidade. Entre as medidas para que isso ocorra está a adição de polímeros de látex (HUANG *et al*, 2010), fibras (KEVERN; BIDDLE; CAO, 2014) e sílica (LIAN; ZHUGE, 2010; ZHONG; WILLE, 2015).

Huang *et al* (2010) estudaram o comportamento de concretos porosos com o uso de polímeros de látex (borracha de butadieno estireno – SBR) em substituição ao cimento e/ou adição de fibras de polipropileno. Os autores trabalharam com granulometrias constantes de agregados graúdos, utilizando os diâmetros de 12,5 mm, 9,5 mm e 4,75 mm. Além disso, utilizaram traços com agregados miúdos. Nestes, a substituição foi de 7% dos agregados graúdos em massa.

Os pesquisadores concluíram que a combinação de látex, areia e fibra pode produzir concretos com aceitável resistência e permeabilidade, sendo que só a adição de látex aumenta a resistência à tração na compressão diametral e que a fibra sozinha não teve um efeito significativo na resistência.

O efeito do uso de fibras macrossintéticas na resistência e na durabilidade dos concretos porosos foi estudado por Kevern, Biddle e Cao (2014). Foram utilizados dois comprimentos diferentes de fibras (38 mm e 56 mm) em diferentes dosagens (0,16%,

0,33% e 0,49%). As misturas tiveram o peso unitário e o índice de vazios fixados para permitir que a influência das fibras fosse determinada. Os autores concluíram que as fibras reduzem a permeabilidade, a taxa de infiltração e a abrasão superficial dos concretos enquanto a resistência à compressão e a tração por compressão diametral não foram significativamente afetadas, e que a resistência a gelo-degelo aumentava quanto maior fosse a quantidade de fibras na mistura.

A adição de sílica aos concretos porosos foi estudada por Lian e Zhuge (2010) e tinha como intuito buscar concretos com maiores resistências mecânicas. Usando até 10% de sílica, os autores concluíram que sua incorporação não é muito efetiva em aumentar a resistência do concreto, exceto se usada com superplastificantes. Os autores afirmam que, para se produzir concretos porosos de alta resistência com sílica, é preciso ter o superplastificante como agente dispersor.

Outros autores que estudaram o efeito da sílica nos concretos porosos são Zhong e Wille (2015). Eles buscaram aumentar a resistência desse material produzindo uma matriz cimentícia ultra resistente e com isso obtiveram concretos porosos com mais de 40 MPa de resistência à compressão, entretanto a permeabilidade fica limitada a não mais que 2 mm/s.

Quanto à análise de concretos com agregados reciclados, Bhutta et al (2013) conduziram estudos para verificar a influência desse tipo de agregado no índice de vazios, permeabilidade e resistências à compressão e à flexão. Os autores concluíram que os concretos com agregados reciclados possuem maior índice de vazios e permeabilidade e menor resistência à compressão quando comparados com concretos porosos com agregados convencionais.

Sriravindrarah et al (2012) compararam concretos porosos com agregados naturais e reciclados e verificaram que, para uma mesma porosidade, os concretos com agregados reciclados tiveram uma resistência à compressão menor. Os autores averiguaram que quanto maior a porosidade, menor o efeito do tipo de agregado na resistência à compressão e que a permeabilidade do concreto poroso se deve apenas à porosidade, não sendo influenciada pelo tipo de agregado.

“O termo abrasão geralmente se refere ao atrito seco, como no caso de desgaste em pisos e pavimentos industriais por tráfego de veículo” (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.132). Sendo assim, o conhecimento dessa propriedade permite calcular o quanto os concretos estudados irão durar.

Wu *et al* (2011) e Dong *et al* (2014) estudaram a resistência à abrasão dos concretos porosos. Em ambas as pesquisas, foi constatado que esse parâmetro é altamente dependente do tamanho e tipo de agregado. Agregados menores são menos abrasivos, possuem maior resistência mecânica, mas em contrapartida menor permeabilidade.

No Brasil, há algumas pesquisas sobre o tema: Antunes (2017), Batezini (2013), Höltz (2011) e Mariano (2014). Essas pesquisas buscaram identificar propriedades físico-mecânicas do concreto poroso, bem como sua permeabilidade.

Höltz (2011), no decorrer da pesquisa, optou por ensaiar concretos extraídos de blocos de concretos maiores, pois, de acordo com ele, moldá-los em laboratório não representaria bem suas propriedades em campo, já que seu uso é efetivado em pavimentação e o modo de compactação é outro.

Mariano (2014) produziu bloquetes de concreto poroso com diferentes granulometrias, unitárias e contínuas, e com teores de argamassa. Ele obteve resultados maiores que 35 MPa de resistência à compressão (Tabela 5), o que, à época, como não havia a ABNT NBR 16416:2015, era o parâmetro de resistência para os *pavers* definido pela ABNT NBR 9781:2013.

Tabela 5 – Resistência à compressão do concreto endurecido.

Teor de Argamassa (%)	Nomenclatura do Traço	Granulometria	Tempo (Dias)		
			03	07	28
30	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	11,35	14,13	15,98
	CPGC2	4,75 e 6,3	5,62	6,47	8,36
	CPGU1	6,3	9,92	10,21	12,31
	CPGU2	9,5	10,07	11,58	14,64
33	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	12,20	15,31	17,10
	CPGC2	4,75 e 6,3	7,87	10,33	11,92
	CPGU1	6,3	10,98	11,45	13,51
	CPGU2	9,5	12,06	14,50	16,25
35	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	13,87	16,78	18,42
	CPGC2	4,75 e 6,3	8,92	11,93	13,45
	CPGU1	6,3	12,55	13,98	15,32
	CPGU2	9,5	13,42	16,08	17,37
40	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	20,66	26,11	31,67
	CPGC2	4,75 e 6,3	13,60	18,33	21,86
	CPGU1	6,3	19,87	25,22	29,49
	CPGU2	9,5	20,15	25,71	30,08
42	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	23,36	30,84	37,48
	CPGC2	4,75 e 6,3	15,89	19,64	23,89
	CPGU1	6,3	21,07	27,74	32,77
	CPGU2	9,5	21,84	24,29	35,23
44	CPGC1	4,75; 6,3 e 9,5	26,36	32,10	38,30
	CPGC2	4,75 e 6,3	19,88	24,21	25,82
	CPGU1	6,3	23,00	28,87	29,99
	CPGU2	9,5	25,37	30,97	36,02
55	CRG	4,75; 6,3 e 9,5	22,87	30,13	36,93

Fonte: Mariano (2014).

Além disso, Mariano (2014) avaliou a resistência à abrasão dos traços produzidos. Em geral, os traços com granulometria contínua foram mais resistentes à abrasão que suas contrapartidas com granulometria unitária.

Batezini (2013) verificou as resistências à compressão, à tração por compressão diametral e por flexão e estudou os módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos porosos. E através de uma análise de elementos finitos, concluiu que concretos permeáveis com resistência à tração maiores que 2,13 MPa e espessura mínima de 110 mm, podem ser utilizados em áreas de tráfego leve.

Antunes (2017) produziu vários traços de concreto poroso a fim de que atingissem os requisitos mínimos de permeabilidade para serem utilizados em calçadas. De posse de um traço ótimo, a autora dimensionou as camadas restantes do pavimento permeável para utilizar em uma simulação hidráulica e hidrológica. A bacia escolhida para a simulação foi a bacia do Rio dos Macacos localizada no Rio de Janeiro.

Em seu trabalho, Antunes (2017) concluiu que a aplicação de pavimentos permeáveis em apenas 0,7% da área da bacia do Rio dos Macacos reduziria em 4% o escoamento superficial e em 37% a vazão do primeiro pico de chuva para uma chuva de tempo de retorno de 25 anos e duração de 120 minutos.

2.2 Drenagem urbana no Distrito Federal

Nos últimos anos, nas cidades brasileiras, têm sido frequentes os casos de alagamentos (Figura 7 e Figura 8). São episódios que ocorrem sempre nas mesmas épocas e que não recebem soluções realmente efetivas.



Figura 7 – Alagamento no Pistão Sul em Taguatinga.

Fonte:

https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2017/11/10/interna_cidadesdf,640066/chuva-forte-alaga-ruas-e-prejudica-o-transito-em-brasilia.shtml [acessado em 30/06/18 às 12:27].



Figura 8 - Alagamento na 401 Norte.

Fonte: <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2018/10/29/chuva-intensa-e-granizo-fazem-inmet-emitir-alerta-de-perigo-no-df.ghtml> [Acessado em 31/10/2018 às 23:38].

Na região do Distrito Federal, os alagamentos ocorrem no período de novembro a fevereiro, que são os períodos com os volumes de chuva acumulada no mês maiores que 200 mm (Figura 9).

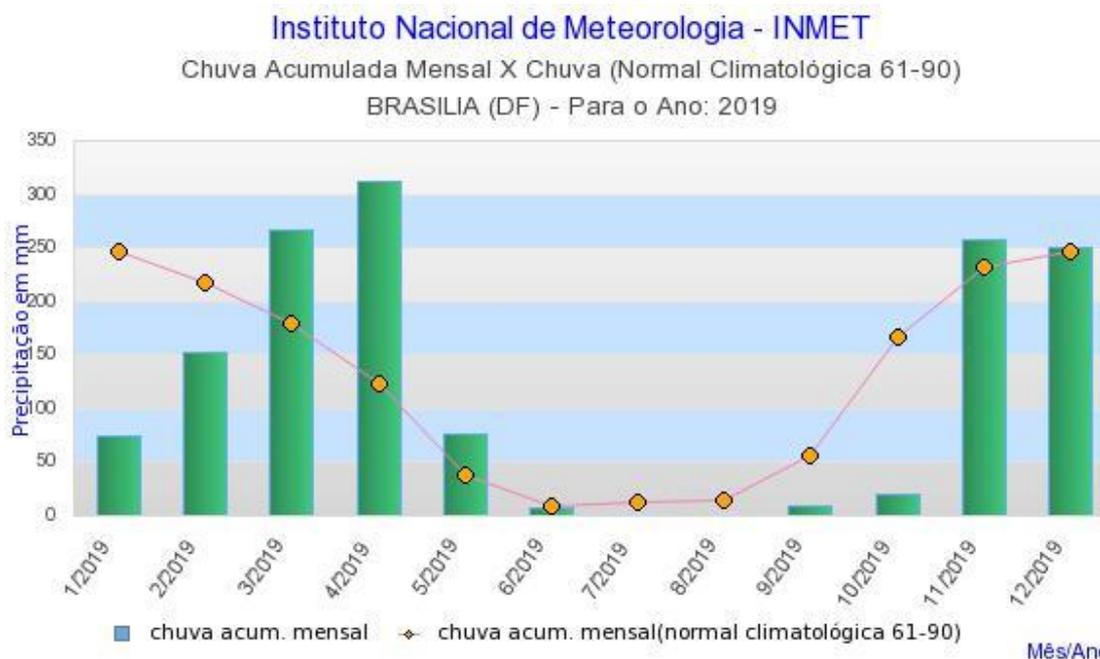


Figura 9 - Chuva acumulada mensal em 2019 X Chuva (Normal Climatológica 61-90) para Brasília (DF).

Fonte: INMET (2020)¹.

¹ O gráfico foi obtido selecionando-se Chuva Acumulada Mensal X Chuva (Normal Climatológica 61-90) para o ano 2019 nos parâmetros mensais do site <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>

A drenagem urbana atual é higienista e busca coletar a água de um ponto e escoá-la para outro lugar o mais rápido possível. Entretanto, isso apenas transfere o problema dos alagamentos de montante para jusante, pois os habitantes dessa região é que terão que lidar com os problemas ocasionados por alagamentos que, há até pouco tempo, não existiam na região.

O planejamento urbano deve integrar as atividades relacionadas à água, isso inclui, o desenho da malha urbana e sua expansão, o zoneamento de atividades, a rede viária e de transportes, fluxos de informações e aspectos paisagísticos para citar alguns (POMPÊO, 2000)

Tucci (2003) destaca que, dentre as ações a serem desenvolvidas para alcance de cidades sustentáveis se encontra a elaboração do Plano Diretor de Drenagem Urbana que se baseia em: (a) os novos desenvolvimentos não podem aumentar a vazão máxima de jusante; (b) o planejamento e o controle dos impactos existentes devem ser elaborados considerando a bacia como um todo; (c) o horizonte de planejamento deve ser integrado ao Plano Diretor da cidade; (d) o controle dos efluentes deve ser avaliado de forma integrada com o esgotamento sanitário e os resíduos sólidos.

O Distrito Federal teve seu Plano Diretor de Drenagem Urbana estabelecido em 2008. E de acordo com o PDDU/DF o objetivo desse plano é:

“Criar os mecanismos de gestão da infraestrutura urbana relacionados com o escoamento das águas pluviais e dos rios na área urbana da cidade. [...] planejar a distribuição da água no tempo e no espaço, com base na tendência de ocupação urbana compatibilizando esse desenvolvimento e a infraestrutura para evitar prejuízos econômicos e ambientais. [...] controlar a ocupação de áreas de risco de inundação através de restrições nas áreas de alto risco, além de propiciar as condições para convivência com as enchentes nas áreas de baixo risco.” (PDDU/DF, 2008, p. 2)

Tucci (2005) explicita que as enchentes podem ocorrer por dois processos: inundações de áreas ribeirinhas ou devido à urbanização. O primeiro acontece quando há uma ocupação mal planejada de áreas próximas aos rios que tendem a encher (Figura 10) a cada 2 anos, aproximadamente. O segundo caso se dá pela impermeabilização do solo e consequente redução da infiltração de água. Esse volume que deixa de se infiltrar aumenta o escoamento superficial e a sua velocidade.

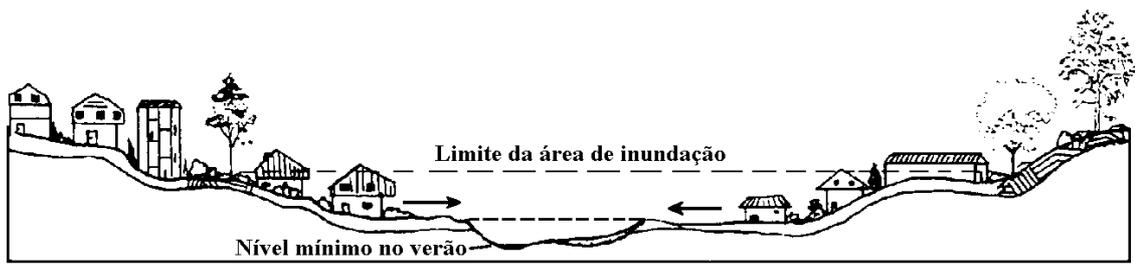


Figura 10 - Características dos leitos do rio.

Fonte: Tucci (2005).

O impacto da urbanização pode ser notado nos aumentos de vazões máximas e no seu pico. A vazão máxima aumenta de 6 a 7 vezes, e o tempo de pico é antecipado (Figura 11). Há também um acréscimo do escoamento superficial.

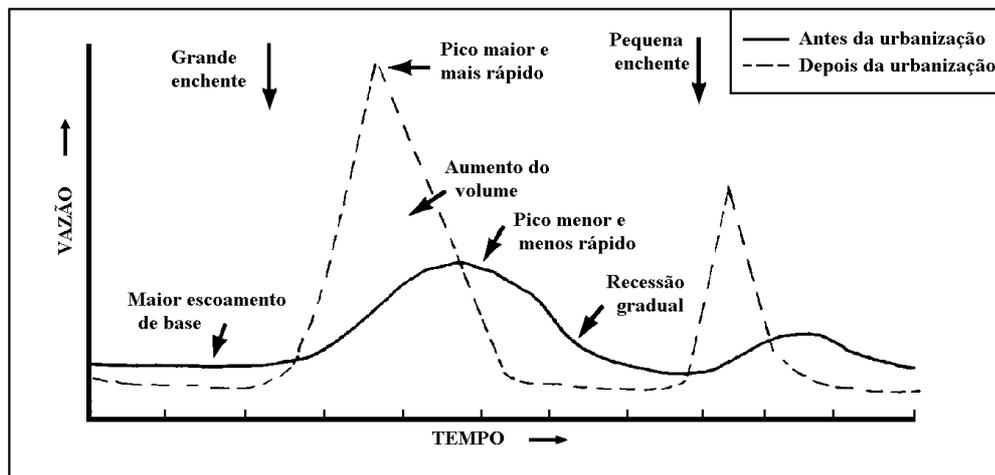


Figura 11 - Escoamento antes e depois da urbanização.

Fonte: Adaptado de Schueler (1987) *apud* Tucci (2005).

O aumento da impermeabilização do solo é também um dos responsáveis pelo efeito de ilhas de calor que está diretamente ligado às mudanças climáticas por intermédio de alterações de albedo, rugosidade da superfície e fluxo de energia, o que resulta em aumento de precipitações nas cidades (OKE, 1982). Além disso, o nível do lençol freático diminui e há uma redução da evapotranspiração (TUCCI, 2005).

Convém, ainda, destacar que Brasília nasceu planejada, mas o seu rápido crescimento e urbanização trouxeram problemas. Para se ter ideia do avanço da mancha urbana, a Figura 12 traz um mapa da evolução urbana no Distrito Federal ao longo dos anos.

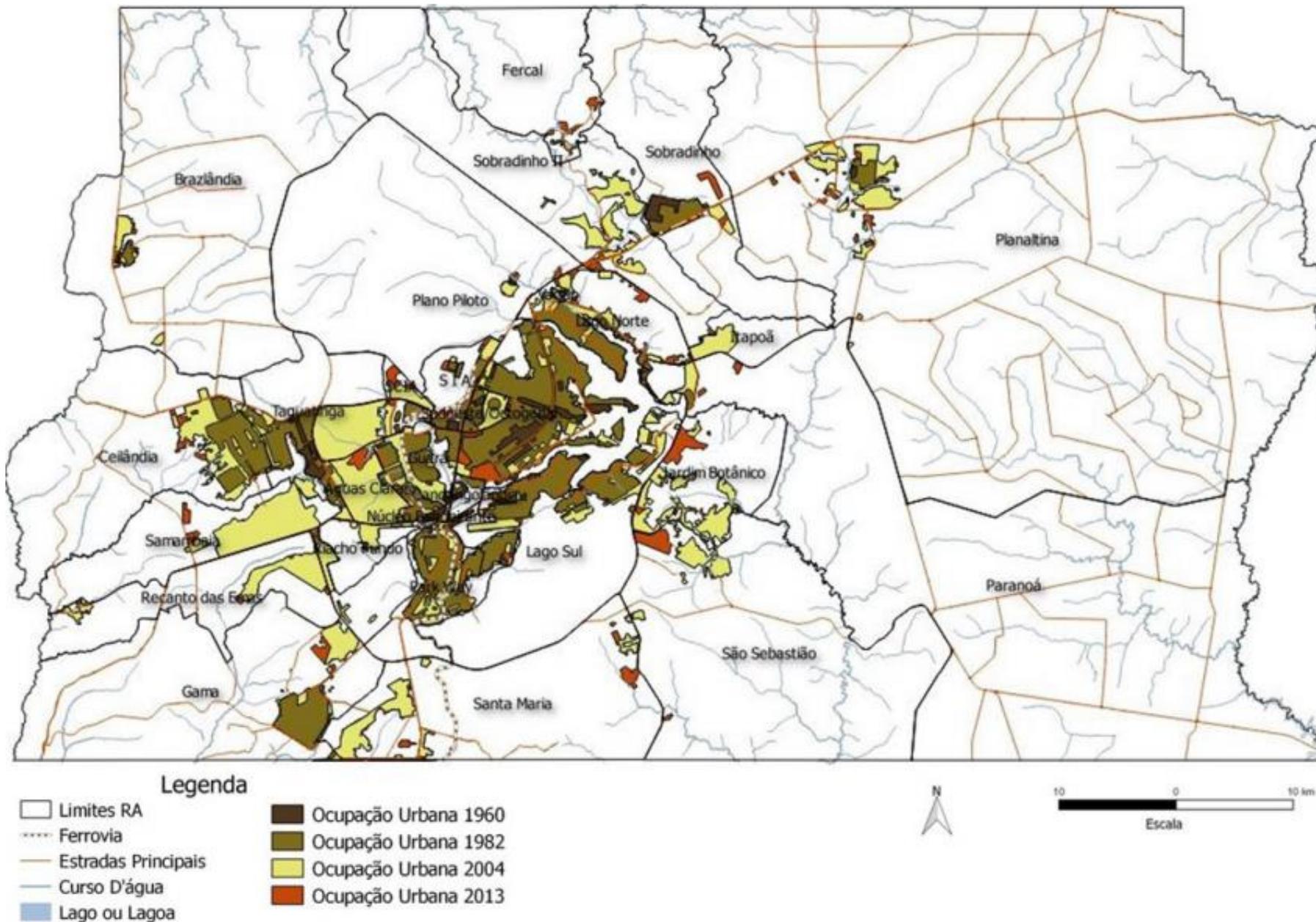


Figura 12 - Divisão administrativa e evolução urbana do DF.

Fonte: CODEPLAN (2017).

Verifica-se que o DF continua em expansão e muito dessa expansão aconteceu e acontece de forma irregular, o que prejudica a correta drenagem pluvial das cidades brasileiras. Áreas que antes eram destinadas a serem núcleos rurais, atualmente são grandes aglomerados de construções, como é o caso de Vicente Pires, que sofre de alagamentos constantes, pois, nesse processo de ocupação desenfreado, não foram desenvolvidas medidas de contenção de águas pluviais.

Mesmo em áreas consolidadas, como o Plano Piloto, os alagamentos são constantes devido ao processo de impermeabilização do solo das áreas de montante como é o caso das quadras 900 onde era previsto uma ocupação de baixa densidade e hoje se encontra, quase todas impermeabilizada. Esse processo fez com que a rede de drenagem original ficasse obsoleta.

O PDDU/DF (2009b) mapeou a situação da rede de drenagem em todo o DF. A partir de simulações com chuvas tempo de retorno de 2 anos, 5 anos, 10 anos e 25 anos, traçou-se um diagnóstico apontando os pontos onde a rede alaga. A Figura 13 apresenta o diagnóstico feito para o Plano Piloto.

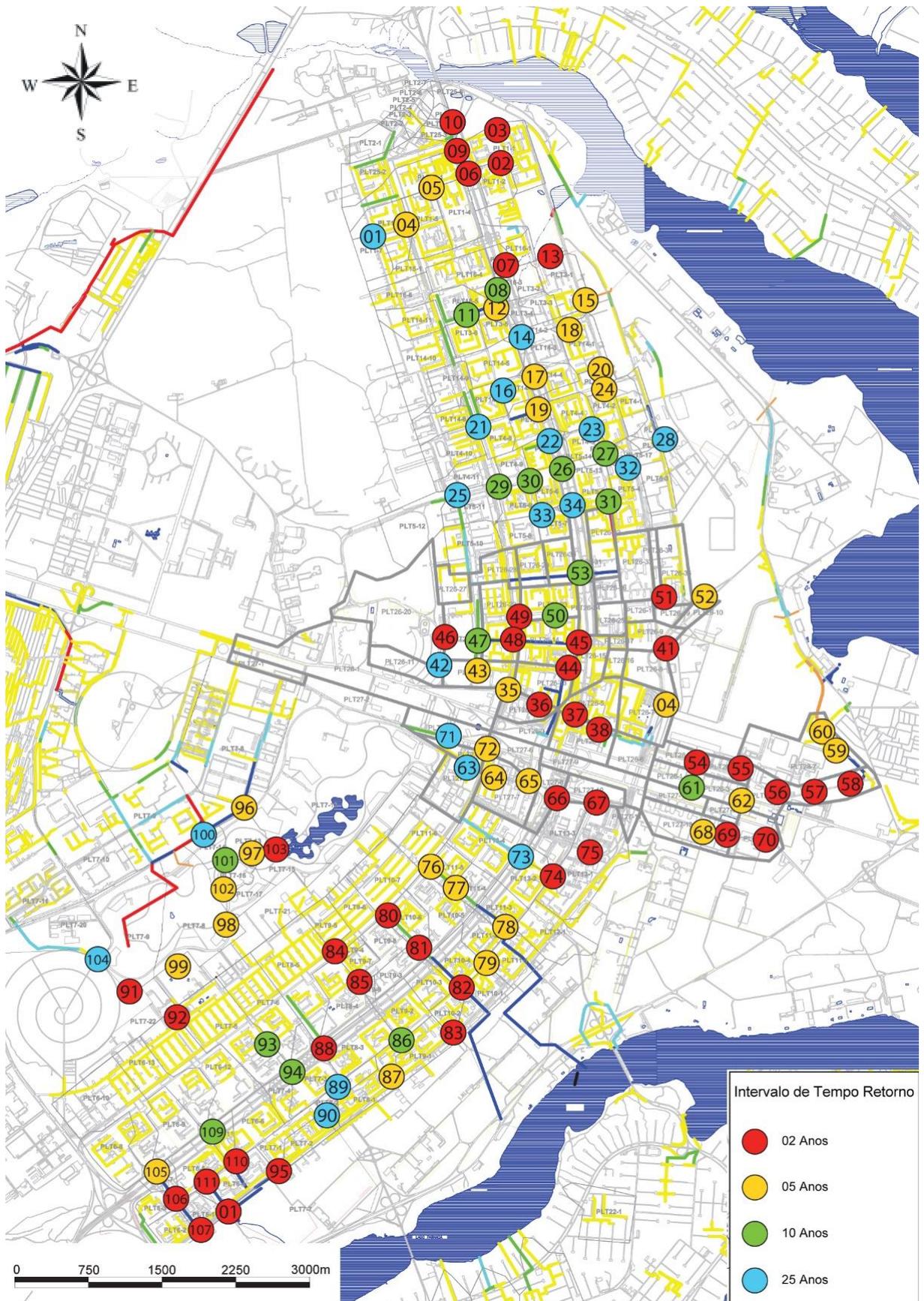


Figura 13 - Pontos de alagamento no DF.

Fonte: Adaptado de PDDU/DF (2009b).

As más condições das galerias pluviais devido à falta de manutenção são outro motivo para os alagamentos. O carreamento de resíduos sólidos para dentro das galerias causa o seu entupimento, com isso diminuindo a seção transversal da galeria e reduzindo sua capacidade de escoamento.

2.2.1 Modelagem hidráulica e hidrológica

Uma bacia urbana é composta por vários tipos de usos do solo que resultam em diferentes volumes de escoamento, tempo de pico e vazão. A modelagem de bacias hidrográficas permite a integração de todas estas características. Os modelos hidrológicos de águas pluviais urbanas devem ser capazes de simular os fluxos e o transporte de poluentes em áreas impermeáveis e permeáveis através de canais e redes de tubulação (ANTUNES, 2017).

Modelos capazes de simular a qualidade e a quantidade da água da chuva apareceram na década de 1970, e foram desenvolvidos principalmente por agências do governo dos EUA, como a USEPA, *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) (Zoppou, 2001).

Diversos modelos hidráulicos hidrológicos podem ser aplicados à drenagem urbana. Ellitot & Trowsdale (2007) compararam os modelos MOUSE, MUSIC, P8, PURRS, RUNQUAL, SLAMM, STORMTAc, SWMM, UVQ e WBM para parâmetros diversos e demonstraram que os modelos MOUSE e SWMM eram os modelos mais completos, sendo adequados para uma vasta gama de utilizações.

O SWMM, *Storm Water Management Model*, é um modelo de simulação dinâmica largamente utilizado, criado pela USEPA em 1971. Ele é capaz de simular a quantidade e a qualidade do escoamento superficial, em um único evento chuvoso ou continuamente a longo prazo e o comportamento hidráulico das redes de drenagem (ANTUNES, 2017).

Além dos modelos estudados por Ellitot & Trowsdale (2007), Antunes (2017) cita como modelos hidráulicos e hidrológicos importantes os HEC-RAS e HEC-HMS.

O *Hydrologic Engineering Center* – HEC (Centro de engenharia hidrológica) das *U.S. Army Corps of Engineers* – USACE (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)

desenvolveu os modelos *River Analysis System* (HEC-RAS) e *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS). O HEC-RAS é um software que permite executar cálculos hidráulicos para regimes de fluxo unidimensional permanente e não permanente. O HEC-HMS simula os processos hidrológicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, como, infiltração e hidrogramas unitários, até métodos que necessitam de simulação contínua, como a evapotranspiração. (USACE, 2016).

2.3 Resíduos da construção e demolição

Segundo Blumenschein (2004), o impacto no meio ambiente proveniente da cadeia produtiva da indústria da construção ocorre em todos os seus estágios e atividades e ao longo de toda esta cadeia, recursos naturais são explorados, energia é consumida indiscriminadamente e resíduos são gerados de forma excessiva e dispostos irregularmente.

Quanto às fontes geradoras de resíduos na construção civil, Leite (2001) cita a falta de qualidade de bens e serviços, o que resulta perdas de materiais que saem das obras como entulho e aumentam o montante dos resíduos produzidos.

Os impactos negativos ocasionados pela disposição incorreta e o não tratamento dos resíduos têm causado, de acordo com Rocha (2006), problemas a gestão urbana, como: esgotamento prematuro de áreas de disposição, degradação do meio ambiente e prejuízo aos cofres públicos.

Outros problemas relacionados ao descarte de resíduos em locais incorretos são o assoreamento de rios e córregos, o entupimento de bueiros e galerias e, conseqüentemente, enchentes.

A quantidade de resíduos coletados na região Centro-Oeste, no ano de 2018, foi de 0,824 kg/hab/dia (ABRELPE, 2019), o que, para a população do Distrito Federal de aproximadamente 3 milhões de habitantes, corresponde a um total de 902 mil toneladas. Esse índice é o maior dentre as regiões do país e pode estar relacionado com uma efetiva coleta dos resíduos, ou com um desperdício elevado nas construções da região.

Os dados com relação a 2018 para a região centro-oeste aparecem na Tabela 6 e indicam uma redução na coleta de resíduo na região pelo segundo ano consecutivo, o que pode

ocorrer devido a uma redução efetiva da geração devido à crise econômica enfrentada pelo país ou a um aumento do descarte irregular do material.

Tabela 6 - Coleta de RCD na região Centro-Oeste.

2017		2018	
Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)	Total (toneladas/dia)	Per capita (kg/habitante/dia)
13.574	0,855	13.255	0,824

Fonte: ABRELPE (2019).

Resíduo de construção e demolição (RCD) e resíduo de construção civil (RCC) são termos sinônimos e cuja definição é dada pelo CONAMA Resolução 307/2002 como:

"Os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha." (BRASIL, Resolução CONAMA N° 307, de 5 de julho de 2002, 2002)

Os resíduos sólidos são distribuídos em classes A, B, C e D (Tabela 7). Na classe A, estão os resíduos que podem ser reutilizados como agregados depois de reciclados, podendo ser empregados como agregados finos e grossos.

Tabela 7 - Classificação e descrição dos resíduos

CLASSE	DESCRIÇÃO
A	São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, oriundos de construção, demolição, reformas e reparos de: pavimentação e de outras obras de infraestrutura (inclusive solos provenientes de terraplanagem); edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento e outros), argamassa e concreto; peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios e outros) produzidos nos canteiros de obras.
B	São os resíduos recicláveis para outras destinações (plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e outros).
C	São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou sua recuperação (gesso e seus derivados)
D	São os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (tintas, solventes, óleos e outros) ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos (clínicas radiológicas, instalações industriais e outros)

Fonte: ABNT NBT 15116:2004

Os agregados provenientes dos resíduos de classe A são separados em duas categorias: agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM). Segundo a ABNT NBR 15116:2004, o primeiro tipo tem em sua composição de fração graúda, no mínimo 90% de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, já o segundo tem no máximo 90% de fragmentos.

Para ser utilizado como agregado em concreto sem função estrutural, o resíduo tem que ser da classe A e atender aos requisitos específicos mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Requisitos para agregado reciclado destinado ao preparo de concreto.

Propriedades	Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
	ARC		ARM		Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos à base de cimento e rochas (%)	≥ 90	-	< 90	-	Anexo A	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Cloretos		1		ABNT NBR 9917	
	Sulfatos		1		ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais ¹		2		Anexo A	Anexo B
	Torrões de Argila		2		ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes		3		-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)	≤ 10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	

¹ Para efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos

Fonte: ABNT NBR 15116:2004.

Leite (2001) explicitou que o beneficiamento de RCD envolve desde sua coleta e transporte, passando por separação, britagem e peneiramento, até sua estocagem para posterior utilização. Ela ainda afirma que esse beneficiamento não é muito diferente do tratamento usado para a produção de agregados naturais, os quais utilizam até, muitas vezes, os mesmos equipamentos.

Entre os processos de beneficiamento do RCD para torná-lo utilizável estão: a britagem, que pode ser por mandíbula ou por impacto, e para a separação de partículas, o jigue.

A britagem é um processo de cominuição do agregado, que reduz as dimensões das partículas por meio da ação mecânica; se for uma força de compressão é britagem por mandíbulas, se for por impacto, britagem por impacto (MOREIRA, 2010).

O britador de mandíbula fratura o material por esmagamento das partículas. Os fragmentos presos na abertura da mandíbula sofrem sucessivos processos de quebra por cisalhamento no plano principal de tensões, gerando grande quantidade de finos (CHAVEZ, 1999 apud MOREIRA, 2010, p. 16).

Segundo Lima (1999), o britador de impacto possui uma câmara na qual o material é britado a partir do choque de martelos fixados por um rotor e pelo choque com placas fixas.

Hansen (1992) constatou que o britador de mandíbula produz melhor distribuição granulométrica dos agregados reciclados para uso em concretos, quando o resíduo processado é de concreto estrutural, enquanto o britador de impacto promove uma melhor distribuição de tamanho dos grãos dos agregados para uso em pavimentação.

O resíduo de construção e demolição é heterogêneo e por isso é difícil estimar sua composição. Pinto (1986 apud Zordan, 1997, p. 89) analisou a composição de resíduos em canteiros de obras na cidade de São Carlos (SP) e constatou que 64% da composição do resíduo é argamassa, seguido de 29% de material cerâmico.

Zordan (1997) analisou o material de uma usina de reciclagem em Ribeirão Preto (SP) e os resultados foram: 37,4% argamassa, 21,1% concreto, 20,8% cerâmica e o restante de pedras, cerâmicas polidas e outros. Carneiro *et al* (2001) verificaram que em Salvador (BA) a soma das composições de argamassa, concreto, rochas naturais e materiais cerâmicos era igual a 72%. Oliveira *et al* (2011) verificaram que a composição do resíduo de construção civil em Fortaleza (CE) era de 65% de argamassa (38%), concreto (14%) e material cerâmico (13%).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos e procedimentos realizados para se alcançar os objetivos propostos. Os métodos foram baseados em pesquisas anteriores e normas vigentes nacionais e internacionais.

A pesquisa se divide em uma parte experimental, em que foram feitos traços distintos de concretos porosos e uma parte que envolve uma modelagem hidráulica e hidrológica de pontos críticos de alagamento da região do DF para se avaliar qual o impacto da utilização desse material nesses pontos.

Os ensaios realizados com concreto endurecido foram: absorção de água, índice de vazios, permeabilidade, resistência à compressão, à tração por compressão diametral, à tração por flexão e à abrasão.

Os ensaios de caracterização dos agregados foram feitos no Laboratório de Materiais do UniCEUB. A moldagem dos concretos e os ensaios com o concreto endurecido foram feitos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade de Brasília.

3.1 Caracterização dos materiais constituintes do concreto

Nesta seção são apresentados os ensaios de caracterização dos materiais utilizados na confecção dos concretos.

3.1.1 Agregados graúdos natural e reciclado

O agregado graúdo reciclado é proveniente de um fornecedor local, especializado em recolher resíduos de construção e beneficiá-los para utilização como agregados, localizado no Grande Colorado/DF. Os resíduos têm origens diversas e sua composição é bem heterogênea, com predominância de materiais cimentícios (concreto e argamassa). A produção do agregado de RCD é feita num britador de mandíbulas conforme mostrado na Figura 14.



Figura 14 – Produção dos agregados reciclados.

Fonte: Acervo do autor.

Os agregados graúdos utilizados têm granulometria contínua e dimensões compatíveis com brita 0. Essa escolha foi embasada na bibliografia, a qual demonstra que concretos porosos produzidos com agregados nessa configuração tendem a obter resistências melhores. A Figura 15 apresenta ambos os agregados graúdos utilizados.



Figura 15 –(a) Agregado gráúdo natural e (b) agregado gráúdo de RCD (esquerda) utilizados na confecção dos concretos estudados.

Fonte: Acervo do autor.

Os ensaios para caracterização dos agregados gráúdos foram: ABNT NM 45:2006, ABNT NM 46:2003, ABNT NM 51:2001, ABNT NM 53:2009, ABNT NM 248:2003.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Tabela 9 apresenta os resultados da granulometria e demais ensaios de caracterização dos agregados gráúdos utilizados na pesquisa.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos.

Peneira (mm)	Brita 0 (% retida acumulada)	Brita 0 RCD (% retida acumulada)
32	0%	0%
25	0%	0%
19	0%	0%
12,5	0%	0%
9,5	6%	0%
6,3	40%	11%
4,8	66%	54%
2,4	95%	99%
1,2	99%	99%
0,6	100%	99%
0,3	100%	99%
0,15	100%	100%
Fundo	100%	100%
D máx (mm)	12,5	9,5
Módulo de finura	5,64	5,50
Massa específica (g/cm ³)	2,60	2,30
Massa unitária (g/cm ³)	1,08	1,42
Índice de vazios (%)	60,0	46,8
Material pulverulento (%)	1,6	0,9
Absorção (%)	1,2	5,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Brita RCD é mais fina que a Brita 0 natural, como mostrado pelo diâmetro máximo e módulo de finura do agregado RCD. A massa específica do agregado reciclado foi 11,5%, aproximadamente, menor que a massa específica do agregado natural.

Outra diferença grande entre os agregados está no índice de vazios e na absorção. O agregado RCD absorve muito mais água que o agregado natural e essa absorção precisa ser levada em conta na mistura do concreto, caso contrário os agregados reciclados retirarão água da mistura. Nesta pesquisa, essa absorção foi compensada com uma pré-umidificação dos agregados antes da concretagem.

O material pulverulento do agregado natural foi maior que o do agregado RCD. Visualmente, esse fato parece ser contraditório. Entretanto, no peneiramento dos agregados foram usadas peneiras menores que as mínimas pedidas por norma para agregados graúdos. Nesse processo foi percebido que os finos presentes no RCD estão acima da peneira de 0,075 mm. Logo, o agregado RCD possui mais finos que o agregado natural, mas estes não se configuram como material pulverulento.

A Figura 16 – Curva granulométrica dos agregados graúdos estudados. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** traz a curva granulométrica dos dois agregados graúdos estudados, brita 0 e brita 0 RCD e os limites para brita 0 de acordo com a ABNT NBR 7211:2019.

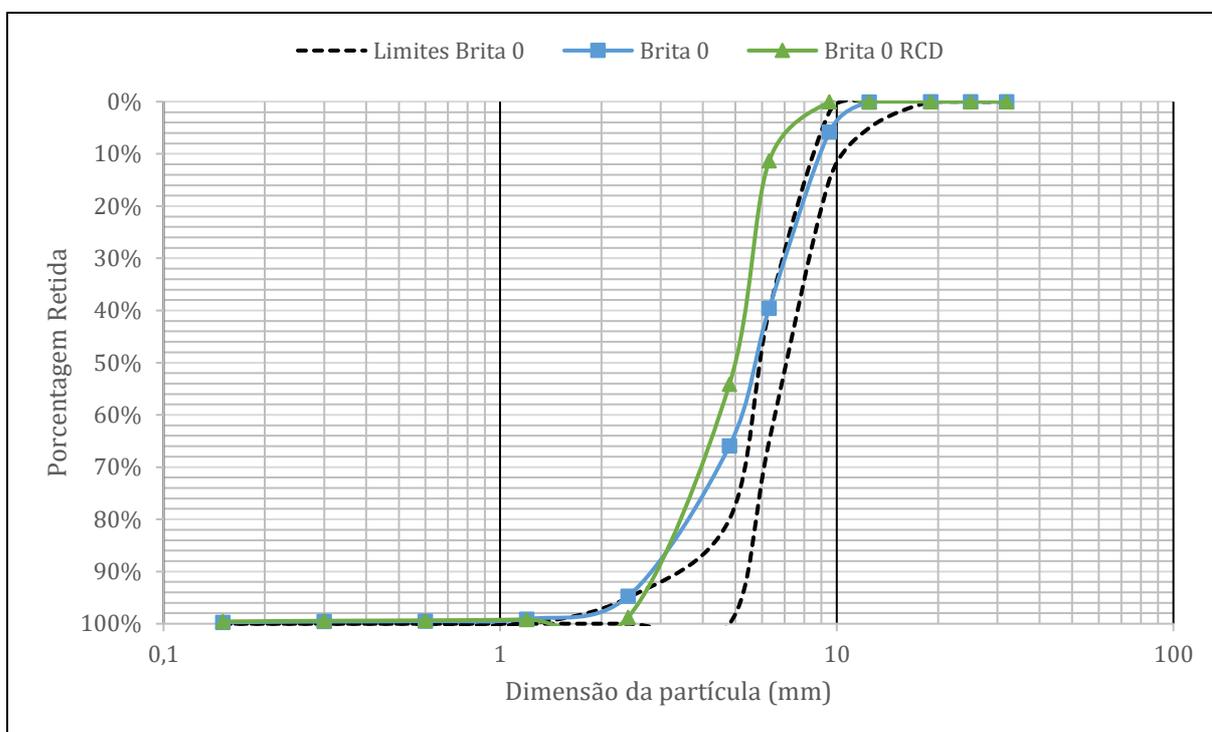


Figura 16 – Curva granulométrica dos agregados graúdos estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela curva granulométrica que ambos os agregados não se encaixam dentro dos limites recomendados por norma para a brita 0, sendo que a brita 0 RCD ficou mais deslocada. A produção de um agregado que se enquadrasse perfeitamente nesses limites consistiria em pegar agregados de diferentes granulometrias na planta de produção e peneirá-los. Isto não foi feito, pois o intuito era utilizar os agregados na forma que foram fornecidos, com o mínimo de beneficiamento possível.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo empregado na confecção dos concretos é o pó de pedra (Figura 17). A escolha se embasou no fato de esse ser um agregado miúdo mais grosso para não afetar os poros e a confecção deles, o que prejudicaria as propriedades hidráulicas do concreto.



Figura 17 – Agregado miúdo utilizado.

Fonte: Acervo do autor.

Os ensaios para caracterização dos agregados miúdos foram: ABNT NM 30:2001, ABNT NM 45, ABNT NM 46:2003, ABNT NM 52:2009, ABNT NM 248:2003. A Tabela 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os resultados de granulometria e demais caracterizações do agregado miúdo, pó de pedra.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

Peneira (mm)	Pó de Pedra (% retida acumulada)
9,5	0%
6,3	0%
4,8	0%
2,4	15%
1,2	61%
0,6	88%
0,3	95%
0,15	99%
Fundo	100%
D máx (mm)	4,8
Módulo de finura	3,59
Massa específica (g/cm ³)	2,74
Massa unitária (g/cm ³)	1,16
Índice de vazios (%)	58,0
Material pulverulento (%)	4,4
Absorção (%)	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto mais preocupante desse agregado é a sua quantidade de material pulverulento (4,4%), que foi maior que a do agregado RCD (0,9%). Grandes quantidades de pulverulento podem impactar a trabalhabilidade do concreto, o que não é um problema nesta pesquisa, pois a trabalhabilidade dos concretos estudados não é um fator relevante.

A Figura 18 – Curva granulométrica do pó de pedra. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** traz a curva granulométrica do pó de pedra e os limites da zona utilizável e ótima de acordo com a ABNT NBR 7211:2019.

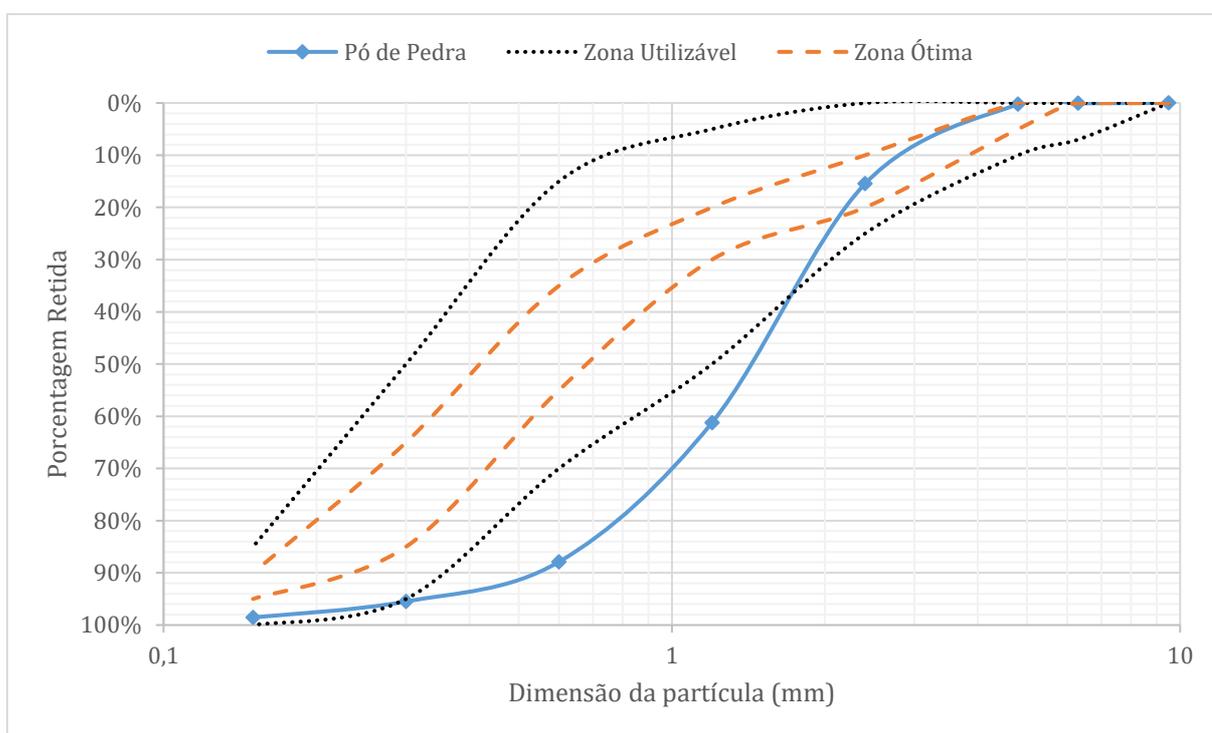


Figura 18 – Curva granulométrica do pó de pedra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se pela curva granulométrica que o pó de pedra é mais grosso que o recomendado para o uso na confecção de concretos. Para a produção de concreto poroso essa granulometria mais grossa é melhor pois permite poros maiores no concreto.

3.1.3 Cimento

O cimento utilizado nesta pesquisa será o CP II-F-40, proveniente da fábrica da Votorantim Cimentos, localizada na Fercal/DF. Foi utilizado um cimento de classe 40 para atingir a resistência à compressão de 20 MPa

3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado foi o polifuncional da marca Sika. O aditivo foi utilizado em uma proporção de 0,5% do peso de cimento. O objetivo deste aditivo foi de ajudar na redução de água do concreto e garantir coesão do concreto.

3.2 Definição dos traços

O traço, em massa, escolhido foi 1:4:0,35 (c:m:a/c) e abatimento de tronco de cone nulo. A escolha do traço foi definida com base em traços presentes em outras pesquisas, como Wu et al (2011), e buscando atender uma resistência à compressão maior que 20 MPa. A proporção de agregados graúdos por miúdos foi definida pelo teor de argamassa (α). Foram escolhidos dois teores, 35% e 40%.

Para cada teor de argamassa foram produzidos traços com 15% e 30% de substituição, em massa, de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado. Além disso foram feitos traços sem substituição nenhuma de agregados para cada teor de argamassa (α) para referência. A Tabela 11 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** traz a nomenclatura dos traços.

Tabela 11 - Nomenclatura dos traços utilizados.

Traço	Descrição
35/REF	Traço de referência com $\alpha=35\%$
35/15RCD	Traço com $\alpha=35\%$ e 15% de substituição de brita por RCD
35/30RCD	Traço com $\alpha=35\%$ e 30% de substituição de brita por RCD
40/REF	Traço de referência com $\alpha=40\%$
40/15RCD	Traço com $\alpha=40\%$ e 15% de substituição de brita por RCD
40/30RCD	Traço com $\alpha=40\%$ e 30% de substituição de brita por RCD

Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição unitária de cada traço e a relação água/materiais secos (H%) calculada são apresentados na Tabela 12 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo.

Tabela 12 - Composição unitária dos traços.

Traço	C	AN	B 0	B RCD	Adit. (g)	Água	α (%)	H (%)
35/REF	1,0	0,8	3,2	-				
35/15RCD	1,0	0,8	2,8	0,5	5	0,35	35	7,0
35/30RCD	1,0	0,8	2,3	1,0				
40/REF	1,0	1,0	3,0	-				
40/15RCD	1,0	1,0	2,6	0,5	5	0,35	40	7,0
40/30RCD	1,0	1,0	2,1	0,9				

C: cimento; AN: areia natural; B0: brita 0; BRCD: brita rcd; adit.: aditivo; α : teor de argamassa; H: relação água/materiais secos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha da substituição em massa e não em volume, como é usualmente feito em outros estudos, deve-se ao fato de que para este estudo, o teor de argamassa, a relação água/materiais secos e a relação água/cimento deveriam ser os mesmos para independentes da substituição.

Ao se optar por essa substituição em massa, obtêm-se um consumo de cimento teórico por m^3 menor para os concretos com agregados reciclados (Tabela 13).

Tabela 13 – Consumo de cimento teórico dos traços elaborados

Traço	Consumo de cimento (Kg/m^3)
35/REF	453
35/15RCD	448
35/30RCD	443
40/REF	454
40/15RCD	450
40/30RCD	445

3.3 Preparo e moldagem dos corpos de prova

Os traços foram produzidos no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da UnB com a utilização de uma betoneira de eixo vertical (Figura 19). Para a produção dos concretos todos os agregados foram secos e os agregados reciclados foram pré-umidificados antes da mistura para que ele não absorvesse a água.



Figura 19 – Betoneira utilizada para moldagem dos concretos.

Fonte: Acervo do autor.

A Figura 20 mostra o concreto em seu estado fresco e o ensaio de abatimento de tronco de cone que foi realizado. O abatimento de tronco de cone foi de 0 cm o que representa um concreto de difícil trabalhabilidade, mas bem coeso. Cabe ressaltar, que para concretos secos, o ensaio de tronco de cone não é o mais adequado para se avaliar a trabalhabilidade. Nesta pesquisa, foi adotado esse ensaio apenas para avaliar se o concreto realmente se encaixava como seco e avaliar possíveis erros de dosagem, caso tivessem ocorrido.



Figura 20 – (a) Concreto permeável em estado fresco; (b) ensaio de abatimento de tronco de cone.

Fonte: Acervo do autor.

O número de corpos de prova e seu formato se devem às normas específicas que regem cada ensaio a ser realizado, além disso foram moldados conforme a ABNT NBR 5738:2003.

Foram moldados corpos de provas cilíndricos e prismáticos. Os corpos de prova cilíndricos possuem 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Os prismáticos são do tipo *pavers* de dimensões 20 cm x 10 cm x 8 cm (comprimento x largura x altura).

O primeiro tipo de corpo de prova é o padrão para ensaios de resistência à compressão do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 16416:2015 requer que peças de concreto sejam ensaiadas nas dimensões em que são utilizadas.

As quantidades por ensaio e as idades de realização dos testes estão detalhadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Ensaio a serem realizados e quantidades de corpos de prova e idades de ensaio.

Tipo de corpo de prova Dimensões Idade (dias)	Cilíndrico 10 cm x 20 cm			Prismático 20 cm x 10 cm x 8 cm	
	7	28	90	7	28
	Resistência à compressão (NBR 5739:2007; NBR 9781:2013)	3	3	-	3
Absorção de água/ índice de vazios (NBR 9778:2009)	-	3	-	-	-
Permeabilidade (Neithalath, Weiss e Olek, 2003)	-	3	-	-	-
Resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222:2011)	-	3*	-	-	-

* Os corpos de prova ensaiados são os mesmos do ensaio de permeabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de permeabilidade foram depois rompidos à compressão diametral para se obter a resistência à tração.

A Figura 21 mostra os corpos de prova após serem desmoldados. Depois, foram levados para câmara úmida onde ficaram até as datas dos ensaios.



Figura 21 - Corpos de prova após serem desmoldados.

Fonte: Acervo do autor.

Um fator importante na moldagem dos corpos de prova é sua compactação, pois esta afeta o índice de vazios dos concretos. Para esta pesquisa compactou-se os corpos de prova em

3 camadas com 12 golpes de haste cada uma, modificando o estudo de Batezini (2013), que moldou os corpos de prova em 3 camadas com 15 golpes cada.

A compactação dos *pavers* com (10 cm x 20 cm x 8 cm) foi feita em uma camada com 12 golpes. Ressalta-se que a moldagem dos *pavers* não é contemplada pela ABNT NBR 5738:2015 e que a ABNT NBR 9781:2013 não traz nenhuma informação sobre a moldagem das peças.

3.4 Ensaios físico-mecânicos

Esta seção descreve os métodos de ensaios que foram realizados nos concretos endurecidos. Os resultados desses ensaios serão apresentados no capítulo seguinte.

3.4.1 Resistência à compressão

A ABNT NBR 16416:2015 solicita o ensaio à compressão apenas para os blocos de concreto que devem seguir o Anexo A da ABNT NBR 9781:2013. Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados conforme ABNT NBR 5739:2007. Os ensaios foram realizados na máquina mostrada na Figura 22.



Figura 22 - Máquina de ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Acervo do autor.

A Figura 23 mostra os ensaios de compressão do cilindro e do *paver*. O princípio de ambos os ensaios é semelhante, entretanto a velocidade de carregamento é diferente, 0,45 MPa/s no cilindro e 0,55 MPa/s no *paver*. A ABNT NBR 9781:2013 preconiza que a aplicação de carga no *paver* seja através de placas auxiliares circulares de aço com diâmetro 85 mm e espessura 20 mm.

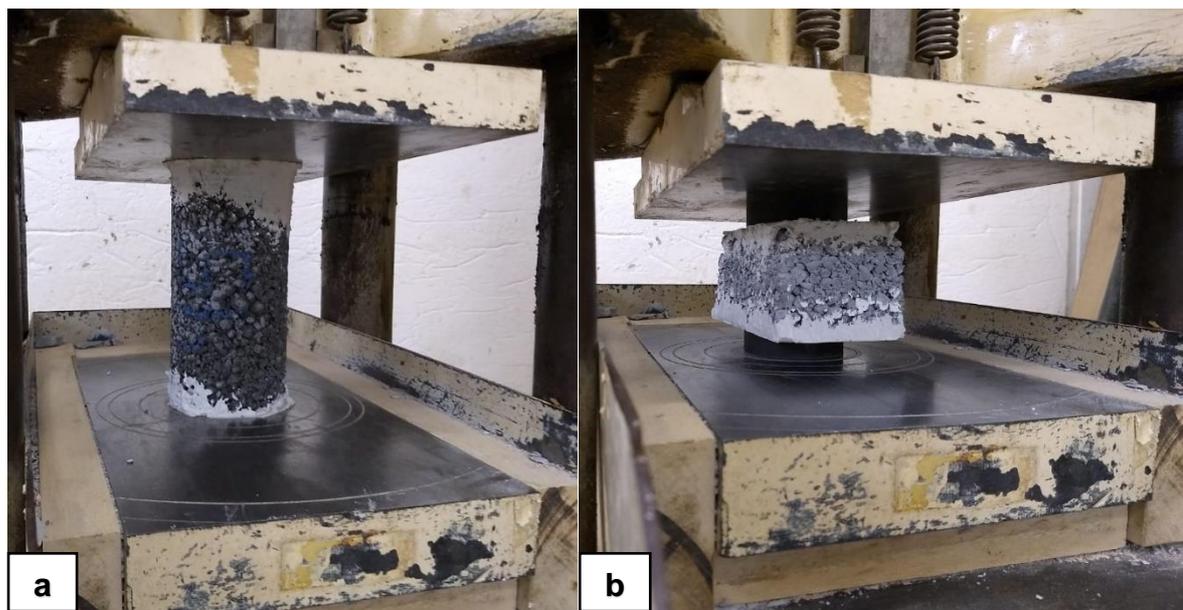


Figura 23 - Ensaio de resistência à compressão (a) cilindro (b) *paver*.

Fonte: Acervo do autor.

O intuito de trabalhar com os dois tipos de corpos de prova foi o de comparar ambas as resistências e de estipular uma relação entre elas. Ao se ter essa correlação, diferentes laboratórios que não tem um equipamento que permita a realização do ensaio conforme solicitado em norma podem estimar a resistência à compressão do *paver*.

Testes pilotos mostraram que não seria possível fazer a retificação mecânica, pois o equipamento desagregava partes do topo dos concretos e a retífica não permitia a retificação dos *pavers*. Optou-se por capear os corpos de prova com gesso (Figura 24), conforme recomendado por Padilha, Paliga e Torres (2017).



Figura 24 - Capeamento com gesso dos corpos de prova.

Fonte: Acervo do autor.

A equação para o cálculo da resistência à compressão de ambos os tipos de corpos de prova é a Equação 1 a seguir.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão em (MPa);

F = força máxima aplicada em (N);

A = área de carregamento em (mm²).

3.4.2 Índice de vazios, absorção e massa específica

O índice de vazios é o parâmetro que permite quantificar os poros permeáveis do concreto. O índice de vazios, a absorção e a massa específica são obtidos de acordo com a ABNT NBR 9778:2009.

Esse procedimento consiste em se obter massa da amostra de concreto seco, saturado e submerso (Figura 25). Foram feitas 3 pesagens em cada um dos 3 corpos de prova de cada

traço para cada estado, seco, saturado e submerso. O valor adotado para os cálculos foi a média das pesagens de cada estado, o que resultou em 3 médias para cada traço para o cálculo das massas específicas seca e real, absorção de água e índice de vazios. O valor final adotado para esses parâmetros foi a média entre os 3 corpos de prova.



Figura 25 – Pesagem de corpo de prova em balança hidrostática.

Fonte: Acervo do autor.

Com esses valores é possível calcular a massa específica seca (Equação 2), a massa específica real (Equação 3), a absorção de água (Equação 4) e o índice de vazios (Equação 5).

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{(Equação 4)}$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

ρ_s = massa específica seca em (g/cm³);

ρ_r = massa específica real em (g/cm³)

A = absorção de água em (%);

I_v = índice de vazios em (%);

m_s = massa seca em estufa em (g);

m_{sat} = massa saturada em (g);

m_i = massa imersa em (g).

3.4.3 Permeabilidade

O ensaio mais comumente utilizado em pesquisas para a determinação do coeficiente de permeabilidade é o teste de carga variável. Esta pesquisa optou por utilizar o equipamento descrito por Neithalath, Weiss e Olek (2003) e mostrado na Figura 26. Essa escolha se baseou no ACI 522R-10 que cita essa pesquisa como exemplo para obtenção do ensaio de permeabilidade com carga variável.

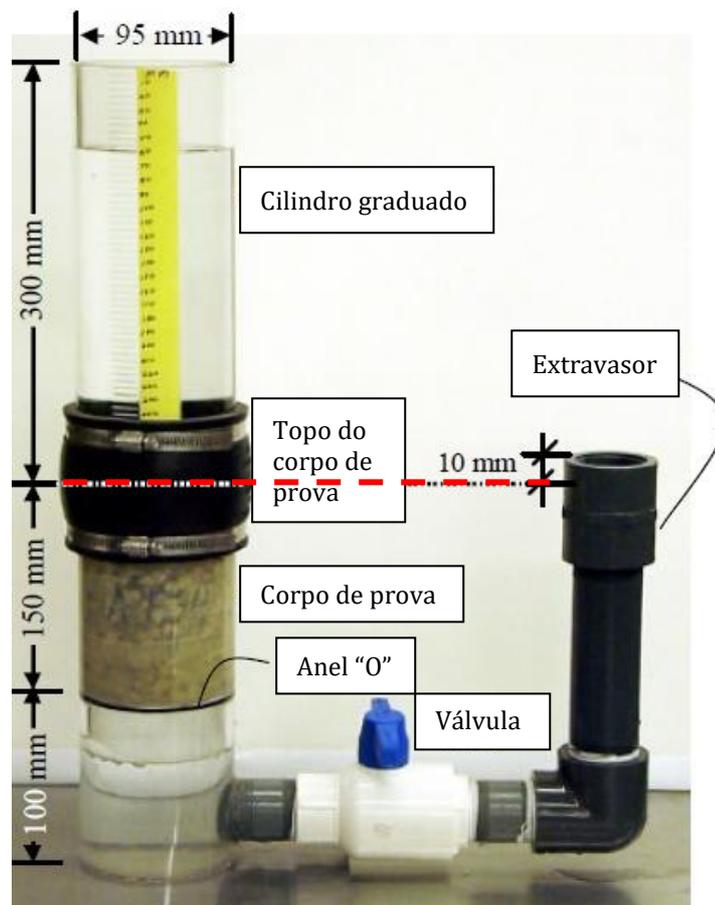


Figura 26 - Equipamento para o ensaio de permeabilidade a carga variável.

Fonte: Neithalath, Weiss e Olek (2003).

O ensaio de permeabilidade escolhido segue a Lei de Darcy para percolação de fluídos em meios porosos, sendo o coeficiente de permeabilidade determinado pela Equação 6.

$$K = \frac{A_1 * l}{A_2 * l} \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

K = coeficiente de permeabilidade em (mm/s);

A₁ = área da sessão da amostra em (mm²);

A₂ = área da sessão interna do tubo (mm²);

l = comprimento da amostra (mm);

t = tempo em (s);

h_i = altura inicial da lâmina d'água em (mm);

h_f = altura da lâmina d'água em (mm).

Para o ensaio dessa pesquisa, usou-se um corpo de prova de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. O equipamento utilizado no ensaio (Figura 27) e o procedimento são descritos a seguir.



Figura 27 – Equipamento de permeabilidade montado para a pesquisa.

Fonte: Acervo do autor.

Primeiro o corpo de prova foi envolvido em plástico filme para que a água não passasse pelas laterais e depois revestido com fita crepe a fim de que o papel filme não rasgasse durante o ensaio. Preparada a amostra, ela é colocada no equipamento. Com a válvula central aberta, completa-se o equipamento com água (Figura 28) e aguarda-se que a água passe pelo cano do outro lado.



Figura 28 – Preenchimento do equipamento para ensaio de permeabilidade.

Fonte: Acervo do autor.

Esse procedimento é importante para garantir que o corpo de prova esteja completamente saturado e que todo ar incorporado seja removido. A verificação dessas condições é feita enchendo o cano superior com água e deixando percolar toda a água, em seguida o registro é fechado e o cano completado com água novamente. Se não houver movimentação da água por 10 minutos, então o corpo de prova está saturado e o ar

incorporado foi removido. Caso haja movimentação, cabe repetir o procedimento até que não haja.

Para o ensaio fecha-se a válvula central e se completa o cano acima do corpo de prova com água. Com o equipamento cheio de água, abre-se a válvula central e mede-se o tempo que a água leva de uma altura inicial (h_i) até uma altura final (h_f), medidas a partir do topo do corpo de prova. Para esse ensaio seguiu-se Neithalath, Weiss e Olek (2003) e $h_i = 290$ mm e $h_f = 70$ mm.

Como o ensaio requer que um cronômetro seja acionado quando a água atinge determinada marca e parado em outra marca, Neithalath, Weiss e Olek (2003) recomendam adotar a média de 3 leituras de tempo para cada corpo de prova no intuito de minimizar erros humanos. Devido ao comportamento heterogêneo do concreto, esta pesquisa optou por realizar esse ensaio em 3 corpos de prova para garantir que o resultado refletisse o comportamento do concreto dosado

3.4.4 Resistência à tração do concreto

A ABNT NBR 16416:2015 requer resistência mecânica de 2,0 MPa e espessura de 100 mm para concretos permeáveis moldados no local. O ensaio designado pela norma para caracterização da resistência mecânica desse tipo de concreto é o da ABNT NBR 12142:2010. Tal norma estabelece o método de ensaio para determinar a resistência à tração na flexão.

Um método mais simples para se obter a resistência à tração do concreto é o ensaio de compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011), também conhecido como tração indireta. Esta pesquisa utilizou esse ensaio para obtenção da resistência à tração. Esse ensaio utiliza a mesma máquina da Figura 22 e a resistência à tração é calculada com a Equação 7.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 * F}{\pi * d * L} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração por compressão diametral em (MPa);

F = força em (N);

d = diâmetro médio em (mm);
 L = comprimento em (mm).

É possível correlacionar a resistência à tração na flexão com a resistência à tração indireta utilizando as Equações 8 e 9 da ABNT NBR 6118:2014.

$$f_{ct} = 0,9 * f_{ct,sp} \quad \text{(Equação 8)}$$

$$f_{ct} = 0,7 * f_{ct,f} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde:

f_{ct} = resistência à tração direta em (MPa);

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração indireta em (MPa);

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão em (MPa).

Como se trata do mesmo concreto, pode-se assumir que o valor da tração direta é o mesmo em ambas as equações resultando na Equação 10 e 11.

$$0,7 * f_{ct,f} = 0,9 * f_{ct,sp} \quad \text{(Equação 10)}$$

$$f_{ct,f} = 1,286 * f_{ct,sp} \quad \text{(Equação 11)}$$

Percebe-se da Equação 11 que o valor da resistência à tração na flexão é sempre maior que o da tração na compressão diametral.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas seções seguintes são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios do concreto endurecido.

4.1 Resistência à compressão do concreto

Os resultados de 7 e 28 dias de resistência à compressão, em MPa, em corpos de prova cilíndricos, obtidos para todos os traços, são mostrados na Tabela 15, a qual traz os resultados dos 3 corpos de prova ensaiados, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Quando o desvio padrão ficou acima de 2, foi descartado o valor mais discrepante da amostra.

Tabela 15 – Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos para as idades de 7 e 28 dias, em MPa.

TRAÇO	fc7 (MPa)						fc28 (MPa)					
	CP1	CP2	CP3	Média	D.P.	C.V.	CP1	CP2	CP3	Média	D.P.	C.V.
REF35	26,6	26,8	26,7	26,7	0,1	0,3%	29,1	26,6	*36,8	27,8	1,3	4,6%
35/15RCD	21,6	19,9	19,4	20,3	0,9	4,6%	24,0	21,4	19,3	21,5	1,9	8,9%
35/30RCD	18,6	15,8	16,9	17,1	1,2	6,9%	22,1	*25,2	20,3	21,2	0,9	4,2%
REF40	30,0	31,4	27,6	29,7	1,6	5,2%	23,5	*41,7	27,2	25,3	1,9	7,3%
40/15RCD	15,2	14,6	14,1	14,6	0,5	3,1%	28,5*	23,6	18,9	21,3	2,4	11,2%
40/30RCD	16,2	16,9	16,7	16,6	0,3	1,7%	21,1	22,6	*13,7	21,9	0,8	3,4%

D.P. = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação; * valores descartados

Fonte: Elaborado pelo autor.

O concreto REF40 apresentou resistência aos 7 dias maior que aos 28 dias. Isso pode ter sido influência do capeamento, de cura insuficiente ou de má compactação.

Como exposto na revisão bibliográfica, a resistência à compressão de concretos porosos fica entre 7 e 25 MPa (ZHONG; WILLIE, 2016). Com isso, pode-se afirmar que os concretos obtidos nessa pesquisa estão com resistências dentro do esperado, variando de 21,2 MPa a 27,8 MPa aos 28 dias.

A relação entre as médias das resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os corpos de prova cilíndricos, é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Relação entre as resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os corpos de prova cilíndricos.

TRAÇO	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)	fc28/fc7
REF35	26,7	27,8	1,04
35/15RCD	20,3	21,5	1,06
35/30RCD	17,1	21,2	1,24
REF40	29,7	25,3	0,85
40/15RCD	14,6	21,3	1,46
40/30RCD	16,6	21,9	1,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que com a substituição de agregado natural por agregado reciclado há um ganho que varia de 6% a 45,6% de resistência à compressão. Isso pode ocorrer devido à presença de material pozolânico no agregado reciclado utilizado que é em sua maior parte cimentício e proveniente de uma região onde o tipo de cimento mais comum é o CP II-Z 32.

A Tabela 17 apresenta a relação entre as médias das resistências à compressão, em MPa, aos 28 dias, quando da substituição de agregado natural por agregado reciclado, e o respectivo traço de referência, para os corpos de prova cilíndricos.

Tabela 17 – Relação entre as resistências à compressão, em MPa, e os traços de referência, para os corpos de prova cilíndricos.

TRAÇO	fc28 (MPa)	fc28/REF
REF35	27,8	1,00
35/15RCD	21,5	0,77
35/30RCD	21,2	0,76
REF40	25,3	1,00
40/15RCD	21,3	0,84
40/30RCD	21,9	0,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teor de argamassa de 35%, a resistência à compressão diminuiu inversamente proporcional à substituição de agregados naturais por reciclados e a redução de resistência chegou a 23,9% quando houve uma substituição de 30% de agregado natural por agregado reciclado.

Há uma redução de 22,7% na resistência à compressão quando da mudança do concreto REF35 para o 35/15RCD. Entretanto, quando se comparam os traços 35/15RCD e o

35/30RCD a redução é de apenas 2%, o que indica que a resistência ficou estável quando houve essa substituição de mais 15% de agregado reciclado.

Para o teor de argamassa de 40%, houve redução de 16,0% na resistência quando se substituiu 15% dos agregados naturais por reciclados. Contudo, a substituição de 30% dos agregados provocou um aumento de 2,8% na resistência, comparando com a substituição anterior.

Na sequência a Figura 29 apresenta um gráfico relacionando o teor de argamassa com a resistência à compressão para cada substituição de agregado (0%, 15% e 30%).

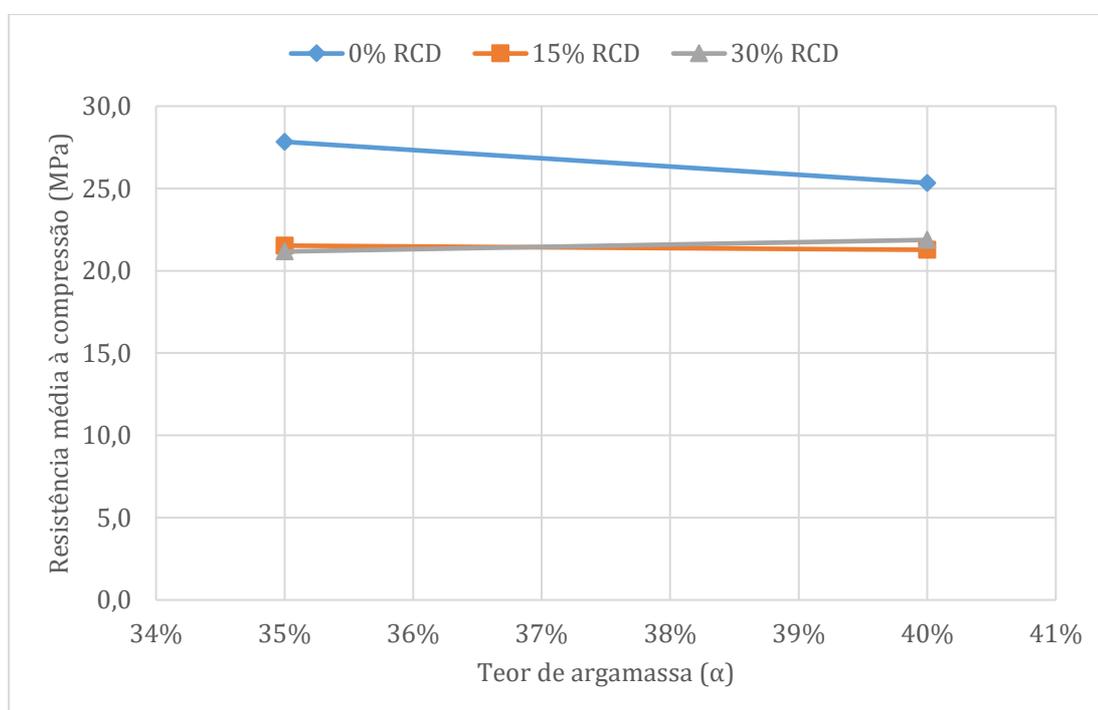


Figura 29 – Resistência à compressão x teor de argamassa, para os corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 29, percebe-se como a mudança de teor de argamassa impacta cada substituição de agregado natural por reciclado. Ao contrário do que era esperado, com 0% de substituição de agregado (REF), houve uma redução de 9% na resistência quando o teor de argamassa passou de 35% para 40%.

A variação entre as curvas de 15% e 30% de substituição dos agregados naturais por reciclados não foi significativa (diferença máxima de 3%). Tal fator implica que a resistência do agregado reciclado é o fator limitante na resistência à compressão.

A Figura 30 explicita graficamente a resistência à compressão em função da substituição de agregados naturais por reciclados para cada teor de argamassa ($\alpha = 35\%$ e $\alpha = 40\%$).

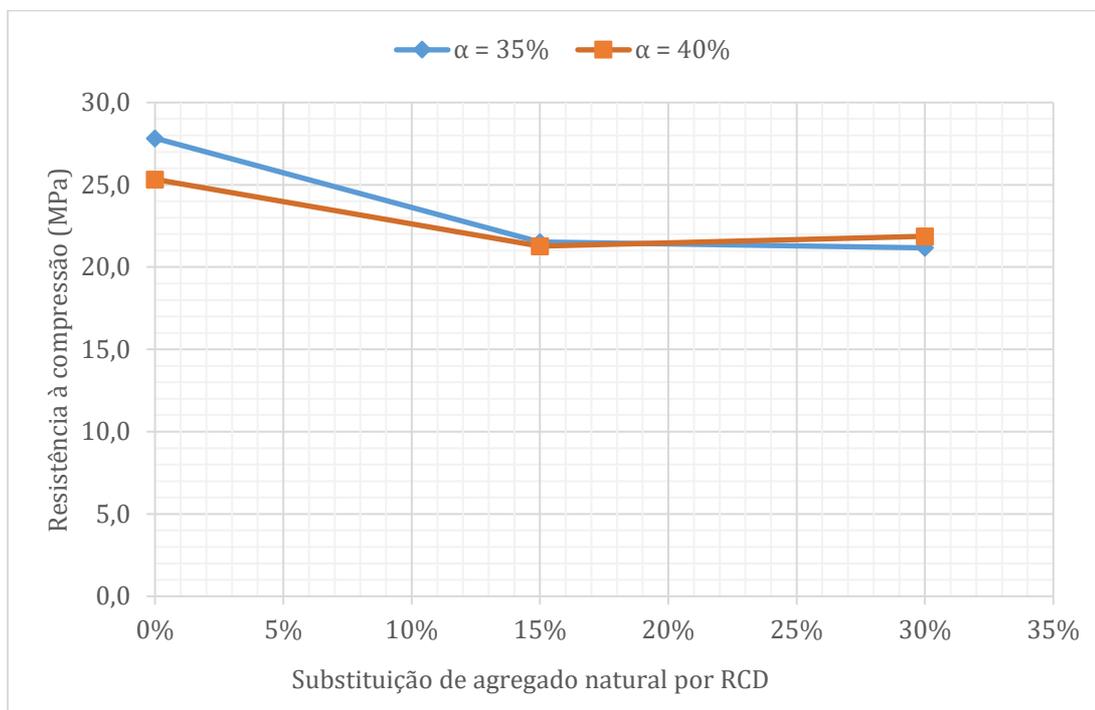


Figura 30 – Resistência à compressão x substituição de agregados naturais por RCD, para corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 30 mostra que os dois teores de argamassa reagem similarmente à substituição de agregados naturais por agregados reciclados. A substituição de 15% de agregados naturais por reciclados causa uma redução na resistência à compressão. Para a faixa de substituição de 30% a variação da resistência à compressão foi de no máximo 2,8%.

A Tabela 18 apresenta os resultados de 7 e 28 dias de todos os traços para os corpos de prova do tipo *pavers*. Os resultados apresentados na tabelam são: os 3 corpos de prova rompidos, a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Quando o desvio padrão ficou acima de 2, foi descartado o valor mais discrepante da amostra.

Tabela 18 – Resistência à compressão dos *pavers* para as idades de 7 e 28 dias, em MPa.

TRAÇO	fc7 (MPa)						fc28 (MPa)					
	P1	P2	P3	Média	D.P.	C.V.	P1	P2	P3	Média	D.P.	C.V.
REF35	23,1	26,6	23,5	24,4	1,6	6,5%	31,0	29,2	29,5	29,9	0,8	2,7%
35/15RCD	21,6	21,6	20,9	21,4	0,3	1,5%	21,7	25,3	22,6	23,2	1,5	6,5%
35/30RCD	20,2	17,7	19,1	19,0	1,0	5,3%	21,3	29,0*	25,2	23,3	2,0	8,4%
REF40	20,5	24,0	25,1	23,2	1,9	8,4%	27,0	25,9	23,5	25,5	1,5	5,9%
40/15RCD	24,8*	34,3	37,0	35,7	1,3	3,7%	24,4	24,5	17,0*	24,5	0,1	0,3%
40/30RCD	18,2	21,5	20,0	19,9	1,3	6,7%	23,0	24,2	27,2	24,8	1,8	7,2%

D.P. = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação; * valores descartados

Fonte: Elaborado pelo autor.

A ABNT NBR 16416:2015 para pavimentos permeáveis de concreto preconiza que para *pavers* porosos a resistência à compressão deve ser maior que 20 MPa. Nesta pesquisa, todos os traços atingiram essa resistência mínima requerida.

A relação entre as médias das resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os *pavers*, é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Relação entre as resistências à compressão, em MPa, de 7 dias e de 28 dias, para os *pavers*.

TRAÇO	fc7 (MPa)	fc28 (MPa)	fc28/fc7
REF35	24,4	29,9	1,04
35/15RCD	21,4	23,2	1,06
35/30RCD	19,0	23,3	1,24
REF40	23,2	25,5	0,85
40/15RCD	35,7	24,5	1,46
40/30RCD	19,9	24,8	1,32

Fonte: Elaborado pelo autor.

O concreto 40/15RCD obteve resistência à compressão aos 7 dias maior que aos 28 dias. Isso pode ter sido influência do capeamento, da cura, do excesso de compactação ou do acúmulo desproporcional de pasta de cimento.

Não se percebeu uma tendência de os concretos com agregados reciclados terem uma variação de resistência de 7 dias para 28 dias maior do que os traços sem agregados reciclados.

A Tabela 20 apresenta a relação entre as médias das resistências à compressão, em MPa, aos 28 dias dos concretos estudados, quando da substituição de agregado natural por agregado reciclado e do respectivo traço de referência, para os *pavers*.

Tabela 20 – Relação entre as resistências à compressão, em MPa, e os traços de referência, para os *pavers*.

TRAÇO	fc28 (MPa)	fc28/REF
REF35	29,9	1,00
35/15RCD	23,2	0,78
35/30RCD	23,3	0,78
REF40	25,5	1,00
40/15RCD	24,5	0,96
40/30RCD	24,8	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teor de argamassa de 35% a resistência à compressão diminuiu 22,4% quando se substituiu 15% dos agregados naturais por reciclados. Quando a substituição de agregados foi de 30% a resistência reduziu 22,1%. Comparando os concretos 35/15 RCD e 35/30RCD a diferença de resistência entre eles é de 0,4%.

Para o teor de argamassa de 40% houve uma diminuição de 3,9% na resistência quando se substituiu 15% dos agregados naturais por reciclados e uma redução de 2,6% na resistência quando se substituiu 30% dos agregados. A diferença de resistência entre os concretos 40/15RCD e 40/30RCD é de 1,4%.

Na sequência, a Figura 31 mostra gráfico relacionando o teor de argamassa com a resistência à compressão para cada substituição de agregado (0%, 15% e 30%).

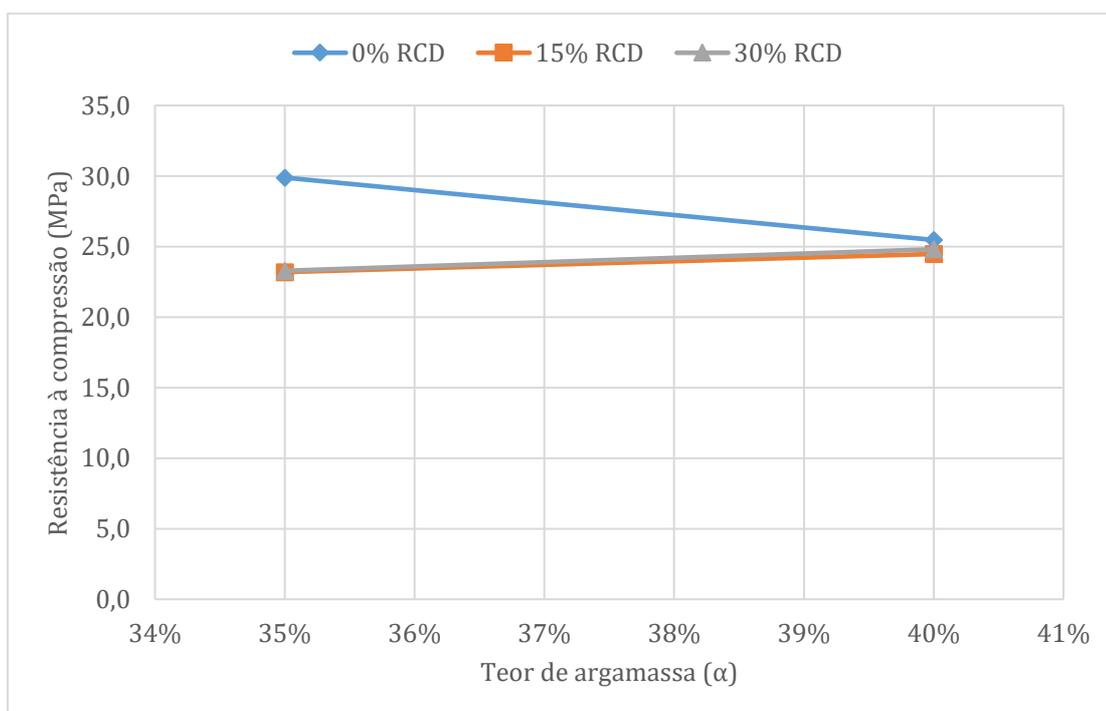


Figura 31 – Resistência à compressão x teor de argamassa para os *pavers*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 31 percebe-se que para os *pavers* a diferença entre as curvas 15% RCD e 30% RCD no intervalo de teor de argamassa estudado foi de 6%. Isso pode estar relacionado com o modo de produção dos *pavers* empregado nessa pesquisa, o qual aparenta minimizar os efeitos negativos que os agregados reciclados causam na resistência à compressão.

A Figura 32 apresenta no gráfico a resistência à compressão em função da substituição de agregados naturais por reciclado para cada teor de argamassa ($\alpha = 35\%$ e $\alpha = 40\%$).

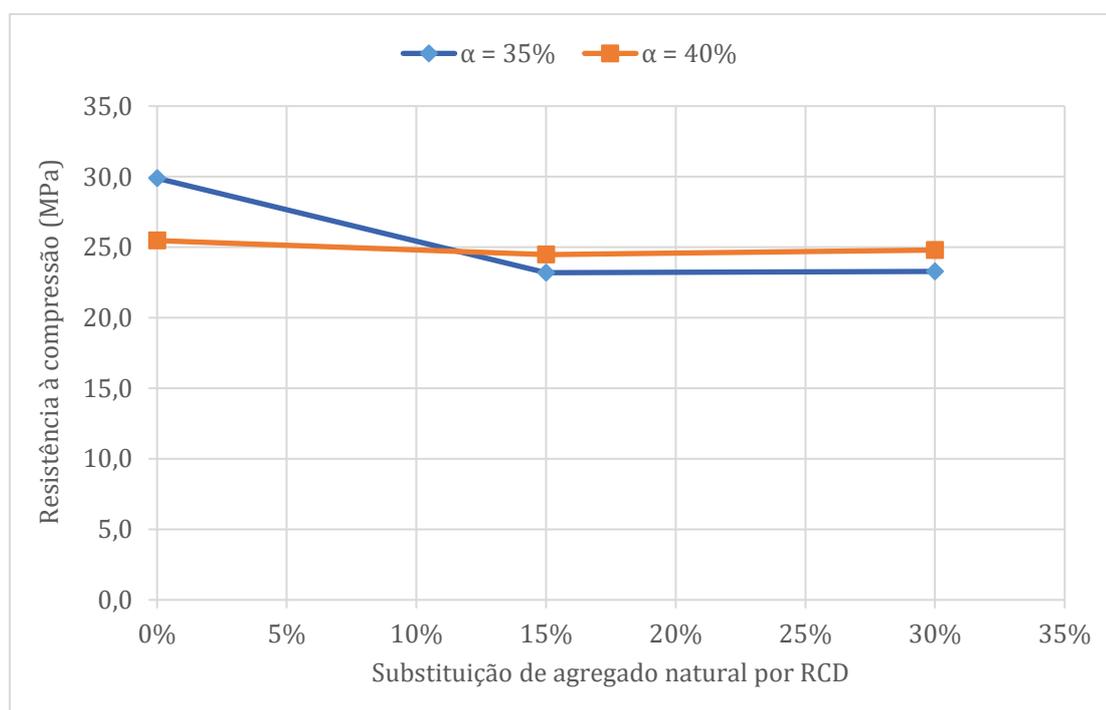


Figura 32 – Resistência à compressão x substituição de agregado natural por RCD, para os *pavers*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 32 mostra que para o teor de argamassa de 40% não houve diferença significativa entre a resistência dos *pavers* com ou sem agregado reciclado, para o teor de argamassa de 35% em que o *paver* sem agregado reciclado tem resistência 22% maior que com agregado de RCD.

A ABNT NBR 16416:2015 solicita que os ensaios de resistência à compressão de peças porosas sejam feitos nos *pavers*, entretanto o ensaio mais comum para resistência à compressão do concreto é feito em corpos de prova cilíndricos. Esta pesquisa buscou uma relação entre a resistência do cilindro e do *paver*.

A Figura 33 mostra a relação entre a resistência dos corpos da prova cilíndricos pela resistência dos *pavers*. Os pontos do gráfico são as resistências de cada corpo de prova cilíndrico pareada com a resistência de cada *paver* do respectivo traço. Por exemplo, para o traço REF35 os pares ordenados são: (29,1, 31,0), (29,1, 29,2), (29,1, 29,5), (26,6, 31,0), (26,6, 29,2) e (26,6, 29,5). Os resultados que foram descartados nas Tabelas 13 e 16 não foram considerados nessa avaliação.

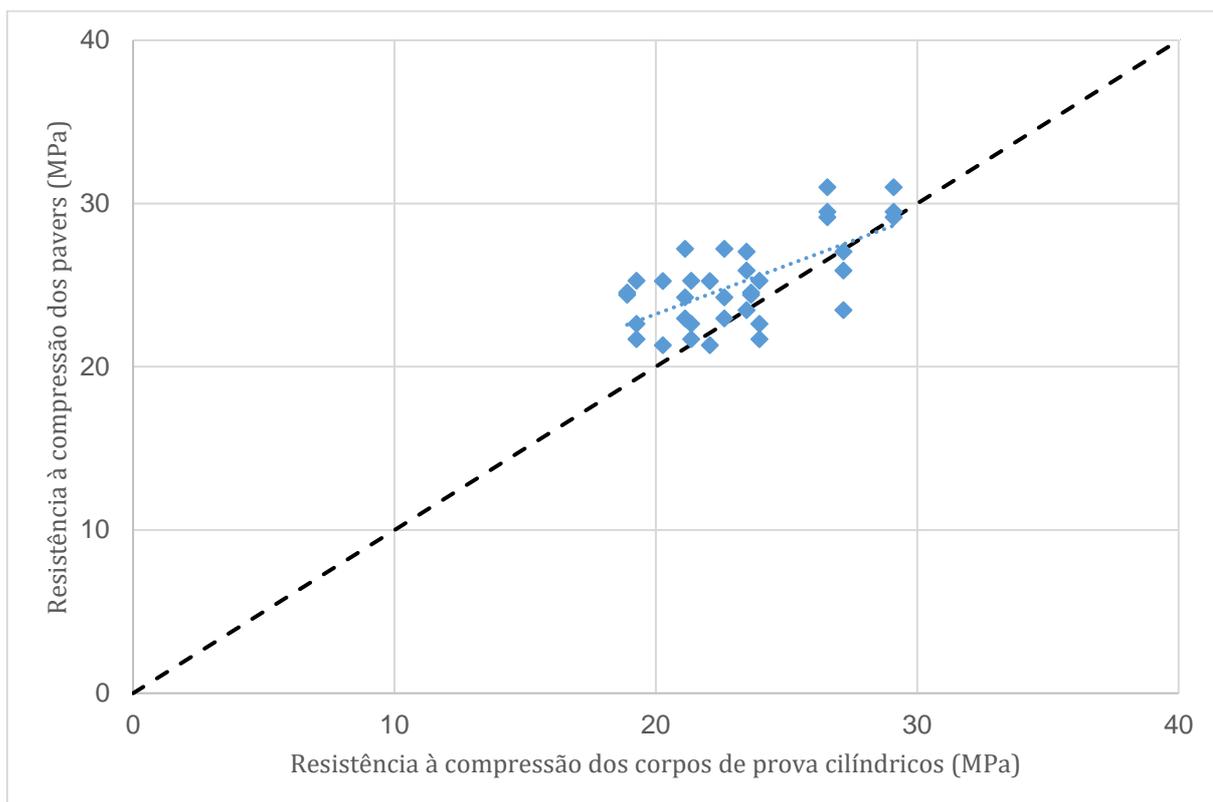


Figura 33 – Resistência à compressão dos *pavers* x resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos dos concretos estudados, em MPa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se, pela Figura 33, que a resistência à compressão dos *pavers* foi maior que a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos em 80% dos casos. A resistência à compressão do cilindro pode variar 16% para mais ou 24% para menos quando comparada com a resistência à compressão do *paver*.

A partir da mesma análise entre a resistência à compressão dos *pavers* (R_p) e a resistência à compressão dos corpos cilíndricos (R_c) com uso das médias, é possível obter uma equação que correlaciona esses parâmetros (Figura 34).

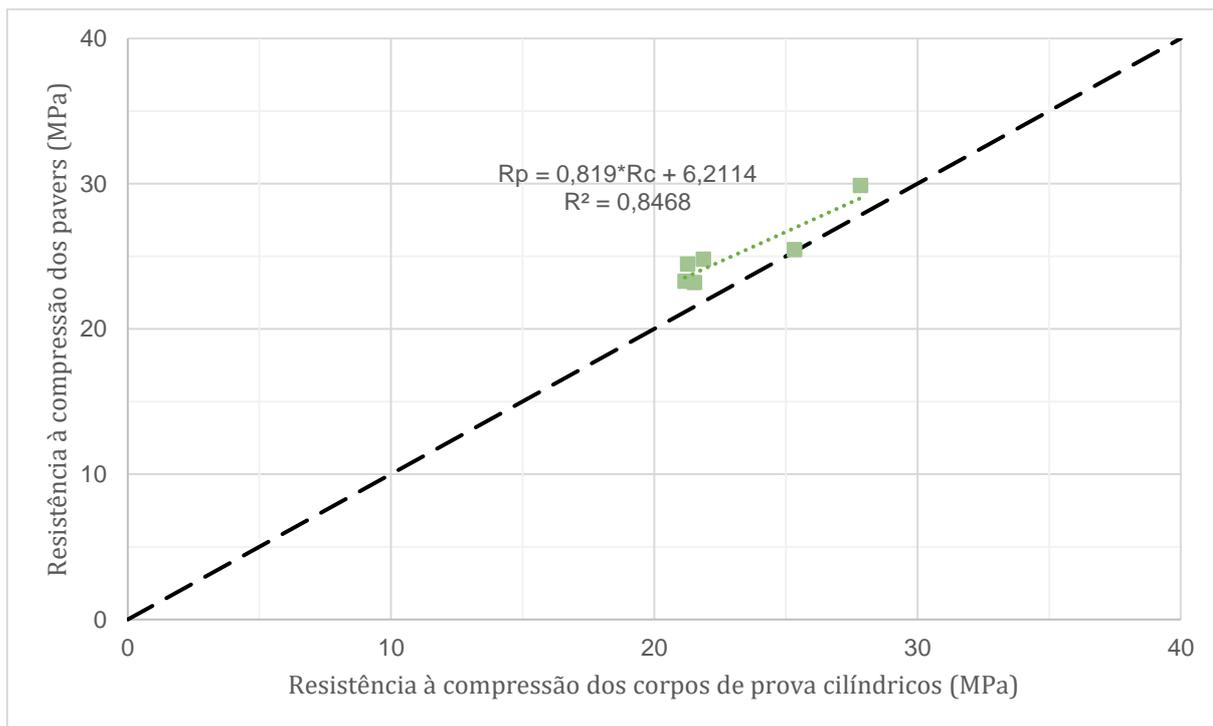


Figura 34 – Média da resistência à compressão dos *pavers* x médias da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos dos concretos estudados, em MPa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando apenas as médias das resistências à compressão dos concretos estudados, a resistência dos *pavers* é maior que a resistência dos corpos de prova cilíndricos em 100% dos pontos e a resistência dos *pavers* foi, em média, 9% maior que a resistência dos cilindros. Logo, os resultados do ensaio de resistência à compressão pelo cilindro estão a favor da segurança para a faixa de resistência estudada.

4.2 Índice de vazios, absorção e massa específica do concreto

Os resultados dos ensaios de índice de vazios, absorção e massas específicas dos concretos dos diferentes traços são apresentados na Tabela 21. Os valores na tabela são as médias obtidas para cada traço.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de índice de vazios, absorção e massa específica dos concretos estudados.

	REF35	35/15RCD	35/30RCD	REF40	40/15RCD	40/30RCD
Massa Específica Seca (g/cm³)	2,27	2,19	2,16	2,29	2,21	2,15
Massa Específica Real (g/cm³)	2,58	2,56	2,51	2,59	2,53	2,52
Absorção	5,3%	6,6%	6,5%	5,2%	5,8%	6,7%
Índice de vazios	11,9%	14,5%	14,1%	11,9%	12,8%	14,5%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A massa específica real é definida como a massa específica que desconsidera os vazios permeáveis do concreto (ABNT NBR 9778:2009). Isso faz com que o valor da massa específica seca seja de 12% a 15% menor que o valor da massa específica real. Como o escopo dessa pesquisa é concreto poroso, a massa específica seca é um parâmetro melhor para caracterizá-lo.

Houve uma tendência de que quanto maior a substituição de agregado natural por agregado reciclado menor a massa específica seca. Isso ocorreu para os dois teores de argamassa (α) estudados (Figura 35).

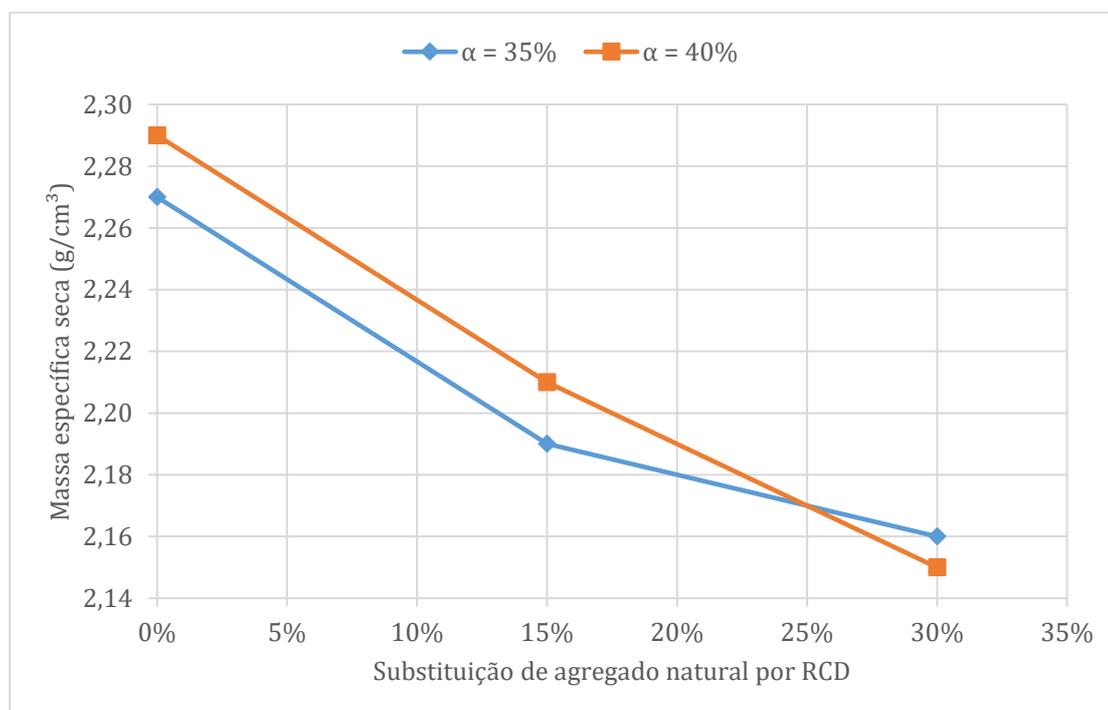


Figura 35 – Massa específica seca x porcentagem de substituição de agregado natural por agregado de RCD para os teores de argamassa 35% e 40%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A redução da massa específica quando da substituição de agregado natural por agregado reciclado é explicada pelo fato de o agregado de RCD ter uma massa específica menor. A substituição de 30% do agregado implicou uma redução da massa específica de 5% para o teor de argamassa de 35% e de 6% para o teor de 40%.

Os concretos porosos dessa pesquisa tiveram índice de vazios entre 11% e 15% e absorções que variaram entre 5% e 7%. Não houve uma tendência na absorção e no índice de vazios dos concretos de teor de argamassa 35%. Entretanto, para o teor de argamassa de 40% quanto maior a quantidade de RCD no concreto, maiores foram a absorção e o índice de vazios.

A Figura 36 consolida os resultados do índice de vazios por porcentagem de substituição de RCD e do teor de argamassa ($\alpha = 35\%$ e $\alpha = 40\%$).

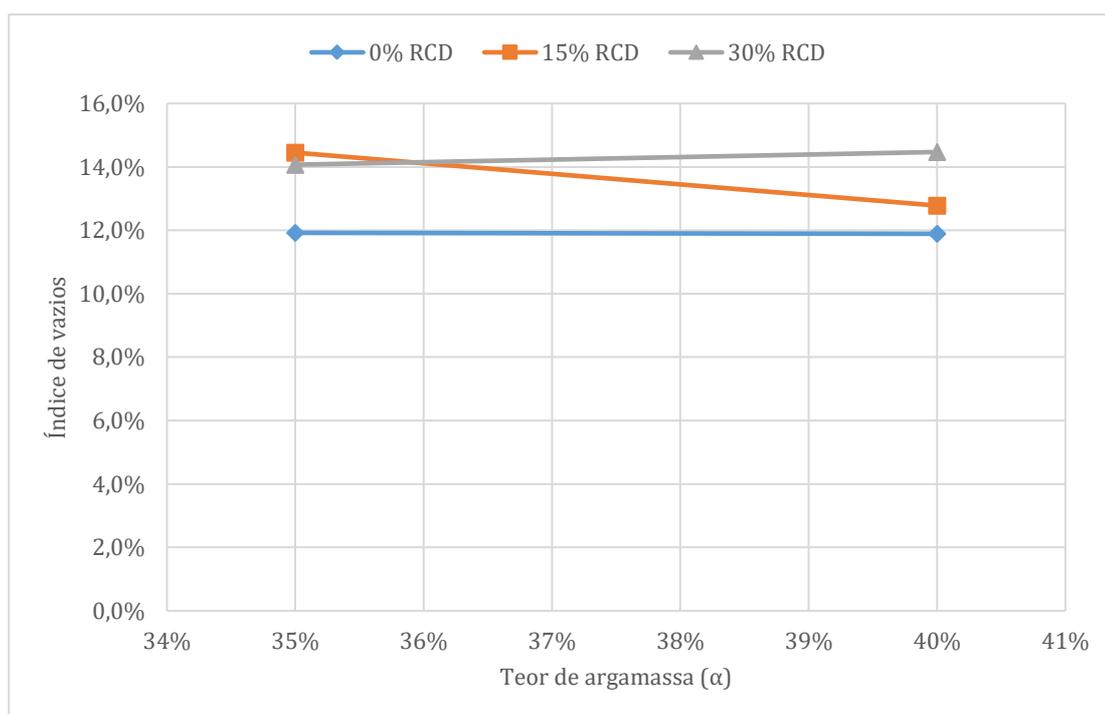


Figura 36 – Índice de vazios x teor de argamassados concretos estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A substituição de agregado natural por reciclado tem um impacto maior no índice de vazios do que a mudança no teor de argamassa. O gráfico mostra que a substituição de 30% dos agregados naturais por reciclados, em qualquer um dos teores de argamassa, corresponde a um aumento de 21% no índice de vazios.

Outra análise feita demonstra que, para o teor de argamassa de 35%, as substituições de 15% e de 30% de agregado natural por reciclado tiveram valores de índice de vazios próximos. Isso significa que para esse teor de argamassa, essas substituições impactam similarmente a porosidade.

Verifica-se pela Figura 36 que há uma proporcionalidade entre a substituição de agregado e o índice de vazios para o teor de argamassa de 40%. Para o teor de 35% essa mesma proporcionalidade não foi identificada. Todavia, percebe-se que a maior diferença do índice de vazios entre os diferentes teores de argamassa foi a que ocorreu para os traços 35/15RCD e 40/15RCD.

A relação entre índice de vazios e resistência à compressão é primordial para os concretos porosos. Correlacionou-se a resistência à compressão dos cilindros e a resistência à compressão dos *pavers*, de ambos os teores de argamassa, com os respectivos índices de vazios. Essa relação pode ser visualizada na Figura 37.

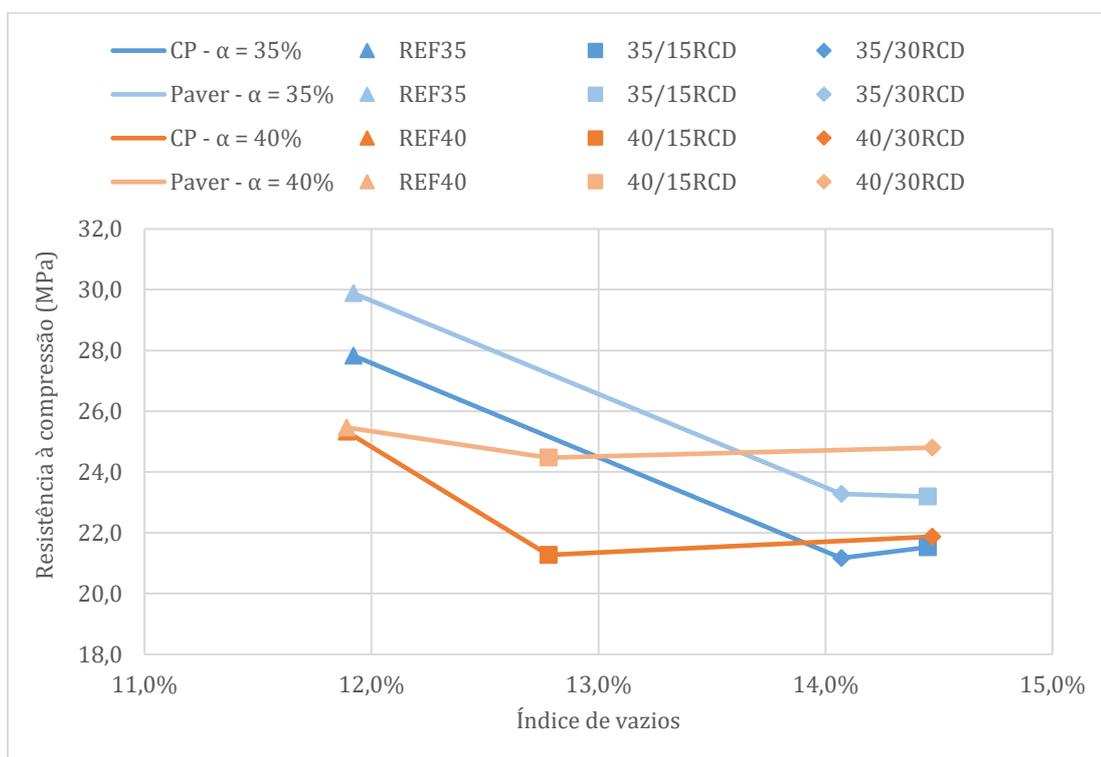


Figura 37 – Resistência à compressão x índice de vazios dos concretos estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, para o teor de argamassa 35%, a substituição de 30% do agregado natural por reciclado incrementou o índice de vazios em 18% e reduziu a resistência à compressão em 23,9%. Para esse teor

de argamassa, a curva referente aos *pavers* é similar a dos corpos de prova cilíndricos, com a diferença que a curva dos *pavers* está deslocada 2 MPa acima.

O concreto 35/15RCD obteve índice de vazios próximo ao 35/30RCD, diferença de 3%. Isso implicou uma variação de -1,7% na resistência à compressão, para o corpo de prova cilíndrico, e de 0,40%, para o *paver*. Logo, conclui-se que, para o teor de argamassa 35%, as substituições de 15% ou de 30% de agregado natural por agregado reciclado produzem efeitos similares no concreto.

A substituição de 30% dos agregados naturais por reciclados no teor de argamassa de 40% provocou um aumento de 21,7% no índice de vazios e diminuição de 13,6% na resistência à compressão no corpo de prova cilíndrico. Para os *pavers*, a redução da resistência à compressão foi de 2,6%.

Para o teor de argamassa 40%, a variação de resistência à compressão entre os traços 40/15RCD e 40/30RCD é pequena (2,8% para os corpos de prova cilíndricos e 1,37% para os *pavers*), entretanto o índice de vazios desses traços variou em 13,2%. Isso significa que o fator limitante na resistência desses concretos não foi a quantidade de poros e sim a resistência do agregado reciclado.

4.3 Permeabilidade do concreto

Os resultados do ensaio de permeabilidade são apresentados na Tabela 22 que é composta pelas médias das 3 leituras de cada corpo de prova e pela média final do concreto. Os valores do desvio padrão e o coeficiente de variação também fazem parte da tabela. A última coluna corresponde à variação da permeabilidade para o traço de referência de cada teor de argamassa.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de permeabilidade.

TRAÇO	Permeabilidade (mm/s)			Média	D.P.	C.V.	Variação p/ o traço REF
	CP1	CP2	CP3				
REF35	0,16	0,18	0,42*	0,17	0,01	7,38%	0%
35/15RCD	1,60	1,67	1,42*	1,64	0,03	2,01%	878%
35/30RCD	0,97	0,75*	1,09	1,03	0,06	5,71%	515%
REF40	0,29	0,16*	0,24	0,26	0,02	8,90%	0%
40/15RCD	0,49	0,48	0,64*	0,48	0,01	1,25%	83%
40/30RCD	0,40	0,54	1,27*	0,47	0,07	13,99%	78%

D.P. = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação; *valores descartados

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado de um corpo de prova de cada traço teve que ser descartado da análise para minimizar o coeficiente de variação, que mesmo assim chegou a 14% no traço 40/30RCD.

Percebe-se que o impacto da substituição por RCD é maior no teor de argamassa de 35%, tendo um aumento de até 878% ao se considerar o concreto 35/15RCD em relação ao REF35. Para o teor de argamassa de 40% o aumento da permeabilidade foi menor, chegando a 83%.

De acordo com a ABNT NBR 16416:2015 a permeabilidade mínima que um concreto poroso deve ter é de 1 mm/s. O gráfico da Figura 38 que correlaciona a porcentagem de RCD com a permeabilidade compara como os traços estudados se comparam a esse valor.

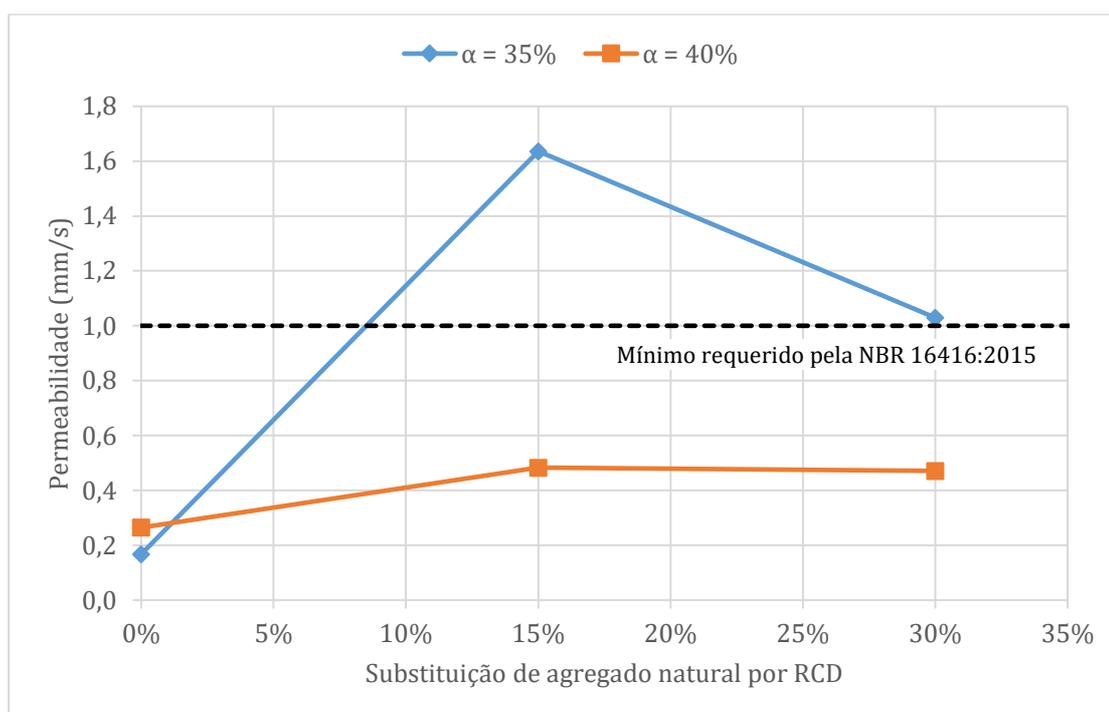


Figura 38 – Permeabilidade em função da substituição de agregado natural por agregado reciclado para os teores de argamassa 35% e 40%.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que só atendem ao parâmetro da ABNT NBR 16416:2015 os traços 35/15RCD e 35/30RCD, que foram os traços com maior ganho da permeabilidade quando da substituição de agregado natural por agregado reciclado.

Esse aumento expressivo na permeabilidade pode acontecer devido aos poros internos dos agregados reciclados que aumentam a conexão dos poros do concreto, permitindo a água fluir por mais caminhos.

A Figura 39 mostra a relação entre o índice de vazios e a permeabilidade dos concretos estudados.

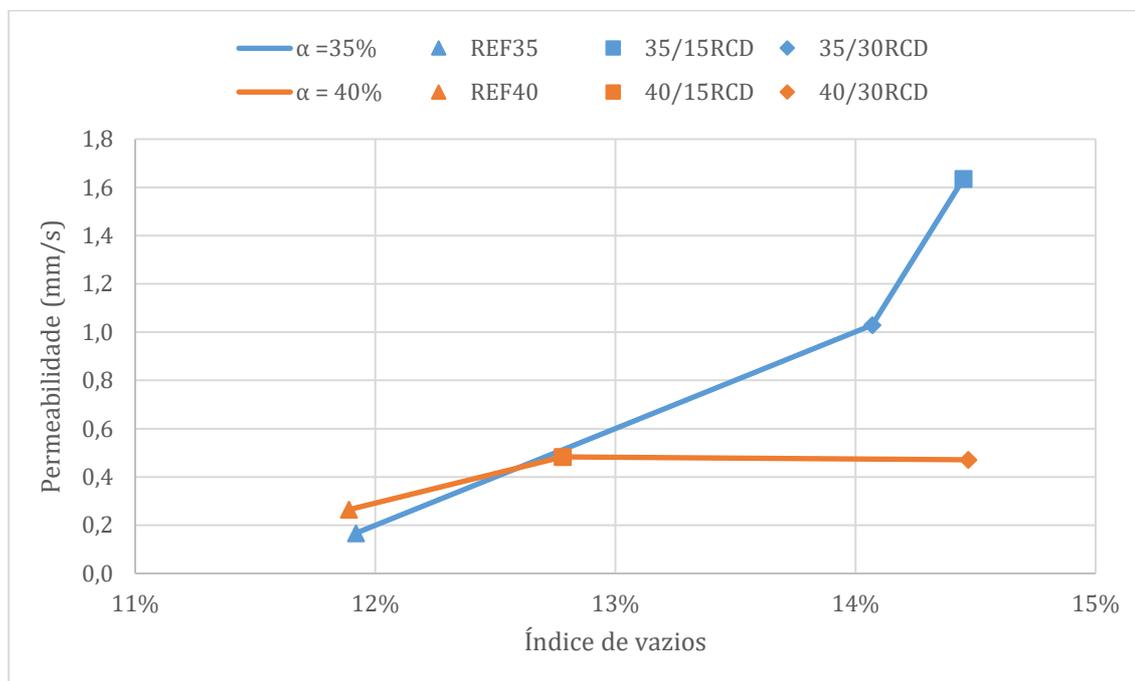


Figura 39 – Índice de vazios x permeabilidade dos concretos estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o teor de argamassa 35% a permeabilidade aumentou proporcionalmente ao índice de vazios. Não foi possível observar a mesma tendência no teor de argamassa 40%. Neste último, há uma diferença entre os índices de vazios, mas a permeabilidade praticamente se manteve, o que significa que o total de vazios não foi o único parâmetro a influenciar a permeabilidade. Sabe-se que o tamanho e a forma desses vazios têm um impacto significativo na permeabilidade dos concretos porosos.

A Figura 40 mostra a relação entre a resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos e a permeabilidade para os dois teores de argamassa.

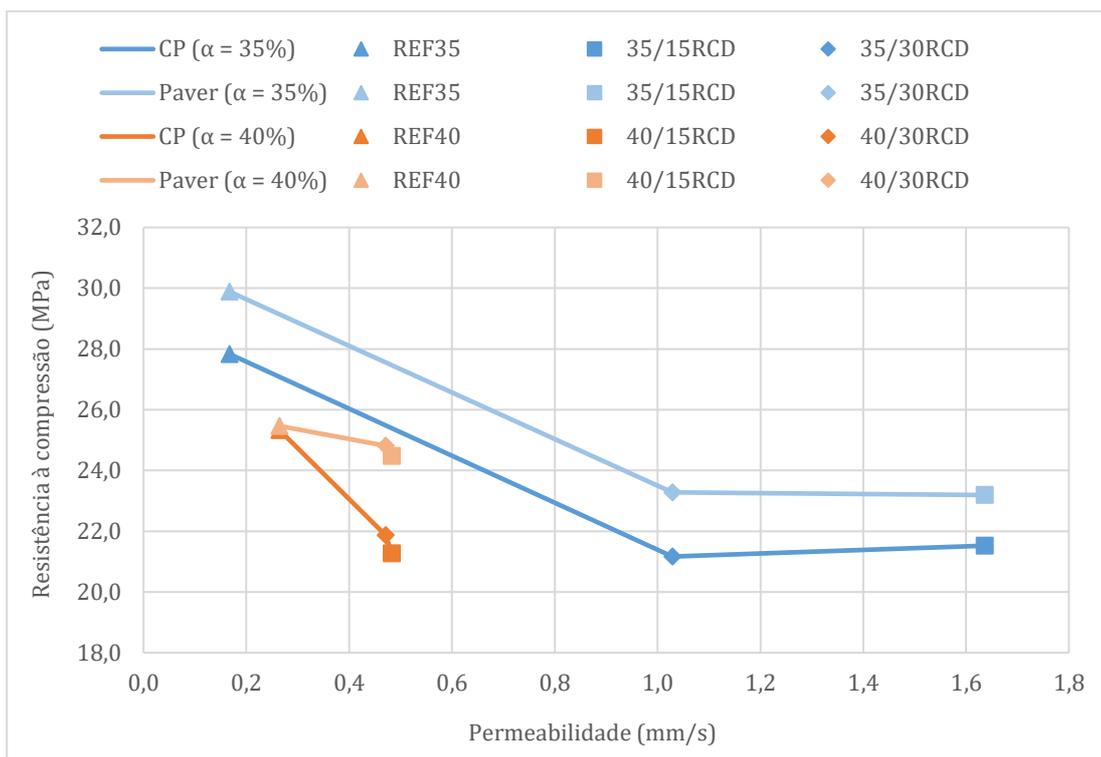


Figura 40 – Resistência à compressão x permeabilidade dos concretos estudados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que as curvas são bem diferentes e o comportamento de cada teor de argamassa é bem distinto. Apesar de as resistências à compressão não variarem muito entre os concretos estudados, a permeabilidade foi significativamente alterada quando se mudou o teor de argamassa e quando se substituíram os agregados naturais por reciclados.

A curva referente ao teor de argamassa 35% dos *pavers* é similar a dos corpos de prova cilíndricos, mas deslocada 2 MPa acima. Entretanto, as curvas dos *pavers* e dos corpos de prova cilíndricos para o teor de argamassa 40% não possuem similaridade.

Conclui-se da Figura 40 que a substituição de agregado natural por agregado reciclado tem um impacto maior na permeabilidade do que a mudança do teor de argamassa. Entretanto, um teor de argamassa mais alto pode limitar o efeito de substituição do agregado, o que é justificado pela quantidade maiores de finos, limitando os tamanhos e as conexões dos poros do concreto.

4.4 Resistência à tração do concreto

Os resultados encontrados nesta pesquisa, utilizando o ensaio de resistência à tração por compressão diametral (fct,sp), são apresentados na Tabela 23. A tabela é composta dos resultados de cada corpo de prova rompido aos 28 dias e fct,sp adotado foi a média entre esses resultados. Também compõe a tabela: o desvio padrão e o coeficiente de variação. Alguns resultados destoaram e por isso foram descartados.

Tabela 23 – Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

Traço	Resistência à tração (MPa)				D.P.	C.V.
	CP 1	CP 2	CP 3	fct,sp		
REF35	3,48	2,55*	3,29	3,39	0,10	2,8%
35/15RCD	2,84	3,16	3,00	3,00	0,13	4,4%
35/30RCD	3,53	3,82	3,49	3,61	0,15	4,1%
REF40	3,81*	2,74	2,57	2,65	0,09	3,2%
40/15RCD	3,86	3,81	3,70	3,79	0,07	1,8%
40/30RCD	3,50	3,12	3,43	3,35	0,17	4,9%

D.P. = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variação; *valores descartados

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que não houve uma tendência em nenhum dos teores de argamassa estudados. O teor de argamassa 35% teve resultados de resistência piores quando se substituiu 15% dos agregados naturais por reciclados; mas, quando a substituição foi de 30%, a resistência à tração indireta aumentou. Em comparação, o teor de argamassa 40% teve os dois traços com agregados reciclados com resultados de resistência à tração indireta maiores que o traço apenas com agregados naturais. Os valores estimados para a tração à flexão a partir da média da tração à compressão diametral são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resistência à tração e estimativa da resistência à tração na flexão dos concretos estudados.

Traço	fct,sp (MPa)	fct,f (MPa)	fct,min (MPa)	fct,f/fct,min
REF35	3,39	4,36		2,2
35/15RCD	3,00	3,86	2,00	1,9
35/30RCD	3,61	4,65		2,3
REF40	2,65	3,41		1,7
40/15RCD	3,79	4,87	2,00	2,4
40/30RCD	3,35	4,30		2,2

Todos os concretos desta pesquisa obtiveram a resistência à tração na flexão mínima requerida pela ABNT NBR 16416:2015. Logo, do ponto de vista mecânico, todos os

concretos estudados podem ser utilizados para produção de pavimentos permeáveis moldados no local.

5 SIMULAÇÃO HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA

A simulação foi realizada com o *software Storm Water Management Model (SWMM)* desenvolvido pelo US EPA, *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos). Ele possui uma versão em português traduzida pelo Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e de um convênio entre a Eletrobras e a UFPB (ANTUNES, 2017).

A escolha do programa se deu pela capacidade de simular a quantidade de escoamento superficial, por integrar técnicas compensatórias como pavimentos permeáveis, pela sua abrangência em outras pesquisas (ANTUNES, 2017; FERREIRA, 2017 e MARTINS, 2017) e por ser de fácil aprendizagem e utilização.

O intuito dessa simulação é avaliar como o escoamento superficial será afetado quando da substituição do asfalto pelo concreto permeável e se será suficiente para mitigar de maneira satisfatória os alagamentos.

Nos últimos 10 anos, 3 grandes alagamentos aconteceram no campus Darcy Ribeiro da UnB, em abril de 2011 (CORREIO BRAZILIENSE, 2011), em outubro de 2012 (G1, 2012) e o último em abril de 2019 (JORNAL DE BRASÍLIA, 2019) (Figura 41).

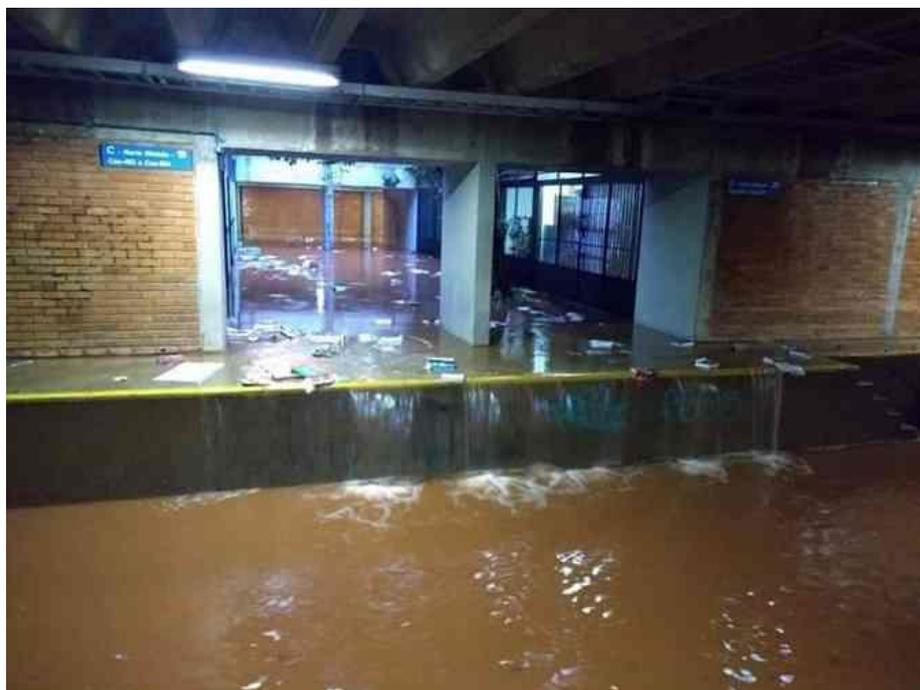


Figura 41 – Alagamento no subsolo do ICC

Fonte: <https://jornaldebrasil.com.br/cidades/unb-fica-alagada-apos-forte-chuva-no-df/> [Acessado em 29/04/2020 às 20:21]

Além desses eventos mais intensos, chuvas de menor intensidade tendem a acumular nos estacionamentos e nas pistas que cortam o campus Darcy Ribeiro. Esta pesquisa decidiu por simular a aplicação do pavimento permeável nos estacionamentos do Instituto Central de Ciências da UnB, devido ao valor histórico e simbólico do edifício para a universidade e por ele ser um dos edifícios mais afetados em grandes eventos de chuva.

A área de estudo escolhida para a simulação hidráulica e hidrológica está localizada na Asa Norte – Distrito Federal (Figura 42), e é composta pelos estacionamentos do Instituto Central de Ciências (ICC) da UnB, e parte da área entre eles (Figura 43).

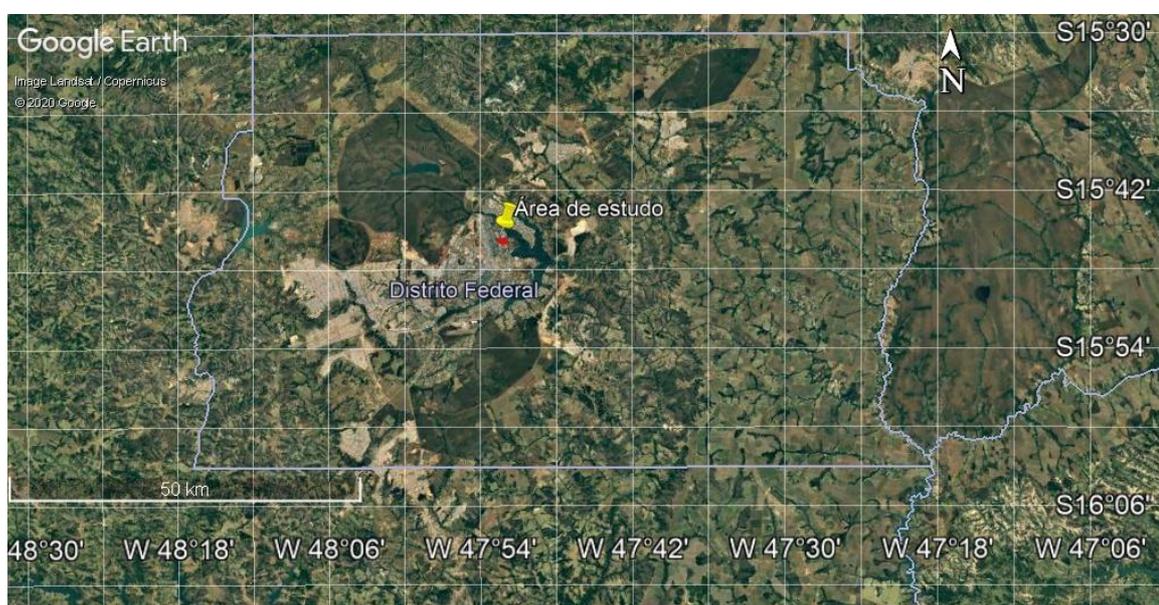
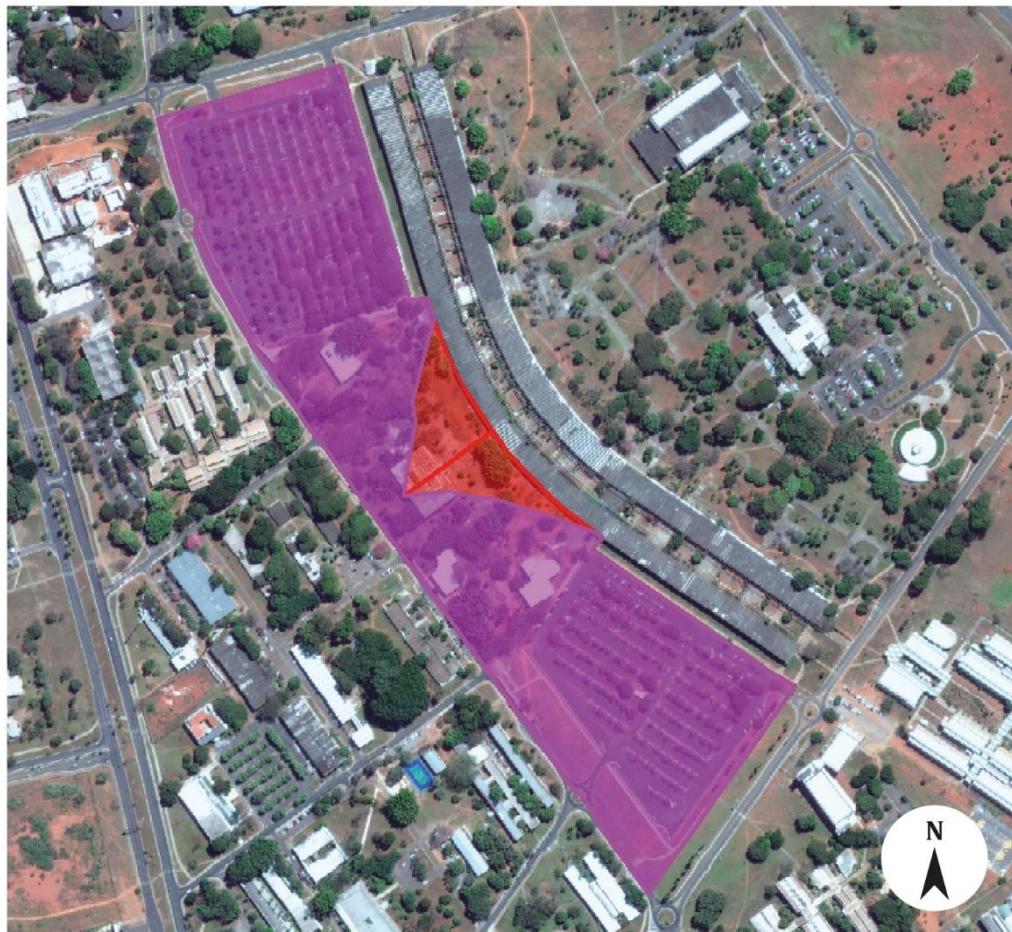


Figura 42 – Localização da área de estudo no DF.

Fonte: Google Earth 2020



LEGENDA

 Área de estudo

 Área não incluída na simulação



Figura 43 - Área de estudo para simulação hidráulica e hidrológica (Sem escala).

Fonte: Adaptado de <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/>>. Acessado em 16/07/2020 às 23:00²

A área de estudo possui 2295 m de perímetro e área igual a 138167 m², ou, aproximadamente, 13,8 hectares. Ela é composta dos dois maiores estacionamentos do campus e que raramente tem tráfego de veículos mais pesados, como ônibus. Isso torna a região o local ideal para aplicação dos pavimentos permeáveis.

A área apresentada em vermelho não entrou no estudo, pois, de acordo com o projeto da rede de drenagem (Anexo A), a precipitação dessa área é captada por uma rede independente, que segue por baixo do prédio do ICC, não influenciando o volume captado e escoado em nenhum dos estacionamentos.

² Foi utilizada a imagem Geoeye Terracap 2018, que apesar de não ser a mais recente, é a de melhor qualidade.

O autor entende que limitando a área de estudo apenas a esses estacionamentos há uma simplificação do problema de alagamento na região e um estudo mais aprofundado é de levar em consideração a bacia por inteira.

O escopo deste estudo é apenas de verificar como a substituição do pavimento convencional por permeáveis pode impactar o escoamento superficial e a rede de drenagem na área de aplicação.

5.1 Caracterização da área de estudo

Para realizar a simulação hidráulica e hidrológica é preciso caracterizar a área de estudo quanto a: clima, tipo de solo, hidrografia, uso e ocupação do solo, topografia, rede de drenagem e delimitar a área quanto as áreas de contribuição.

5.1.1 Clima

O clima de Brasília é caracterizado por uma estação seca e fria (maio a setembro) e outra quente e chuvosa (outubro a abril). A Figura 44 mostra a temperatura média ao longo do ano e a média das máximas e mínimas, com temperaturas variando de 10°C à 29°C.

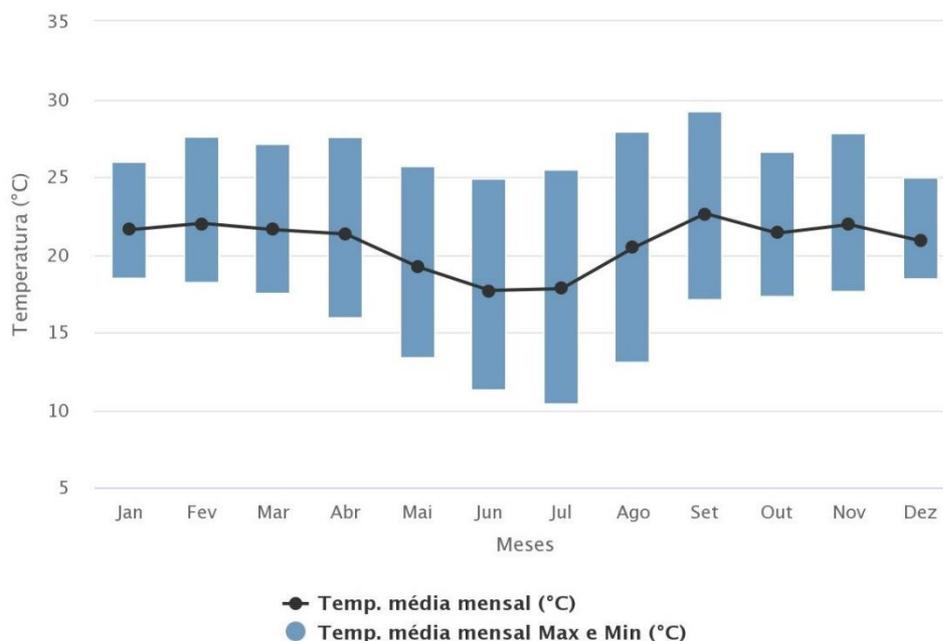


Figura 44 – Temperatura média mensal e média mensal das temperaturas máximas e mínimas de Brasília.

Fonte: PROJETEEE (2020)

Outra característica do clima de Brasília é a baixa umidade relativa do ar nos meses secos. A Figura 45 mostra a umidade média mensal e a média das máximas e mínimas mensais. Nos meses mais secos a umidade pode cair para menos de 40%, nos demais meses ela fica em pelo menos 70%.



Figura 45 – Umidade relativa média mensal e média mensal das umidades relativas máximas e mínimas de Brasília.

Fonte: PROJETEEEE (2020)

5.1.2 Tipo de solo

Os principais tipos de solo no DF são os latossolos e os cambissolos (Figura 46). Campos e Gonçalves (2015) descrevem o latossolo como formados a partir de rochas metamórficas ricas em quartzo e sílica e tendo capacidade moderada de infiltração, 10^{-4} m/s a 10^{-7} m/s.

Silva (2012) realizou ensaios de infiltração do solo no campus da UnB em local próximo ao que esta pesquisa pretende simular e obteve valores de infiltração de 10^{-5} m/s que de acordo com o autor representa uma elevada drenabilidade e capacidade de infiltração.

5.1.3 Hidrografia

A área de estudo se encontra dentro da bacia hidrográfica do Lago Paranoá (Figura 47) que possui 1058 km². Essa bacia se divide em 5 unidades hidrográficas, sendo que a área de estudo se encontra na UH 9 – Lago Paranoá.

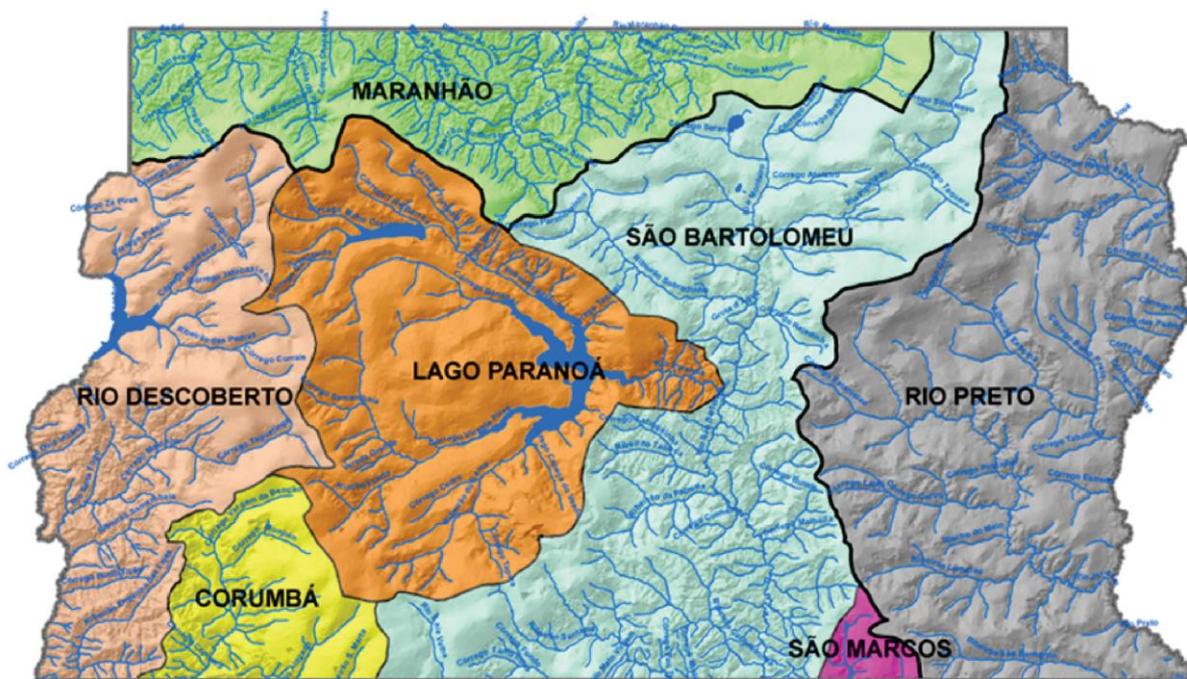


Figura 47 – Bacias hidrográficas do DF.

Fonte: ADASA (2018).

5.1.4 Uso e ocupação do solo

A área de estudo é caracterizada por dois grandes estacionamentos circundados por uma área gramada. Entre esses estacionamentos há uma área gramada com árvores grandes e densas, além disso nessa área se encontram o restaurante universitário e mais 3 edifícios de pequeno porte. Interligando todos os edifícios e os estacionamentos há um calçamento de concreto. A Figura 48 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra a classificação da área de estudo quanto seu uso e ocupação



LEGENDA

	Asfalto		Calçada		Edifícios
	Vegetação alta		Gramado		

Figura 48 – Mapa do uso e ocupação da área de estudo (Sem escala).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 25 detalha o tamanho, em m² e ha, e o percentual de cada tipo de uso. Observa-se que há uma concentração maior de áreas impermeáveis (59,3%) do que de áreas permeáveis (40,7%).

Tabela 25 – Detalhamento da área e do percentual de cada uso e ocupação.

Tipos de uso	Área (m²)	Área (Ha)	Atip/ Atot (%)
Asfalto	66280,42	6,63	44,0%
Calçada	17291,90	1,73	11,5%
Edifícios	5687,93	0,57	3,8%
Vegetação alta	36280,62	3,63	24,1%
Gramado	24988,77	2,50	16,6%
TOTAL	150529,64	15,05	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como modelo de infiltração de água no solo se adotou o cálculo do *Soil Conservation Service* (SCS) que requer um coeficiente chamado Curva Número (CN), obtido pela Tabela 26, que depende do tipo de solo (A, B, C ou D) e do uso e ocupação do solo.

Tabela 26 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas.

Utilização ou cobertura do solo	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura ruim	45	66	77	83
cobertura boa	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, em boas condições:				
Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
Com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m ²)	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:				
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: PDDU/DF (2009a).

Os valores de CN da tabela são para a seguinte condição de umidade: chuvas dos últimos 5 dias totalizaram 15 a 40 mm. Os tipos de solo são classificados de acordo com a Tabela 27. O solo da região de estudo se classifica como C.

Tabela 27 – Classificação dos solos para o modelo SCS.

Tipo	Descrição
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rocha nem camadas argilosas densificadas até a profundidade de 1,5 m.
B	Solos arenosos menos profundos que os do Tipo A e com teor de argila total inferior a 15%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5m.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até profundidades de 1,2 m.
D	Solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável, ou horizonte de seixos rolados.

Fonte: Adaptado de PDDU/DF (2009a).

5.1.5 Topografia

A topografia da região é importante para saber o fluxo da chuva e onde devem ser os lançamentos da rede de drenagem. A topografia da área de estudo (Figura 49) foi obtida a partir da ortofotocarta 121 disponibilizada pela Secretária de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEDUH) no site < http://mapas.segeth.df.gov.br/index_sirgas.htm >.



Figura 49 – Topografia da área de estudo (Sem escala).

Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de nível do arquivo são de 5 metros em 5 metros, como a região de estudo é pequena, utilizou-se o *software* Autodesk Civil 3D para gerar as curvas a cada 1 metro. A região apresenta uma inclinação suave variando 5 metros de altura em aproximadamente 138 metros de largura, o que gera uma declividade de 0,036 m/m, ou 3,6%.

5.1.6 Rede de drenagem

No Distrito Federal a drenagem urbana é competência da Companhia Urbanizadora da Nova Capital (Novacap). Foi solicitado à Novacap os cadastros da rede de drenagem da região e foram fornecidos os projetos que datam de 1970 e 1971. Esses projetos estão no Anexo A.

Na área central a rede possui diâmetros de 300 mm e de 500 mm e inclinações variáveis. Parte da rede capta água e leva até a rede de drenagem no estacionamento norte, outra parte leva a água até a rede no estacionamento sul e uma terceira parte vai para baixo do ICC.

No começo do estacionamento norte a rede possui diâmetro 1000 mm e segue com inclinação contínua de 0,3% até o lançamento em outra rede. No estacionamento sul a rede começa com 800 mm de diâmetro e na metade do caminho até o lançamento a rede aumenta para 1000 mm, com inclinações de 0,15% a 0,55%.

5.2 Dados inseridos no EPA-SWMM

Essa seção irá descrever os dados inseridos no *software* EPA-SWMM para a realização da simulação hidráulica e hidrológica. Os objetos do *software* utilizados nesta simulação foram: série temporal, controle por dispositivo de baixo impacto (LID), sub-bacias e nós de conexão.

5.2.1 Série temporal

A série temporal corresponde aos dados dos eventos de chuva inseridos no modelo. Esta pesquisa utilizou 4 eventos de chuva com tempos de retorno (TR) de 1 ano, 2 anos, 5 anos e 10 anos e duração de 24h, conforme recomendação do Manual de Drenagem (ADASA, 2018). Esses eventos foram calculados a partir da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) para a região de Brasília (Equação 12) (PDDU, 2008).

$$I = \frac{1574,70 \times T^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

I = intensidade da chuva (mm/h);
T = Tempo de retorno (anos);
t = duração do evento (minutos).

O hietograma de projeto foi obtido a partir dessa curva IDF, para cada um dos tempos de retorno, com chuvas de duração de 24h (1440 min) através do método dos blocos

alternados. Os blocos foram calculados em intervalos de 10 minutos e os hietogramas finais para cada tempo de retorno estão nas Figura 50 à Figura 53.

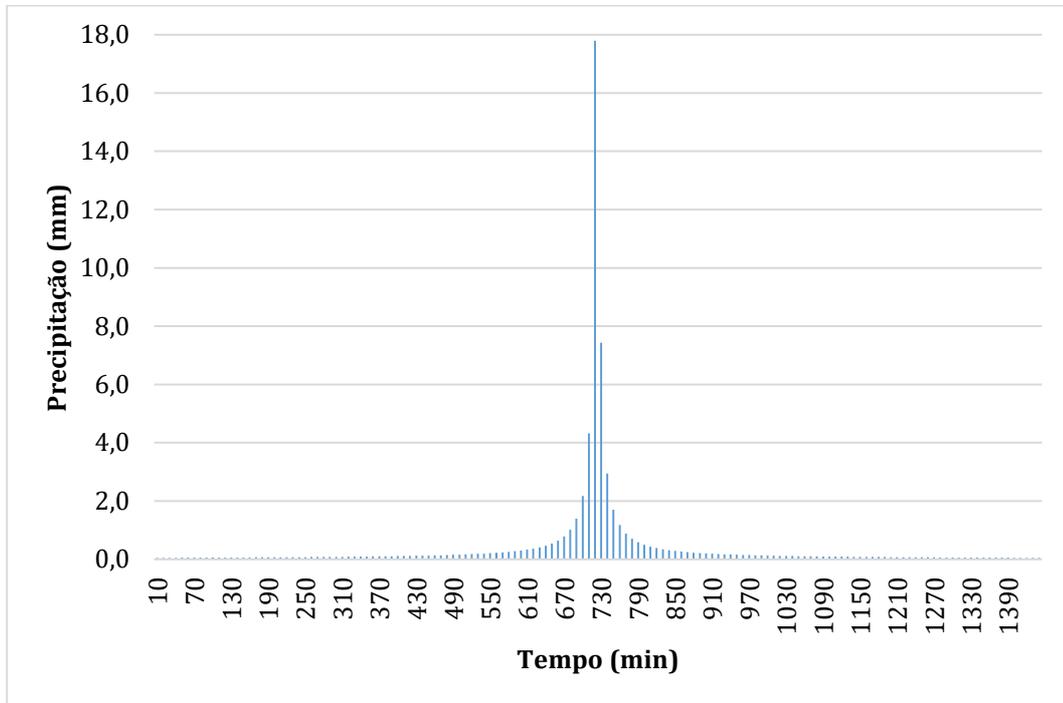


Figura 50 - Hietograma para TR = 1 ano, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).

Fonte: Elaborado pelo autor.

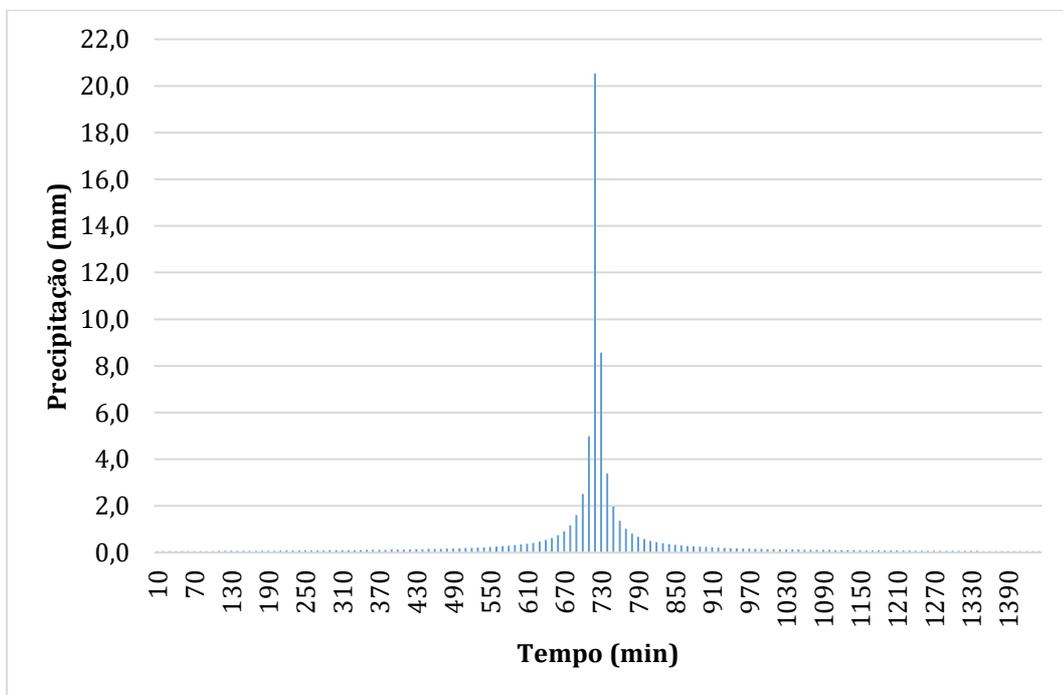


Figura 51 - Hietograma para TR = 2 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).

Fonte: Elaborado pelo autor.

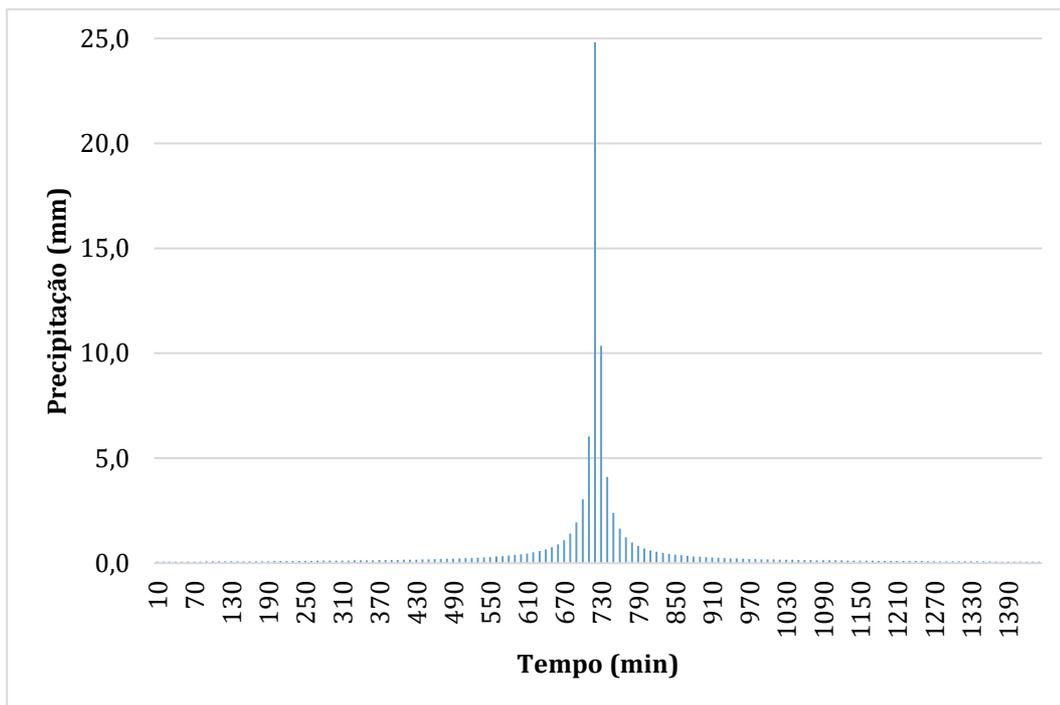


Figura 52 – Hietograma para TR = 5 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).

Fonte: Elaborado pelo autor.

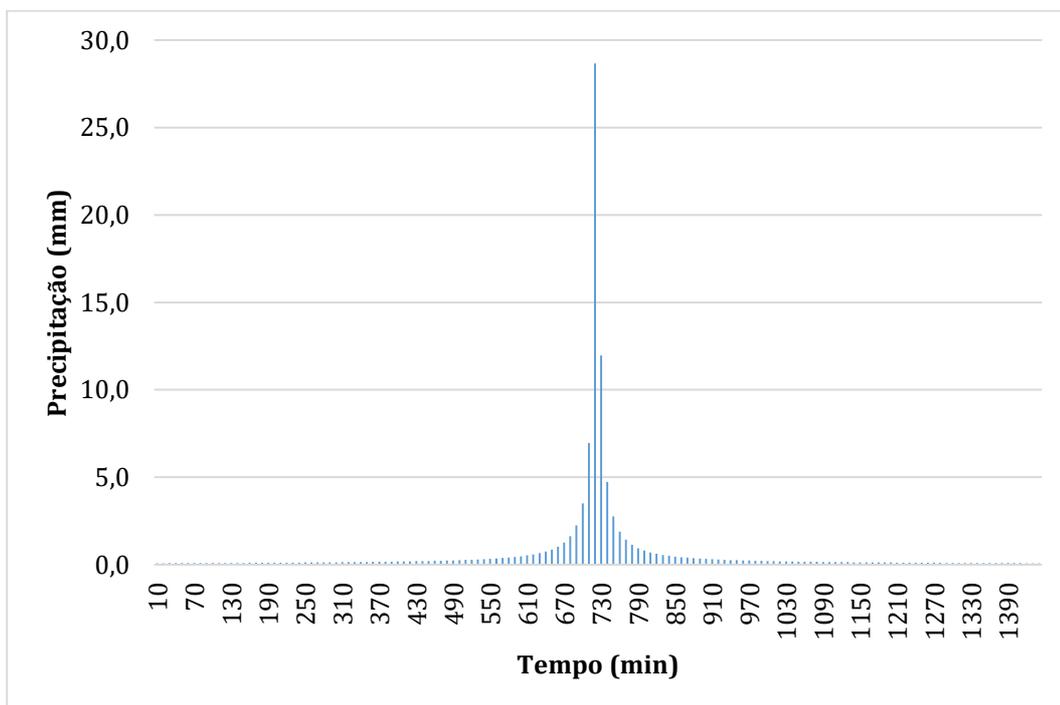


Figura 53 – Hietograma para TR = 10 anos, a partir da curva IDF de Brasília fornecida pelo PDDU (2008).

Fonte: Elaborado pelo autor.

O total precipitado em cada um dos eventos de chuva foi: 60,6 mm (TR = 1 ano), 70,0 mm (TR = 2 anos), 84,6 mm (TR = 5 anos) e 97,6 mm (TR = 10 anos). Em comparação com eventos de chuvas reais em Brasília, o último alagamento no ICC aconteceu em novembro

de 2019 e nesse mês a maior chuva acumulada em 24h foi de aproximadamente 100 mm (Figura 54). Logo, a chuva do TR=10 anos se aproxima desse evento.

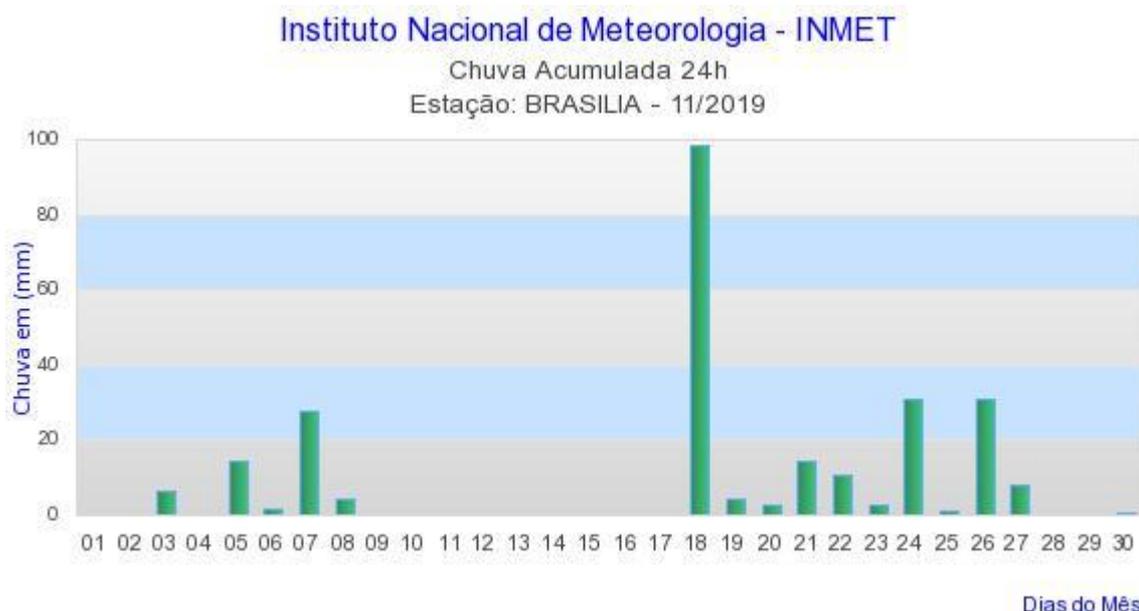


Figura 54 – Chuva acumulada em 24 para o período de novembro de 2019 na estação Brasília do INMET.
Fonte: INMET (2020)³.

5.2.2 Controle por dispositivo de baixo impacto (LID)

O dispositivo de controle de baixo impacto utilizado nesta pesquisa foi o “Pavimento Poroso”. O *software* divide esse dispositivo em 4 camadas, superfície, pavimento, base/armazenamento e dreno profundo, este último, opcional e não utilizado nesta pesquisa. A Figura 55 ilustra as camadas utilizadas.



Figura 55 – Detalhamento das camadas do pavimento permeável utilizadas na simulação e o subleito.
Fonte: Adaptado de Chandrappa e Biligiri (2016).

³ O gráfico foi obtido selecionando-se Chuva Acumulada em 24h para o período 11/2019 nos parâmetros diários do *site* <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/graficos>>

A Tabela 28 apresenta os valores adotados para os parâmetros de cada camada. Não foi utilizada camada de dreno.

Tabela 28 – Valores adotados para os parâmetros de cada camada.

Camada	Parâmetros	Valor
Superfície	Profundidade de armazenamento (mm)	0
	Cobertura Vegetal (Fração)	0
	Rugosidade Superficial (nº de Manning)	0,013
	Declividade Superficial (%)	3,6
Pavimento	Espessura (hpav) (mm)	100
	Índice de vazios (%)	14,1
	Superfície impermeável	0
	Permeabilidade (mm/h)	3704
	Fator de colmatação	0
Base/ Armazenamento	Altura (hbase) (mm)	350
	Índice de vazios (%)	32
	Taxa de infiltração (mm/h)	36
	Fator de colmatação	0

Para a cama de superfície, adotou-se um nº de Manning sugerido pelo próprio *software* para superfícies de concreto não polida⁴. A declividade adotada foi a mesma declividade da bacia 3,6%.

Para o pavimento, optou-se por simular um concreto moldado no local. Logo, escolheu-se o concreto 35/30RCD pois foi o concreto de maior resistência à tração na flexão (3,61 MPa) e que atingiu a permeabilidade mínima sugerida pela ABNT NBR 16416:2015. Essa mesma NBR prevê que a espessura mínima para pavimentos de concreto moldado no local e com tráfego de veículos é de 100 mm. Os valores de índice de vazios e de permeabilidade adotados foram retirados dos itens 4.3 e 4.4, e são, respectivamente, 14,1% e 1,03 mm/s.

Adotou-se um fator de colmatação nulo para se simular a capacidade inicial do pavimento permeável. Entende-se que a colmatação é um fator crítico na vida útil desse sistema, mas

⁴ Os valores de referência do software vêm de McCuen, R. et al. (1996), *Hydrology*, FHWA-SA-96-067, Federal Highway Administration, Washington, DC.

conforme Kia *et al.* (2017) ainda são necessários mais estudos para se conseguir estimar a perda de infiltração devido a colmatação.

Para pavimentos permeáveis, a camada de base também tem a função de armazenar a água das chuvas, funcionando como uma camada de armazenamento. O dimensionamento hidráulico dessa camada é feito através da Equação 13 (BALLARD et al, 2015):

$$h_{base} = \frac{d}{n} \times (R \times I - q) \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde:

h_{base} = espessura total da camada do reservatório (m);

d = duração da chuva (h);

n = índice de vazios da camada reservatório;

R = razão entre a área a ser drenada e a área do pavimento permeável;

I = intensidade da chuva (m/h);

q = taxa de infiltração no solo (m/h).

A escolha do material que irá compor a base do pavimento permeável, atuando como camada de armazenamento, envolve um dimensionamento estrutural que não faz parte do escopo desta pesquisa. Por isso, como índice de vazios da camada de armazenamento adotou-se o mínimo requerido pela ABNT NBR 16416:2015 que é de 32%, estando assim, a favor da segurança.

A razão entre a área a ser drenada e a área do pavimento permeável é igual a 16,84 ha/6,77 ha, que é 2,49. A taxa de infiltração do solo é 10^{-5} m/s, ou 0,036 m/h (SILVA, 2012). Com esses valores fixados montou-se uma tabela para várias durações de chuvas, calculadas pela Equação 12, com TR = 10 anos (Tabela 29).

Tabela 29 – Altura da camada de armazenamento para diferentes tempos e intensidades de chuva.

Duração da chuva (h)	Intensidade (mm/h)	Altura da camada de armazenamento (mm)
0,25	142,4	249
0,5	95,2	314
0,75	72,2	336
1	58,6	343
2	34,1	305

6	13,6	-41
24	4,1	-1935

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o dimensionamento hidráulico a camada de armazenamento deve ter pelo menos 343 mm para comportar uma chuva com TR = 10 anos e uma hora de duração. Esta pesquisa adotou então uma altura de 350 mm.

De acordo com a Tabela 2 o solo da região permite infiltração total, assumindo-se que o nível do lençol freático está há mais de 1,0 m da base do pavimento. Sendo assim, não é necessário o uso de drenos profundos.

5.2.3 Sub-bacias

A partir da topografia (Figura 49) e dos projetos da rede existente (Anexo A), é possível separar a área de estudo em duas áreas de contribuição, que foram chamadas de Estacionamento Norte e Estacionamento Sul, sendo cada área dividida em 4 sub-bacias de acordo com as captações da rede (Figura 56).



LEGENDA

 Estacionamento Norte - EN  Estacionamento Sul - ES

Figura 56 – Divisão das sub-bacias (sem escala).

Fonte: Elaborado pelo autor.

O detalhamento dos usos de cada sub-bacia, bem como suas áreas totais estão na Tabela 30. Desta Tabela percebe-se que áreas dos estacionamentos norte e sul são bem similares nos usos. Há uma diferença pequena nos tipos de uso, no estacionamento norte há uma maior concentração de vegetação alta, enquanto o estacionamento sul possui um gramado maior. A parte norte tem mais asfalto, ainda assim é possível observar que ambos os estacionamentos, norte e sul, têm proporções próximas de áreas impermeáveis e permeáveis.

Tabela 30 – Detalhamento dos usos das sub-bacias.

EN-1			ES-1		
Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)	Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)
Asfalto	0,66	22,9%	Asfalto	0,57	18,7%
Calçada	0,53	18,4%	Calçada	0,80	26,2%
Edifícios	0,15	5,0%	Edifícios	0,28	9,0%
Vegetação alta	1,46	50,5%	Vegetação alta	1,11	36,3%
Gramado	0,09	3,3%	Gramado	0,30	9,9%
TOTAL	2,90	100,0%	TOTAL	3,07	100,0%
EN-2			ES-2		
Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)	Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)
Asfalto	0,91	75,6%	Asfalto	0,91	67,1%
Calçada	0,00	0,0%	Calçada	0,01	0,7%
Edifícios	0,00	0,0%	Edifícios	0,00	0,2%
Vegetação alta	0,26	21,4%	Vegetação alta	0,13	9,9%
Gramado	0,04	3,0%	Gramado	0,30	22,1%
TOTAL	1,20	100,0%	TOTAL	1,36	100%
EN-3			ES-3		
Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)	Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)
Asfalto	0,89	79,3%	Asfalto	1,05	74,5%
Calçada	0,00	0,0%	Calçada	0,00	0,0%
Edifícios	0,00	0,0%	Edifícios	0,00	0,2%
Vegetação alta	0,21	18,5%	Vegetação alta	0,12	8,2%
Gramado	0,03	2,2%	Gramado	0,24	17,1%
TOTAL	1,13	100,0%	TOTAL	1,41	100,0%
EN-4			ES-4		
Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)	Tipo de uso	Área (ha)	Atip/ Atot (%)
Asfalto	0,83	62,6%	Asfalto	0,79	56,0%
Calçada	0,00	0,0%	Calçada	0,00	0,0%
Edifícios	0,00	0,0%	Edifícios	0,00	0,0%
Vegetação alta	0,21	15,6%	Vegetação alta	0,08	5,7%
Gramado	0,29	21,8%	Gramado	0,54	38,3%
TOTAL	1,33	100,0%	TOTAL	1,42	100,0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores adotados no SWMM para os parâmetros das sub-bacias são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Valores dos parâmetros adotados no SWMM para as sub-bacias

ESTACIONAMENTO NORTE				
PARÂMETROS	EN-1	EN-2	EN-3	EN-4
ÁREA (ha)	2,90	1,20	1,13	1,33
LARGURA (m)	248	68	59	71
% DECLIVIDADE	3,6	3,6	3,6	3,6
% IMPERMEÁVEL	46,3	75,6	79,3	62,6
n-PERMEÁVEL	0,011	0,011	0,011	0,011
n-IMPERMEÁVEL	0,15	0,15	0,15	0,15
PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO	OUTLET	IMPERVIOUS	IMPERVIOUS	IMPERVIOUS
INFILTRAÇÃO	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER
VALOR CN	87	93	94	89
ESTACIONAMENTO SUL				
PARÂMETROS	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
ÁREA (ha)	3,07	1,36	1,41	1,42
LARGURA (m)	247	70	64	59
% DECLIVIDADE	3,6	3,6	3,6	3,6
% IMPERMEÁVEL	53,8	68	74,7	56
n-PERMEÁVEL	0,011	0,011	0,011	0,011
n-IMPERMEÁVEL	0,15	0,15	0,15	0,15
PROPAGAÇÃO DO ESCOAMENTO	OUTLET	IMPERVIOUS	IMPERVIOUS	IMPERVIOUS
INFILTRAÇÃO	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER	CURVE_NUMBER
VALOR CN	88	91	92	88

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tipo de propagação utilizado “outlet” considera que os escoamentos das áreas impermeáveis e permeáveis vão diretamente para a saída da bacia, sem passar de uma área para a outra. Enquanto “impervious” aceita que a água da parte permeável vá para a parte impermeável antes de ser captada.

As larguras das bacias foram calculadas utilizando-se as Equações 14 a 16 retiradas de Collodel (2009). Os perímetros adotados foram 1199 m para o Estacionamento norte e 1355 m para o Estacionamento Sul.

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 14})$$

$$L_e = \frac{k_c \times \sqrt{A}}{1,12} \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (\text{Equação 15})$$

$$W = \frac{A}{L_e} \quad \text{(Equação 16)}$$

Onde:

kc = fator de compacidade;

P = perímetro da bacia (m);

A = área da bacia (m²);

Le = largura do retângulo equivalente (m);

W = largura da sub-bacia (m);

O *software* EPA-SWMM permite que os dispositivos de baixo impacto (LID), definidos pelo usuário, sejam atribuídos às sub-bacias. Ao fazer isso é preciso informar a área e a largura do dispositivo. Decidiu-se substituir todo o pavimento de ambos os estacionamentos por pavimentos permeáveis. A Tabela 32 mostra os valores adotados para as sub-bacias estudadas.

Tabela 32 – Valores atribuídos no SWMM aos pavimentos permeáveis aplicados nas sub-bacias.

ESTACIONAMENTO NORTE				
Parâmetros	EN-1	EN-2	EN-3	EN-4
Área (ha)	0,66	0,91	0,89	0,83
Largura (m)	51	68	59	71
% Área da sub-bacia com pav. permeável	22,9	75,6	79,3	62,6
ESTACIONAMENTO SUL				
Parâmetros	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
Área (ha)	0,57	0,91	1,05	0,79
Largura (m)	50	69	64	59
% Área da sub-bacia com pav. permeável	18,7	67,1	74,5	56

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se aplicar um dispositivo como o pavimento permeável é importante atualizar a área impermeável da sub-bacia. De acordo com o Manual do EPA-SWMM (ROSSMAN, 2008) ao se aplicar um dispositivo baixo impacto, a área deste não deve ser considerada para o cálculo da nova proporção de áreas permeáveis e impermeáveis (Figura 57).

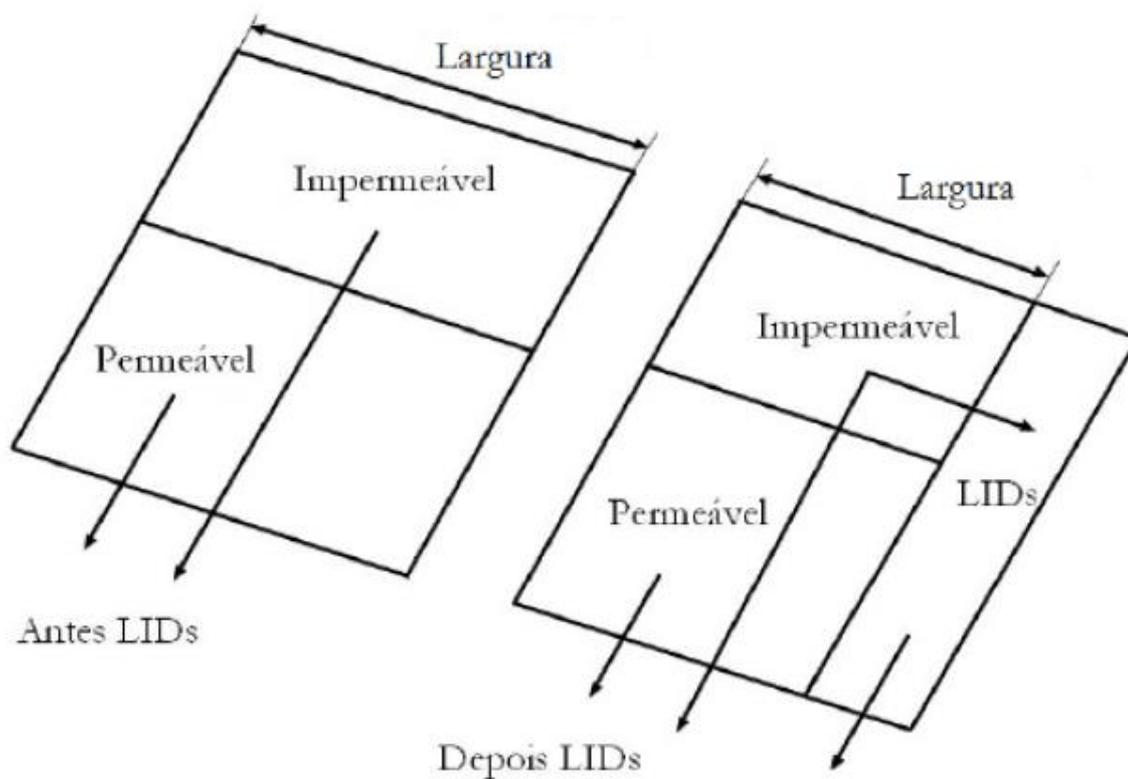


Figura 57 – Ajuste dos parâmetros da sub-bacia após a introdução do LID (*Low Impact Development* – Dispositivo de baixo impacto)

Fonte: ROSSMAN, 2010

Os percentuais ajustados das áreas impermeáveis para cada sub-bacia após a aplicação do pavimento permeável estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Percentual da área impermeável ajustada no SWMM para cada sub-bacia

ESTACIONAMENTO NORTE				
Parâmetros	EN-1	EN-2	EN-3	EN-4
% Área impermeável ajustada	30,3	0	0	0
ESTACIONAMENTO SUL				
Parâmetros	ES-1	ES-2	ES-3	ES-4
% Área impermeável ajustada	26	2,8	1	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.4 Rede de drenagem e poços de visitas

A partir do Anexo A foi desenhado a rede e os pontos de visita que seriam utilizados na simulação. No SWMM estes poços funcionam como pontos de captação de água. A Figura 58 mostra os locais de cada poço de visita (PV), os trechos da rede de drenagem (T) e o lançamento (L). As siglas “N” e “S” após a numeração correspondem à norte e sul, respectivamente.

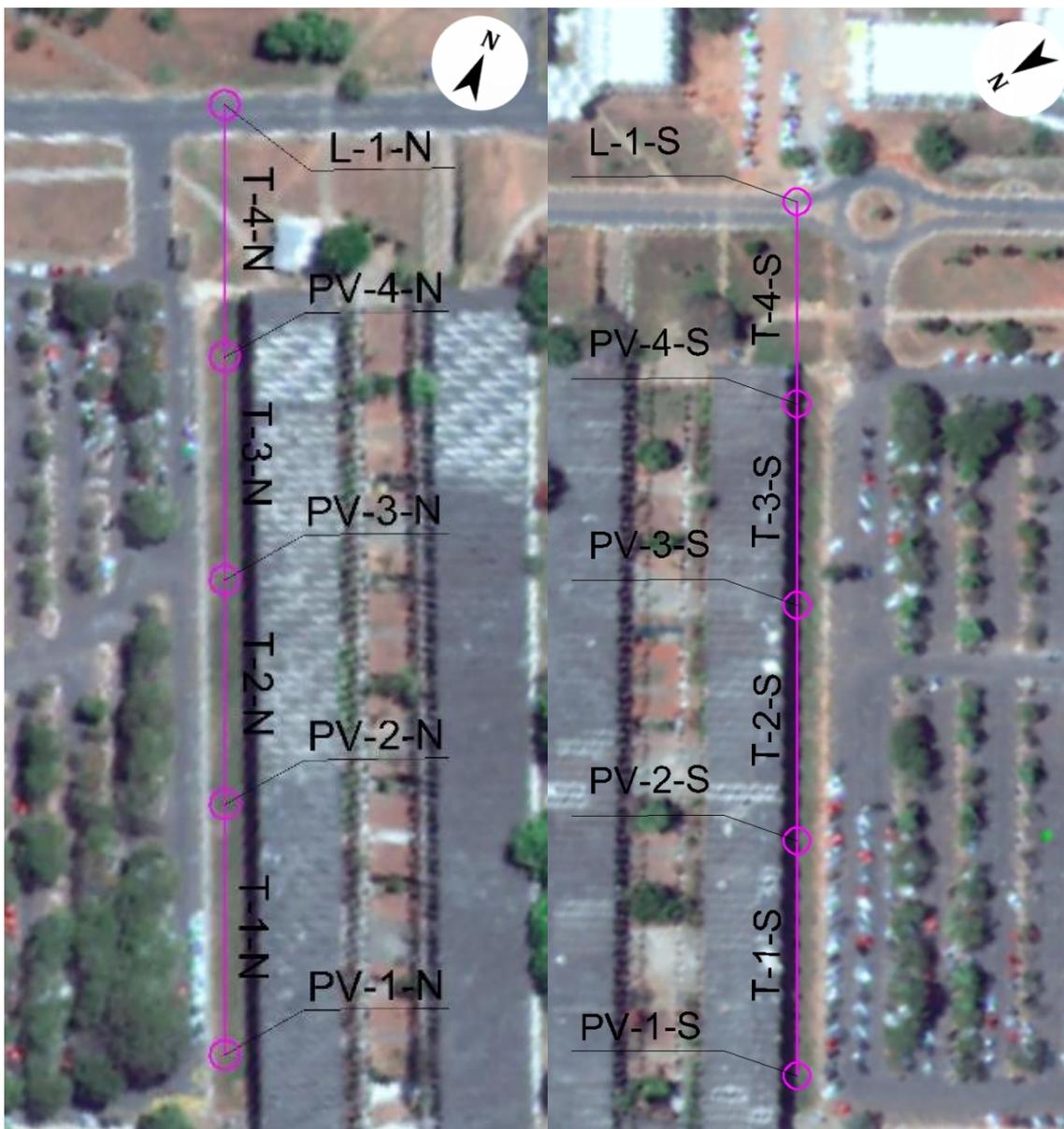


Figura 58 - Rede de drenagem do estacionamento norte (lado esquerdo) e rede de drenagem do estacionamento sul (lado direito)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também das **Erro! Fonte de referência não encontrada., Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foram obtidos os seguintes parâmetros para os poços de visita: cota de fundo e altura máxima (Tabela 34). Para a rede de drenagem foram obtidos: comprimento e diâmetro (Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35).

Tabela 34 – Parâmetros dos poços de visita

PV	Cota de fundo (m)	Altura Máxima (m)
PV-1-N	96,3	1,70
PV-2-N	96,1	1,93
PV-3-N	95,9	2,19
PV-4-N	95,7	2,61
L-1-N	95,5	1,00
PV-1-S	1025,7	1,63
PV-2-S	1025,6	1,80
PV-3-S	1025,2	2,01
PV-4-S	1025,0	2,43
L-1-S	1024,5	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 35 – Parâmetros das redes de drenagens

Rede	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
T-1-N	67,2	1000
T-2-N	60,4	1000
T-3-N	59,8	1000
T-4-N	67,9	1000
T-1-S	70,0	800
T-2-S	70,0	800
T-3-S	60,0	1000

T-4-S	60,0	1000
-------	------	------

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 34, os estacionamentos sul e norte possuem cotas muito divergentes. Uma explicação para esse fato pode ser a amarração dessa cota ser um ponto arbitrário não informado nos projetos, enquanto o estacionamento sul está amarrado ao nível do mar. Todavia, isso não interfere na análise, pois a maior finalidade dessas cotas, é propiciar ao *software* parâmetros de inclinação das redes de drenagem.

A rede de drenagem é toda em concreto, então, adotou-se o coeficiente de Manning de 0,015, conforme recomendado pelo Manual de Drenagem (ADASA, 2018) para todos os trechos. E foi escolhido o método de Onda Dinâmica para o cálculo de propagação de fluxo.

5.3 Resultados da modelagem hidráulica e hidrológica

Da Tabela 36 à Tabela 39 são consolidados os resultados individuais de todas as sub-bacias e da área total para: coeficiente de escoamento, volume escoado e vazão de pico, além das relações, entre volume escoado do pavimento permeável e impermeável e entre vazão de pico do pavimento permeável e impermeável.

Da Figura 59 até a Figura 62 são exibidos os hidrogramas do escoamento superficial total da área total simulada para cada tempo de retorno (1 ano, 2 anos, 5 anos e 10 anos), para os cenários com pavimento permeável e impermeável. Nos hidrogramas foram destacados os pontos e valores do pico de escoamento. Para melhor visualização, restringiu-se os gráficos ao período de 11 horas às 14 horas.

Tabela 36 – Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 1 ano

Sub-bacia	Cenário	Coefficiente de escoamento	Volume escoado (m ³)	Vol. Perm. / Vol. Imperm.	Pico do escoamento (l/s)	Pico Perm. / Pico Imperm.
EN-1	IMPERM.	0,75	1360	0,75	570	0,77
	PERM.	0,57	1020		438	
EN-2	IMPERM.	0,91	680	0,32	275	0,52
	PERM.	0,29	220		144	
EN-3	IMPERM.	0,93	650	0,31	270	0,50
	PERM.	0,28	200		136	
EN-4	IMPERM.	0,84	690	0,39	252	0,55
	PERM.	0,33	270		139	
ES-1	IMPERM.	0,79	1520	0,74	665	0,67
	PERM.	0,59	1120		445	
ES-2	IMPERM.	0,87	740	0,38	280	0,55
	PERM.	0,33	280		153	
ES-3	IMPERM.	0,90	790	0,33	314	0,51
	PERM.	0,30	260		160	
ES-4	IMPERM.	0,80	710	0,44	238	0,56
	PERM.	0,35	310		134	
TOTAL	IMPERM.	0,83	7140	0,52	2863	0,61
	PERM.	0,43	3680		1748	

Fonte: Elaborado pelo autor.

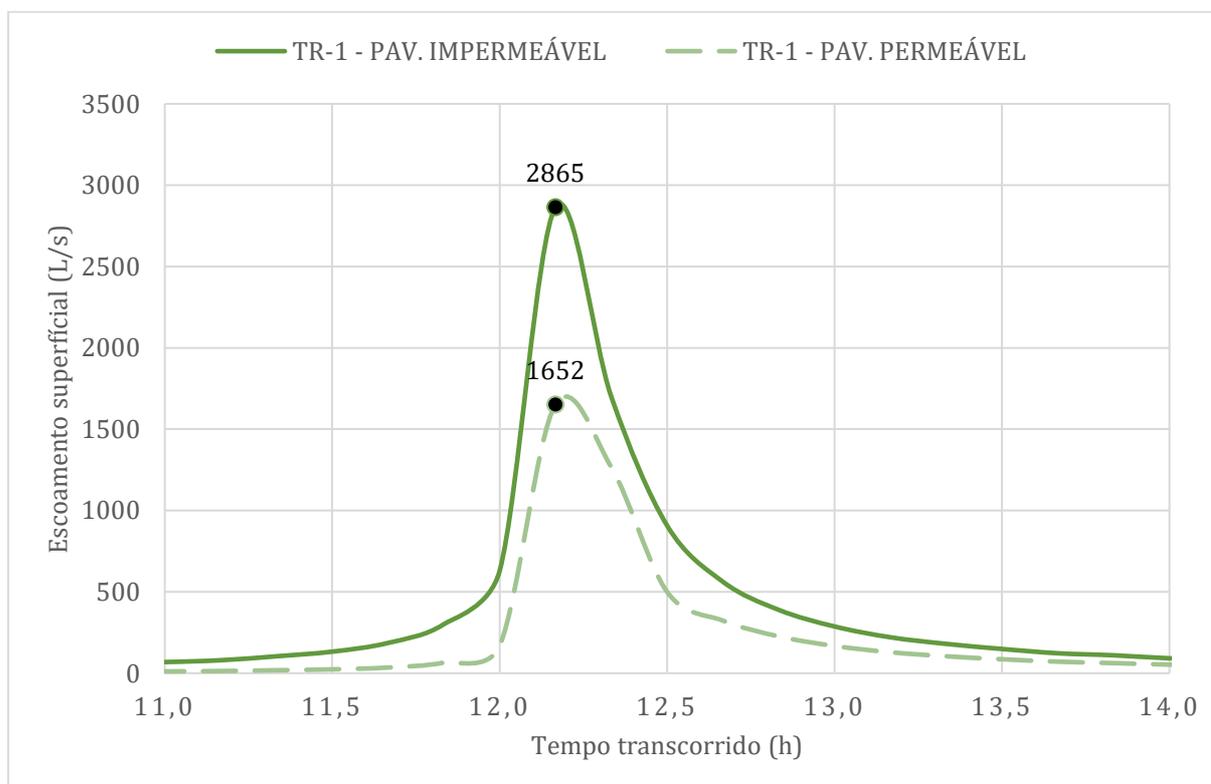


Figura 59 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 1 ano

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 2 anos

Sub-bacia	Cenário	Coefficiente de escoamento	Volume escoado (m ³)	Vol. Perm. / Vol. Imperm.	Pico do escoamento (l/s)	Pico Perm. / Pico Imperm.
EN-1	IMPERM.	0,77	1600	0,77	688	0,78
	PERM.	0,60	1230		534	
EN-2	IMPERM.	0,92	780	0,36	319	0,52
	PERM.	0,33	280		166	
EN-3	IMPERM.	0,94	750	0,33	312	0,50
	PERM.	0,31	250		155	
EN-4	IMPERM.	0,85	810	0,43	293	0,57
	PERM.	0,37	350		168	
ES-1	IMPERM.	0,81	1770	0,76	794	0,69
	PERM.	0,62	1350		547	
ES-2	IMPERM.	0,89	860	0,41	326	0,55
	PERM.	0,37	350		180	
ES-3	IMPERM.	0,91	910	0,35	366	0,51
	PERM.	0,32	320		186	
ES-4	IMPERM.	0,82	830	0,47	278	0,59
	PERM.	0,39	390		163	
TOTAL	IMPERM.	0,85	8310	0,54	3376	0,62
	PERM.	0,46	4520		2099	

Fonte: Elaborado pelo autor.

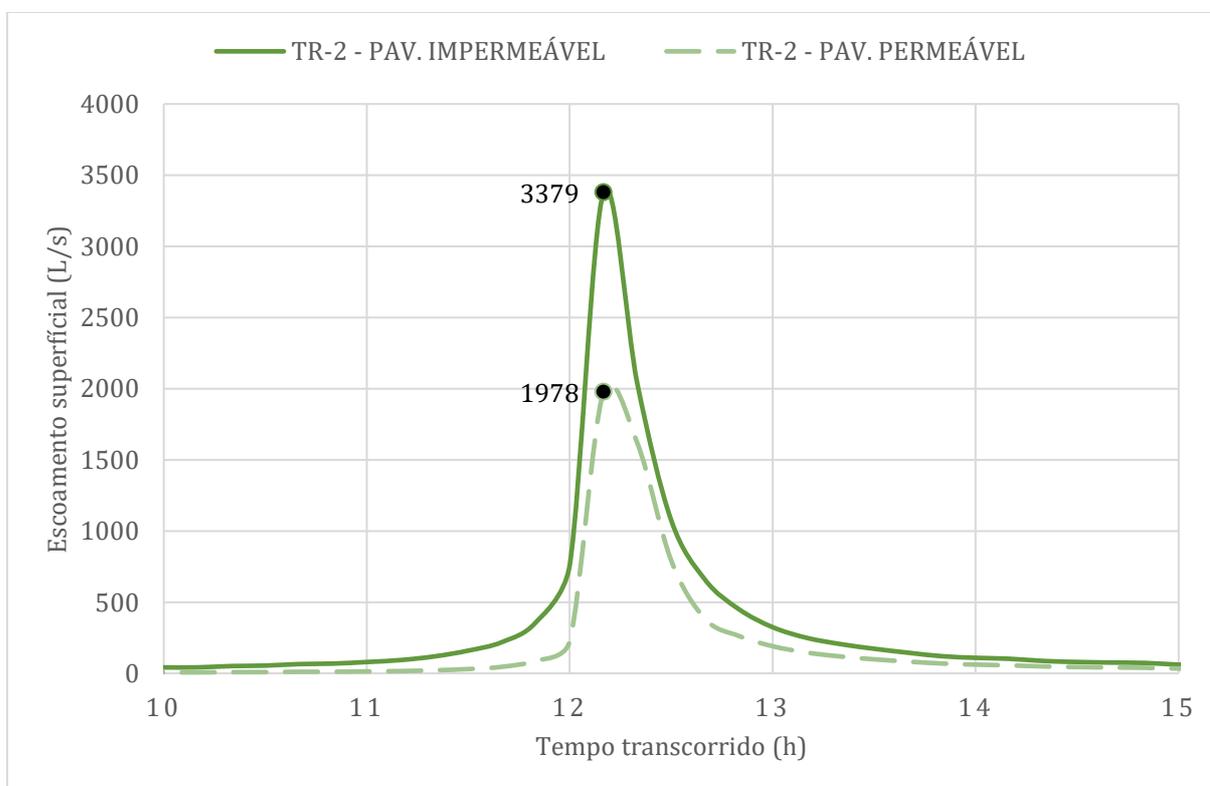


Figura 60 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 2 anos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 38 Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 5 anos

Sub-bacia	Cenário	Coefficiente de escoamento	Volume escoado (m ³)	Vol. Perm. / Vol. Imperm.	Pico do escoamento (l/s)	Pico Perm. / Pico Imperm.
EN-1	IMPERM.	0,80	1970	0,79	883	0,79
	PERM.	0,64	1560		694	
EN-2	IMPERM.	0,93	950	0,41	389	0,53
	PERM.	0,38	390		206	
EN-3	IMPERM.	0,95	910	0,38	381	0,50
	PERM.	0,37	350		191	
EN-4	IMPERM.	0,87	980	0,48	360	0,60
	PERM.	0,42	470		217	
ES-1	IMPERM.	0,84	2180	0,78	1005	0,71
	PERM.	0,66	1710		718	
ES-2	IMPERM.	0,90	1040	0,46	399	0,57
	PERM.	0,41	480		228	
ES-3	IMPERM.	0,93	1110	0,41	447	0,51
	PERM.	0,38	460		230	
ES-4	IMPERM.	0,84	1010	0,51	342	0,63
	PERM.	0,44	520		214	
TOTAL	IMPERM.	0,87	10150	0,59	4207	0,64
	PERM.	0,51	5940		2698	

Fonte: Elaborado pelo autor.

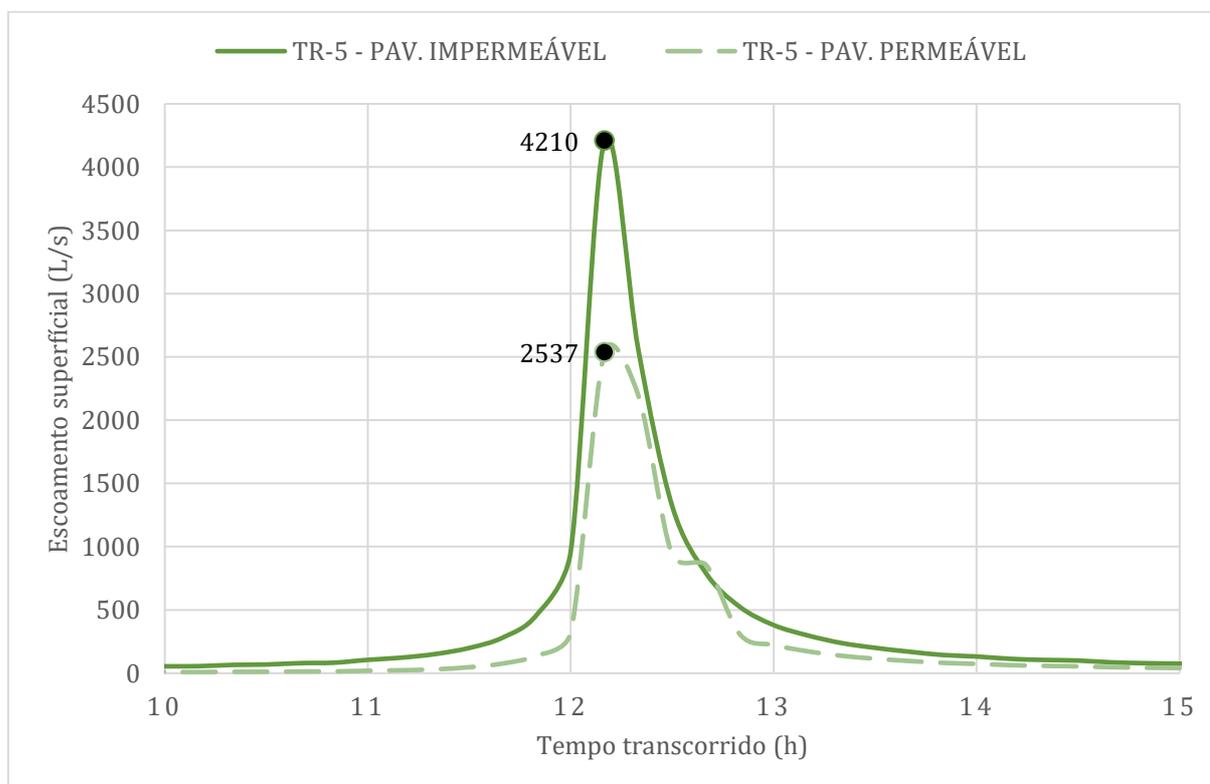


Figura 61 - Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 5 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 39 – Comparação entre os hidrogramas com pavimento impermeável e permeável para todas as sub-bacias e TR = 10 anos

Sub-bacia	Cenário	Coefficiente de escoamento	Volume escoado (m ³)	Vol. Perm. / Vol. Imperm.	Pico do escoamento (l/s)	Pico Perm. / Pico Imperm.
EN-1	IMPERM.	0,82	2330	0,81	1063	0,80
	PERM.	0,67	1880		845	
EN-2	IMPERM.	0,94	1100	0,44	453	0,54
	PERM.	0,41	480		244	
EN-3	IMPERM.	0,95	1050	0,42	444	0,51
	PERM.	0,40	440		225	
EN-4	IMPERM.	0,89	1150	0,51	421	0,63
	PERM.	0,45	590		264	
ES-1	IMPERM.	0,85	2550	0,80	1200	0,73
	PERM.	0,69	2050		879	
ES-2	IMPERM.	0,91	1210	0,49	465	0,59
	PERM.	0,45	590		274	
ES-3	IMPERM.	0,93	1280	0,45	522	0,53
	PERM.	0,42	570		274	
ES-4	IMPERM.	0,86	1190	0,55	401	0,66
	PERM.	0,47	650		264	
TOTAL	IMPERM.	0,88	11860	0,61	4968	0,66
	PERM.	0,54	7250		3270	

Fonte: Elaborado pelo autor.

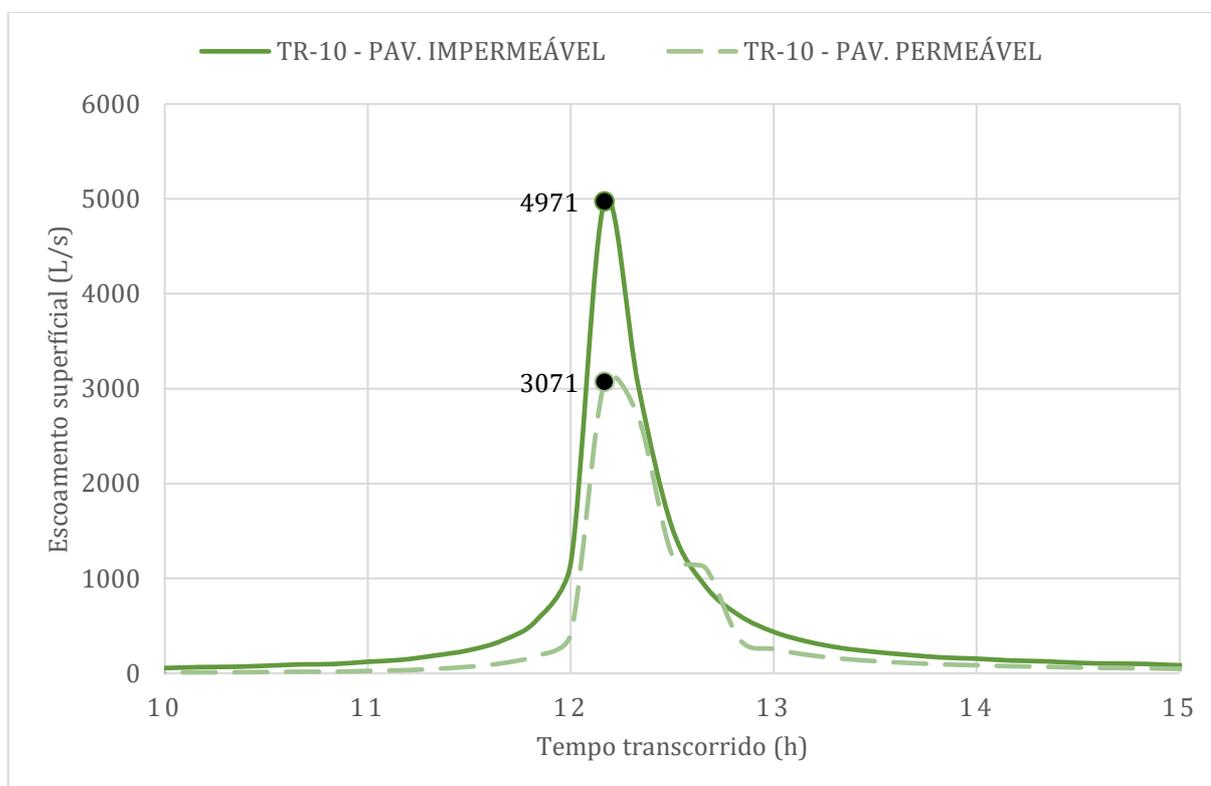


Figura 62 – Hidrograma do sistema total gerado pelo EPA-SWMM para TR= 10 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se das tabelas que quanto maior o tempo de retorno da chuva, menor é a redução do volume e pico do escoamento que os pavimentos permeáveis conseguem proporcionar. Isso ocorre devido a infiltração do solo ser o fator limitante, conforme mencionado por Hölitz (2011), ocasionando o enchimento da camada de armazenamento e o escoamento do excedente.

Independente dos tempos de retorno, a redução dos volumes e picos de escoamento foi observado similaridade entre os estacionamentos norte e sul. Isso era esperado por ambos os estacionamentos terem percentuais parecidos de áreas impermeáveis e permeáveis.

A sub-bacia EN-3 tem o maior percentual de área de pavimento permeável (79,3%), enquanto a sub-bacia ES-1 tem o menor percentual (18,7%) e a razão entre esses percentuais é de 4,24. Comparando a redução do volume escoado para o TR = 1 ano, a aplicação do pavimento permeável reduziu o volume em 69% para EN-3 e 26% para ES-1. Isto resulta em uma razão de 2,65. Conclui-se então que o aumento da área do pavimento permeável não reduz o escoamento na mesma proporção.

Isso é importante pois demonstra que não é preciso utilizar o pavimento permeável em grandes porções da bacia para se obter bons resultados e que tentar reduzir 100% do escoamento superficial é um objetivo inviável. A sub-bacia EN-3 tem 100% de sua área permeável e mesmo assim, ainda houve pelo menos 28% de escoamento superficial.

O coeficiente de escoamento é a relação entre o total escoado e o total precipitado. Ao se aplicar o pavimento permeável, ele variou de 0,43 a 0,54 para o sistema total. Isso significa que para chuvas com tempo de retorno até 10 anos, aproximadamente 50% do total precipitado irá infiltrar pelo solo. Isso é um ótimo ganho, pois, para o cenário com pavimento impermeável, o percentual infiltrado não passa de 17%.

O *software* EPA-SWMM 5.0 consegue discretizar os dados de precipitação, infiltração e escoamento, considerando somente a área do pavimento permeável. Com isso, é possível quantificar a eficiência do sistema. A Tabela 40, apresenta esses dados e o coeficiente de escoamento.

Tabela 40 – Total precipitado, infiltrado e escoado somente nas áreas com pavimento permeável para os TR simulados.

	TR = 1 ano	TR = 2 anos	TR = 5 anos	TR = 10 anos
Precipitação (P) (mm)	62,4	71	84,7	97,3
Infiltração (mm)	52,5	58,6	67,0	74,4
Escoamento (E) (mm)	9,9	12,4	17,7	28,2
Coefficiente de escoamento (E/P)	0,16	0,17	0,21	0,24

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, quanto maior o tempo de retorno, conseqüentemente, a intensidade da chuva, menor a eficiência do pavimento permeável. O uso de pavimentos permeáveis amorteceu pelo menos 71% do total precipitado. Pinto (2011) estudou blocos de concreto e asfalto poroso e concluiu que essas tipologias podem amortecer de 30% a 79% as chuvas. Em comparação, o concreto convencional tem coeficiente de escoamento 0,95 (ARAÚJO, TUCCI, GOLDENFUM, 1998), amortecendo apenas 5% da chuva.

A partir dos coeficientes de escoamento obtidos pode-se comparar com os valores da Tabela 41, obtida **Erro! Fonte de referência não encontrada.** do Manual de drenagem de rodovias do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT, 2006). Os coeficientes de escoamento obtidos nesta pesquisa ficaram na mesma faixa que o coeficiente de solos sem revestimento com permeabilidade moderada (0,10 – 0,30). Isto demonstra a capacidade dos pavimentos permeáveis de propiciarem condições hidrológicas similares aquelas de pré-urbanização.

Tabela 41 – Coeficiente de escoamento superficial.

Características da superfície	Coefficiente de escoamento
Revestimento de concreto de cimento portland	0,70 – 0,90
Revestimento betuminoso	0,80 – 0,95
Revestimento primário	0,40 – 0,60
Solos sem revestimento com baixa permeabilidade	0,40 – 0,65
Solos sem revestimento com permeabilidade moderada	0,10 – 0,30
Taludes gramados	0,50 – 0,70
Prados e campinas	0,10 – 0,40
Áreas florestais	0,10 – 0,25
Terrenos cultivados em zonas altas	0,15 – 0,40
Terrenos cultivados em vales	0,10 – 0,30

Fonte: DNIT (2006)

A redução do escoamento superficial tem impacto direto na rede de drenagem. A Tabela 42 apresenta os valores de vazão máxima para os cenários com e sem pavimento permeável e a capacidade máxima atingida pela rede (relação entre o nível d'água máximo e o diâmetro). Quando a capacidade é igual a 1, significa que a rede atingiu a capacidade máxima e está em sobrecarga e a água começa a se acumular no ponto de captação, podendo inundar. O Apêndice A traz os perfis longitudinais das redes no instante mais crítico para todos os tempos de retorno.

Tabela 42 – Vazões máximas e capacidade das redes considerando os cenários com pavimento impermeável e permeável para todos os tempos de retorno estudados.

REDE	CENÁRIO	Vazão máx. (l/s)	TR = 1 ANO		Vazão máx. (l/s)	TR = 2 ANOS		Vazão máx. (l/s)	TR = 5 ANOS		Vazão máx. (l/s)	TR = 10 ANOS	
			V. perm. / V. imperm.	Cap.		V. perm. / V. imperm.	Cap.		V. perm. / V. imperm.	Cap.		V. perm. / V. imperm.	Cap.
T-1-N	IMPERM.	556	0,78	0,62	661	0,80	0,76	887	0,77	1,00*	962	0,86	1,00*
	PERM.	435		0,48			0,54			0,65			0,80
T-2-N	IMPERM.	806	0,71	0,74	939	0,73	0,88	1284	0,68	1,00*	1382	0,74	1,00*
	PERM.	570		0,55			0,62			0,74			0,89
T-3-N	IMPERM.	1060	0,66	0,80	1231	0,68	0,92	1672	0,63	1,00*	1805	0,69	1,00*
	PERM.	699		0,59			0,66			0,78			0,91
T-4-N	IMPERM.	1301	0,64	0,73	1510	0,66	0,81	2035	0,62	0,91	2225	0,68	0,92
	PERM.	835		0,56			0,62			0,72			0,81
T-1-S	IMPERM.	665	0,66	0,96	793	0,68	1,00*	862	0,83	1,00*	865	1,01	1,00*
	PERM.	440		0,67			0,77			0,96			1,00*
T-2-S	IMPERM.	918	0,64	0,93	1117	0,64	1,00*	1216	0,76	1,00*	1216	0,95	1,00*
	PERM.	590		0,64			0,73			0,90			1,00*
T-3-S	IMPERM.	1229	0,61	0,68	1474	0,61	0,79	1649	0,70	0,90	1725	0,82	0,93
	PERM.	749		0,50			0,56			0,66			0,76
T-4-S	IMPERM.	1462	0,60	0,63	1750	0,61	0,72	1988	0,69	0,80	2124	0,80	0,85
	PERM.	882		0,46			0,52			0,61			0,70

* Sobrecarga na rede

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a rede do estacionamento sul a rede entra em sobrecarga já no trecho inicial e a partir do tempo de retorno de 2 anos, que são chuvas de baixas de intensidade. As redes T-1-S e T-2-S são as únicas com diâmetro de 800 mm e se encontram subdimensionadas para os parâmetros atuais das bacias. Além do diâmetro outro fator que impacta para facilitar a sobrecarga dessa rede é sua baixa inclinação.

A rede no estacionamento norte começa a apresentar sobrecarga com chuvas de tempo de retorno de 5 anos. Das 4 redes, 3 entraram em sobrecarga, comprometendo o funcionamento da rede. Esse cenário se mantece para o TR = 10 anos.

Ao se aplicar o pavimento permeável, a rede do estacionamento norte não entra em sobrecarga em nenhum tempo de retorno. No estacionamento sul, as redes T-1-S e T-2-S entram em sobrecarga, mas somente no TR = 10 anos.

A utilização do pavimento permeável reduziu a vazão de 5% a 40%. Essa redução é o que solucionou os problemas de sobrecargas nas redes. No estacionamento sul, quanto maior o TR menor a redução da vazão. Isso não acontece no estacionamento norte, pois a rede entra em sobrecarga com TR = 5 anos e isso influencia nas vazões máximas do cenário com pavimento impermeável.

As vazões nas redes T-1-N e T-1-S são as que menos reduzem pois estão ligados aos escoamentos de EN-1 e ES-1, que são sub-bacias com menor redução do escoamento. E as vazões referentes a T-4-N e T-4-S são as vazões no exutório, que reduziram de 20% a 40%.

É importante pontuar que para o T-1-S houve um aumento da vazão, isso está relacionado a inundação do ponto de captação. No cenário com pavimento impermeável há inundação, como será falado a frente, e isso limita a vazão máxima da rede.

Inundação ocorre quando o fluxo de água de entrada é maior que a vazão da rede e a água começa a acumular na captação até extravasar. A Tabela 43 traz o volume e a vazão inundados nos poços de visita (os pontos de lançamento não são inclusos nessa análise). Não houve inundação em nenhum ponto ao se utilizar o pavimento permeável.

Tabela 43 – Vazão máxima e volume inundado

REDE	CENÁRIO	TR = 5 ANOS		TR = 10 ANOS	
		Vazão máx. inundada (l/s)	Volume inundado (m ³)	Vazão máx. inundada (l/s)	Volume inundado (m ³)
PV-1-N	IMPERM.	-	-	150	15
PV-1-S	IMPERM.	188	29	455	136

Fonte: Elaborado pelo autor.

Supondo uma altura de 15 cm para o meio-fio é possível estimar uma área alagada, de forma que não ultrapasse esse limite. Para o volume inundado no PV-1-S para a chuva de tempo de retorno de 10 anos, 136 m³, seriam alagados aproximadamente 906 m², que representa mais de 15% da área asfaltada da sub-bacia ES-1.

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos concretos permeáveis com resíduos de construção e demolição na mitigação de alagamentos, quando aplicados em áreas de tráfego leve.

Esta pesquisa está limitada ao estacionamento do ICC a partir de dados hidrológicos de Brasília para chuvas com 1 dia de duração. A simulação realizada não leva em consideração a contribuição do escoamento de sub-bacias à montante da área de estudo e que podem contribuir com o escoamento superficial do estacionamento.

Outra limitação deste trabalho foi a não realização de estudos *in loco* do solo do local e do dimensionamento mecânico. Os valores adotados para o solo local foram retirados de outras pesquisas na região e como explicado anteriormente não fazia parte do escopo o dimensionamento mecânico, que envolveria o conhecimento de outras propriedades do solo, de ensaios para o material de base/sub-base, além da contagem de tráfego.

Esta pesquisa estudou concretos permeáveis variando o teor de argamassa em 35% e 40% e substituindo os agregados graúdos naturais por agregados graúdos de RCD em quantidades de 15% e 30%.

Todos os concretos estudados obtiveram resistências à compressão maiores que o mínimo requerido pela ABNT NBR 16416:2015 para peças permeáveis, que é de 20 MPa. Ademais, todos os concretos estudados também obtiveram resistências à tração maiores que o mínimo da norma, 2 MPa, para concretos permeáveis moldados no local. Isso permite liberdade de escolha para projetos urbanísticos e demonstra versatilidade do material.

Todavia os resultados das propriedades mecânicas tenham se mostrado satisfatórios, de todos os concretos estudados, apenas 2 (35/15RCD e 35/30RCD) atingiram a permeabilidade mínima (1 mm/s) para serem reconhecidos como concretos permeáveis pela ABNT NBR 16416:2015. E apenas 1 (35/15RCD), conseguiu superar o mínimo de 1,4 mm/s da ACI 522R-10.

A maioria dos concretos não atingiu os resultados esperados de permeabilidade, pois os índices de vazios de todos os concretos estudados ficaram na faixa de 11% a 15%.

Conforme Zhong e Willie (2016) o esperado nesse tipo de concreto é entre 15% e 30%. Não obstante, os concretos que atingiram a permeabilidade mínima, foram os que ficaram mais próximos dessa faixa de porosidade.

Quanto ao desempenho dos agregados reciclados em comparação aos agregados naturais. As substituições reduziram as resistências à compressão dos concretos estudados. Essa redução foi maior no teor de argamassa 35% (variação de -24%), reforçando que teores de argamassa menores são mais impactados por alterações nos agregados.

Percebeu-se que, em ambos os teores de argamassa, a diferença de resistência à compressão entre os concretos com 15% de RCD e com 30% de RCD foi pequena, não ultrapassando 2%. Uma das explicações para isso é que nesse intervalo, o fator limitante na resistência foi a resistência do próprio agregado RCD.

Conquanto os agregados reciclados reduzam substancialmente a resistência à compressão dos concretos, o efeito desses agregados na permeabilidade é significativamente mais positivo. Há um aumento de pelo menos 78% ao se substituir os agregados naturais por agregados de RCD. Isto pode ter sido causado pela distribuição granulométrica dos agregados que possibilitou uma melhor distribuição dos poros, ou os poros internos dos agregados reciclados contribuíram para o aumento da interconexão dos poros.

Ao se simular os estacionamentos do ICC para os cenários atual (com pavimento impermeável) e com o pavimento permeável ocupando 44% da área total, notou-se que a eficiência dos pavimentos permeáveis é inversamente proporcional ao tempo de retorno da chuva. Entretanto, os resultados da simulação hidráulica e hidrológica demonstraram os benefícios da utilização do concreto permeável como solução para mitigar o problema dos alagamentos para qualquer chuva simulada, atenuaram os picos de escoamento superficial em 34% a 39% e o volume escoado de 39% até 48%.

A eficácia do uso do pavimento permeável fica mais evidente ao se observar os efeitos nas redes de drenagem. No cenário atual, 25% dos trechos da rede entra em sobrecarga com chuvas de tempo de retorno a partir de 2 anos e na pior situação, com chuvas de TR = 10 anos, chega a ter 62,5% da rede comprometida. Conquanto o pavimento permeável não tenha anulado completamente a sobrecarga na rede, ela ocorre apenas na chuva mais

crítica e em 25% da rede. Apesar de não resolver por completo a sobrecarga na rede de drenagem, o uso dos pavimentos permeáveis eliminou completamente as inundações nos pontos de captação.

Em suma, este trabalho conclui que os concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados atingiram desempenhos mecânicos satisfatórios, mas apenas os concretos 35/15RCD e 35/30RCD podem ser utilizados como pavimentos permeáveis, em decorrência da permeabilidade. A simulação demonstrou que a aplicação dessa solução nos estacionamentos do ICC mitigou os alagamentos na região para chuvas de tempo de retorno até 10 anos.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para pesquisas futuras para aprofundar os estudos na área propõem-se:

- Utilizar substituições maiores de agregados naturais por agregados reciclados até os 100%;
- Utilizar agregados naturais e de RCD com granulometria fixa;
- Avaliar diferentes tipos de compactação dos *pavers* e como afetam suas propriedades físicas e mecânicas;
- Estudar aspectos referentes a durabilidade dos concretos permeáveis com RCD como a colmatação e resistência à abrasão;
- Verificar como pavimentos permeáveis com RCD pode impactar a qualidade da água;
- Averiguar quanto do montante de RCD da região são resíduos de classe A e quanto é possível reduzir incorporando esse material em concretos;
- Simular o desempenho do pavimento permeável para 1 ano hidrológico de forma a se levar em conta a sazonalidade e os efeitos de chuvas seguidas;

- Realizar simulação considerando como área de estudo considerando a área à montante da área desta pesquisa, ou seja, incluindo a área que compreende desde a L3 Norte até o ICC;
- Desenvolver um simulador de chuva ou um protótipo de estacionamento e verificar em campo a eficiência do pavimento permeável com RCD. Considerar utilizar o RCD não apenas na confecção dos concretos permeáveis, mas como a base/sub-base do pavimento;
- Aprimorar o modelo do pavimento adotado fazendo seu correto dimensionamento mecânico.

7 BIBLIOGRAFIA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 - **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.

__. NBR 5739 - **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2018.

__. NBR 7211 - **Agregados para concreto - Especificação**. ABNT, Rio de Janeiro, 2019.

__. NBR 7215 - **Cimento Portland - Determinação da resistência a compressão**. ABNT, Rio de Janeiro, 1996.

__. NBR 7222 - **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2011.

__. NBR 9778 - **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

__. NBR 9781 - **Peças de concreto para pavimentação — Especificação e métodos de ensaio**. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.

__. NBR 11579 - **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200)**. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

__. NBR 11697 - **Cimento Portland - Requisitos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2018.

__. NBR 12142 - **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. ABNT, Rio de Janeiro, 2010.

__. NBR 13292 - **Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante - Método de ensaio**. ABNT, Rio de Janeiro, 1995.

__. NBR 15116 - **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos**. ABNT, Rio de Janeiro. 2004.

___ . NBR 16416 - **Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos**. ABNT, Rio de Janeiro. 2015.

___ . NBR 16606 - **Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

___ . NBR 16607 - **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. ABNT, Rio de Janeiro, 2017.

___ . NBR NM 30 - **Agregados miúdos - Determinação da absorção de água**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001.

___ . NBR NM 45 - **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. ABNT, Rio de Janeiro, 2006.

___ . NBR NM 46 - **Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001.

___ . NBR NM 51:2001 - **Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles"**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001

___ . NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

___ . NBR NM 53 - **Agregado graúdo - Determinação de massa específica e massa aparente**. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

___ . NBR NM 67 - **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. ABNT, Rio de Janeiro, 1996.

___ . NBR NM 248 - **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. ABNT, Rio de Janeiro, 2001.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018-2019**. São Paulo, 2019.

ACI - American Concrete Institute. **ACI - 522R-10 - Pervious concrete**. Michigan, 2010.

ANTUNES, Patricia Tainá da Silva Correa. **Uso do pavimento permeável de concreto para atenuação de cheias urbanas**. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ARAÚJO, Paulo Roberto; TUCCI, Carlos, E. M.; GOLDENFUM, Joel A. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), Porto Alegre, v. 5, n. 3, p 21-29, 2000.

ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM C496 / C496M-17 - **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. ASTM International, West Conshohocken, 2017.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BHUTTA, Muhammad Aamer Rafique; HASANAH, Nor; FARHAYU, Nur; HUSSIN, Mohd Warid; TAHIR, Mahmood bin Md; MIRZA, J. **Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate)**. Construction and Building Materials, v. 47, p. 1243–1248, 2013.

BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves. **A sustentabilidade na cadeia produtiva da indústria da construção**. 2004. 249 f. Tese (Doutorado). Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

BONICELLI, Alessandra; GIUSTOZZI, Filippo; CRISPINO, Maurizio. **Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete**. Construction and Buildings Materials, v. 91, p. 102-110, 2015

CAMPOS, J. L. G.; GONÇALVES, T. D. **Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no Distrito Federal: Relatório de Consultoria Técnica**. Brasília: ADASA, 2015.

CARNEIRO, Alex Pires; QUADROS, Bárbara Elizabete C.; OLIVEIRA, Ana Maria V. de; BRUM, Irineu Antônio S.; SAMPAIO, Taís Santos; ALBERTE, Elaine Pinto V.; COSTA, Dayana

Bastos. **Características do entulho e do agregado reciclado**. In: CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUN, I. A. S. (Orgs.) Projeto Entulho Bom. Reciclagem de Entulho para a produção de materiais de construção. Salvador: Editora UFBA, p. 142-186, 2001.

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. **Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials, v. 111, p. 262–274, 2016.

CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal. **Atlas do Distrito Federal 2017**. Online [http://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/Atlas-do-Distrito-Federal-2017.pdf]

COLLODEL, M. G. **Aplicação do Modelo Hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetidas ao processo de transformação chuva-vazão**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério das Cidades, Secretária Nacional da Habitação. Publicada no Diário Oficial da União em 17/07/02.

CORREIO BRAZILIENSE. **Chuva forte alaga ruas e prejudica o trânsito em diferentes pontos do DF**. Publicado em 10/11/17. Online https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2017/11/10/interna_cidadesdf,640066/chuva-forte-alaga-ruas-e-prejudica-o-transito-em-brasilia.shtml [Acessado em 30/06/18 às 12:27]

___ . **Chuva forte inunda e causa estragos no subsolo do ICC na UnB**. Publicado em 10/04/2011. Online https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2011/04/10/interna_cidadesdf,247106/chuva-forte-inunda-e-causa-estragos-no-subsolo-do-icc-na-unb.shtml?sms_ss=twitter&at_xt=4da2141981beeff6%2C0 [Acessado em 29/04/2020 às 20:21]

DEO, Omkar; NEITHALATH, Narayanan. **Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features**. Materials Science and Engineering A, v. 528, p. 402–412, 2010.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **DNER-ME 383/99 – Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro**. Rio de Janeiro, 1999.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de drenagem de rodovias**. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DONG, Qiao; WU, Hao; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang; WANG, Kejin. **Investigation into Laboratory Abrasion Test Methods for Pervious Concrete**. Journal of materials in civil engineering, v. 25(7), p. 886–892, 2013.

FARIAS, L. A.; LOPES, A. N. M.; STIVAL, M. L.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. **Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**. Disponível em: <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf>. Acesso em 27/05/2019.

FERGUSON, Bruce K. **Porous Pavements**. 1. Florida, Estados Unidos: CRC Press, 2005. 577p.

FERREIRA, Edinilson de Castro **modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia urbana do riacho Moxotó na cidade de Recife/PE**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

G1. **Ônibus tomba, vias alagam e Inmet emite alerta em dia de granizo e chuva forte no DF**. Publicado em 29/10/2018. Online <https://g1.globo.com/df/distrito-federal/noticia/2018/10/29/chuva-intensa-e-granizo-fazem-inmet-emitir-alerta-de-perigo-no-df.ghtml> [Acessado em 31/10/2018 às 23:38]

G1. **Chuva alaga subsolo do principal prédio da UnB**. Publicado em 17/10/2012. Online <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2012/10/chuva-alaga-subsolo-do-principal-predio-da-unb.html> [Acessado em 29/04/2020 às 20:21]

HANSEN, T. C. **Recycling of Demolished Concrete and Masonry**. RILEM Report 6. Ed Chapman & Hall, London, 1992, 336p.

HÖLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental.** 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUANG, Baoshan; WU, Hao; SHU, Xiang; BURDETTE, Edwin G. **Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete.** Construction and Buildings Materials, v. 24, p. 818-823, 2010

IBRAHIM, A., MAHMOUD, E., YAMIN, M., PATIBANDLA, V. C. **Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties.** Construction and Building Materials, v. 50, p. 524–529, 2014.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Chuva Acumulada Mensal X Chuva (Normal Climatológica 61-90).** Online:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo/gráficos>> [Acessado em 12/01/2019 às 19:09].

Jornal de Brasília. **UnB fica alagada após forte chuva no DF.** Publicado em 07/11/2019. Online <https://jornaldebrasil.com.br/cidades/unb-fica-alagada-apos-forte-chuva-no-df/> [Acessado em 29/04/2020 às 20:21]

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. **Clogging in permeable concrete: A review.** Journal of Environmental Management, v. 193, p.221-233, 2017.

KEVERN, J. T.; BIDDLE, D.; CAO, Q. **Effects of Macrosynthetic Fibers on Pervious Concrete Properties.** Journal of Materials in Civil Engineering,, v. 27(9), 2015.

KUANG, Xuheng; KIM, Jong-Yeop; GNECCO, Ilaria; RAJE, Saurabh; GAROFALO, Giuseppina; SANSALONE, John J. **Particle Separation and Hydrologic Control by Cementitious Permeable Pavement.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2025 (1), 2007.

LEITE, Mônica Batista. **Avaliação de propriedades mecânicas de concreto produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. **Optimum mix design of enhanced permeable concrete – Na experimental investigation**. Construction and Buildings Materials, v. 24, p. 2664-2671, 2010.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 222 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1999.

MARCHIONI, M.; BECCIU, G. **Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): a synthetic review of recent literature**. WIT Press Urban Water II, v.139, 2014; p. 12

MARIANO, Humberto Rodrigues. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. 2014. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

MARTINS, Leandro Guimarães Bais. **Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas**. 2017. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2^a ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 674p.

MOREIRA, Lucia Hiromi Higa. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NEITHALATH, Narayanan. **Development and characterization of acoustically eficiente cementitious materials**. 2004. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Purdue University, Indiana, 2004.

NEITHALATH, Narayanan; SUMANASOORIYA, Milani S.; DEO, Omkar. **Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction.** Materials Characterization, v. 61, p. 802-813, 2010.

NEITHALATH, N; WEISS, W.J.; OLEK, J. **Development of quiet and durable porous portland cement concrete paving materials.** Final report, The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, p.179, 2003.

OLIVEIRA, Maria Elane Dias de. SALES, Raquel Jucá de Moraes, OLIVEIRA, Lúcia Andréa Sindeaux de, CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE.** Engenharia Sanitaria e Ambiental, 16 (3), p. 219-224, 2011.

OLIVIER, Jos G. J.; JANSSENS-MAENHOUT, Greet; MUNTEAN, Marilena; PETERS, Jeroen A. H. W. **Trends in global CO2 emissions: 2016 Report.** PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Haia, 2016.

PADILHA, Stael Amaral; PALIGA, Charlei Marcelo; TORRES, Ariela da Silva. **Estudo comparativo da resistência à compressão de blocos de concreto produzidos com diferentes cimentos e dosados em ambiente de fábrica.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil - REEC, 13 (2), p. 184-195, 2017.

PEIXOTO, Allana de Deus. **Utilização de Painéis Pré-Fabricados de Concreto Visando a Racionalização Construtiva.** 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PIERALISI, Ricardo. **Characterization and modelling of pervious concrete.** 2016. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.

PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos.** Oficina de textos. 2ª edição. São Paulo, 2002.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano.** 2011. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (PDDU/DF). **Manual Técnico 1 – Modelo hidrológico e hidráulico**. Brasília: Concremat Engenharia; Secretaria de Estado de Obras do GDF, v. 1, 2009a.

___ **Relatório de Produto 2 – Caracterização**. Brasília: Concremat Engenharia; Secretaria de Estado de Obras do GDF, v. 4 (1), 2008.

___ **Relatório de Produto 4 – Diagnóstico**. Brasília: Concremat Engenharia; Secretaria de Estado de Obras do GDF, v. 8 (5), 2009b.

POMPÊO, Cesar Augusto. **Drenagem urbana sustentável**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, volume 5, no. 1, pag. 15-23, Porto Alegre, 2000.

PRATT, C.J.; MANTLE J.D.G.; SCHOFIELD, P.A. **Urban Stormwater Reduction and Quality Improvement through the Use of Permeable Pavements**. Water Science and Technology, v. 21, p. 769–778, 1989.

PROJETEEEE. **Gráfico da temperatura e zona de conforto**. Disponível em: http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id_cidade=bra_df_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780_try.1962

[Acessado em: 30/04/2020 às 00:43]

PROJETEEEE. **Gráfico da umidade relativa**. Disponível em: http://projeteee.mma.gov.br/dados-climaticos/?cidade=DF+-+Bras%C3%ADlia&id_cidade=bra_df_brasilia-kubitschek.intl.ap.833780_try.1962

[Acessado em: 30/04/2020 às 00:43]

ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Os resíduos sólidos de construção e demolição: gerenciamento, quantificação e caracterização. Um estudo de caso no Distrito Federal**. 2006. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

RODIN III, Harry; RANGELOV, Milena; NASSIRI, Somayeh; ENGLUND, Karl. **Enhancing Mechanical Properties of Pervious Concrete Using Carbon Fiber Composite Reinforcement**. Journal of materials in civil engineering, v. 30(3), 2018.

ROSSMAN, L. A. **Storm Management Model, Version 5.0: User's Manual**. Environment Protection Agency. Cincinnati, OH. 2008

SILVA, Danilo de Almeida; MELO, Carlos Eduardo Luna de. **Processo de britagem e sua influência nas características físicas do agregado graúdo para concreto reciclado**. Paranoá: Cadernos De Arquitetura E Urbanismo, (26), 36-47., 2020.

SILVA, Joseleide Pereira da. **Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos**. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

SHU, Xiang; HUANG, Baoshan; WU, Hao; DONG, Qiao; BURDETTE, Edwin G. **Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures**. Construction and Buildings Materials, v. 25(8), p. 3187-3192, 2011.

SMITH, David R. **Evaluations of concrete grid pavements in the United States**. Second International Conference on Concrete Block Paving, Delft, 1984.

SRIRAVINDRARAJAH, Rasiah; WANG, Neo Derek Huai; ERVIN, Lai Jian Wen. **Mix Design for Pervious Recycled Aggregate Concrete**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 6(4), p. 239–246, 2012.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Ministério das Cidades, Global Water Partnership, World Bank, Unesco, 2005.

TUCCI, Carlos E. M. **Inundações e drenagem urbana**. In: Carlos E. M. Tucci e Juan Carlos Bertoni (Org.). Inundações urbanas na América do Sul. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 45-150, 2003.

USACE- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual**. Estados Unidos, 2016.

WOODS-BALLARD, B.; KELLAGHER, R.; MARTIN, P.; JEFFERIES, C.; BRAY, R.; SHAFFER, P. **The SUDS manual (C697)**. CIRIA, 2007.

WU, Hao; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang; DONG, Qiao. **Laboratory Evaluation of Abrasion Resistance of Portland Cement Pervious Concrete**. Journal of materials in civil engineering, v. 23(5), p. 697–702, 2011.

YANG, Jing; JIANG, Guoliang. **Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials**. Cement and Concrete Research, v. 33, p. 381– 386, 2003.

ZHONG, Rui; LENG, Zhen; POON, Chi-sun. **Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the practice review**. Construction and Buildings Materials, v. 183, p. 544–553, 2018.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. **Material design and characterization of high performance pervious concrete**. Construction and Buildings Materials, v. 98, p. 51-61, 2015.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. **Compression response of normal and high strength pervious concrete**. Construction and Buildings Materials, v. 109, p. 177–187, 2016.

ZOPPOU, C. **Review of urban storm water models**. Environmental Modelling & Software, Volume 16, Issue 3, p. 195–231, 2001.

ZORDAN, Sérgio. **A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. 1997. 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ANEXO A – REDE DE DRENAGEM EXISTENTE

Neste anexo são apresentados os projetos fornecidos pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital (Novacap) para a rede de drenagem dos estacionamentos do ICC.

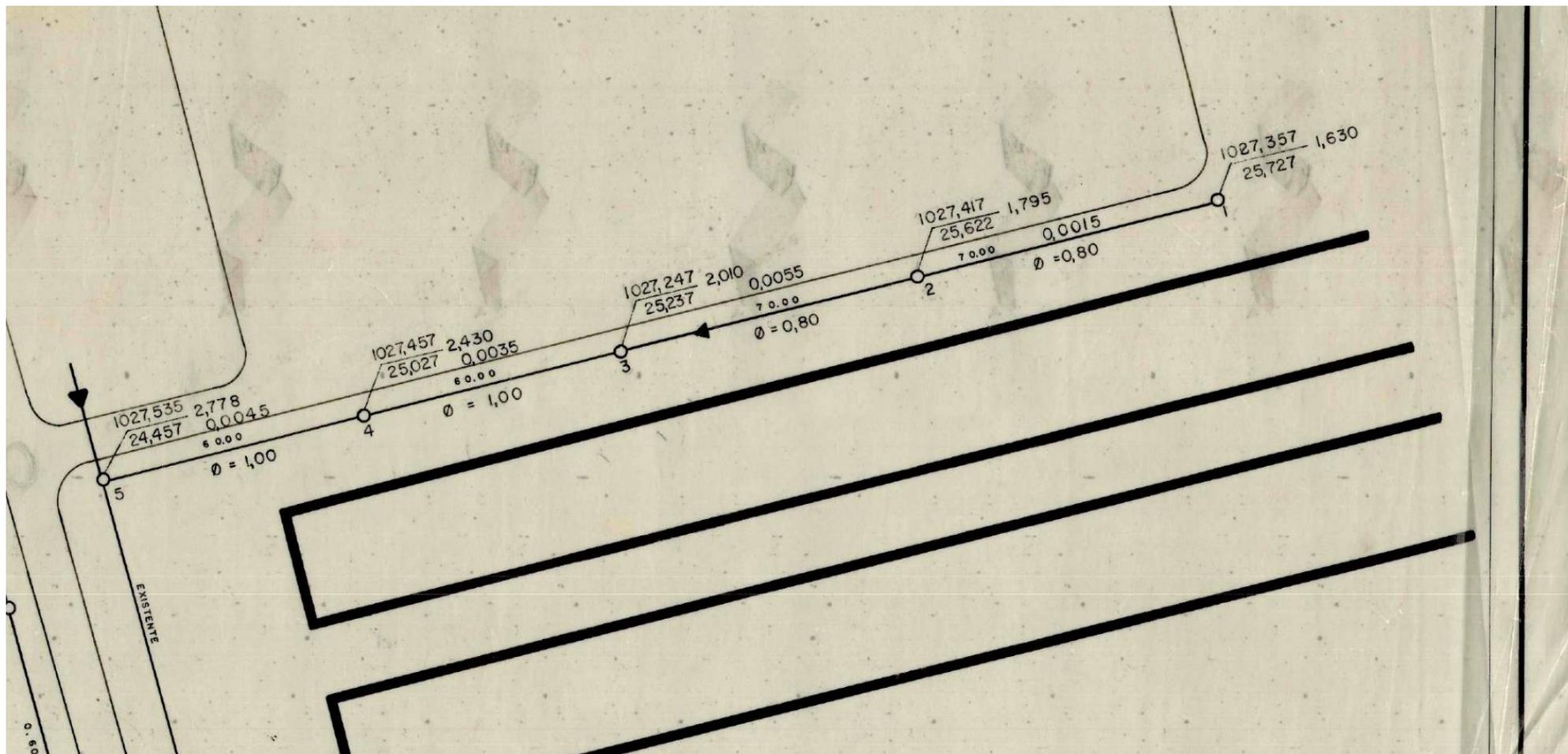


Figura 63 – Rede de drenagem do estacionamento do ICC Sul.

Fonte: Fornecido pela Novacap.

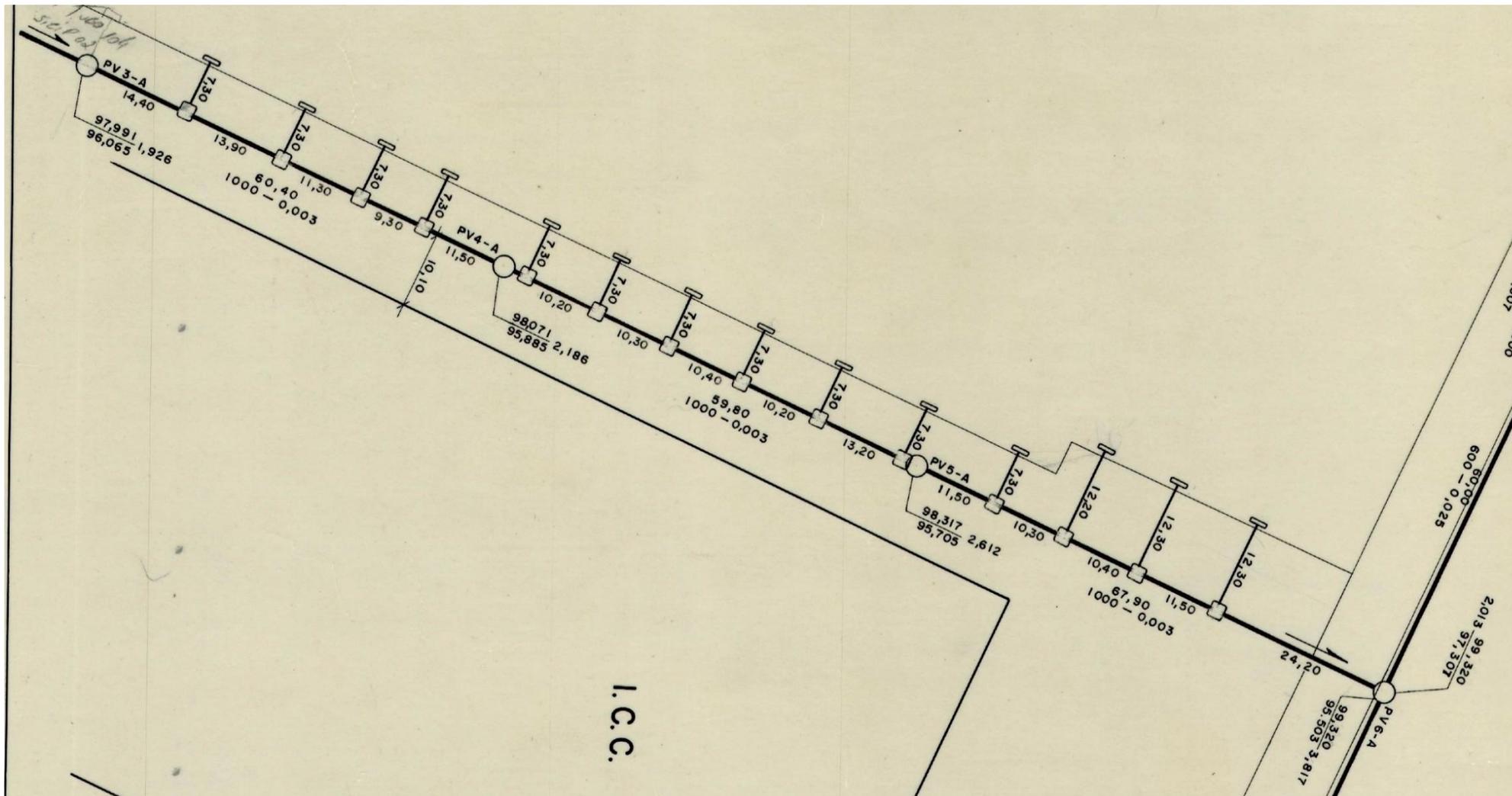


Figura 64 – Rede de drenagem do estacionamento do ICC Norte.

Fonte: Fornecido pela Novacap.

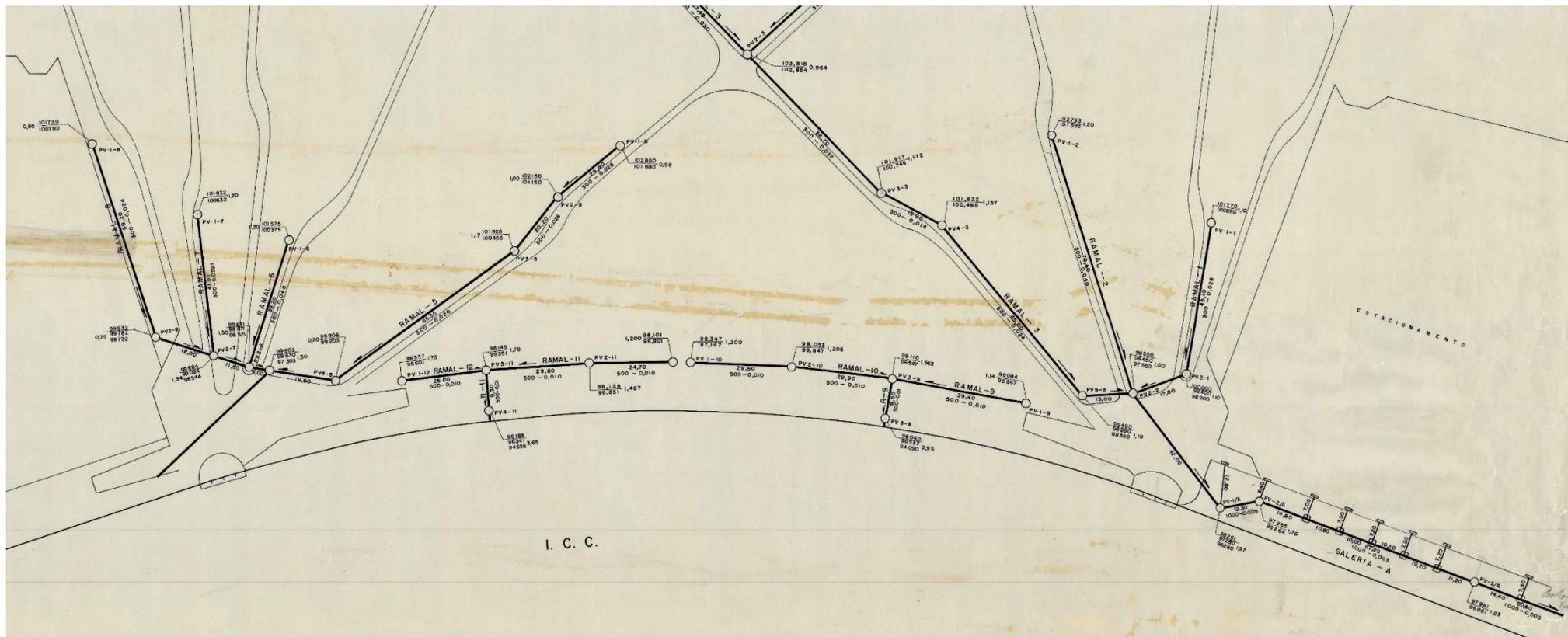


Figura 65 – Rede de drenagem da região central do ICC.

Fonte: Fornecido pela Novacap.

APÊNDICE A – PERFIL LONGITUDINAL DAS REDES DE DRENAGEM SIMULADAS

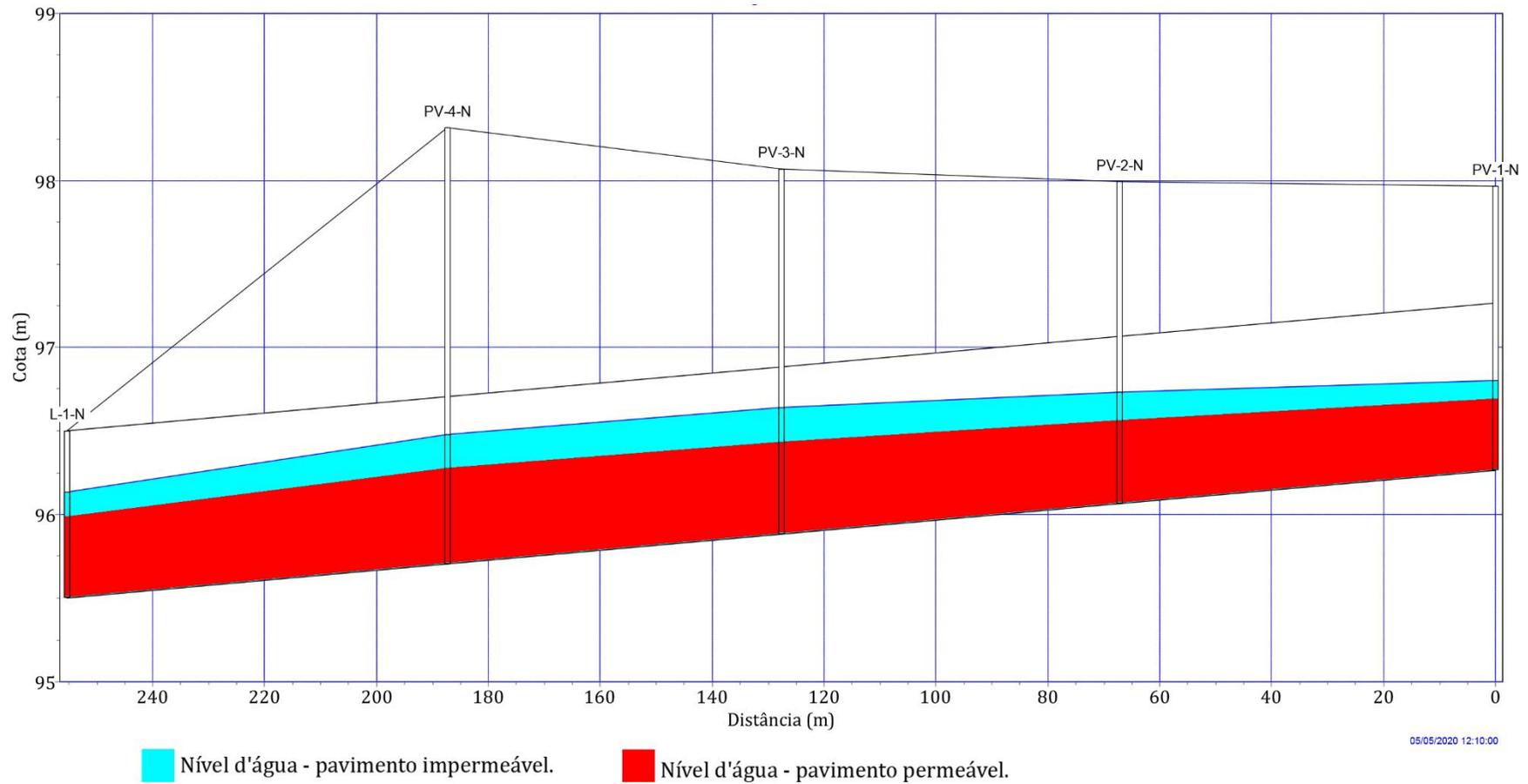


Figura 66 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 1 ano

Fonte: Elaborado pelo autor.

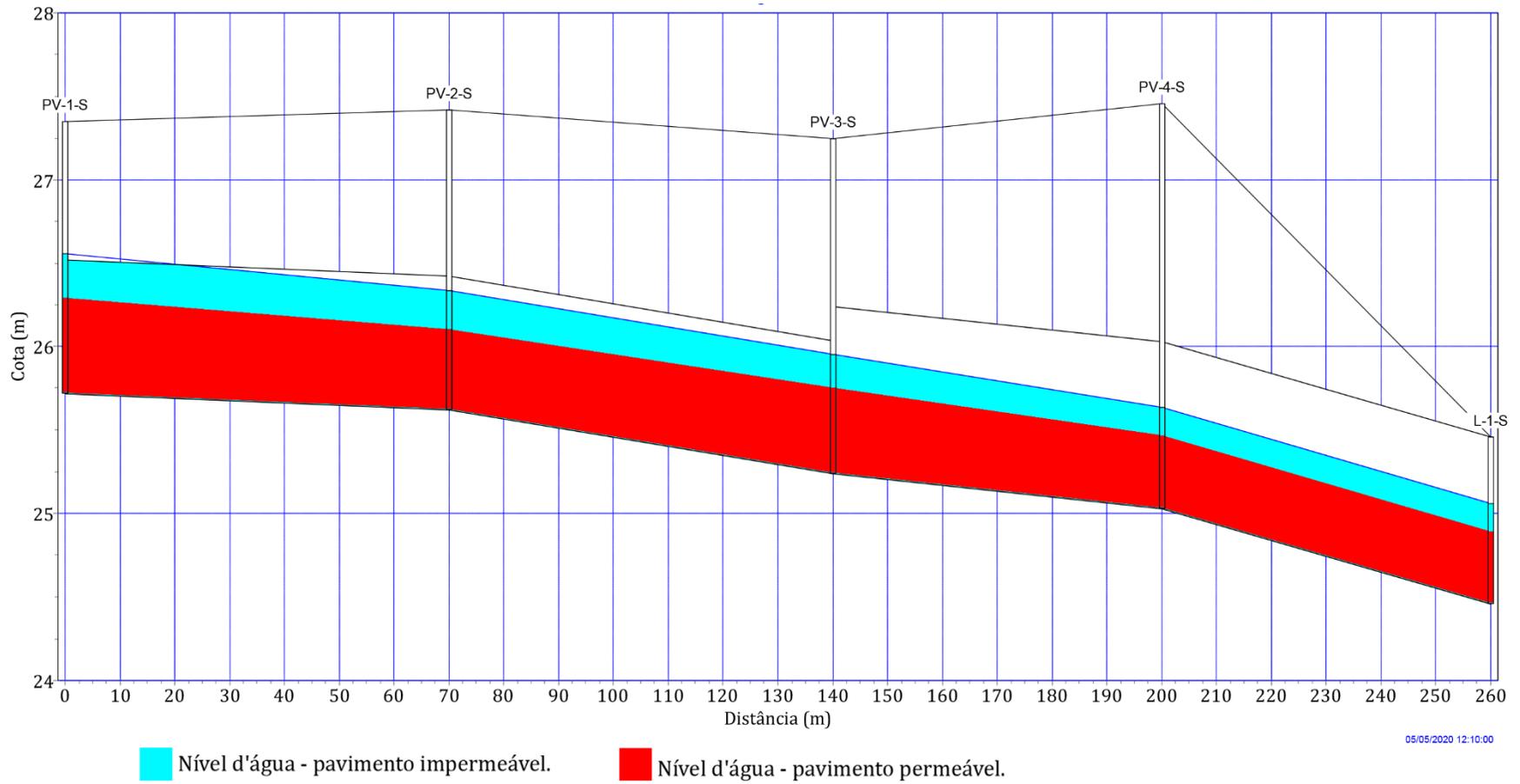


Figura 67 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 1 ano

Fonte: Elaborado pelo autor.

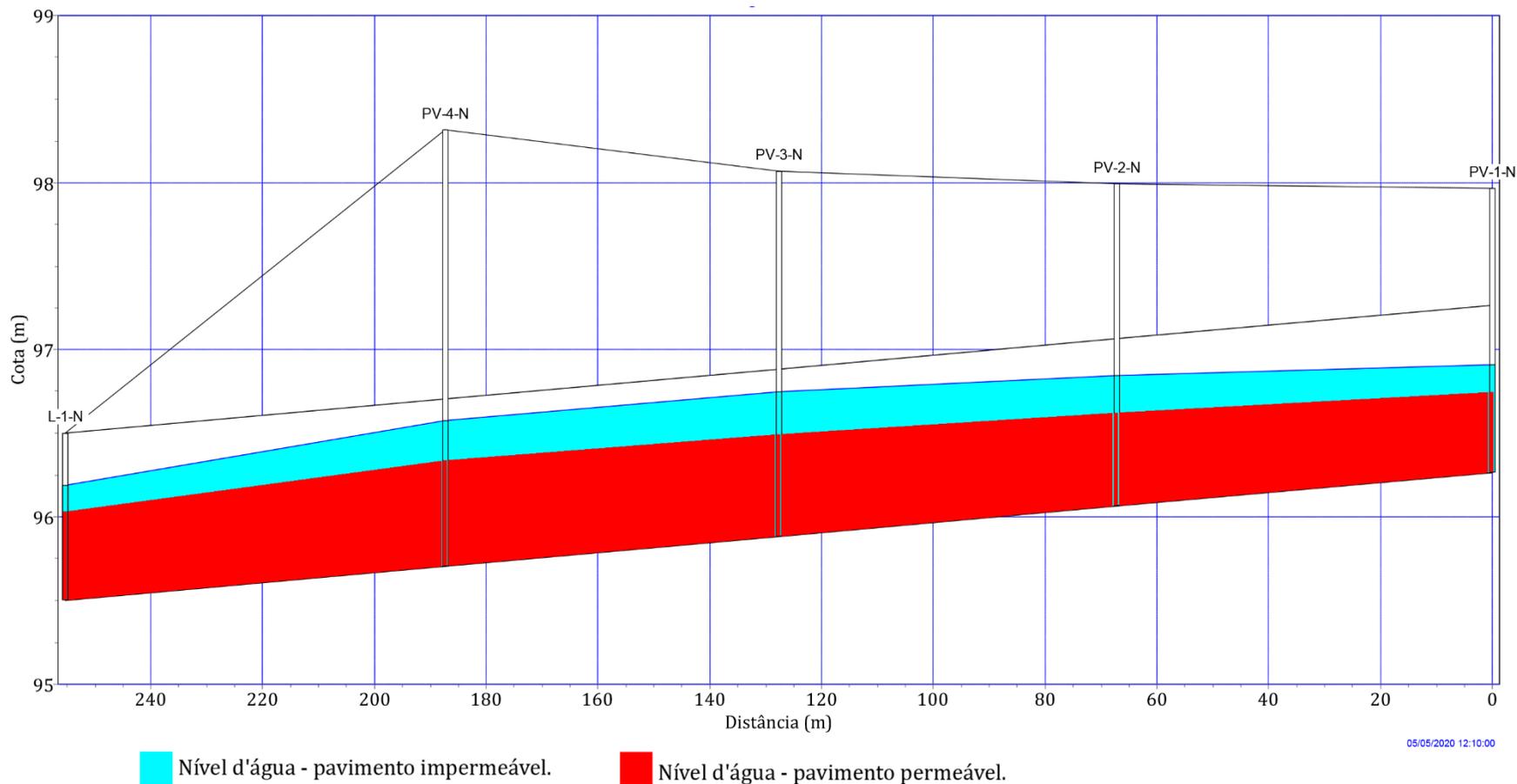


Figura 68 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 2 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

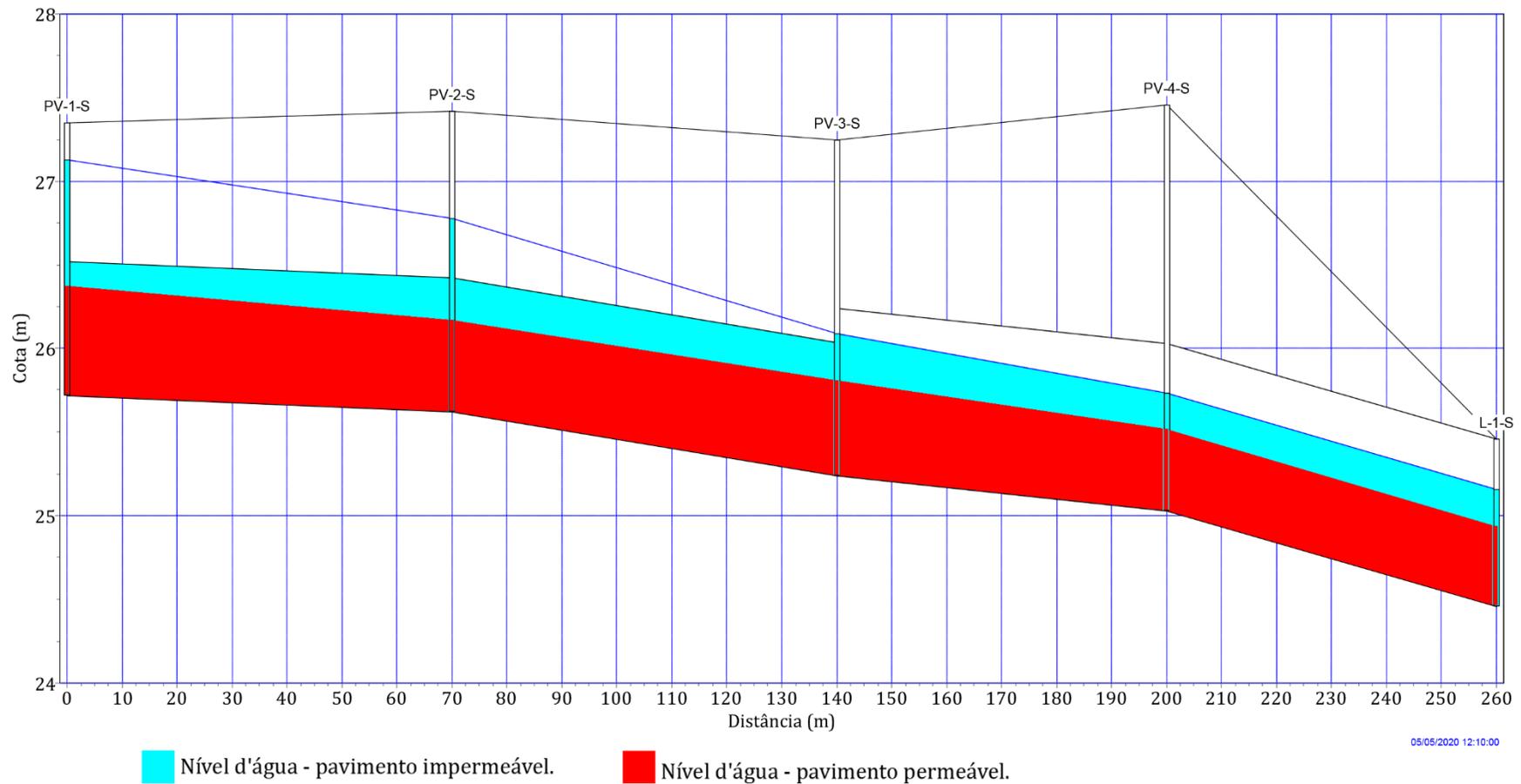


Figura 69 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 2 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

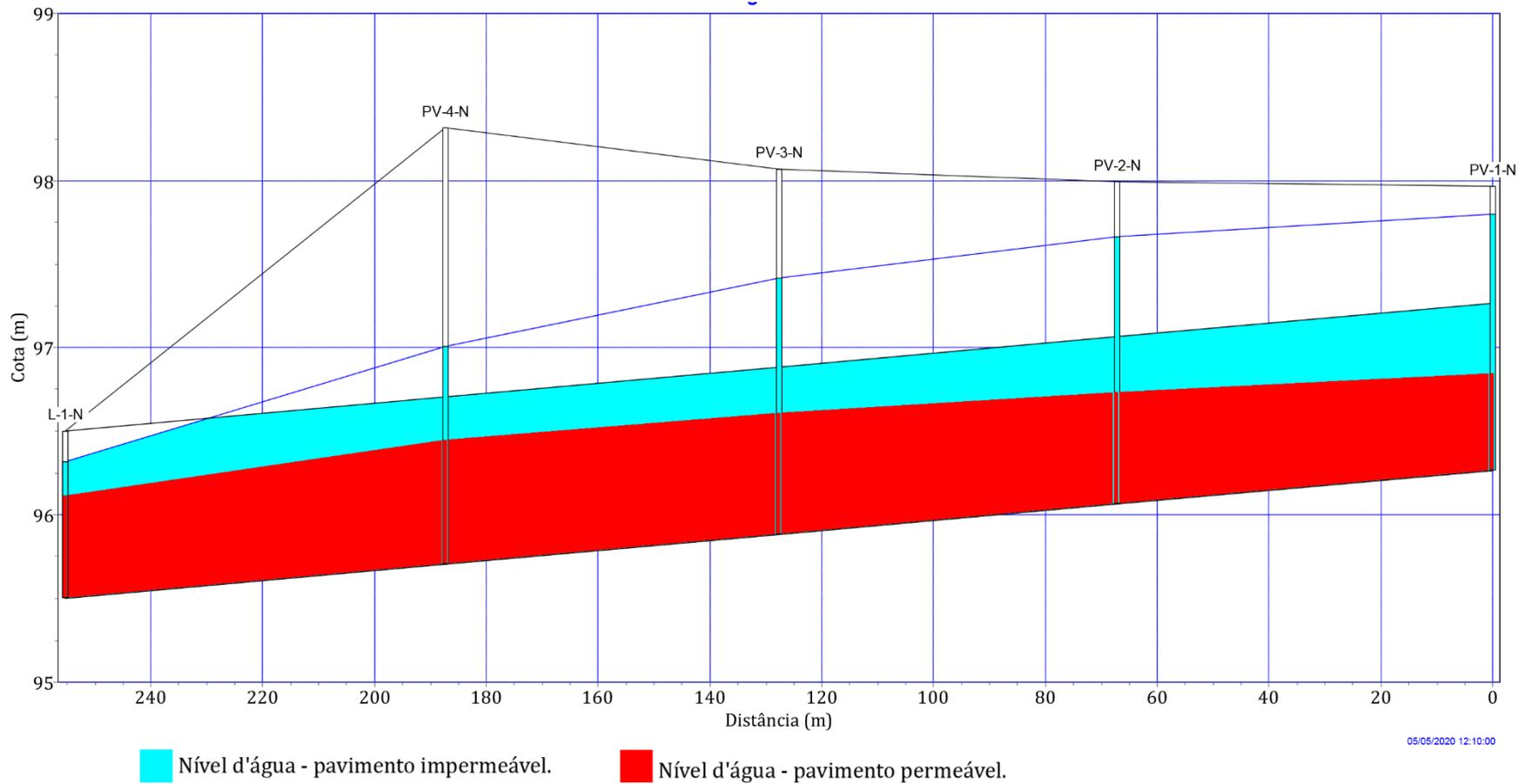


Figura 70 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 5 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

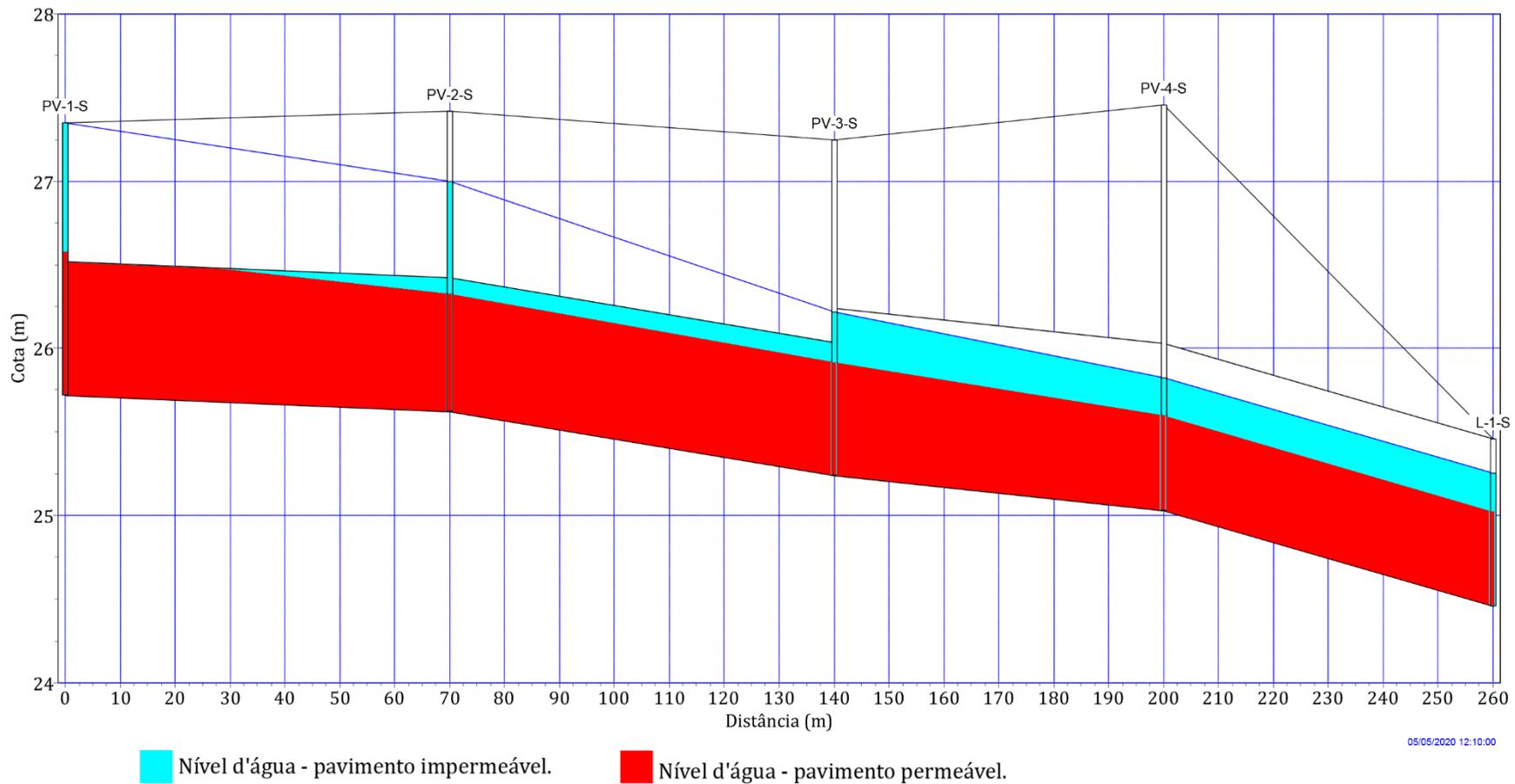


Figura 71 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 5 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

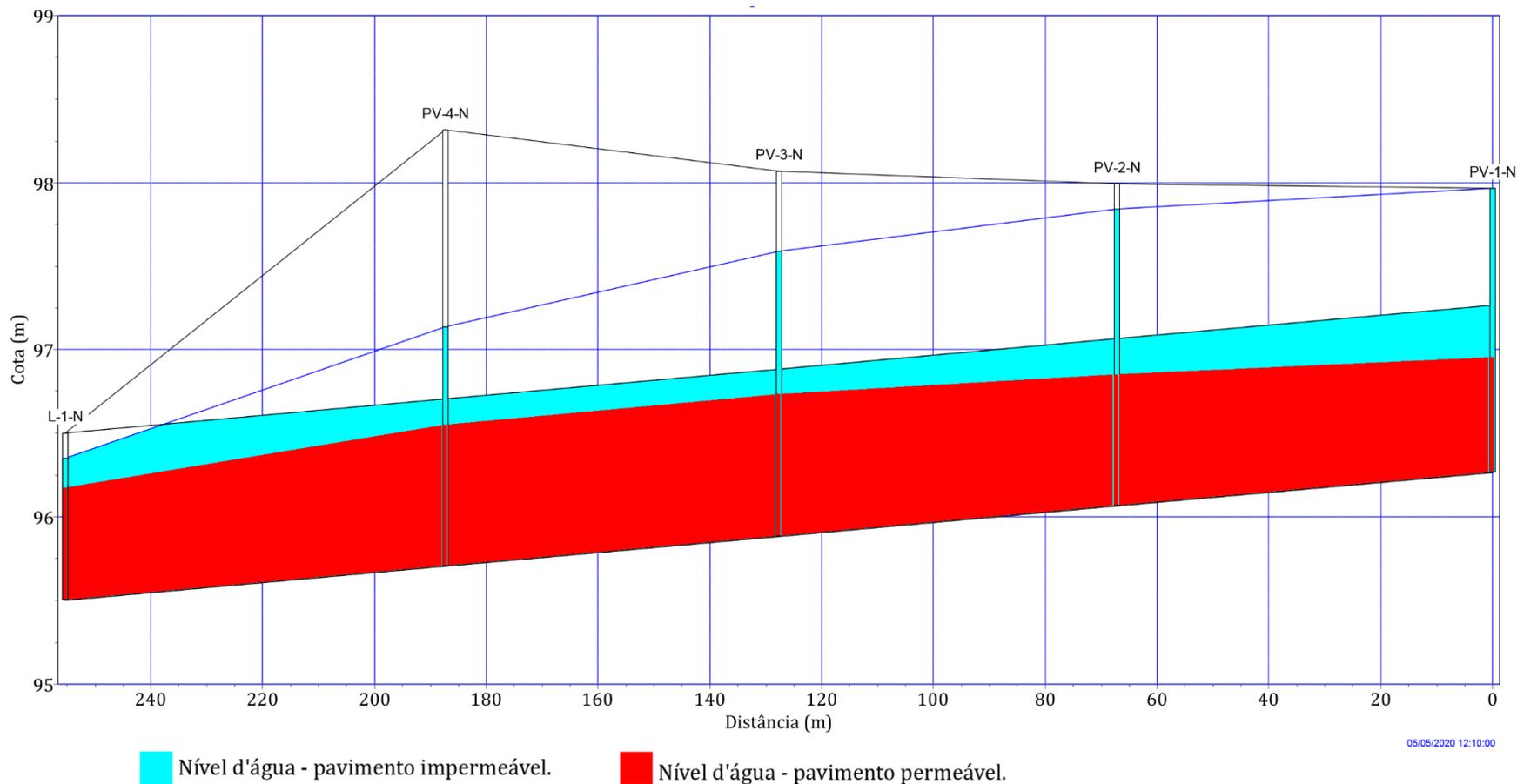


Figura 72 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento norte com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 10 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

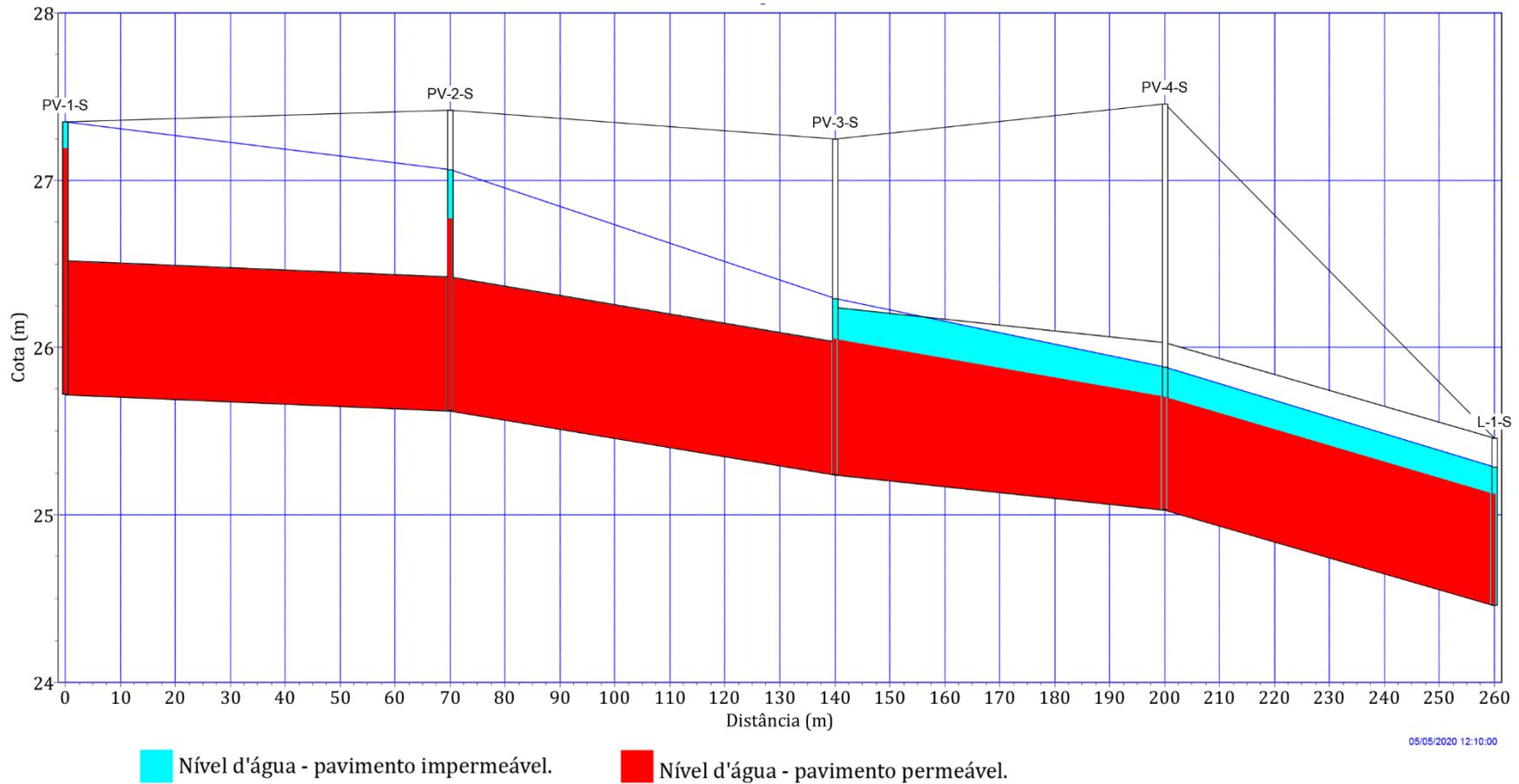


Figura 73 – Perfil longitudinal da rede do estacionamento sul com o nível d'água para pavimento permeável e impermeável para TR = 10 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.