

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

AYRTON RODRIGUES FERREIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR
METACULIM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESPESSURA DE
PASTA DO CONCRETO PERMEÁVEL**

SÃO LEOPOLDO

2024

AYRTON RODRIGUES FERREIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR
METACULIM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESPESSURA DE
PASTA DO CONCRETO PERMEÁVEL**

Dissertação apresentada como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Civil, pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos
(UNISINOS)

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2024

F383i Ferreira, Ayrton Rodrigues

Influência da substituição parcial do cimento Portland por Metacaulim nas propriedades mecânicas e na espessura de pasta do concreto permeável. / Ayrton Rodrigues Ferreira -- 2024.
148 f. : il. ; color. ; 30cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.

1. Engenharia civil. 2. Concreto permeável. 3. Metacaulim - Substituição parcial. 4. Espessura de pasta - Concreto permeável. 5. Propriedades mecânicas e hidráulicas I. Título. II. Kazmierczak, Claudio de Souza.

CDU 624

AYRTON RODRIGUES FERREIRA

**INFLUÊNCIA DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR
METACULIM NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESPESSURA DE
PASTA DO CONCRETO PERMEÁVEL.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovado em 29 de julho de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Valéria Costa de Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO)

Prof. Dr. Maurício Mancio

Universidade Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Prof^a. Dr^a. Marlova Kulakowski

Universidade Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS)

Dedico este estudo a minha família, plano de Deus para minha vida, em especial a minha esposa, Rosilane, meus filhos, Ayrton Junior e Athyrson Júlio, meus pais, Amilton e Salete e meus irmãos Amilton (*in memoriam*) e Amirlete.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pelo bem maior que revelou na pessoa de Jesus Cristo e ao amigo Espírito Santo, por cuidarem de mim em todos os momentos.

Aos meus pais, Amilton e Salete, que acreditaram em mim e sempre se esforçaram para me proporcionar o acesso à educação necessária, apresentando-me os possíveis cenários de vida condicionados às nossas escolhas. Mostrando as boas consequências quando decidimos trilhar pelo caminho da educação, do trabalho e da honestidade. Exemplo maior de que as dificuldades, que se apresentam, devem ser superadas e que a persistência é o elemento essencial para o sucesso nas empreitadas da vida.

A minha esposa e filhos por entenderem a importância da realização desse propósito, pelo companheirismo, compreensão e o apoio necessário ao longo desse processo de formação.

Aos meus amigos e familiares pelo apoio, estímulo e motivação e por compreenderem minhas ausências nos encontros e nas celebrações.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, meus sinceros agradecimentos pela paciência, compartilhamento de conhecimento e por acreditar em mim.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pelas contribuições e o compartilhamento de suas experiências em sala de aula.

Aos colegas de turma PPGE/Unisinos - São Lucas 2019.1, pelos momentos compartilhados em sala de aula, seja em Porto Velho/RO ou em São Leopoldo/RS. Foi bom desfrutar desses momentos de aprendizagem junto com todos vocês.

Aos fornecedores dos materiais meu muito obrigado.

Aos laboratoristas Leonardo, Mateus, Jéssica, Helen, Marluci, Kalvin, enfim, todos os que se disponibilizaram e apoiaram a realização de cada ensaio, minha imensa gratidão.

Aos colegas, Fernanda Gentil, Roger, Giovanna e Rorennychollas, pelo apoio, pela companhia e pelas palavras de incentivo.

Enfim, agradeço a todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa.

“A vida não é um problema a ser resolvido, mas uma realidade a ser experimentada”. (Soren Kierkegaard)

RESUMO

As áreas pavimentadas das cidades, em sua maioria, utilizam revestimentos impermeáveis, o que contribui para transtornos causados por enchentes e alagações. O revestimento com concreto permeável é uma forma de atenuar esses transtornos e propiciar o retorno ao ciclo hidrológico natural. O concreto permeável permite o escoamento da água dentro da sua estrutura física por meio de seus macroporos interligados. Sua estrutura física é composta pelo agregado graúdo revestido por pasta cimentícia. A pasta deve ter uma consistência adequada para não gerar defeitos, falha na cobertura do agregado e entupimento dos poros, na produção do concreto. Nesse sentido, o objetivo principal desta pesquisa é verificar a influência da substituição parcial do cimento por metacaulim nas propriedades mecânicas, hidráulicas e na espessura de pasta do concreto permeável. Desta forma, se propôs o estudo do teor de água a ser adicionado à pasta cimentícia que proporcione a melhor consistência e permita uma mistura satisfatória com o agregado. Trabalhou-se com quatro pastas cimentícias, referência e substituição de 5%, 10% e 15% do cimento, em massa, por metacaulim. Foram testados teores de água até que cada mistura atingisse o espalhamento de 100 ± 5 mm, medidos com o minicone de Kantro. O comportamento reológico uniforme em todas as pastas estudadas foi comprovado por meio de ensaios de squeeze-flow. Constatou-se que todas as pastas com metacaulim obedecem a um comportamento similar quando solicitadas a um esforço de até 200 N com o deslocamento de massa de aproximadamente 5 mm. Foram moldados quatro (04) traços de concreto permeável com os mesmos teores de metacaulim. Comparando a mistura referência com as substituições, observou-se que o teor de 5% atingiu os melhores resultados medidos aos 28 dias, a resistência à compressão axial de 18,09 MPa aumentou cerca de 7,36%, a resistência à tração por compressão diametral de 2,73 MPa aumentou cerca de 5,00%, a resistência à degradação por impacto e por abrasão de 56,18% aumentou cerca de 4,74% e o coeficiente de permeabilidade de 0,00507 m/s aumentou cerca de 58,93%. O teor de substituição de 10% apresentou piora na maioria das propriedades e o teor de 15% se mostrou inviável.

Palavras-chave: concreto permeável; substituição parcial; metacaulim; espessura de pasta; propriedades mecânicas e hidráulicas.

ABSTRACT

The paved areas of cities mostly use impermeable coatings, which contribute to problems caused by floods and inundations. Permeable concrete coating is a way to mitigate these problems and promote the return to the natural hydrological cycle. Permeable concrete allows water to flow through its physical structure via interconnected macropores. Its physical structure is composed of coarse aggregate coated with cement paste. The paste must have an adequate consistency to avoid defects, failure in the aggregate coating, and clogging of the pores during concrete production. In this regard, the main objective of this research is to verify the influence of the partial replacement of cement by metakaolin on the mechanical and hydraulic properties, as well as the paste thickness of permeable concrete. Thus, the study proposed examining the amount of water to be added to the cement paste that provides the best consistency and allows satisfactory mixing with the aggregate. Four cement pastes were used: a reference paste and replacements of 5%, 10%, and 15% of the cement mass with metakaolin. Water content was tested until each mixture reached a spread of 100 ± 5 mm, measured with the Kantro mini-cone. The uniform rheological behavior in all pastes studied was confirmed through squeeze-flow tests, showing that all pastes with metakaolin exhibited similar behavior when subjected to a force of up to 200 N with a mass displacement of approximately 5 mm. Four (04) permeable concrete mixtures were molded with the same metakaolin contents. Comparing the reference mixture with the replacements, it was observed that the 5% content achieved the best results at 28 days, with the axial compressive strength of 18.09 MPa increasing by about 7.36%, the tensile strength by diametrical compression of 2.73 MPa increasing by about 5.00%, the resistance to degradation by impact and abrasion of 56.18% increasing by about 4.74%, and the permeability coefficient of 0.00507 m/s increasing by about 58.93%. The 10% replacement content showed deterioration in most properties, and the 15% content proved unfeasible.

Keywords: permeable concrete; partial replacement; metakaolin; paste thickness; mechanical and hydraulic properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concreto Permeável	23
Figura 2 - Teste tátil-visual para controle da consistência da mistura	28
Figura 3 - (a) Permeâmetro de carga variável - (b) Posicionamento do corpo de prova revestido com membrana látex para realização do ensaio de permeabilidade.	35
Figura 4 - Equipamento para determinação do coeficiente de permeabilidade para utilização no campo.....	35
Figura 5 - Espessura real de pasta.	38
Figura 6 - Perfil típico de uma curva carga versus deslocamento de um ensaio de squeeze-flow com controle de deformação	44
Figura 7 - Padrão de ruptura: (a) resistência forte - (b) resistência fraca	45
Figura 8 - Comportamento reológico da pasta	47
Figura 9 - Minitronco de Kantro	48
Figura 10 - Diagrama do Programa Experimental (1ª, 2ª e 3ª Etapa)	50
Figura 11 - Diagrama do Programa Experimental: Caracterização de Materiais (1ª Etapa).....	51
Figura 12 - Diagrama do Programa Experimental: Pasta Cimentícia (2ª Etapa)	51
Figura 13 - Diagrama do Programa Experimental: Concreto Permeável (3ª Etapa) .	52
Figura 14 - Distribuição granulométrica do cimento CP II F-40	57
Figura 15 - Distribuição granulométrica do metacaulim	58
Figura 16 - Posicionamento do corpo de prova na prensa utilizando as tiras de aglomerado	74
Figura 17 - Simbologias das medidas utilizadas no cálculo do coeficiente de permeabilidade (K).	76
Figura 18 - Permeâmetro de carga variável.	77
Figura 19 - Plano de corte do CP.	103

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Avaliação da consistência da pasta	48
Fotografia 2 - Moldagem das pastas de cimento.....	65
Fotografia 3 - Retificação das faces do corpo de prova.	66
Fotografia 4 - Ensaio de resistência à compressão axial	66
Fotografia 5 - Teste tátil visual do concreto permeável	69
Fotografia 6 - Corpos de prova após a moldagem.	71
Fotografia 7 - Corpos de prova na câmara úmida.	71
Fotografia 8 - Massa da amostra submersa em água para determinação da densidade e do índice de vazios do concreto permeável.	73
Fotografia 9 - Execução do ensaio de resistência à compressão axial.	73
Fotografia 10 - Execução do ensaio de resistência à tração na compressão.	75
Fotografia 11 - Processo de degradação do concreto permeável por impacto e abrasão.	75
Fotografia 12 - Preparação das amostras para determinação do coeficiente de permeabilidade.....	78
Fotografia 13 - Cenário com borda infinita	78
Fotografia 14 - Plano de corte do corpo de prova na horizontal.....	79
Fotografia 15 - Plano de corte do corpo de prova na vertical	79
Fotografia 16 - Localização das medidas na região Transv_5%_CP 01_Corte AA...81	
Fotografia 17 - Localização das medidas na região Long_5%_CP 03_Corte DD-MS	81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados do ensaio squeeze-flow (1 mm/s) – Pastas cimentícias	86
Gráfico 2 - Densidade e índice de vazios no estado fresco	90
Gráfico 3 - Densidade e índice de vazios no estado endurecido.....	91
Gráfico 4 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial	93
Gráfico 5 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral	96
Gráfico 6 - Resultados dos ensaios de resistência à degradação por impacto e por abrasão	98
Gráfico 7 - Coeficientes de permeabilidade <i>versus</i> índice de vazios no estado endurecido.....	102
Gráfico 8 - Espessura de pasta - Medidas transversais e longitudinais	105
Gráfico 9 - Espessura de pasta <i>versus</i> densidades parciais	107
Gráfico 10 - Espessura de pasta <i>versus</i> densidades parciais (Mistura 5% MET) ...	108
Gráfico 11 - Resistência à compressão axial <i>versus</i> índice de vazios	109
Gráfico 12 - Resistência à compressão axial <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral	110
Gráfico 13 - Resistência à compressão axial <i>versus</i> espessura de pasta transversal	111
Gráfico 14 - Espessura de pasta <i>versus</i> coeficiente de permeabilidade	112
Gráfico 15 - Espessura de pasta <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral	113
Gráfico 16 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão <i>versus</i> espessura de pasta	114
Gráfico 17 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão <i>versus</i> coeficiente de permeabilidade	115
Gráfico 18 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão <i>versus</i> resistência à compressão axial	117
Gráfico 19 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio de consistência do concreto permeável utilizado por alguns autores em seus estudos	28
Quadro 2 - Tipos de cimentos utilizados por alguns autores da área científica.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa granulométrica usual na confecção de concretos permeáveis	25
Tabela 2 - Valores usuais de absorção de água para agregado graúdo natural utilizado em concreto permeável.....	26
Tabela 3 - Tipo e procedimento de adensamento do concreto permeável utilizado por diversos autores em seus estudos	30
Tabela 4 - Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável	32
Tabela 5 - Resistência à compressão axial em concretos permeáveis estudados por diferentes autores.....	32
Tabela 6 - Resistência à tração na compressão diametral e resistência à tração na flexão em concretos permeáveis estudados por alguns autores.....	33
Tabela 7 - Resultados do ensaio de desgaste - concreto permeável.....	36
Tabela 8 - Resultados dos índices de vazios do concreto permeável.....	37
Tabela 9 - Intervalo de consumo de material nas misturas de concreto permeável..	42
Tabela 10 - Idade do concreto na realização dos ensaios	53
Tabela 11 - Características físicas do CP II F-40	57
Tabela 12 - Características químicas e mecânicas do CP II F-40.....	57
Tabela 13 - Características físicas do metacaulim	59
Tabela 14 - Características químicas do metacaulim	59
Tabela 15 - Granulometria utilizada nas misturas de concreto permeável	60
Tabela 16 - Caracterização física do agregado graúdo natural.....	60
Tabela 17 - Composição das pastas, espalhamento e resistência média à compressão aos 7 dias.....	63
Tabela 18 - Consumo de materiais na produção do concreto permeável	67
Tabela 19 - Regiões de realização das medidas da espessura de pasta (Referência)	80
Tabela 20 - Medidas de espessura de pasta na região Transv_5%_CP 01_Corte AA	82
Tabela 21 - Dados da pasta cimentícia em função da massa de água (g).....	84
Tabela 22 - Dados da pasta cimentícia utilizada no concreto permeável.....	87
Tabela 23 - Resultados dos ensaios realizados nas misturas de concreto permeável	89

Tabela 24 - Análise dos dados dos índices de vazios do concreto permeável no estado endurecido.....	92
Tabela 25 - Análise dos dados de resistência à compressão axial	94
Tabela 26 - ANOVA da resistência à compressão axial	95
Tabela 27 - Análise dos dados de resistência à tração na compressão diametral	97
Tabela 28 - ANOVA da resistência à tração na compressão diametral.....	97
Tabela 29 - Análise dos dados da resistência à degradação por impacto e por abrasão	99
Tabela 30 - ANOVA da resistência à degradação por impacto e por abrasão	99
Tabela 31 - Coeficientes de permeabilidade <i>versus</i> índice de vazios no estado endurecido.....	100
Tabela 32 - Análise dos dados dos coeficientes de permeabilidade	100
Tabela 33 - ANOVA do coeficiente de permeabilidade	101
Tabela 34 - Espessura de pasta nas seções transversais com 03 camadas.	104
Tabela 35 - Espessura de pasta nas seções longitudinais com 03 camadas	104
Tabela 36 - Espessura de pasta e densidades parciais	106

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)
AFM	Microscópio de Força Atômica
AGN	Agregado Graúdo Natural
AN	Agregado Natural
ASTM	American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Ensaaios e Materiais)
BEC	Batalhão de Engenharia e Construção
CP	Cimento Portland
CPR	Concreto Pós Reativo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EDX	Espectroscopia de raios-X de Energia Dispersiva
EPA	Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Transformador Diferencial Linear Variável)
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Normas Mercosul
NRMCA	<i>National Ready Mixed Concrete Association</i>
SSHA	<i>Scottish Special Housing Association</i> (Associação Escocesa de Habitação Especial)
UWRC	Urban Water Resources Centre (Centro Urbano de Recursos Hídricos)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES DE MEDIDAS

#	Malha da peneira
%	Porcentagem
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
g	Gramma
J	Joule
kg	Kilograma
l	Litro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
min	Minuto
ml	Milílitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
Ø	Diâmetro
°C	Graus Celcius
s	Segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 CONCRETO PERMEÁVEL	23
2.2 PROPRIEDADES REQUERIDAS DO CONCRETO PERMEÁVEL	24
2.2.1 Propriedades do Concreto Permeável no Estado Fresco	27
2.2.1.1 Consistência	27
2.2.1.2 Massa unitária do agregado graúdo	30
2.2.2 Propriedades do Concreto Permeável no Estado Endurecido	31
2.2.2.1 Resistência à Compressão Axial	31
2.2.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	33
2.2.2.3 Permeabilidade	34
2.2.2.4 Resistência à degradação por impacto e por abrasão	36
2.2.2.5 Densidade e Índice de Vazios	37
2.2.2.6 Espessura da pasta por análises de imagens	37
2.3 PARÂMETROS DE DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL	38
2.3.1 Influência dos Materiais na Dosagem dos Concretos Permeáveis	39
2.3.1.1 Aglomerantes: cimento e metacaulim	39
2.3.1.2 Agregados	41
2.3.2 Proporções de Materiais e a Trabalhabilidade da Pasta	42
2.4 INTERDEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM	45
2.4.1 Influências nas Propriedades do Estado Fresco	46
2.4.2 Influências nas Propriedades do Estado Endurecido	49
3 METODOLOGIA	50
3.1 FATORES E VARIÁVEIS	52
3.1.1 Fatores de Controle com Níveis Variáveis de Estudo	52
3.1.2 Fatores de Controle com Nível Fixo	53
3.1.3 Fatores Não Controlados	55
3.1.4 Variáveis de Resposta	55

3.2 MATERIAIS	56
3.2.1 Cimento	56
3.2.2 Metacaulim de Alta Reatividade	58
3.2.3 Agregado Graúdo Natural.....	59
3.2.4 Água	61
3.2.5 Substituições Parciais de Cimento Portland por Metacaulim	61
3.3 PRODUÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS.....	61
3.3.1 Definição do Espalhamento da Pasta com Diferentes Teores de Água	62
3.3.2 Consumo de Pasta Cimentícia	63
3.3.3 Processo de Mistura	64
3.3.4 Características no Estado Fresco.....	64
3.3.5 Características no Estado Endurecido.....	65
3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL	67
3.4.1 O Teor de Água (H) e o Traço Utilizado	67
3.4.2 Processo de Mistura	68
3.4.3 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	68
3.5 MÉTODOS	72
3.5.1 Consistência da Mistura	72
3.5.2 Densidade e Índice de Vazios no Estado Fresco	72
3.5.3 Densidade e Índice de Vazios no Estado Endurecido.....	72
3.5.4 Resistência à Compressão Axial	73
3.5.5 Resistência à Tração na Compressão Diametral.....	74
3.5.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão.....	75
3.5.7 Permeabilidade.....	76
3.5.8 Determinação da Espessura de Pasta Aderida ao Agregado Graúdo	78
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	84
4.1 PASTA CIMENTÍCIA.....	84
4.1.1 Caracterização da Pasta Cimentícia no Estado Fresco	84
4.1.2 Comportamento Reológico da Pasta Cimentícia (squeeze flow)	86
4.1.3 Densidade da Pasta Cimentícia nos Estados Fresco e Endurecido	87
4.1.4 Resistência a Compressão Axial da Pasta Cimentícia (28 dias)	87
4.1.5 Considerações sobre a Pasta Cimentícia	88
4.2 CONCRETO PERMEÁVEL	88
4.2.1 Consistência	89

4.2.2 Densidade e Índice de Vazios no Estado Fresco	90
4.2.3 Densidade e Índice de Vazios no Estado Endurecido.....	91
4.2.4 Resistência à Compressão Axial	93
4.2.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral	96
4.2.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão.....	98
4.2.7 Coeficiente de Permeabilidade	99
4.2.8 Espessura de Pasta e Densidades Parciais	102
4.2.8.1 Espessura de pasta nas seções transversais	103
4.2.8.1.1 Espessura de pasta nas seções longitudinais (03 camadas)	104
4.2.8.1.2 Espessura de pasta nas seções longitudinais (04 camadas)	105
4.3 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL	108
4.3.1 Resistência à Compressão Axial <i>Versus</i> Índice de Vazios.....	109
4.3.2 Resistência à Compressão Axial <i>Versus</i> Resistência à Tração por Compressão Diametral	110
4.3.3 Resistência à Compressão Axial <i>Versus</i> Espessura de Pasta Transversal	111
4.3.4 Espessura de Pasta <i>Versus</i> Coeficiente de Permeabilidade.....	112
4.3.5 Espessura de Pasta <i>Versus</i> Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	113
4.3.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão <i>Versus</i> Espessura de Pasta.....	114
4.3.7 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão <i>Versus</i> Permeabilidade.....	115
4.3.8 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão <i>Versus</i> Resistência à Compressão Axial	116
4.3.9 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão <i>Versus</i> Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	117
5 CONCLUSÃO	119
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS	132

1 INTRODUÇÃO

As intervenções humanas através da urbanização das cidades têm gerado grandes áreas pavimentadas com revestimentos impermeáveis como, por exemplo, as vias, calçadas, praças e estacionamentos. A impermeabilização do solo contribui para transtornos causados por enchentes e alagações. Nessa perspectiva, novos revestimentos que permitem maiores taxas de infiltração no solo e menor taxa de escoamento das águas pluviais têm sido estudados. Assim, Candian Filho *et al.* (2022), Zhang *et al.* (2021), Xu *et al.* (2020) e Zhao *et al.* (2020) têm desenvolvido estudos com a temática sobre concreto permeável, o qual pode ser aplicado na camada de revestimento de vias de tráfego leve, calçadas e estacionamento.

Segundo Bonicelli, Arguelles e Pumarejo (2016), a *Environmental Protection Agency* (EPA)¹ reconheceu o uso de concreto permeável como uma das melhores práticas de gerenciamento para a redução do escoamento de águas pluviais. Contudo, este tipo de concreto tem um elevado consumo de cimento, uma vez que o concreto permeável basicamente, segundo Lamb (2014), é resultado da mistura do agregado graúdo, com pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo, água e cimento, sendo utilizado ou não adições e aditivos para melhorar alguma propriedade específica. O concreto permeável permite a percolação de água dentro de sua estrutura física por meio dos seus macroporos interligados.

Algumas estratégias se apresentam como possível solução para a redução do elevado consumo de cimento na confecção do concreto permeável ou melhorar sua eficiência. Damineli *et al.* (2013) destaca três estratégias para a redução de emissão de CO₂: aumentar a ecoeficiência a partir do aumento na substituição do clínquer por adições minerais, melhorar a eficiência dos ligantes e o menor consumo, em escala, de cimento em obras de engenharia com melhor eficiência. Deve-se considerar que, na produção do clínquer, é liberada uma alta quantidade de CO₂.

A quantidade de material cimentício utilizado na produção do concreto permeável deverá ser capaz de ligar os agregados graúdos sem reduzir significativamente sua permeabilidade.

“A consistência de pasta inadequada pode gerar defeitos na produção do concreto permeável, como a falha na cobertura dos agregados ou o escoamento da

¹ Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos.

pasta pelos poros”. (Mikami, 2022, p. 182).

Apesar de haver estudos como os realizados por Andrade (2019), Costa (2019) e Fernandes (2019), referentes ao uso de adições ao concreto permeável, com a intenção de melhorar o desempenho, seja quanto à maior resistência mecânica, maior durabilidade e melhor trabalhabilidade, verificou-se a necessidade de investigação do comportamento reológico da pasta cimentícia no estado fresco, bem como sua influência nas propriedades mecânicas, hidráulicas e na espessura de pasta do concreto permeável no estado endurecido.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar dos benefícios ambientais, no período de 2014 a 2024, foram publicados apenas 74 artigos, em nível nacional, com base em pesquisa bibliográfica realizada na base de dados CAPES CAFE a partir da palavra de busca, concreto permeável, e 154 artigos com a palavra, *concrete permeability*. Considerando a revisão bibliográfica realizada se percebe a falta de estudos que definam claramente os critérios de escolha de materiais constituintes da mistura, parâmetros de dosagem, procedimentos de compactação, o comportamento mecânico e hidráulico satisfatório, bem como, as previsões de relações entre essas variáveis.

É notória a necessidade de estudo sobre o concreto permeável, principalmente referente a adições e/ou substituições de materiais cimentícios, com característica específica, que melhore as características da pasta cimentícia quanto a sua resistência e ao controle da fluidez, uma vez que a pasta é o elemento responsável pela ligação entre agregados e o não preenchimento total dos poros.

Observou-se, na literatura, que muitos dos procedimentos para a realização de ensaio e avaliação do concreto permeável são adaptados de procedimentos utilizados em solos.

Apesar de a ABNT NBR 16416:2015, primeira norma brasileira sobre o assunto, ser válida até os dias atuais, não foram elaboradas normas próprias para avaliação do concreto permeável, especificamente, quanto ao método de dosagem e ao método de compactação adequado. Na literatura, os métodos utilizados para dosagem e compactação do concreto permeável são diversos, dificultando o estabelecimento de padrões que facilitem a repetibilidade dos procedimentos adotados e aferições de resultados consistentes.

Nessas circunstâncias, há necessidade de caracterização de materiais com propriedades compatíveis para suprir essas lacunas, bem como a elaboração de normas específicas imprescindíveis para difundir a utilização do concreto permeável, para além do revestimento de calçadas destinadas ao tráfego de pedestres e das vias para tráfego leve de veículos. Assim, propiciando sua utilização nas vias de tráfego médio e pesado de veículos.

Esta pesquisa traz contribuições quanto à influência da substituição parcial do cimento Portland por metacaulim de alta reatividade na resistência mecânica (à compressão, à tração na compressão diametral e à degradação por impacto e por abrasão), na espessura de pasta do concreto permeável e na sua permeabilidade.

A substituição parcial do cimento por metacaulim tem o intuito de aumentar a resistência mecânica do concreto permeável, conferindo uma espessura adequada de pasta de material cimentício na envoltória do agregado graúdo, sem a redução significativa da permeabilidade.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é verificar a influência da substituição parcial do cimento por metacaulim nas propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração na compressão diametral, resistência à degradação por impacto e por abrasão), hidráulicas e na espessura de pasta do concreto permeável.

1.2.2 Objetivos Específicos

No que diz respeito aos objetivos específicos se pretende:

- a) analisar a influência da relação água/material cimentício e do teor de substituição do cimento por metacaulim na consistência da pasta utilizada no concreto permeável;
- b) avaliar a influência da espessura de pasta nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável;
- c) avaliar se a substituição do cimento por metacaulim no concreto permeável promove maior resistência mecânica (resistência à compressão, resistência

à tração na compressão diametral, resistência à degradação por impacto e por abrasão), melhorando os aspectos relacionados à durabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será realizada uma contextualização teórica da pesquisa, centrada no tema concreto permeável especificamente na influência de adições nas propriedades mecânicas e na permeabilidade. Destacando temas relevantes como volume de pasta, critérios de dosagem e procedimento de adensamento.

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo o American Concrete Institute (2010) no Relatório do Comitê 522, concreto permeável é definido como concreto de cimento hidráulico provido de vazios interconectados suficientes que resultam em material altamente permeável, permitindo que a água passe facilmente por ele. Enquanto a definição atribuída pela norma da ABNT NBR16416 (2015) ao concreto permeável é descrita como sendo um concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade. A figura 1 ilustra uma peça prismática de concreto permeável sendo percolada pela água.

Figura 1 - Concreto Permeável



Fonte: Votorantim Cimentos (2020).

No Brasil, essa técnica de pavimentação com utilização do concreto permeável na camada de revestimento é pouco aplicada. No entanto, em outros países do mundo, por exemplo, Japão e os Estados Unidos da América, essa técnica vem sendo utilizada desde a década de 70 (Azzout *et al.*, 1994).

Para Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010), o principal benefício oferecido por esse tipo de concreto é a capacidade de transportar grandes volumes de água através da sua estrutura, reduzindo problemas relacionados ao escoamento de águas pluviais.

2.2 PROPRIEDADES REQUERIDAS DO CONCRETO PERMEÁVEL

As propriedades do concreto permeável são diretamente influenciadas pelas proporções dos materiais: aglomerantes, agregados, água, adições e aditivos. Bem como, pelas metodologias utilizadas em sua aplicação, compactação e cura.

Conforme Tennis, Leming e Akers (2004), dentre os aglomerantes, estão o cimento Portland, o mais utilizado. Há também adições de materiais pozzolânicos, cinza volante, escória de alto forno granulado e adição de polímero estudado por Giustozzi (2016).

Segundo o American Concrete Institute (2010), no Relatório do Comitê 522, a variação do teor de vazios é de 15 a 35% e da resistência à compressão é de 2,8 a 28 MPa, enquanto a taxa de drenagem do pavimento em concreto permeável irá variar geralmente no intervalo de 0,14 a 1,22 cm/s.

Já a norma da ABNT NBR 16416 (2015) estabelece o coeficiente de permeabilidade maior que 10^{-3} m/s para pavimento com revestimento de concreto permeável moldado no local, avaliado em laboratório ou em campo. Especifica, ainda, resistência à tração na flexão maior ou igual a 1 MPa (tráfego de pedestre) e maior ou igual a 2 MPa (tráfego leve), determinada pelo método de ensaio ABNT NBR 12142.

De acordo com a ACI 522 (2010), o agregado graúdo é utilizado em tamanho único ou classificado entre 9,5 e 19 mm. Constata-se que grãos mais lamelares e de tamanhos maiores de partículas aumentam a permeabilidade devido à presença de poros maiores. Uma opção para melhorar as propriedades mecânicas é a combinação de agregados em tamanhos diferentes, no entanto esse procedimento acarretará redução nas taxas de porosidade e permeabilidade.

Kim e Lee (2010) ponderam que as proporções de vazios totais nas misturas são maiores quando usados numa faixa de agregados de maior dimensão. Enquanto para Ćosic *et al.* (2015), as faixas granulométricas com maior percentual na mistura de agregado de maior dimensão resultam em um aumento de porosidade. Já misturas com agregados de menores dimensões apresentam uma maior densidade e consequente melhoria da resistência mecânica. Yang e Jiang (2003) complementam que a utilização de agregados de tamanho menor aumenta a resistência do concreto permeável, desde que a quantidade de cimento seja adequada.

Uma dosagem equilibrada com base em estudo minucioso do tipo de agregado graúdo é fundamental para a definição dos parâmetros, definição do esqueleto

granulométrico (faixa dimensional ou mistura de várias faixas dimensionais) e proporções. É o referencial inicial do método de dosagem de concretos permeáveis. Quanto ao tipo de rocha do agregado, as de origem granítica são as que apresentam os melhores resultados de resistência mecânica, segundo ACI (2010), Chandrappa e Biligiri (2016) e Tennis, Leming e Akers (2004).

A Tabela 1 registra a faixa granulométrica usual na confecção de concretos permeáveis, conforme referência bibliográfica, encontrada na busca com critério de pesquisa no período compreendido entre os anos de 2010 a 2023.

Tabela 1 - Faixa granulométrica usual na confecção de concretos permeáveis

(continua)

Referência	Faixa granulométrica (mm)	Proporções entre Frações (%)
Huang <i>et al.</i> (2010)	12,5	100
	9,5	100
	4,75	100
Lian e Zhuge (2010)	9,5-6,7	100
	9,5-4,75	100
	13,2-4,75	100
Bhuta; Tsuruta; Mirza (2012)	13-20	100
	5-13	100
	2,5-5	100
Batezini (2013)	9,5-6,3	100
	9,5-6,3/6,3-4,8	50-50
	12,5-9,5/9,5-6,3/6,3-4,8	30-40-30
Torres, Hu e Ramos (2015)	9,54	100
	6,35	100
Batezini <i>et al.</i> (2016)	9,5-6,3	100
	Pedrisco	100
Bechara (2017)	19-12,5	100
	12,5-6,3	100
	6,3-2,36	100
	12,5-9,5/9,5-6,3	30-70
	6,3-4,75/4,75-2,36	50-50
Teixeira (2020)	12,5-0,15	100
	12,5-0,115/4,75-0,15	95-5
	12,5-0,115/4,75-0,15	92,5-7,5
	12,5-0,115/4,75-0,15	90-10
Bizão (2021)	19-4,75	Referência ASTM C33/C33M
	12,5-4,75	
	9,5-2,36	

(conclusão)

Referência	Faixa granulométrica (mm)	Proporções entre Frações (%)
Bezerra (2023)	19	100
	9,5	100
	9,5-19	50-50
	9,5-9,5-19	10-40-50
	9,5-9,5-19	20-30-50
	9,5-9,5-19	30-20-50
	9,5-9,5-19	40-10-50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Verian, Ashraf e Cao (2018) relatam que os valores de absorção de água variam de 0,34% a 3,0% para agregado graúdo natural. A Tabela 2 apresenta valores diversos, levantados por autores em suas pesquisas quanto à absorção de água para os agregados graúdos naturais.

Tabela 2 - Valores usuais de absorção de água para agregado graúdo natural utilizado em concreto permeável

Referência	Absorção de água (%)
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	2,00
Levy e Helene (2004)	0,80
Grubba (2009)	2,20
Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012)	1,20
Tavares e Kazmierczak (2016)	1,33
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	1,48
Aliabdo, Abd Elmoaty e Fawzy (2018)	1,50 (9,5 mm) - 1,20 (19 mm)
Yap <i>et al.</i> (2018)	3,5
Oliveira (2017)	3,55

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante salientar que a quantidade de água deve ser ajustada para compensar a absorção do agregado, conforme ACI (2010). Essa compensação de água precisa ser considerada no processo de mistura, pois os agregados secos diminuem a trabalhabilidade e o processo de compactação, enquanto os agregados com excesso de umidade proporcionam a drenagem da pasta, ainda no estado fresco, ocasionando a colmatação dos poros.

Os aditivos são materiais que, incorporados ao concreto durante o processo de mistura, modificam suas propriedades. Apesar de em boa parte dos estudos se verificar

a utilização dos diversos tipos de aditivos, tais como, o redutor de água utilizado por Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012), Fu e Zhang (2002), Ibrahim *et al.* (2014) e Wu *et al.* (2002); os aditivos, plastificante e superplastificante, utilizados por Lian e Zhuge (2010); o aditivo retardador de pega, utilizado por Krishna, Zhuge e Karunasena (2013) e Wu *et al.* (2002); os aditivos incorporadores de ar utilizados por Ghafoori e Dutta (2002) e Wu *et al.* (2002). Nesta pesquisa, não será utilizado aditivo, como meio de resguardar os efeitos provenientes unicamente da substituição do cimento Portland por metacaulim.

A seguir serão abordadas as propriedades do concreto permeável com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim considerando seu estado, recém misturado (fresco) e o estado endurecido.

2.2.1 Propriedades do Concreto Permeável no Estado Fresco

O concreto permeável recém misturado apresenta o abatimento nulo como característica. De acordo com Rizvi *et al.* (2010), esse comportamento é esperado devido à menor relação água/cimento, que possibilita que os vazios no concreto permaneçam abertos.

A ACI (2010) preconiza que o manuseio deve ocorrer, no máximo, 60 minutos após os elementos sólidos, agregado, cimento e adições entrarem em contato com a água. Caso se utilizem aditivos, esse tempo útil de trabalho se modificará, por exemplo, na possibilidade de se usarem aditivos retardadores esse tempo passa para 90 minutos.

2.2.1.1 Consistência

Não há um ensaio específico para o controle da consistência na confecção do concreto permeável, no entanto, em alguns estudos, o ensaio de abatimento de tronco de cone é utilizado para esse fim.

Tennis, Leming e Akers (2004) propõem utilizar o método tátil-visual, o qual consiste em moldar uma pequena bola manualmente e aferir visualmente sua coesão e brilho. Contudo, tal procedimento não dispõe de norma ou critérios de avaliação. Segundo Zhong e Wille (2015), a melhor trabalhabilidade ocorre com aumento da superfície de contato entre os agregados, reforçando a ligação na região de contorno do agregado envolvido pela pasta deixando o concreto mais coeso.

O processo utilizado para visualizar a consistência da mistura, de forma

empírica, pelo teste tátil-visual para controle da consistência, conforme ilustrado na Figura 2, constitui-se em aplicar um pequeno esforço com a mão em determinada quantidade da mistura e examinar se ocorreu uma aglomeração dos agregados.

Figura 2 - Teste tátil-visual para controle da consistência da mistura



Fonte: Xie *et al.* (2018).

A falta de coesão visualizada na Figura 2 (a) acontecerá em concretos permeáveis de baixa trabalhabilidade em que se tem uma mistura muito seca e fraca ligação entre os agregados. Na Figura 2 (b), está representada uma pasta de cimento com trabalhabilidade adequada em que há a formação do concreto permeável em uma esfera e nenhuma pasta de cimento adere às luvas após o processo de compactação. A Figura 2 (c) representa uma pasta de cimento na qual os espaços vazios são colmatados. (XIE *et al.*, 2018).

O Quadro 1 apresenta os ensaios de consistência do concreto permeável e as normas utilizadas por alguns autores em suas pesquisas.

Quadro 1 - Ensaio de consistência do concreto permeável utilizado por alguns autores em seus estudos

Referência	Ensaio	Norma
Rizvi <i>et al.</i> (2010)	Abatimento do tronco de cone	NBR NM 67 (ABNT, 1998)
Mariano (2014)		
Alves (2016)		
Tavares e Kazmierczak (2016)	Consistômetro VeBe	DNIT 064 (2004)
Gentil (2020)	Abatimento do tronco de cone	NBR NM 67 (ABNT, 1998)
Teixeira (2020)	Tátil-visual	-
Bizão (2021)	Tátil-visual	-
Bezerra (2023)	Abatimento do tronco de cone / Consistômetro VeBe	NBR NM 67 (ABNT, 1998) / DNIT 064 (2004)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A norma da ABNT NBR 16416 (2015) recomenda que o processo de adensamento do concreto permeável nos corpos de prova, sempre que possível, deve reproduzir o adensamento realizado em campo.

Uma temática significativa na execução do concreto permeável é a compactação, tema pouco explorado nos trabalhos acadêmicos, porém de importância ímpar. Nesse sentido se apresentam os estudos de Mahboub *et al.* (2009) e Putman e Neptune (2011).

Mahboub *et al.* (2009) realizaram a comparação nas propriedades mecânicas do concreto permeável moldados em cilindros em laboratório, com os corpos de prova extraídos de pavimentos de concreto permeável moldados em campo.

Na parte do trabalho realizado em campo, foram utilizadas formas com tamanho de 180 x 240 x 20 cm, para que posteriormente houvesse a extração de testemunhos de concreto. A mistura de concreto permeável foi executada com uma espessura de aproximadamente 1,3 cm acima do nível da forma, de modo que esse excesso de material fosse compactado com rolo até o nível de 20 cm da forma. Para o procedimento de compactação, o rolo utilizado exercia 148 kg.m^{-1} com 60 cm de comprimento.

Na etapa laboratorial, foram executados os corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro por 20 cm de altura), com dois métodos de compactação. O primeiro com uma pressão pneumática, ajustando-se o rolo na prensa pneumática e aplicando-se, de forma axial, 0,07 MPa sobre as amostras que receberam concreto até restar uma camada de 1,3 cm acima da borda.

O segundo, o método foi o da ASTM C192-06, que se refere a uma compactação aplicando-se 25 golpes com uma haste distribuídos em duas camadas. Os cilindros compactados com a prensa pneumática produziram propriedades estatisticamente similares com o do pavimento em campo (resistência à compressão, coeficiente de permeabilidade e porosidade). Os cilindros compactados com a haste, por outro lado, apresentaram valores de resistência à compressão, significativamente, superiores aos do concreto executado em campo e valores de porosidade significativamente inferiores.

Já o trabalho de Putman e Neptune (2011) avaliou a diferença entre o concreto moldado *in loco* com os cilindros moldados de diferentes formas para analisar qual apresenta maior similaridade. No modelo *in loco*, a espessura do revestimento foi de 10 e 20 cm. O concreto permeável foi entregue por caminhões misturadores e

utilizados rolos de 100 cm de comprimento com 15 cm de diâmetro para compactar o material. Em cada concretagem, foram moldados cilindros (15 cm de diâmetro por 30 cm de altura) e aplicados diferentes números de golpes (5, 10, 15 e 25) em duas e três camadas com uma mesma haste padrão de compactação e um martelo de proctor padrão (2,5 kg). Os resultados evidenciaram que os cilindros mais próximos estatisticamente com os revestimentos foram os moldados com duas camadas de 10 golpes com o martelo de proctor.

A Tabela 3 apresenta o tipo e o procedimento de adensamento do concreto permeável utilizado por diversos autores em seus estudos.

Tabela 3 - Tipo e procedimento de adensamento do concreto permeável utilizado por diversos autores em seus estudos

Referência	Corpos de Prova		Tipo	Procedimento
	Forma	Dimensões		
Batezini (2013)	Cilíndrico	10Ø20cm	Proctor (2,5 kg)	03 camadas / 15 golpes em cada camada (+10 segundos de vibração em mesa)
	Prismático	10x10x40cm	Proctor (2,5 kg)	02 camadas / 25 golpes em cada camada (+10 segundos de vibração em mesa)
Alves (2016)	Cilíndrico	10Ø20cm	Proctor (2,5 kg)	02 camadas / 05 golpes em cada camada
Bechara (2017)	Placa	71x41x15	Rolo (65 kg/m)	02 camadas / 15 passagens em cada camada – Extração conforme item 5.5.3, página 60
Andrade Silva, Santa Bárbara (2019)	Cilíndrico	10Ø15cm	Proctor (2,5 kg)	Não descrito
Batezini (2019)	Cilíndrico	10Ø20cm	Proctor (2,5 kg)	03 camadas / 15 golpes em cada camada
	Cilíndrico	10Ø20cm	Martelo de borracha	Camada única / auxílio de anel de neopreme
	Prismático	10x10x40cm	Rolo (XX kg/m)	Kg/m não especificado
Bezerra (2023)	Prismático	10x10x40cm	Haste metálica	-
	Cilíndrico	10Ø20cm	Haste metálica	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.1.2 Massa unitária do agregado graúdo

A massa unitária é uma característica fundamental na confecção de concretos permeáveis, pois, dependendo da granulometria utilizada, o grau de empacotamento

das partículas pode ser muito elevado e elevar a densidade da mistura, ocasionando na diminuição dos vazios e poros interconectados (Fuller; Thompson, 1907).

Bechara (2017), em seus estudos, adota como variável de controle a faixa de distribuição granulométrica das partículas predefinindo 09 formulações, sendo 03 de granulometria uniforme (U1, U2 e U3) e 06 de granulometria descontínua (D1 à D6) fixando como variável de resposta a massa unitária dos agregados graúdos, que preconiza três métodos (A, B e C) para sua determinação. Para as composições de granulometria uniforme com intervalos de 19 a 12,5 mm, 12,5 a 6,3 mm e 6,3 a 2,36 mm, ou seja, aquelas constituídas apenas por um intervalo de tamanho de peneira, todas as misturas foram empregadas na produção do concreto poroso e avaliação de suas propriedades.

2.2.2 Propriedades do Concreto Permeável no Estado Endurecido

Assim como o concreto convencional e outros tipos de concreto, as propriedades do concreto permeável no estado endurecido serão dependentes fundamentalmente de sua composição e proporção entre os materiais utilizados (ACI, 2010).

Tennis, Leming e Akers (2004) apresentam intervalos de valores que caracterizam algumas propriedades associadas ao concreto permeável. Entre essas propriedades, a resistência à compressão de 3,5 a 28 MPa; resistência à flexão entre 1 e 48 MPa; permeabilidade de 0,2 cm/s a 0,54 cm/s; densidade, que geralmente tem uma variação entre 1,6 g/cm³ e 2,0 g/cm³.

2.2.2.1 Resistência à Compressão Axial

Entre os parâmetros mecânicos analisados no concreto permeável está a resistência à compressão. No Brasil, os limites para esses parâmetros são especificados pela ABNT NBR 16416:2015. A norma brasileira de concreto permeável estabelece diferentes limites de resistência mecânica de acordo com o tipo de revestimento aplicado, bem como descreve o método de ensaio a ser utilizado em função do tipo de solicitação, resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência mecânica e espessura mínima do concreto permeável

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	≥ 35	NBR 9781 (ABNT, 2013)
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 20	
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	≥ 2	NBR 15805 (ABNT, 2015)
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	≥ 1	NBR 12142 (ABNT, 2010)
	Tráfego leve	100	≥ 2	

a) Determinação da resistência à compressão, conforme a ABNT 9781.

b) Determinação da resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 15805.

c) Determinação da resistência à tração na flexão, conforme a ABNT NBR 12142.

Fonte: ABNT NBR 16416 (ABNT, 2015).

A resistência à compressão, segundo Tennis, Leming e Akers (2004), varia de 3,5 a 28 MPa, sendo o valor mediano da resistência 17 MPa. A Tabela 5 apresenta os valores de resistência à compressão axial em concretos permeáveis estudados por diferentes autores, em estudos realizados posteriormente. Nesses estudos observam-se concretos com resistência à compressão com valores de até 65,8 MPa.

Tabela 5 - Resistência à compressão axial em concretos permeáveis estudados por diferentes autores

(continua)

Referência	Resistência à Compressão (MPa)
Lian e Zhuge (2010)	11,6 – 19
Zaetang <i>et al.</i> (2013)	2,47 – 5,99
Ibrahim <i>et al.</i> (2014)	1,8 - 6,9
Torres, Hu e Ramos (2015)	3,2 - 17,9
Zhong e Wille (2015)	8,8 - 65,8
Vidal (2014)	7,80
Pils <i>et al.</i> (2019)	2,58 – 4,66
Gentil (2020)	6,21 – 28,00

(conclusão)

Referência	Resistência à Compressão (MPa)
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	7,77 – 11,73
Batezini <i>et al.</i> (2021)	7,51 – 8,68
Bezerra (2023)	6,84 – 9,98

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Oliveira (2017) relata que a aplicação de concretos permeáveis ocorre principalmente na camada de rolamento de pavimentos, assim, essa camada está sujeita aos esforços de tração na flexão, sendo essa a propriedade mecânica mais estudada nesse material. Foram encontradas poucas referências bibliográficas em que foi analisada a resistência à tração por compressão diametral no concreto permeável. Contudo, nos estudos realizados por Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014) e Pils *et al.* (2019), foram encontradas excelentes correlações entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à tração na flexão, verificada por meio dos respectivos ensaios. Martins Filho *et al.* (2020) e Batezini *et al.* (2021), também abordaram essa análise em seus trabalhos.

A Tabela 6 apresenta os valores de resistências à tração na compressão diametral e a resistência à tração na flexão obtida em algumas das referências da pesquisa.

Tabela 6 - Resistência à tração na compressão diametral e resistência à tração na flexão em concretos permeáveis estudados por alguns autores

Referência	Resistência à Tração na Compressão Diametral (MPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
Vidal (2014)	1,63 – 1,78	-
Pils <i>et al.</i> (2019)	0,54 – 2,52	0,70 – 6,35
Schackow <i>et al.</i> (2020)	-	2,18 – 2,42
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	1,49 – 2,33	-
Batezini <i>et al.</i> (2021)	0,25 – 1,24	2,03 – 2,22
Bezerra (2023)	3,44 – 6,94	1,74 – 3,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2.3 Permeabilidade

De acordo com Kia, Wong e Cheeseman (2017), a permeabilidade descreve a facilidade com que um meio poroso permite a passagem de um líquido sob um gradiente hidráulico. Para Tavares e Kazmierczak (2016), essa propriedade depende da distribuição, tamanho, forma, conectividade, tortuosidade e volume total dos poros.

Segundo o relatório do comitê ACI 522R (2010), o coeficiente de permeabilidade sofrerá variações com as dimensões do agregado e densidade da mistura, mas usualmente se encontram valores no intervalo de 0,0014 ($1,4 \cdot 10^{-3}$) a 0,0122 ($12,2 \cdot 10^{-3}$) m/s.

Neithalath, Sumanasooriya e Deo (2010), para a realização do ensaio de permeabilidade nas amostras de concreto permeável também utilizaram o permeâmetro de carga hidráulica descendente. Para um adequado funcionamento do teste, a amostra foi envolvida com uma membrana impermeável em torno de sua superfície exterior com o intuito de garantir a passagem da água apenas na parte central do corpo de prova, e não pelas laterais. O tempo que a água leva para cair de uma altura h_i para h_f no tubo é registrado. Com os dados das áreas das seções transversais da amostra “A1” e do tubo “A2”, com o comprimento da amostra “L”, os autores conseguiram encontrar o valor da condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade “K”, utilizando a equação:

$$k = \frac{A_1 L}{A_2 t} \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde

K= coeficiente de permeabilidade (m/s)

A1= área da sessão da amostra (m²)

A2= área da sessão interna do tubo (m²)

L= comprimento da amostra (m)

t= tempo (s)

h_i = Altura inicial (0,29 m)

h_f = Altura final (0,07 m)

A norma da ABNT NBR 16416 (2015) estabelece como requisito mínimo exigível para os pavimentos permeáveis de concreto, moldado no local, coeficiente de

permeabilidade maior que 1.10^{-3} m/s para todos os tipos de revestimentos. Para a avaliação da permeabilidade nos pavimentos permeáveis, a ABNT apresenta dois métodos, o descrito na NBR 13292, conforme ilustrado na Figura 3, quando a avaliação for realizada em laboratório. E o método descrito na NBR 16416, em seu Anexo A, quando a avaliação for realizada em campo, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3 - (a) Permeâmetro de carga variável - (b) Posicionamento do corpo de prova revestido com membrana látex para realização do ensaio de permeabilidade.



(a)



(b)

Fonte: Costa (2019).

Figura 4 - Equipamento para determinação do coeficiente de permeabilidade para utilização no campo.



Fonte: Costa (2019).

2.2.2.4 Resistência à degradação por impacto e por abrasão

Como foi relatado, a quantidade de água está diretamente relacionada às propriedades do concreto permeável. Essa quantidade determinará o desempenho do produto. Quando utilizada uma pequena quantidade de água, o concreto no estado fresco apresentará menor coesão e trabalhabilidade. Quando utilizada uma quantidade excessiva de água, resultará no preenchimento dos vazios devido o escoamento da pasta da superfície do agregado. Trindade e Lopes (2018) descrevem que o efeito seria uma resistência à degradação por impacto e por abrasão baixa prejudicando a qualidade do produto.

O concreto permeável aplicado como camada de revestimento em pavimentos estará sujeito ao desgaste superficial, ocasionado pelo atrito entre o pavimento e as rodas dos veículos. A análise da resistência à degradação por impacto e por abrasão procura o entendimento do comportamento da camada de concreto permeável submetida ao tipo de esforço que gera esse desgaste superficial.

Dentre as pesquisas que abordam essa análise e fornecem um aparato para desenvolvimento dos ensaios experimentais, destacam-se as realizadas por Gaedicke, Marines e Miankodila (2014), as quais apresentam dois métodos para a realização do ensaio de perda de massa por abrasão, ASTM C944 (2012) e ASTM C1747 (2013). Segundo os autores, o último método apresenta menor variância dos resultados. Nas referências bibliográficas pesquisadas, observa-se uma variedade de métodos para a realização do ensaio de determinação do desgaste sofrido pelo pavimento. Na Tabela 7, apresentam-se os resultados dos ensaios de desgaste do concreto com suas respectivas unidades de medida e as normas utilizadas.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de desgaste - concreto permeável

Referência	Desgaste (Unid)	Norma utilizada
Mariano (2014)	1,43 – 5,20 (%)	ABNT NBR 12042 (2012)
Yap et al. (2018)	40 – 50 (%)	ASTM C1747 (2013)
Gentil (2020)	16,55 – 80,95 (%)	ASTM C1747 (2013)
Bezerra (2023)	2,98 – 14,08 (g)	DIN 53516 (2004)

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2.5 Densidade e Índice de Vazios

Monteiro (2010) descreve que o índice de vazios é a propriedade de descontinuidade da matéria, apresentando vazios entre as massas. Segundo a ACI 522 (2010), o índice de vazios deve variar entre 15% e 35%, para que o concreto seja considerado permeável.

Outro método próprio para a determinação da densidade (massa específica) e índice de vazios do concreto permeável no estado fresco, utilizado por Chandrappa e Biligiri (2016) e Meddah *et al.* (2017), é o descrito na norma ASTM C1688 (2014). Valores de densidade (massa específica) considerados ideais, segundo a norma, precisam estar entre 1750 - 2000 kg/m³. A moldagem da mistura é realizada em duas camadas com a mesma altura, em cada camada o adensamento é realizado com o martelo *Proctor* de 2,5 kg com uma altura de queda de 30,5 cm.

A Tabela 8 apresenta os resultados dos índices de vazios do concreto permeável encontrados em algumas referências bibliográficas.

Tabela 8 - Resultados dos índices de vazios do concreto permeável

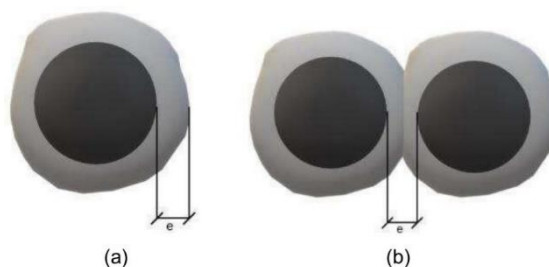
Referência	Índice de vazios Fresco (%)	Índice de vazios Endurecido (%)
Tennis <i>et al.</i> (2003)	Na ordem de 20	-
Sandoval <i>et al.</i> (2019)	15 – 20	-
Aquino <i>et al.</i> (2019)	15 – 25	-
Martins Filho <i>et al.</i> (2020)	20 – 29	-
Gentil (2020)	-	15,28 – 32,21
Teixeira (2020)	25 – 27	26 – 30
Batezini <i>et al.</i> (2021)	Na ordem de 25	-
Bezerra (2023)	7 – 15	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.2.2.6 Espessura da pasta por análises de imagens

Um método adotado por Yu *et al.* (2019), para medir a espessura real de pasta aderida ao agregado no concreto permeável, foi fatiar corpos de prova cilíndricos. Para medição da espessura real de pasta, foram capturadas algumas imagens das fatias da amostra. Nessas fatias foram identificados alguns elementos como o agregado, a pasta aderida e os poros. Para ilustrar o procedimento, a Figura 5 destaca os elementos capturados para determinação da espessura real de pasta aderida.

Figura 5 - Espessura real de pasta.



Fonte: Gentil (2020).

A técnica de análise de imagens digitais em duas dimensões (2D) fornece resultados quantitativos do formato, espessura, número e tamanho de poros. O uso de programas específicos para o tratamento e processamento de imagens possibilita um método rápido e eficiente para quantificar sistemas porosos e a espessura de pasta. No entanto, pelo alto custo dos programas comerciais, os programas livres podem ser uma interessante alternativa para análises das imagens.

As imagens 2D podem ser obtidas usando uma câmera fotográfica e posteriormente submetidas ao tratamento das imagens, processadas e analisadas, usando o programa livre "ImageJ".

Güneyisi *et al.* (2016) registram, em seus estudos sobre concretos permeáveis, que uma estreita camada de pasta cimentícia é o bastante para cobrir o agregado. Para aumentar a resistência mecânica, é necessário melhorar a qualidade da pasta cimentícia e aumentar sua espessura. Mesmo para um aumento da espessura de pasta há um limite. Segundo Yu *et al.* (2019), há um incremento na resistência à compressão, entretanto, a resistência tende a se estabilizar quando a pasta atinge a espessura de 1,15 mm.

2.3 PARÂMETROS DE DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL

O parâmetro genérico para a dosagem da mistura do concreto permeável é o equilíbrio entre as propriedades requeridas, tais como, trabalhabilidade, vazios (poros), teor de pasta e resistência. O desenvolvimento de dosagens da mistura de concreto permeável é frequentemente um processo repetitivo de tentativa e erro. (ACI, 2010).

Assim como no concreto convencional, todos os métodos de dosagem de concreto permeável, aqui apresentados, necessitam de informações referentes às propriedades dos materiais utilizados.

Quatro métodos de dosagem de concreto permeável, o do National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA) (2009), o do American Concrete Institute (ACI) (2010), o de Zheng, Chen e Wang (2012) e o de Nguyen *et al.* (2014), utilizaram materiais disponíveis no mercado da construção civil brasileiro. Os métodos são todos internacionais, visto que no Brasil não há um método estabelecido para dosagem de concreto permeável, embora existam pesquisas em concreto permeável utilizando métodos de dosagem do IPT / EPUSP, como verificado por Costa (2019).

Ambos os métodos não mencionam os valores de aditivos a serem adotados nos experimentos, nem apresentam um intervalo a ser seguido. Apenas mostram quais os tipos de aditivos que podem ser utilizados nas misturas.

O método de Zheng, Chen e Wang (2012) chama a atenção, porque, além de possuir como parâmetro de entrada a porosidade, o que é comum aos três métodos, também tem como entrada a resistência à compressão. Já o método de Nguyen *et al.* (2014) é o único do tipo analítico, e não empírico, como os outros.

2.3.1 Influência dos Materiais na Dosagem dos Concretos Permeáveis

Neste item será apresentado cada material utilizado nas misturas de concreto permeável, bem como, a influência destes na dosagem dos concretos permeáveis. Para tanto, foram separados nos seguintes subitens: aglomerantes e agregados.

2.3.1.1 Aglomerantes: cimento e metacaulim

De acordo com Chandrappa e Biligiri (2016), o material mais utilizado na produção do concreto permeável é o cimento Portland, este acrescido da água, apresenta a função de fornecer revestimento em torno dos agregados e, assim, aumentar a durabilidade do material.

No Quadro 2, consta a relação de tipos de cimentos mais utilizados na produção de concreto permeável, segundo alguns autores da área científica.

Quadro 2 - Tipos de cimentos utilizados por alguns autores da área científica

Referência	Tipo de Cimento Utilizado*
Putman e Neptune (2011)	CPI
Batezini (2013)	CP III 40 RS
Chen <i>et al.</i> (2013)	CPI
Hesami, Ahmadi e Nematzadeh (2014)	CPI-RS
Mariano (2014)	CP II Z 32 RS
Jimma e Rangaraju (2014)	CPI
Vidal (2014)	CP II E-32
Ibrahim <i>et al.</i> (2014)	CPI
Lamb (2014)	CP V-ARI
Zhong e Wille (2015)	CPI
Torres, Hu e Ramos (2015)	CPI
Hariyadi e Tamai (2015)	CPI
Barbosa e Pereira (2015)	CP V-ARI
Jimma e Rangaraju (2015)	CPI
Alves (2016)	CP II Z 32
Fonseca (2016)	CP V-ARI
Tavares e Kazmierczak (2016)	CP IV 32
Meddah <i>et al.</i> (2017)	CPI
Girardi e Finocchiaro (2017)	CP V-ARI
Trindade e Lopes (2018)	CP II F-32
Mohammed <i>et al.</i> (2018)	CPI
Gentil (2020)	CP II F-40
Teixeira (2020)	CP II E-32
Bizão (2021)	CP V-ARI
Bezerra (2023)	CP V-ARI

*Denominação brasileira.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de utilizar apenas o cimento Portland como ligante no concreto permeável, observam-se registros em pesquisas com uso de adições minerais, como sílica ativa, metacaulim, cinza de casca de arroz e outros, como substituição parcial do cimento. Segundo Andrade, Silva e Bárbara (2019), “a utilização de adições minerais altamente reativas pode amenizar a redução da resistência à compressão do concreto permeável por meio da densificação da matriz cimentícia” ocasionada na reação pozolânica e no efeito *fíler*.

Segundo Fu *et al.* (2014), em alguns casos, o uso de adições minerais gera uma redução na resistência mecânica do concreto permeável ao exceder determinado percentual de substituição parcial.

Para Santos *et al.* (2017), o metacaulim atua como um aditivo tixotrópico e um modificador da viscosidade da pasta de cimento. Sua utilização, em substituição parcial (5% a 10%) do cimento, pode resultar em um aumento médio de 30 a 45% na resistência à compressão.

Outra forma de melhorar as propriedades do concreto permeável, no estado fresco e endurecido, é a utilização de aditivos. Aditivos plastificantes e superplastificantes são responsáveis por reduzir o conteúdo de água, aumentar o abatimento e a fluidez de um concreto. Segundo Trindade e Lopes (2018), esses aditivos proporcionam uma mistura plástica e eliminam o excesso de água responsável pela retração hidráulica e futuras fissurações na estrutura. Assim, o plastificante reduz a tensão superficial da água, proporciona menor atrito dinâmico e proporciona o efeito de dispersão de partículas finas.

Os aditivos retardadores de pega utilizados em concreto são encarregados de aumentar o tempo necessário para a mudança do estado plástico para o endurecido. Trindade e Lopes (2018) relatam que esses aditivos possibilitam melhorias no concreto, tais como, elevados valores para a resistência à compressão e à tração, maior plasticidade, aumento da durabilidade, redução de exsudação e fissuras dentre outros benefícios.

Aditivos modificadores de viscosidade produzem misturas mais coesas e inibem a drenagem da pasta. O aditivo modificador de reologia foi utilizado por Rangelov *et al.* (2016) e por Costa (2019) em suas pesquisas.

Como relatado anteriormente nesta pesquisa, não será utilizado aditivo como meio de resguardar os efeitos provenientes unicamente da substituição empregada.

2.3.1.2 Agregados

De acordo com Yahia e Kabagire (2014), a classificação do tamanho das partículas do agregado interfere em algumas propriedades do concreto permeável, como, por exemplo, o índice de vazios, capacidade de trabalho, segregação e durabilidade. Estudos como os realizados por Lian e Zhuge (2010), Batezini e Balbo (2015) e Bechara (2017) têm utilizado agregado graúdo nas dimensões entre 9,5 mm e 6,3 mm, com o intuito de aumentar a resistência mecânica.

Consoante ao relatado por Chandrappa *et al.* (2016), referente às diferentes proporções de misturas encontradas nas pesquisas realizadas, o consumo de

agregado apresenta uma variação de 1400 kg/m³ a 1800 kg/m³ e a relação de agregado para cimento varia de 4:1a 12:1.

2.3.2 Proporções de Materiais e a Trabalhabilidade da Pasta

Segundo Kia, Wong e Cheeseman (2017), há uma enorme variação na composição da mistura de concreto permeável. A Tabela 9 descreve o intervalo de consumo de material.

Tabela 9 - Intervalo de consumo de material nas misturas de concreto permeável

Materiais	Intervalo
Cimento*	150-700 kg/m ³
Agregado graúdo	1100-2800 kg/m ³
Agregado fino**	0-100 kg/m ³
Relação água/cimento	0,2- 0,5
Relação agregado/cimento	2 - 12
Relação agregado graúdo/finos	0-0,07

*Cimentos Portland e cimentos compostos contendo materiais cimentícios complementares, incluindo cinza volante (5-65% em substituição ao cimento), escória de alto forno moída (20-70% em substituição ao cimento) e sílica ativa (5-12% em peso de substituição de cimento) podem ser usados em concreto permeável.

**A quantidade de agregado fino é normalmente limitada a 0-7% em peso da quantidade de agregado graúdo.

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

O teor de água é essencial na dosagem de concreto e apresenta duas funções principais: auxiliar na trabalhabilidade do concreto e proporcionar a reação química entre as partículas desse componente.

No concreto permeável, a quantidade de água está diretamente relacionada às propriedades desse componente, a qual determinará o desempenho da estrutura. Se for utilizada água em pouca quantidade, o concreto no estado fresco apresentará menor coesão e trabalhabilidade. Já se usar uma quantidade excessiva de água, resultará no preenchimento dos vazios devido ao escoamento da pasta da superfície do agregado. Esse efeito acarreta em uma resistência à abrasão superficial baixa prejudicando a qualidade do produto (Trindade e Lopes, 2018).

De acordo com Xie *et al.* (2018), a relação água/cimento, a dosagem de aditivos e a proporção do volume de pasta interferem na espessura da pasta cimentícia aderida ao agregado, afetando o sistema de vazios e determinando as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável.

A espessura de pasta que envolve o agregado é um fator de grande importância nas propriedades do concreto permeável. Uma pasta de cimento mais espessa resulta em menor permeabilidade reduzindo os vazios, dessa forma contribuindo para a melhora das propriedades mecânicas e da durabilidade.

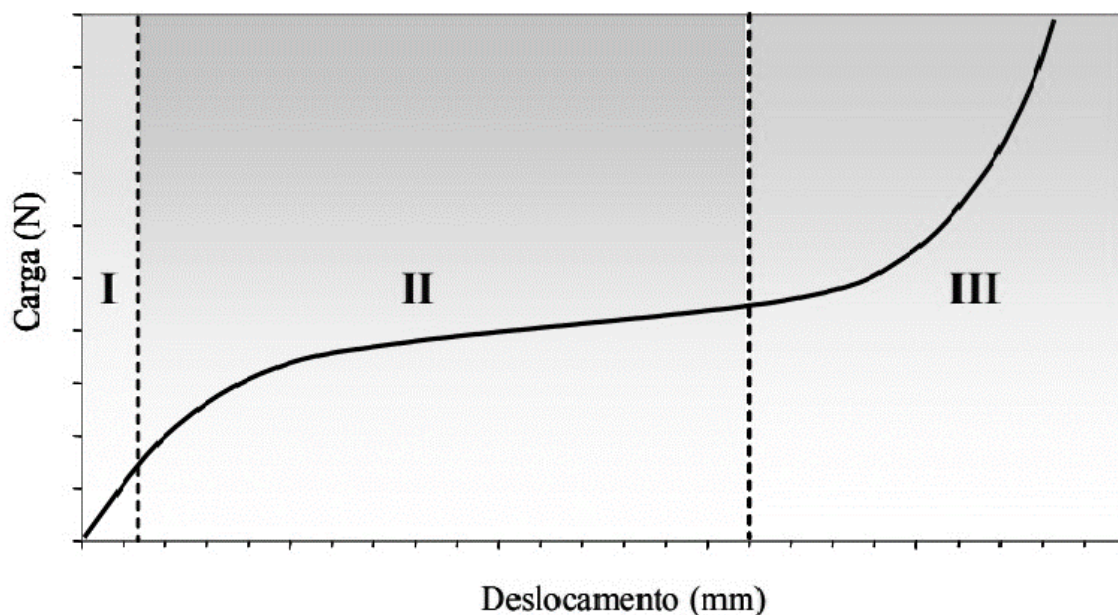
Uma espessura de pasta cimentícia menor é consequência do uso de pastas mais fluidas, e resultará na drenagem desse material para o fundo do concreto permeável, com isso tanto a permeabilidade quanto as propriedades mecânicas serão prejudicadas.

Dessa forma, a ideia é obter uma espessura de pasta cimentícia com propriedades reológicas adequadas, para que não ocorra a colmatação dos vazios e haja a maximização da permeabilidade e das propriedades mecânicas do concreto permeável.

Hoppe Filho, Cardoso e Cincotto (2006), no artigo "Técnicas de Caracterização Reológica de Argamassas", oferecem um panorama completo sobre as técnicas usadas para analisar a reologia das argamassas. Essas técnicas são fundamentais para entender como esses materiais se comportam e melhoram suas propriedades para várias aplicações na construção civil.

O ensaio de squeeze-flow em materiais cimentícios é realizado comprimindo axialmente uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, controlando a força ou a deformação aplicada. Este ensaio, mencionado por Cardoso, Pileggi e John (2005), Kolenda *et al.* (2003) e Phan *et al.* (2006), é de execução simples e oferece repetibilidade, fornecendo resultados de carga em relação ao tempo e ao deslocamento. Na prática, simula as condições de fluxo da pasta de cimento entre os agregados no concreto. O princípio fundamental baseia-se na deformação por cisalhamento radial quando a razão entre o diâmetro (D) e a espessura da amostra (h) é alta ($D/h > 5$). Razões inferiores levam ao surgimento de tensões de compressão, conforme destacado por Meeten (2004). Uma curva típica de carga versus deslocamento obtida neste ensaio pode apresentar três regiões bem definidas, conforme a Figura 6.

Figura 6 - Perfil típico de uma curva carga versus deslocamento de um ensaio de squeeze-flow com controle de deformação



Fonte: Betioli (2009).

Betioli *et al.* (2009) explicam que, na fase I, quando as deformações são pequenas, o material se comporta de forma linear e elástica. Já na fase II, o material pode se deformar bastante com um leve aumento na força aplicada, caracterizando uma deformação plástica ou um fluxo viscoso. Na fase III, a força necessária para comprimir o material cresce bastante, indicando o estágio de enrijecimento por deformação.

O teste de *squeeze-flow* pode revelar parâmetros reológicos essenciais, como a viscosidade e a tensão de escoamento. Analisar o comportamento reológico de materiais à base de cimento não é nada simples, pois envolve diversos tipos de materiais (concretos, argamassas, pastas, fibrocimento), condições variadas de mistura (velocidade, tempo, escoamento) e diferentes métodos de aplicação (extrusão, autoadensável, bombeamento, etc.), além da própria natureza reativa do cimento.

Diversos pesquisadores (Gentil (2020); Jimma e Rangaraju (2014); Xie *et al.* (2018) e Yu *et al.* (2019)) têm desenvolvido estudos com o objetivo de determinar a espessura ideal de pasta que envolva o agregado gráudo sem o preenchimento dos vazios dos macroporos. Contudo, os autores não obtiveram bons resultados passíveis de comprovação prática.

2.4 INTERDEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DE DOSAGEM

Neste item, serão abordadas algumas interdependências entre os parâmetros de dosagem. Para tanto será considerada a influência nas propriedades do concreto permeável no estado fresco e no estado endurecido.

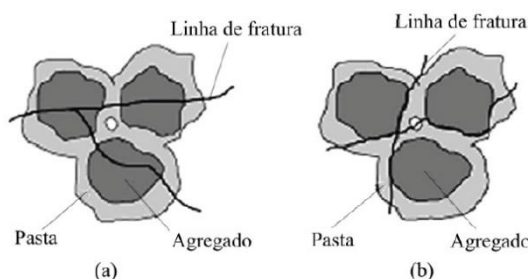
“Devido à variabilidade de suas propriedades e à dependência de inúmeras variáveis, não existe uma mistura ótima em termos absolutos, sendo o projeto de um concreto permeável abrangente de um estudo de consistência e energia de compactação” (Costa, 2019, p. 168).

Segundo Jimma e Rangaraju (2014), a pasta de cimento afeta tanto as propriedades do concreto permeável no estado fresco quanto no estado endurecido. Considerando que a matriz do concreto permeável é formada pela aglomeração dos agregados revestidos por pasta, dessa forma, no estado endurecido a resistência é desenvolvida na pasta e transferida para o agregado por meio da ligação entre eles.

De maneira geral, a incorporação de materiais cimentícios suplementares como substituição parcial ao cimento Portland não alteram as propriedades hidrológicas do concreto permeável de maneira ressaltante como ocorre na consequência de incorporação de areia, principalmente nas frações mais finas. A utilização desses materiais nas proporções ideais costuma aumentar a resistência da zona de transição (ZT) entre a pasta e o agregado, gerando a modificação do modo de ruptura do material (Chen *et al.*, 2012).

A Figura 7 apresenta o padrão de ruptura do concreto permeável verificado por Chen *et al.* (2012).

Figura 7 - Padrão de ruptura: (a) resistência forte - (b) resistência fraca



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2012).

Considerando a Figura 7 (a), observa-se que a ruptura ocorreu no agregado e na pasta cimentícia, indicando que foi utilizada uma pasta forte na mistura. Enquanto

na Figura 7 (b), verifica-se que a ruptura ocorreu adjacente ao agregado e à pasta cimentícia, indicando a ligação fraca entre pasta e agregado.

2.4.1 Influências nas Propriedades do Estado Fresco

O comportamento das misturas de concreto permeável com substituição parcial do cimento Portland por metacaulim sofre uma influência considerável do teor de pasta cimentícia, bem como da coesão e da distribuição da pasta. Tanto na envoltória do agregado como ao longo da estrutura do concreto. A avaliação de seu comportamento reológico e o uso de diferentes relações metacaulim/cimento e relações água/ligantes nas pastas é de suma importância para a determinação de suas propriedades mecânicas e hidráulicas, assim como para a determinação da espessura de pasta aderida ao agregado gráúdo.

A espessura de pasta individual de cada agregado é considerada como sendo a média da espessura de pasta que envolve os agregados considerados na análise. Uma camada de pasta mais espessa apresentará menos vazios, menor permeabilidade, maior resistência mecânica e maior durabilidade, enquanto a espessura de pasta mais fina resulta em escorrimento da pasta e concentração desta na camada inferior do concreto, tornando-o impermeável pelo fechamento dos poros, comprometendo a sua resistência mecânica e durabilidade.

Assim, a meta é alcançar uma espessura de pastas com propriedades reológicas adequadas, para que não ocorra o preenchimento dos vazios, promovendo a otimização da permeabilidade, da resistência mecânica e da durabilidade. A Figura 8 ilustra o processo descrito anteriormente, representando o comportamento reológico da pasta.

Figura 8 - Comportamento reológico da pasta



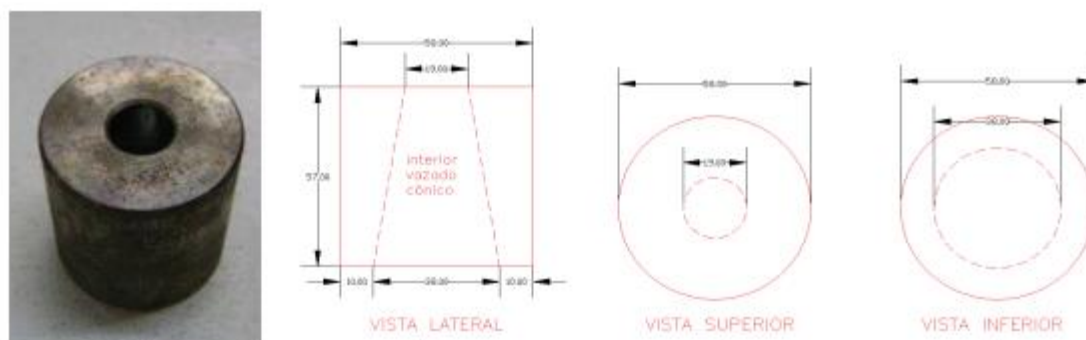
Fonte: Adaptado de XIE *et al.* (2018).

A NBR 13278 (ABNT, 2005) apresenta procedimentos para encontrar a densidade de massa em argamassas, no entanto, Gentil (2020) aplica o mesmo método para estabelecer a densidade de massa da pasta.

A consistência da pasta pode ser medida de acordo com o processo desenvolvido por Kantro (1980), conhecido como ensaio de minitronco de Kantro ou miniabatimento. Esse método é amplamente utilizado como uma medida alternativa para se obter as propriedades reológicas de pastas de cimento. (Jimma; Rangaraju, 2014; Jimma; Rangaraju, 2015). O objetivo de executar o teste de minitronco de Kantro é medir a fluidez das pastas cimentícias por meio da medição do diâmetro da área de espalhamento dessas misturas, visto que, segundo Jimma e Rangaraju (2015), a fluidez das pastas de cimento apresenta uma relação direta com a fluidez da mistura de concreto permeável no estado fresco. Dessa forma, maior fluidez da pasta acarretará maior trabalhabilidade no concreto permeável.

O equipamento utilizado, Figura 8, tem a forma tronco-cônica, conforme apresentado em Gentil, Kazmierczak e Sentena (2019). Possui uma altura de 58 mm, diâmetro inferior de 40 mm e diâmetro superior de 18,60 mm.

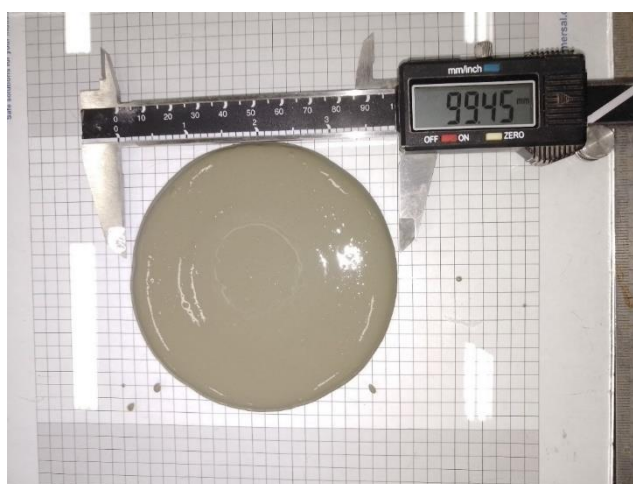
Figura 9 - Minitronco de Kantro



Fonte: Krug (2011).

O resultado do espalhamento proveniente do ensaio de consistência de pasta realizado em todas as misturas produzidas é obtido a partir da média de três valores de diâmetro, medidos com um paquímetro conforme ilustrado na Fotografia 1.

Fotografia 1 - Avaliação da consistência da pasta



Fonte: Registrada pelo autor.

Segundo Jimma e Rangaraju (2014), o teste com a utilização do minitronco de Kantro tem sido usado para determinar a fluidez das pastas. A experiência mostra que é necessário um mínimo de 80 mm de espalhamento, para que uma pasta seja misturada de forma satisfatória com o agregado. Entretanto, a propriedade de formação de película da pasta reduz conforme o espalhamento aumenta. A partir de uma determinada fluidez, a pasta escorre na superfície do agregado acumulando-se no fundo e diminuindo a permeabilidade da mistura. Dessa forma, é significativo atender tanto a fluidez quanto as propriedades de formação de película durante a seleção da pasta.

2.4.2 Influências nas Propriedades do Estado Endurecido

Segundo Silva (2019), no estado endurecido, o concreto permeável apresenta características distintas que o diferenciam bastante dos concretos convencionais. Essas diferenças são principalmente atribuídas à ausência de finos, o que o torna altamente poroso, mais rugoso e geralmente menos resistente.

A estrutura do concreto permeável não se resume apenas aos seus componentes básicos de cimento, agregados e água; ela inclui também a zona de contato entre esses elementos. Essa zona, conhecida como interface pasta/agregado ou zona de transição, surge quando uma película de água envolve os agregados durante o processo de exsudação no concreto, aumentando a relação água/cimento nessa área. Esse aumento na relação água/cimento faz com que os produtos cristalinos formados tenham um tamanho relativamente maior do que aqueles presentes na matriz, resultando em uma estrutura mais porosa na interface.

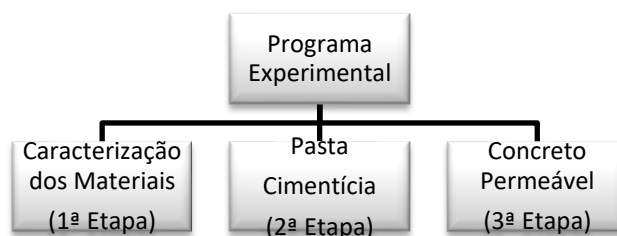
Segundo Tennis, Leming e Akers (2004), devido à alta porosidade, as resistências à compressão e à tração são menores em comparação aos concretos convencionais, variando entre 3,5 a 28 MPa para compressão e de 1 a 3,8 MPa para tração na flexão.

Estudos que exploraram a adição de materiais cimentícios suplementares, como o realizado por Zhong e Wille (2015), que incorporaram sílica ativa em suas misturas, demonstraram grande potencial do ponto de vista mecânico. Os autores variaram a granulometria do agregado e a proporção de aglomerante para agregado, além de utilizar sílica ativa, alcançando resistências à compressão de 14,6 a 65,8 MPa em concretos permeáveis com porosidade variando entre 19,8 a 30,2%.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresentar-se-ão as fases do programa experimental elaborado com intuito de alcançar os objetivos elencados. Considerando as características dos materiais e os métodos utilizados, com foco em analisar a influência no desempenho mecânico e hidráulico do concreto permeável proveniente da substituição parcial do cimento portland, em percentuais distintos (5%, 10% e 15%), por metacaulim de alta reatividade. Foram descritas as fases do programa experimental em três diagramas, os quais retratam seu detalhamento. A Figuras 10 mostra o diagrama do programa experimental contendo as três etapas desta pesquisa.

Figura 10 - Diagrama do Programa Experimental (1ª, 2ª e 3ª Etapa)



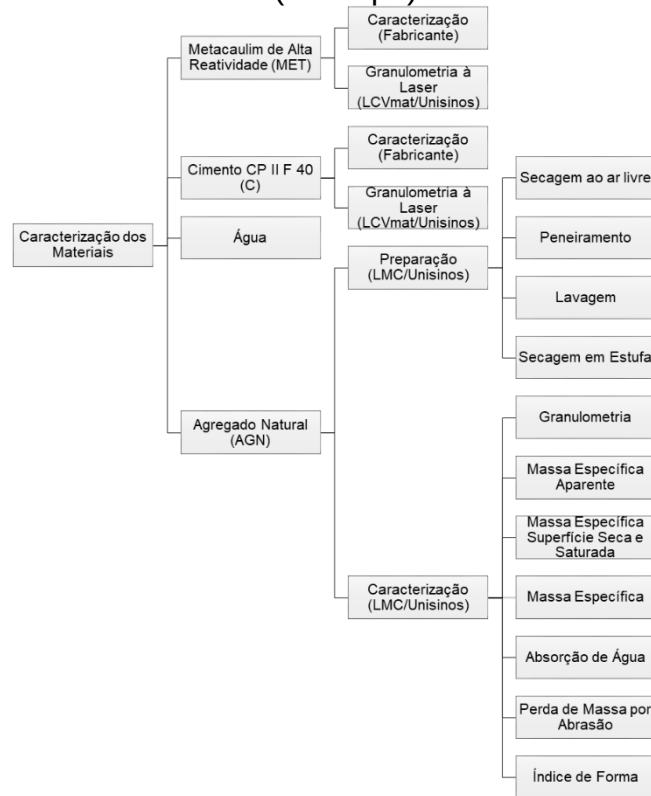
Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, indicam-se quais os fatores de controle com níveis variáveis de estudo, os fatores fixos, as variáveis de resposta, além dos materiais utilizados e os ensaios realizados.

Todos os ensaios foram realizados nas instalações laboratoriais da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, na cidade de São Leopoldo, no estado do Rio Grande do Sul.

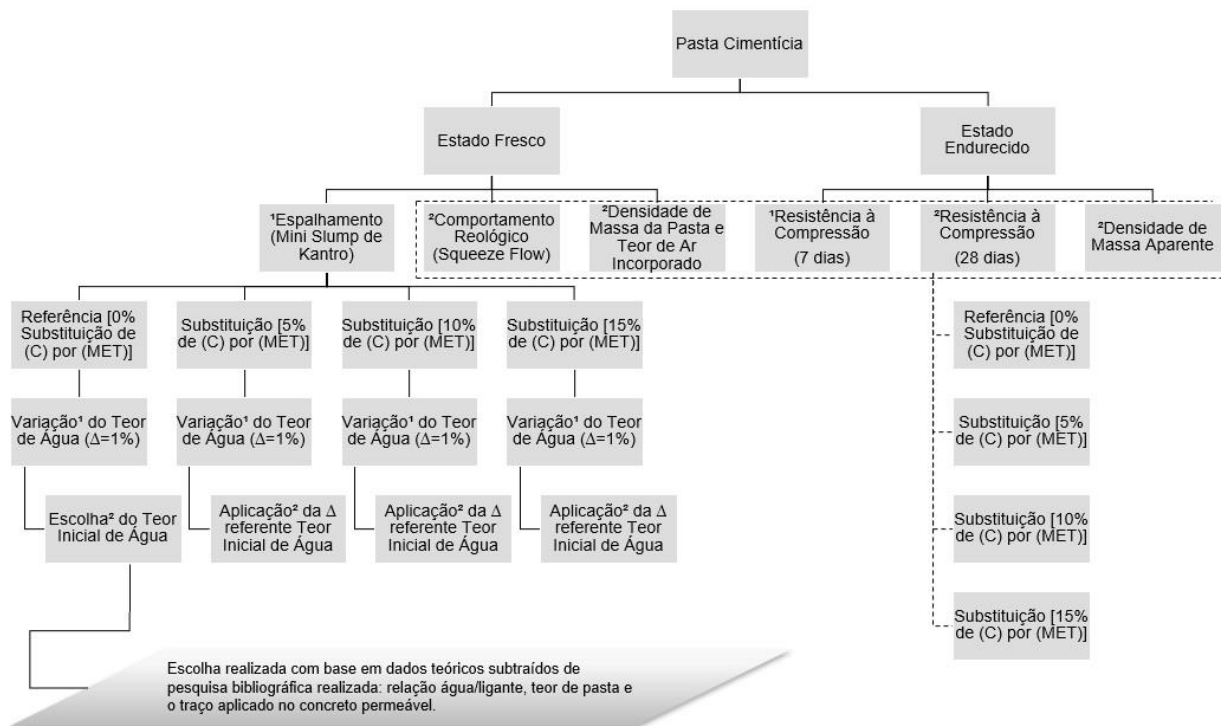
As Figuras 11, 12 e 13 mostram uma síntese das etapas (1ª, 2ª e 3ª) desta pesquisa em diagrama do programa experimental.

Figura 11 - Diagrama do Programa Experimental: Caracterização de Materiais (1ª Etapa)



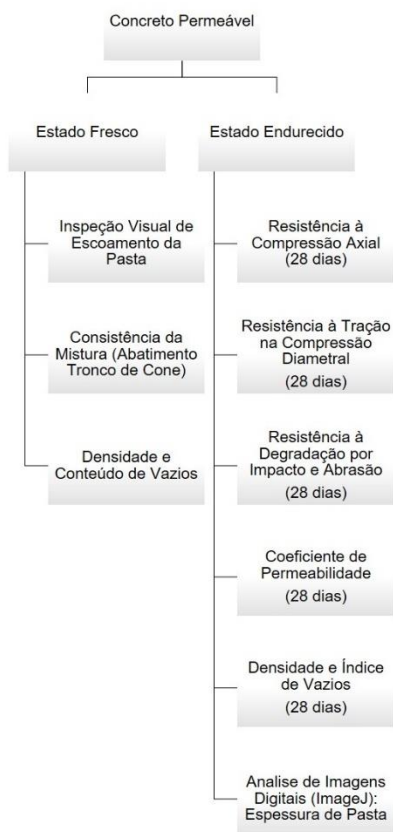
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 - Diagrama do Programa Experimental: Pasta Cimentícia (2ª Etapa)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 13 - Diagrama do Programa Experimental: Concreto Permeável (3ª Etapa)



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1 FATORES E VARIÁVEIS

Para atingir os objetivos sugeridos neste tratado, foram estabelecidos os fatores de controle com níveis variáveis e fixo de estudo, fatores não controlados e as variáveis de resposta.

3.1.1 Fatores de Controle com Níveis Variáveis de Estudo

Neste estudo, o teor de substituição parcial de CIMENTO por METACAULIM, o qual reflete nos percentuais de cimento, metacaulim e o teor de água foram considerados como fatores de controle com níveis variáveis de estudo.

a) Teor de substituição parcial de CIMENTO por METACAULIM

A substituição parcial, em massa, de cimento por metacaulim de alta reatividade foi nos teores de 5%, 10% e 15%.

b) Teor de água

Foi realizado um estudo das pastas (REFERÊNCIA_0% MET, 5% MET, 10% MET e 15% MET) para determinar o teor de água mais adequado em função do teor de metacaulim.

A partir do teor de água, em massa, da pasta referência foi aplicada a variação determinada para cada percentual de substituição.

3.1.2 Fatores de Controle com Nível Fixo

Nesta exposição, o tipo de rocha, a granulometria do agregado graúdo natural, a idade dos ensaios, o traço do concreto, o tipo de corpo de prova, o ensaio de consistência do concreto permeável, o processo de adensamento e a cura do concreto permeável são considerados como fatores de controle com nível fixo:

a) Tipo de rocha

O agregado graúdo natural (pedra britada) de origem basáltica empregado na pesquisa foi adquirido no comércio local.

b) Granulometria do agregado graúdo natural

Foi utilizado agregado graúdo natural (pedra britada) com granulometria uniforme, grãos passantes na peneira 9,5 mm e retidos na peneira 6,3 mm.

c) Idade dos ensaios

Para estabelecer e fixar as idades de realização dos ensaios se procurou adotar as idades de ensaio utilizadas por outros pesquisadores que já estão estudando o concreto permeável, bem como atender à necessidade específica de cada ensaio. A Tabela 10 apresenta as idades do concreto na qual serão realizados os ensaios.

Tabela 10 - Idade do concreto na realização dos ensaios

Ensaio	Norma / Método	Estado (Fresco/ Endurecido)	Idade (dias)
Densidade e índice de vazios	ASTM C1688 (2014)	Fresco	–
Resistência à compressão	Adaptado NBR 5739 (ABNT,2018)	Endurecido	28
Resistência à tração na compressão diametral	Adaptado NBR 7222 (ABNT, 2011)	Endurecido	28
Permeabilidade	ACI 522 (2010)	Endurecido	28
Densidade e índice de vazios	ASTM C1754 (2012)	Endurecido	28
Resistência à abrasão	Adaptado ASTM C1747 (2013)	Endurecido	28
Análise de imagens digitais (ImageJ)	-	Endurecido	28

Fonte: Elaborada pelo autor.

d) Traço

Foi utilizado o traço de 1:3,35 para produção do concreto permeável. A escolha do traço foi em função de apresentar bons resultados em pesquisas anteriores referentes à otimização de misturas de concreto permeável, a exemplo das pesquisas realizadas por Bizão (2021) e Mikami (2022).

e) Tipo de corpo de prova

Todos os corpos de prova usados nos exames possuem as dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, moldados em forma cilíndrica para os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral, permeabilidade, índice de vazios, massa específica e resistência à abrasão.

f) Ensaio de consistência do concreto permeável

Considerando que o concreto permeável apresenta classe de abatimento igual a “zero”. A norma ABNT NBR 16889 (2020) a qual especifica um método para a determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone em concreto fresco foi utilizada apenas como parâmetro de controle, uma vez que a norma não se aplica a concretos com abatimento igual a “zero”.

g) Processo de adensamento do concreto permeável

No adensamento do concreto permeável para moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi adotado procedimento descrito no item 7.4 da ABNT NBR 5738 (2015 – versão corrigida 2016), a qual no item 1.2 dispõe não ser aplicável a concretos com o abatimento igual a zero. Entretanto, com o intuito de padronizar tal procedimento, nessa pesquisa foi utilizado o referido procedimento de adensamento, com alteração do número de golpes para adensamento manual em duas camadas, de 12 para 15, para todos os corpos de prova, os quais foram adensados com a utilização de haste metálica.

h) Tipo de cura

A cura do concreto foi realizada em uma sala apropriada (câmara úmida) com controle de umidade e temperatura. Para tanto, as amostras, após 24 horas da moldagem, foram desmoldadas, identificadas e armazenadas nesse ambiente com umidade relativa do ar superior a 95% e uma temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até o período da execução dos ensaios no estado endurecido.

3.1.3 Fatores Não Controlados

A temperatura e a umidade relativa do ar, no decorrer da moldagem dos corpos de prova, são consideradas como fatores que não poderão ser controlados no preparo dos concretos.

3.1.4 Variáveis de Resposta

A espessura de pasta cimentícia aderida; a densidade e o índice de vazios no estado fresco; a resistência à compressão axial no 28º dia; a resistência à tração na compressão diametral no 28º dia; a resistência à abrasão no 28º dia; a permeabilidade no 28º dia; a densidade e o índice de vazios no estado endurecido no 28º dia são considerados como as variáveis de resposta para os exames efetuados:

a) Espessura de pasta cimentícia aderida

A espessura de pasta foi determinada a partir dos dados fornecidos pelo programa livre "Image J", usado para medir espessura de pasta compreendida entre dois agregados, a partir de análise de imagens digitais. As imagens digitais 2D se referem a fotografias de cortes em camadas distintas, seções transversais e seções longitudinais (em 3 camadas e em 4 camadas) dos corpos de provas com a utilização de uma Câmera fotográfica Nikon D5200.

b) Densidade e índice de vazios no estado fresco

Foram determinados a densidade e o índice de vazios do concreto permeável no estado fresco conforme a norma ASTM C1688 (2014).

c) Resistência à compressão axial

Na determinação da resistência à compressão axial, foi adotada a norma ABNT NBR 5739 (2018) como parâmetro, uma vez que o item 4 desta menciona que os corpos de prova moldados devem atender à ABNT NBR 5738 (2015 – versão corrigida 2016), a qual no item 1.2 dispõe não ser aplicável a concretos com o abatimento igual a zero. Entretanto nessa pesquisa foi utilizado o procedimento de adensamento descrito no item 7.4, com alteração do número de golpes para adensamento manual em duas camadas, de 12 para 15.

d) Resistência à tração na compressão diametral

Para a determinação da resistência à tração na compressão diametral foi adotada a norma ABNT NBR 7222 (2011) como parâmetro, uma vez que o item 4

desta menciona que os corpos de prova moldados devem atender à NBR 5738 (ABNT, 2015 – versão corrigida 2016), a qual no item 1.2 dispõe não ser aplicável a concretos com o abatimento igual a zero. Entretanto nessa pesquisa foi utilizado o procedimento de adensamento descrito no item 7.4, com alteração do número de golpes para adensamento manual em duas camadas, de 12 para 15.

e) Resistência à abrasão

Para a determinação da resistência potencial à degradação do concreto permeável por impacto e abrasão foi adotada a norma ASTM C1747 (2013). Com adaptação do processo de adensamento o qual foi executado de acordo com o item 7.4 da ABNT NBR 5738 (2015 – versão corrigida 2016).

f) Permeabilidade

O procedimento de medida da permeabilidade foi de acordo com a norma ACI 522 (2010).

g) Densidade e Índice de vazios no estado endurecido

A determinação da densidade e do índice de vazios do concreto permeável no estado endurecido foi de acordo com a norma ASTM C1754 (2012).

3.2 MATERIAIS

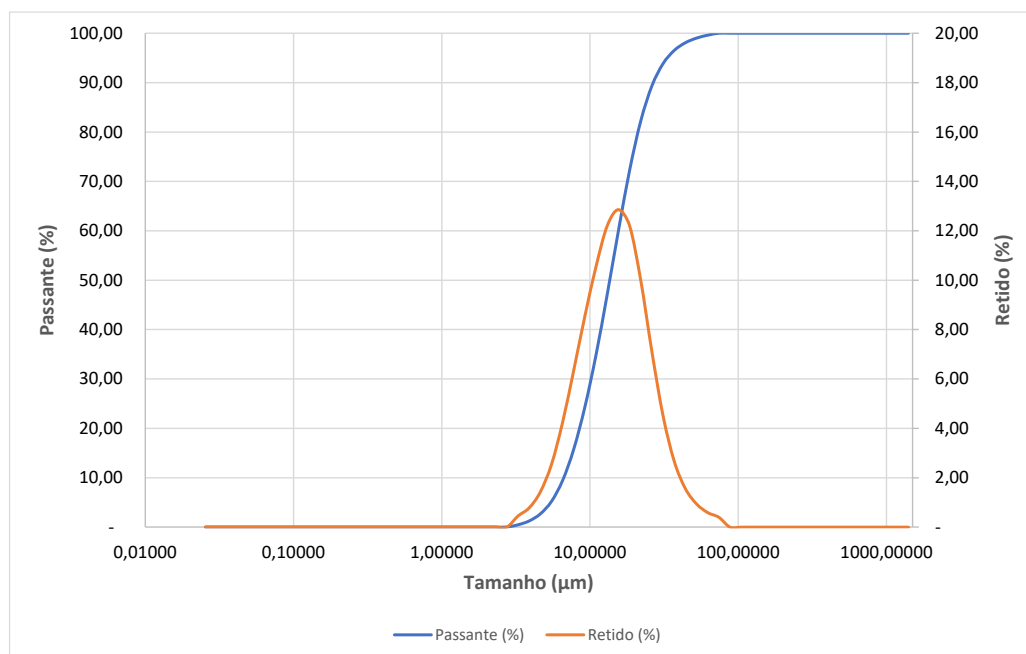
Foram utilizados, no preparo dos concretos permeáveis, os seguintes materiais: cimento, metacaulim de alta reatividade, agregado graúdo natural e água.

3.2.1 Cimento

Foi utilizado o CP II F-40 com a função de fornecer uma hidratação rápida, bem como pela sua disponibilidade no mercado local, a pronta-entrega, à época da realização da pesquisa.

A distribuição granulométrica do CP II F-40 utilizada nesta pesquisa está ilustrada na Figura 14, bem como as características físicas deste material demonstrada na Tabela 11.

Figura 14 - Distribuição granulométrica do cimento CP II F-40



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 - Características físicas do CP II F-40

Parâmetros	Resultados
Massa Específica (g/cm ³)	2,95
Blaine (cm ² /g)*	5.360,00
#200 (%)*	0,00
#325 (%)*	0,80
D10 (μm)**	6,66
D50 (μm)**	13,60
D90 (μm)**	26,74

* Valores fornecidos pela fabricante de cimento

** Valores fornecidos pelo LCVmat/Unisinos

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 12 apresenta os resultados com as características químicas e mecânicas do CP II F-40 fornecidos pela fabricante do cimento.

Tabela 12 - Características químicas e mecânicas do CP II F-40

(continua)

Parâmetros	Resultados
Al ₂ O ₃ (%)	-
SiO ₂ (%)	-
Fe ₂ O ₃ (%)	-
CaO (%)	-
MgO (%)	5,80

(conclusão)

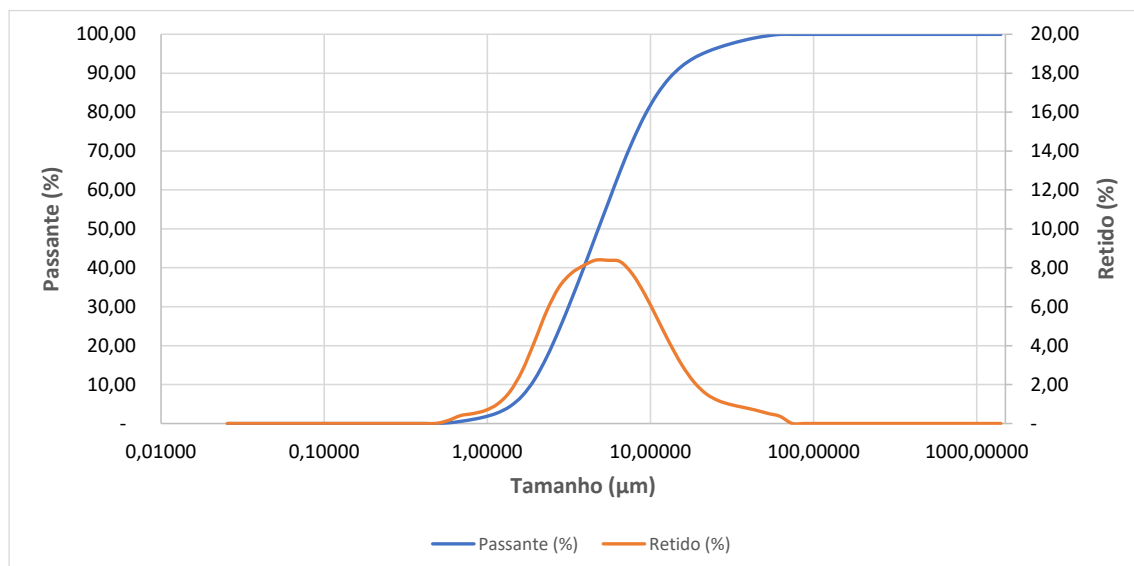
Parâmetros	Resultados
SO ₃ (%)	3,80
Perda ao fogo (%)	5,60
CaO Livre (%)	-
Resíduo insolúvel (%)	1,50
Expansão a quente (mm)	0,00
Início de pega (h:min)	04:40
Fim de pega (h:min)	05:50
Água Cons. Normal (%)	31,00
fc 1 dia (MPa)	23,50
fc 3 dias (MPa)	34,60
fc 7 dias (MPa)	38,80
fc 28 dias (MPa)	46,60

Fonte: Dados fornecidos pela fabricante de cimento (2023).

3.2.2 Metacaulim de Alta Reatividade

Foi utilizado o metacaulim de alta reatividade. A Figura 15 ilustra a distribuição granulométrica do metacaulim utilizado e a Tabela 13 apresenta as características físicas deste material.

Figura 15 - Distribuição granulométrica do metacaulim



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 13 - Características físicas do metacaulim

Parâmetros	Resultados
Massa Específica (kg/dm ³)	2,53
Massa Unitária (kg/dm ³)	0,68
Área Específica (BET, cm ² /g)	216.000
Finura (<#325 - 44 µm) (%)	7,50
D10 (µm)	1,857
D50 (µm)	4,80
D90 (µm)	13,95

Fonte: Dados fornecidos pela fabricante do metacaulim (2020).

As características químicas do metacaulim estão demonstradas na Tabela 14.

Tabela 14 - Características químicas do metacaulim

Parâmetros	Resultados
Al ₂ O ₃ (%)	33,50
SiO ₂ (%)	59,50
Fe ₂ O ₃ (%)	1,50
TiO ₂	0,90
CaO (%)	0,20
MgO (%)	0,30
K ₂ O	1,40
Na ₂ O	0,20
SO ₃ (%)	0,20
Perda ao fogo (%)	2,30

Dados fornecidos pela fabricante do metacaulim (2020)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizou-se o metacaulim em substituição, em massa, ao cimento e como facilitador da distribuição da pasta na envoltória dos agregados, propiciando melhor uniformidade da cobertura do agregado pela pasta cimentícia.

3.2.3 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo natural utilizado na pesquisa foi adquirido no comércio local da cidade de São Leopoldo e sua origem é rocha basáltica fragmentada e britada. A Tabela 15 apresenta a granulometria utilizada nas misturas de concreto permeável. Para obtenção da granulometria escolhida foi realizado o processo de peneiramento na brita “zero” adquirida. Antes da produção dos concretos permeáveis, os agregados graúdos peneirados foram lavados com intuito de retirar as impurezas e o material

pulverulento. Depois foram secos em estufa a 100°C. Dessa forma, foram mantidas as mesmas condições para toda a quantidade de agregado utilizada.

Tabela 15 - Granulometria utilizada nas misturas de concreto permeável

Tipo de Agregado	Tamanho do agregado (mm)	Porcentagem utilizada (%)	Parâmetros de granulometria		
			D60 (mm)*	D10 (mm)**	Cu***
AGN	9,5-6,3	100	6,3	6,3	1

*D60: Tamanho do agregado representando que 60% das partículas são menores que esse tamanho.

**D10: Tamanho do agregado representando que 10% das partículas são menores que esse tamanho.

*** Cu: Coeficiente de uniformidade = D60/D10.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A escolha da granulometria empregada para o agregado gráudo natural se justifica pelo fato de se obter maior grau de intertravamento em agregados com menores dimensões. Dessa forma, oferecendo maior resistência à compactação e maior quantidade de vazios. (Chandrappa; Biligiri, 2016).

No Laboratório de Materiais de Construção (LMC) da Unisinos, foram realizados os ensaios de caracterização física do agregado gráudo natural, conforme Tabela 16.

Tabela 16 - Caracterização física do agregado gráudo natural

Norma	Ensaio	Unidades	Crítérios Aceitação	Resultado
ABNT NBR 16.972 (2021)	Massa unitária	(g/cm ³)	Mínimo de três determinações, o resultado é a média. Com desvio ≤ 1% em relação à média.	1,60
ABNT NBR 16.917 (2021)	Densidade aparente	(g/cm ³)	Duas determinações, o resultado é a média. Com aproximação de 0,01 g/cm ³ .	2,46
	Densidade do agregado saturado com superfície seca	(g/cm ³)	Duas determinações, o resultado é a média. Com aproximação de 0,01 g/cm ³ .	2,47
	Massa específica	(g/cm ³)	Duas determinações, o resultado é a média. Com aproximação de 0,01 g/cm ³ .	2,69
	Absorção	(%)	Duas determinações, o resultado é a média. Com aproximação de 0,1 %.	0,52
ABNT NBR 16.974 (2022)	Perda de massa por abrasão	(%)	–	19,23
ABNT NBR 7809 (2019)	Índice de forma do grão	mm/mm	–	2,63

Fonte: Elaborada pelo autor.

A determinação do índice de forma pelo método do paquímetro de acordo com as especificações da norma é realizada em agregado graúdo com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm. No entanto, foi adotado esse processo, nesta pesquisa, visto que este índice é relevante na produção do concreto permeável.

3.2.4 Água

A água utilizada na confecção dos concretos e pastas foi fornecida pelo sistema de abastecimento da cidade de São Leopoldo.

3.2.5 Substituições Parciais de Cimento Portland por Metacaulim

Foi realizada a substituição nos teores de 5%, 10% e 15% em relação à quantidade de cimento em massa por metacaulim de alta reatividade.

3.3 PRODUÇÃO DE PASTAS CIMENTÍCIAS

Esta fase experimental teve como objetivo determinar a pasta cimentícia com comportamento reológico similar para cada teor de substituição, 5%, 10% e 15%, além da referência (0%). Assim, foram produzidas várias pastas para cada teor de substituição de cimento por metacaulim, variando o teor de água e observando o espalhamento da pasta utilizando o minitronco de Kantro.

Para tanto, primeiramente foi avaliada a variação do teor de água, em massa, para cada percentual de substituição. Assim, homogeneizaram-se os ligantes (cimento e metacaulim) nas devidas proporções, em massa fixa, e misturaram-se com a massa de água variando em 1% ($\Delta=1\%$). O processo de repetição ocorreu até que se obtivessem os valores de espalhamento (Mini Slump de Kantro) da pasta no intervalo compreendido entre 80 mm e 120 mm. Com as pastas, cujos valores de espalhamento atenderam ao intervalo, foram moldados 10 CP's para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 dias. Sendo escolhidos os teores de água, em massa, cujos CP's apresentaram maiores valores médios de resistência à compressão axial e espalhamento mais próximo do valor de 100 mm. Ao que foi denominado nesta pesquisa de etapa 01 da 2ª fase.

Conhecida a variação do teor de água adequado a cada percentual de substituição se procedeu com a escolha da relação água/ligante para pasta referência, considerando o teor de pasta de 23% e o traço de 1:3,35 obtidos pela pesquisa bibliográfica parcial realizada. Por tentativa foram testadas as seguintes relações água/ligante 0,33; 0,34 e 0,35 tanto pela inspeção visual do concreto permeável, no estado fresco e no estado endurecido, como pela permeabilidade no estado endurecido. Assim, optou-se pela relação água/ligante de 0,34 para pasta referência por apresentar melhor aspecto visual, no estado fresco e no estado endurecido, e maior fluxo de água no teste de permeabilidade no estado endurecido.

A partir do teor de água, em massa, da pasta referência foi aplicada a variação determinada para cada percentual de substituição, conforme determinado na etapa 01 da 2ª fase. Com essas pastas foram moldados 10 CP's para realização dos ensaios de resistência à compressão axial, aos 28 dias, atendendo à norma da ABNT NBR 5739 (2018), além da determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado nas pastas no estado fresco, realizados conforme a norma da ABNT NBR 13278 (2005), e da determinação da densidade de massa no estado endurecido, observando a norma da ABNT NBR 13280 (2005). Foi também verificado o seu comportamento reológico por meio do squeeze-flow, conforme dispõe a norma da ABNT NBR 15839 (2010).

3.3.1 Definição do Espalhamento da Pasta com Diferentes Teores de Água

Como mostra a Tabela 17, foram utilizados 03 teores de substituição parcial de cimento por metacaulim de alta reatividade (5%, 10% e 15%), além da pasta referência. Para determinação da consistência de cada pasta, foi analisado o seu espalhamento em função dos distintos teores de água. Entre as pastas estudadas, foram escolhidas 04, as quais apresentaram o espalhamento mais próximo de 100 mm e maior resistência média à compressão aos 7 dias. Conforme destacado na Tabela 17 que apresenta a composição das pastas, espalhamento e resistência média à compressão aos 7 dias.

Tabela 17 - Composição das pastas, espalhamento e resistência média à compressão aos 7 dias.

Pasta	Cimento CP II F-40 (g)	Água (g)	Metacaulim (g)	Espalhamento (mm)	Resistência Média à Compressão (MPa)
500C00MET	500	280	0	83,33	21,292
	500	290	0	100,18	20,356
	500	300	0	100,50	19,363
	500	310	0	101,16	18,564
	500	320	0	108,10	16,847
475C25MET	475	290	25	90,39	19,286
	475	300	25	99,10	18,131
	475	310	25	100,69	16,742
	475	320	25	100,79	13,835
	475	330	25	107,63	11,586
450C50MET	450	305	50	89,19	16,660
	450	310	50	91,02	16,314
	450	315	50	99,59	16,566
	450	320	50	100,37	14,045
	450	325	50	111,34	13,711
425C75MET	425	320	75	97,32	15,170
	425	325	75	101,11	12,460
	425	330	75	98,94	13,168
	425	335	75	117,01	11,303
	425	340	75	103,36	11,018

Observação: As pastas escolhidas estão destacadas na cor verde.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Consumo de Pasta Cimentícia

Para a produção das pastas empregadas no desenvolvimento desta pesquisa, a quantidade de ligante se manteve fixa em massa, variando os teores de água em 1%; os teores de substituição de cimento por metacaulim em 0%, 5%, 10% e 15%, os quais refletem nos teores de cimento. Desta forma, para esta análise através do ensaio de espalhamento, foram produzidas 20 pastas cimentícias [(04 teores de metacaulim) x (05 teores de água)] referentes à 1ª fase da 2ª etapa.

Para cada teor de metacaulim, foram avaliados quais os teores de água que apresentaram um espalhamento “ideal” (100±5 mm). Na prática, foram determinados quais os teores de água chegam nesse espalhamento dentre misturas realizadas.

Somente nas pastas pertencentes a esse intervalo foram realizados os ensaios de resistência à compressão aos 7 dias. Com esse dado foi realizada a escolha da pasta que apresentou maior resistência média e espalhamento mais próximo de 100 mm.

Na 2ª fase da 2ª etapa, foram produzidas 04 pastas cimentícias, referentes aos teores de substituição de cimento por metacaulim, considerando o teor de água determinado na 1ª fase da 2ª etapa para cada teor de substituição. Nestas pastas os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 28 dias.

3.3.3 Processo de Mistura

As pastas foram preparadas em um misturador, com cuba de 5 litros de capacidade e pá (misturador), da marca EMIC. Foi adotado o processo de mistura descrito na NBR 16606/18 – Determinação da pasta de consistência normal, assim adaptado: com o misturador e o cronômetro parados, verteu-se na cuba toda a água, em seguida se acrescentou toda a massa cimentícia. Quando o cimento foi adicionado à água, acionou-se o cronômetro, o qual permaneceu por 30 segundos. Em seguida foi acionado o misturador em velocidade baixa por um período de 30 segundos. Logo após o misturador foi parado e se realizou o processo de raspagem o qual constitui, com a ajuda de uma colher, desprender o material retido nas paredes da cuba, com o objetivo de garantir uma correta mistura dos componentes. Essa etapa de raspagem ocorreu por 60 segundos. Ao término desse processo, o misturador foi ligado e acionado na velocidade alta por um período de 60 segundos. Para finalizar o processo, a pasta ficou por 60 segundos em repouso, totalizando um tempo total de mistura de 4 minutos.

3.3.4 Características no Estado Fresco

Foi determinada a densidade de massa em cada pasta produzida, de acordo com a NBR 13278 (2005) que apresenta procedimentos para encontrar a densidade de massa em argamassas, no entanto, neste experimento, foi aplicado o mesmo método para estabelecer a densidade de massa da pasta. Em seguida foi realizado o ensaio de espalhamento da pasta utilizando o minitronco de Kantro, o resultado do espalhamento de pasta em todas as misturas produzidas foi obtido a partir da média

de três valores de diâmetro (medidos na horizontal, vertical e diagonal) coletados, utilizando-se um paquímetro.

As pastas cimentícias foram moldadas em formas de PVC de aproximadamente 20 mm de diâmetro por 40 mm de altura, seguindo a proporção 1:2. Método realizado também por Baldusco *et al.* (2017) e Fernandes (2019). Conforme as amostras na Figura 10, o fundo do molde foi vedado com material flexível, tipo “bexiga” fixado com fita adesiva reforçada.

Fotografia 2 - Moldagem das pastas de cimento



Fonte: Registrada pelo autor.

As pastas foram adensadas mecanicamente por um agitador de peneiras marca TAMISES na potência de regulação 4, por 15 segundos. Os CP's foram cobertos com filme de PVC, assim permaneceram por 24 horas em uma sala com temperatura controlada. Logo após os CP's foram desformados e armazenados, submersos em água, onde permaneceram até a realização dos ensaios no estado endurecido.

3.3.5 Características no Estado Endurecido

A retificação das faces, superiores e inferiores, das amostras foram realizadas em um torno NODUS, modelo 220 GOLD, potência 8kW. A Fotografia 3 ilustra o processo de retificação das faces do corpo de prova.

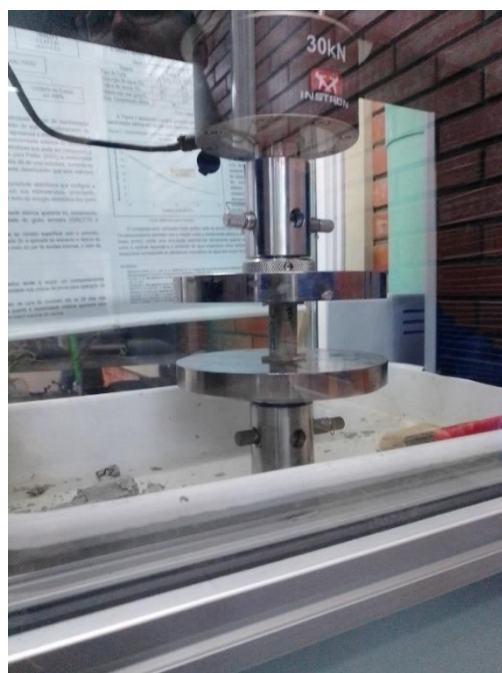
Fotografia 3 - Retificação das faces do corpo de prova.



Fonte: Registrada pelo autor.

A determinação da resistência à compressão axial foi realizada com velocidade de carregamento de 0,5 MPa/s, no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos, utilizando a prensa EMIC-INSTRON, modelo 34TM-30-SA, capacidade de carga de 30 kN. Conforme a Fotografia 4.

Fotografia 4 - Ensaio de resistência à compressão axial



Fonte: Registrada pelo autor.

3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.4.1 O Teor de Água (H) e o Traço Utilizado

O método de dosagem utilizado foi o IPT/EPUSP. O teor de pasta selecionado foi de 23% e o traço referência de 1:3,35 obtidos pela pesquisa bibliográfica parcial realizada. Dentre os traços pesquisados e testados, por tentativa, o traço de 1:3,35 foi escolhido por proporcionar uma homogeneidade do revestimento do agregado pela pasta de material cimentício, propiciando maior cobertura da superfície do agregado na confecção dos concretos permeáveis.

Por tentativa foram testadas as seguintes relações água/ligante 0,33; 0,34 e 0,35 tanto pela inspeção visual do concreto permeável, no estado fresco e no estado endurecido, como pela permeabilidade no estado endurecido. Assim, optou-se pela relação água/ligante de 0,34 para pasta referência por apresentar melhor aspecto visual, no estado fresco e no estado endurecido, e maior fluxo de água no teste de permeabilidade no estado endurecido.

A partir do teor de água, em massa, da pasta referência foi aplicada a variação determinada para cada percentual de substituição, conforme descrito no item 3.3.

O consumo de cimento é uma variável que influencia na resistência mecânica do concreto permeável de acordo com Kia, Wong e Cheeseman (2017). O excesso de cimento utilizado nas misturas contribui para o preenchimento dos vazios, ocasionando a redução da porosidade. Se insuficiente a quantidade de cimento, não haverá um adequado revestimento dos agregados, assim o concreto apresentará baixas resistências.

Assim, o consumo de materiais na produção de concretos permeáveis, nesta pesquisa, está apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 - Consumo de materiais na produção do concreto permeável

Traço Unitário	Mistura	Consumo (Kg)			
		Cimento	Metacaulim	Água	Agregado
1:3,35	Referência	23,90	-	8,13	80,00
	5% Metacaulim	22,70	1,20	8,60	80,00
	10% Metacaulim	21,51	2,39	9,08	80,00
	15% Metacaulim	20,31	3,59	9,56	80,00

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.2 Processo de Mistura

O processo de mistura do concreto permeável foi realizado em uma betoneira com capacidade do tambor para 150 litros. O procedimento de mistura foi executado visando a obter uma melhor trabalhabilidade ao concreto. A sequência do processo de mistura é apresentada a seguir:

- a) imprimação da betoneira com pasta de mesmo traço dos concretos;
- b) adição de 100% do agregado, ligar a betoneira;
- c) adição de 30% da quantidade de água, com a betoneira em movimento, no período compreendido entre 0 – 30 segundos;
- d) adição de 70% do material cimentício e 30% da quantidade de água, com a betoneira em movimento, no período compreendido entre 30 – 120 segundos;
- e) adição de 30% do material cimentício e 40% da quantidade de água, com a betoneira em movimento, no período compreendido entre 120 – 240 segundos.

O tempo de mistura do concreto permeável não pode ser elevado devido ao seu baixo tempo de trabalhabilidade. Ao exceder esse tempo, haverá dificuldades no processo de adensamento levando a se obter um material de baixo desempenho.

3.4.3 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Concluído o processo de mistura, foi realizado o ensaio de consistência, logo após foi feita nova homogeneização da mistura do concreto permeável para posterior inspeção visual da mistura, observando a distribuição da pasta de cimento no entorno dos grãos e se a mesma apresenta um aspecto brilhoso. Em seguida se procedeu ao teste táctil visual (teste empírico), o qual consiste em aplicar uma pequena pressão com a mão em uma porção de concreto, observando se essa porção formará uma aglomeração dos agregados. Conforme ilustrado pela Fotografia 5.

Fotografia 5 - Teste tátil visual do concreto permeável



Fonte: Registrada pelo autor.

Na sequência, foi moldado o corpo de prova para determinação da massa específica, bem como se procedeu à moldagem dos demais corpos de prova, cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

A moldagem dos corpos de prova atendeu à ordem e às quantidades descritas a seguir:

- a) dois corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a determinação da massa específica¹;
- b) oito corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a resistência à compressão axial aos 28 dias;
- c) oito corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias;
- d) nove (três por cada determinação) corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a determinação da resistência potencial à degradação do concreto permeável por impacto e abrasão aos 28 dias;

¹ Ensaio não destrutivo.

- e) cinco corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para determinação da densidade¹ e índice de vazios¹ do concreto permeável no estado endurecido aos 28 dias;
- f) cinco corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a determinação do coeficiente de permeabilidade¹ do concreto permeável (permeâmetro de carga variável) aos 28 dias;
- g) dois corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a determinação da densidade parcial¹ por camada aos 28 dias;
- h) dois corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a execução do plano de corte transversal aos 28 dias;
- i) dois corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para a execução do plano de corte longitudinal aos 28 dias.

Nesse experimento foram moldados no total 29 corpos de prova, por traço.

Considerando que foi utilizado um traço referência com agregado graúdo, cimento e água. E este traço foi alterado por três teores de adição de metacaulim (5%, 10% e 15%). Para realização de todos os ensaios no estado endurecido, como foi descrito anteriormente, foi necessário moldar 116 corpos de prova.

O adensamento nos corpos de prova cilíndricos foi executado em duas camadas, com 15 golpes em cada camada, utilizando uma haste metálica.

Concluída a moldagem, os corpos de prova foram cobertos por placas de vidros com objetivo de evitar a perda da água de amassamento da mistura que permaneceu no molde pelo período de 24 horas até a desmoldagem deste. A Fotografia 6 demonstra os corpos de prova após a moldagem.

Fotografia 6 - Corpos de prova após a moldagem.



Fonte: Registrada pelo autor.

Após a desmoldagem, o concreto foi levado a uma câmara úmida com temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95% de acordo com a ABNT NBR 5738 (2015), onde permaneceu durante o período de cura, 28 dias, até a execução dos ensaios no estado endurecido. Na Fotografia 7, verificam-se os corpos de prova na câmara úmida.

Fotografia 7 - Corpos de prova na câmara úmida.



Fonte: Registrada pelo autor.

3.5 MÉTODOS

Os métodos para a produção do concreto permeável, considerando misturas com granulometria uniforme e a substituição parcial do cimento por metacaulim (Referência_0%, 5%, 10% e 15%) com intuito de analisar a influência nas propriedades mecânicas e na espessura de pasta aderida, foram os descritos a seguir.

3.5.1 Consistência da Mistura

Foi determinada a trabalhabilidade do concreto permeável, no estado fresco, por meio da norma ABNT NBR 16889 (2020). Este ensaio não é normalmente utilizado para a determinação da consistência do concreto permeável, contudo, foi empregado como um parâmetro qualitativo do estado fresco do concreto.

3.5.2 Densidade e Índice de Vazios no Estado Fresco

Para a realização do ensaio de massa específica e determinação de índice de vazios no estado fresco, foi utilizado o procedimento descrito na ASTM C1688 (2014). Esta norma é própria para a realização do ensaio em concreto permeável. Segundo esta, os valores considerados ideais de massa específica precisam estar entre 1750 - 2000 kg/m³. O método utiliza o soquete *proctor* de 2,5 kg com uma altura de queda de 305 mm para o adensamento, enquanto a ABNT NBR 16416 (2015), que também recomenda um método de ensaio para a determinação da massa específica do concreto permeável moldado no local, indica a utilização do soquete *proctor* de 4,5 kg e altura de 45 cm. Contudo, nesta pesquisa, foram utilizados uma haste metálica e o corpo de prova cilíndrico com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, com a intenção de padronizar para todos os ensaios um único método de adensamento do concreto.

3.5.3 Densidade e Índice de Vazios no Estado Endurecido

Na determinação da densidade e do índice de vazios do concreto permeável no estado endurecido, foi adotado o procedimento descrito na norma da ASTM C1754 (2012), conforme ilustrado na Fotografia 8.

Fotografia 8 - Massa da amostra submersa em água para determinação da densidade e do índice de vazios do concreto permeável.



Fonte: Registrada pelo autor.

Essa é uma norma específica para a realização do teste. Os valores compreendidos entre 1650 e 1943 kg/m³ são considerados ideais para a densidade do concreto permeável.

3.5.4 Resistência à Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos, seguindo o disposto na norma da ABNT NBR 5739 (2018). A Fotografia 9 ilustra a execução do ensaio.

Fotografia 9 - Execução do ensaio de resistência à compressão axial.



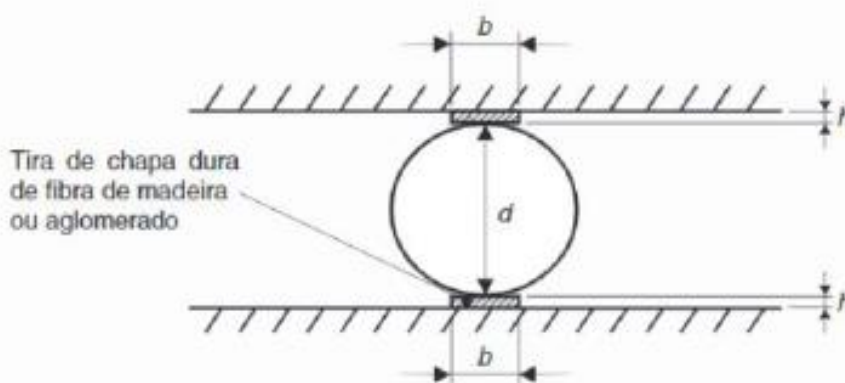
Fonte: Registrada pelo autor.

Foi realizado o capeamento com a mistura enxofre, caulim e negro fumo. Estudos realizados por Harber (2005) mostram que o capeamento eliminou alguns defeitos de ruptura causados pelo deslocamento do agregado na borda superior em relação aos corpos de prova que não foram capeados. Isso gerou também um aumento significativo na resistência à compressão.

3.5.5 Resistência à Tração na Compressão Diametral

A norma determina que, para a realização do ensaio, é necessária a utilização de tiras de aglomerado com tamanho igual ao do comprimento do corpo de prova, com largura de aproximadamente 15% do diâmetro do corpo de prova. A Figura 16 ilustra o posicionamento do corpo de prova na prensa utilizando as tiras de aglomerado.

Figura 16 - Posicionamento do corpo de prova na prensa utilizando as tiras de aglomerado



Fonte: ABNT NBR 7222 (2011).

Onde:

d = Diâmetro do corpo de prova (mm);

$b = (0,10 \pm 0,01) \cdot d$ (mm);

$h = (10 \pm 1)$ (mm).

O ensaio de resistência à tração na compressão diametral foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos, atendendo ao disposto na norma ABNT NBR 7222 (2011), conforme pode ser visualizado na Fotografia 10.

Fotografia 10 - Execução do ensaio de resistência à tração na compressão.



Fonte: Registrada pelo autor.

3.5.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão

A determinação da resistência à degradação por impacto e por abrasão do concreto permeável foi realizada por meio da norma ASTM C1747 (2013).

No ensaio, foi utilizada uma balança digital resolução 1g capacidade 20000g, máquina *Los Angeles* com 30 rpm até 500 rotações, colher e peneira 25 mm, conforme Fotografia 11. Na ocasião da fabricação dos corpos de prova a norma ASTM C1747 (2013) menciona como utilizar o martelo *Marshall* para realizar o processo de adensamento, no entanto se optou em realizar o adensamento da forma proposta nesta pesquisa.

Fotografia 11 - Processo de degradação do concreto permeável por impacto e abrasão.



Massa da amostra no início do processo (a).



Processamento da amostra na máquina Los Angeles (b).



Peneiramento para determinar a massa da amostra no final do processo (c).

Fonte: Registrada pelo autor.

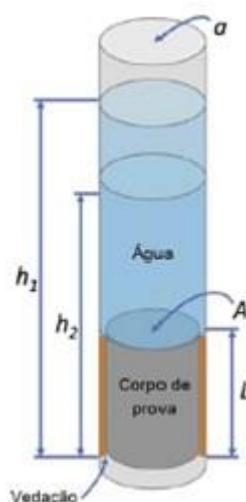
Na realização do ensaio, foram realizadas três determinações para cada teor de substituição, além da referência. Em cada determinação foram utilizados três corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Segundo a norma ASTM C1747 (2013), o resultado de perda de massa do concreto permeável, para ser válido, precisa estar entre 19% e 95%.

3.5.7 Permeabilidade

Atendendo à norma, o processo de medição do tempo foi repetido por três vezes em cada amostra, então foi considerado o tempo médio entre os três valores registrados. A Figura 17 indica as simbologias das medidas utilizadas no cálculo do coeficiente de permeabilidade (K).

Figura 17 - Simbologias das medidas utilizadas no cálculo do coeficiente de permeabilidade (K).



Fonte: Adaptada de Gaedicke, Marines e Miankodila (2014).

Esse valor do tempo médio (t) e os demais dados simbolizados, segundo a ilustração na Figura 16, foram considerados para determinação do coeficiente de permeabilidade (K) da amostra, calculados observando a *Lei de Darcy* expressa na equação:

$$K = \frac{A \times L}{a \times t} \times \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade em m/s;

A = Área de seção da amostra em m²;

a = Área do tubo em m²;

L = Comprimento da amostra em m;

t = Tempo em s;

h_i = Altura inicial (indicado 0,29 m);

h_f = Altura final (indicado 0,07 m).

A determinação do coeficiente de permeabilidade foi realizada segundo o procedimento estabelecido pela ACI 522 (2010), no item 5.6 do Relatório do Comitê, se utilizando um permeâmetro de carga variável, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Permeâmetro de carga variável.



Fonte: Gentil (2020).

Na preparação das amostras, foi utilizado o filme de PVC (policloreto de vinila) para envolver os corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura e a *silver tape* para fixação do filme PVC, como registrado na Fotografia 12.

Fotografia 12 - Preparação das amostras para determinação do coeficiente de permeabilidade



Fonte: Registrada pelo autor.

Após a preparação, as amostras foram inseridas no permeâmetro, a massa de calafetar foi utilizada para impedir que a água passe pela lateral da amostra.

As normas ACI (2010) e ABNT NBR 16416 (2015) consideram que os pavimentos com permeabilidade em um nível satisfatório devem apresentar um coeficiente de permeabilidade $K \geq 10^{-3}$ m/s.

3.5.8 Determinação da Espessura de Pasta Aderida ao Agregado Graúdo

Para determinação da espessura de pasta aderida foi preparado o estúdio fotográfico com o cenário propício à captura de imagens com borda infinita. Mantendo as distâncias fixas de captura de imagens e as mesmas condições de iluminação para todas as fotografias, conforme se pode verificar na Fotografia 13.

Fotografia 13 - Cenário com borda infinita



Fonte: Registrada pelo autor.

As imagens digitais 2D se referem a fotografias de cortes em camadas distintas, seções transversais dispostas em plano de corte do corpo de prova na direção horizontal, como indicado na Fotografia 14.

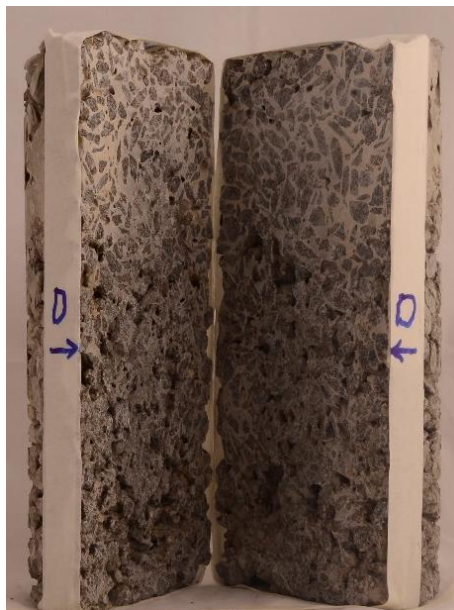
Fotografia 14 - Plano de corte do corpo de prova na horizontal



Fonte: Registrada pelo autor.

Seções longitudinais dispostas em plano de corte do corpo de prova na direção vertical com a utilização de uma câmera fotográfica para a captura das imagens. Conforme ilustrado pela Fotografia 15.

Fotografia 15 - Plano de corte do corpo de prova na vertical



Fonte: Registrada pelo autor.

A espessura de pasta aderida foi determinada a partir das análises das imagens, por meio software livre "Image J", as quais foram ajustadas ao tipo de imagem para 8 bit, o brilho, o contraste e a escala, assim possibilitando medir a espessura de pasta compreendida entre dois agregados em determinada região.

Foram executadas um total de 4000 medidas, distribuídas em 50 medidas de espessura de pasta entre dois agregados aleatoriamente para cada região, considerando os 03 teores de substituição de cimento por metacaulim (5%, 10% e 15%), além da referência (0%) e as 20 regiões analisadas, assim denominadas para referência, conforme Tabela 19.

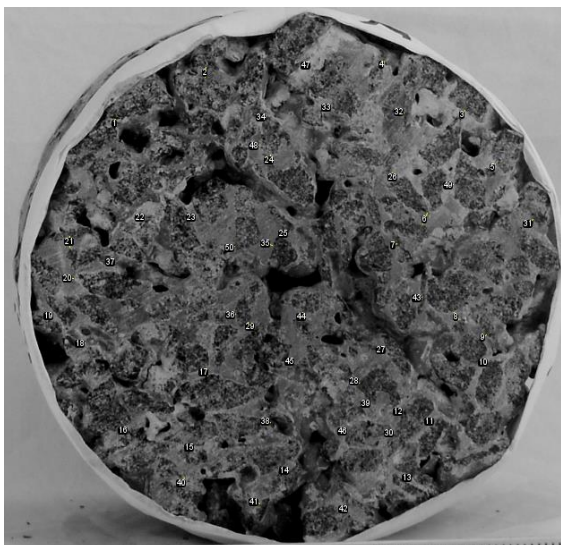
Tabela 19 - Regiões de realização das medidas da espessura de pasta (Referência)

Item	Seção / Região	Quantidade de Camadas
01	Transv_Referência_CP 01_Corte AA	03
02	Transv_Referência_CP 01_Corte BB	
03	Transv_Referência_CP 01_Corte CC	
04	Transv_Referência_CP 02_Corte AA	03
05	Transv_Referência_CP 02_Corte BB	
06	Transv_Referência_CP 02_Corte CC	
07	Long_Referência_CP 03_Corte DD-SP	03
08	Long_Referência_CP 03_Corte DD-ME	
09	Long_Referência_CP 03_Corte DD-IF	
10	Long_Referência_CP 04_Corte DD-SP	03
11	Long_Referência_CP 04_Corte DD-ME	
12	Long_Referência_CP 04_Corte DD-IF	
13	Long_Referência_CP 03_Corte DD-SP	04
14	Long_Referência_CP 03_Corte DD-MS	
15	Long_Referência_CP 03_Corte DD-MI	
16	Long_Referência_CP 03_Corte DD-IF	
17	Long_Referência_CP 04_Corte DD-SP	04
18	Long_Referência_CP 04_Corte DD-MS	
19	Long_Referência_CP 04_Corte DD-MI	
20	Long_Referência_CP 04_Corte DD-IF	

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Fotografia 16 mostra a localização onde foram realizadas as medidas na região denominada Transv_5%_CP 01_Corte AA.

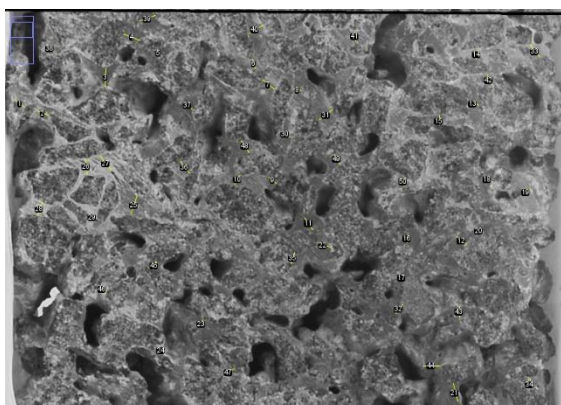
Fotografia 16 - Localização das medidas na região Transv_5%_CP 01_Corte AA



Fonte: Registrada pelo autor.

A Fotografia 17 mostra a localização onde foram realizadas as medidas na região denominada Long_5%_CP 03_Corte DD-MS.

Fotografia 17 - Localização das medidas na região Long_5%_CP 03_Corte DD-MS



Fonte: Registrada pelo autor.

A Tabela 20 apresenta os valores resultantes da medida da espessura de pasta em cada local identificado na região Transv_5%_CP 01_Corte AA, conforme ilustrado na Fotografia 8.

Tabela 20 - Medidas de espessura de pasta na região Transv_5%_CP 01_Corte AA

(continua)

Item	Espessura de Pasta (mm)	
	Entre Agregados	Em cada Agregado
1	1,25	0,63
2	1,45	0,73
3	1,22	0,61
4	0,92	0,46
5	0,91	0,46
6	1,60	0,80
7	1,03	0,52
8	1,22	0,61
9	0,86	0,43
10	1,29	0,65
11	1,23	0,62
12	0,97	0,49
13	0,97	0,49
14	0,92	0,46
15	0,91	0,46
16	0,80	0,40
17	1,18	0,59
18	1,29	0,65
19	0,92	0,46
20	1,36	0,68
21	1,51	0,76
22	1,16	0,58
23	0,99	0,50
24	1,21	0,61
25	0,71	0,36
26	1,22	0,61
27	0,70	0,35
28	1,39	0,70
29	1,40	0,70
30	0,86	0,43
31	1,55	0,78
32	1,05	0,53
33	1,15	0,58
34	0,96	0,48
35	1,46	0,73
36	1,29	0,65
37	0,89	0,45
38	1,32	0,66
39	1,08	0,54
40	1,35	0,68

(conclusão)

Item	Espessura de Pasta (mm)	
	Entre Agregados	Em cada Agregado
41	1,37	0,69
42	0,65	0,33
43	0,98	0,49
44	1,08	0,54
45	0,76	0,38
46	1,02	0,51
47	0,99	0,50
48	1,06	0,53
49	1,06	0,53
50	1,22	0,61

Obs: A espessura de pasta na envoltória de cada agregado corresponde à metade do valor medido.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os dados da análise de imagem realizada foram submetidos a análises estatísticas. Os resultados estão apresentados em média, desvio padrão, mínimo e máximo, bem como os testes estatísticos realizados no capítulo 4.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados passa a ser apresentada, em subtópicos distintos, considerando a metodologia adotada nesse estudo. Respectivamente será apresentada a análise dos resultados encontrados para pasta cimentícia e para o concreto permeável.

4.1 PASTA CIMENTÍCIA

4.1.1 Caracterização da Pasta Cimentícia no Estado Fresco

A Tabela 21 apresenta os dados obtidos neste experimento, considerando os cinco teores de água utilizados para cada uma das quatro pastas cimentícias estudadas na primeira etapa da segunda fase.

Tabela 21 - Dados da pasta cimentícia em função da massa de água (g)

500C00MET					475C25MET				
M_a	a/c	a/l	E_{sp}	F_c	M_a	a/c	a/l	E_{sp}	F_c
280	0,56	0,56	83,33	21,29	290	0,61	0,58	90,39	19,29
290	0,58	0,58	100,18	20,36	300	0,63	0,60	99,10	18,13
300	0,60	0,60	100,50	19,36	310	0,65	0,62	100,69	16,74
310	0,62	0,62	101,16	18,56	320	0,67	0,64	100,79	13,84
320	0,64	0,64	108,10	16,85	330	0,69	0,66	107,63	11,59
450C50MET					425C75MET				
M_a	a/c	a/l	E_{sp}	F_c	M_a	a/c	a/l	E_{sp}	F_c
305	0,68	0,61	89,19	16,66	320	0,75	0,64	97,32	15,17
310	0,69	0,62	91,02	16,31	325	0,76	0,65	101,11	12,46
315	0,70	0,63	99,59	16,57	330	0,78	0,66	98,94	13,17
320	0,71	0,64	100,37	14,04	335	0,79	0,67	117,01	11,30
325	0,72	0,65	111,34	13,71	340	0,80	0,68	103,36	11,02
Legenda:	M_a = Massa de água (g) - a/c = relação água cimento - a/l = relação água ligante E_{sp} = Espalhamento (mm) - F_c = Resistência média à compressão axial (MPa)								

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando a Tabela 21, verifica-se que os valores de espalhamento encontrados condizem com o intervalo proposto na metodologia (80 a 120 mm). Foram trabalhados percentuais diversos de água, variando de 56% a 80%. Ressaltam-se os valores, 83,33 mm e 117,01 mm, mínimo e máximo encontrados para o espalhamento, respectivamente, referente às pastas denominadas 500C00MET (M_a

= 280 g) e 425C75MET ($M_a = 335$ g). E, ainda, que os valores destacados em negrito, escolhidos conforme critério estabelecido, obedecem ao intervalo definido 100 ± 5 mm para o espalhamento e ao maior valor médio medido no ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias.

Os dados registrados evidenciam a relação, inversa, da resistência à compressão axial com a relação água/cimento, ou seja, a menor relação água/cimento corresponde a uma maior resistência à compressão axial, confirmando o mesmo comportamento observado na curva de Abrams.

Na medida em que se faz a substituição do cimento por metacaulim, a relação água/cimento tem aumento elevado (42,85%) e a relação água/ligante um aumento mais discreto (21,43%). Assim, à medida que se aumenta a substituição (5%, 10% e 15%) se percebe a necessidade de acrescentar água para manter o espalhamento dentro do intervalo estabelecido (100 ± 5 mm), motivado pela área superficial do metacaulim maior que a do cimento. Também se observa de forma clara nas pastas escolhidas uma perda de resistência à compressão axial medida, referência (500C00MET) com 20,36 MPa, substituição de 5% (475C25MET) com 18,13 MPa, substituição de 10% (450C50MET) com 16,57 MPa e substituição de 15% (425C75MET) com 15,17 MPa. Comparando a pasta referência e a pasta com maior substituição, a redução da resistência é de aproximadamente 25,49%.

Mesmo com os valores de relação água/cimento elevados (0,58 – 0,63 – 0,70 – 0,75) das pastas escolhidas, representando, respectivamente, a referência, a substituição de 5%, a substituição de 10% e a substituição de 15%, foi realizada uma análise experimental para a pasta referência, ou seja, foram moldados corpos de prova com concretos permeável utilizando-se a relação água/cimento encontrada no espalhamento. Como já era esperado, a análise experimental demonstra que a pasta referência, após o processo de mistura com o agregado, apresentava-se de forma excessivamente fluida. Sendo necessária uma redução na relação água/cimento.

Como a pasta referência não apresentava uma coesão e uma trabalhabilidade adequada, nesta análise experimental por tentativa se chegou a uma relação água/cimento e/ou relação água/ligante ideal de 0,34 para essa pasta. Foram feitos os ajustes também nas pastas de substituição (5%, 10% e 15%) aplicando a variação definida neste estudo e nos teores de água que foram utilizados para chegar à mesma trabalhabilidade. Concluiu-se que o teor de água (H) ideal no concreto permeável, considerando teor de pasta de 23% e o traço de 1:3,35, moldado com a pasta

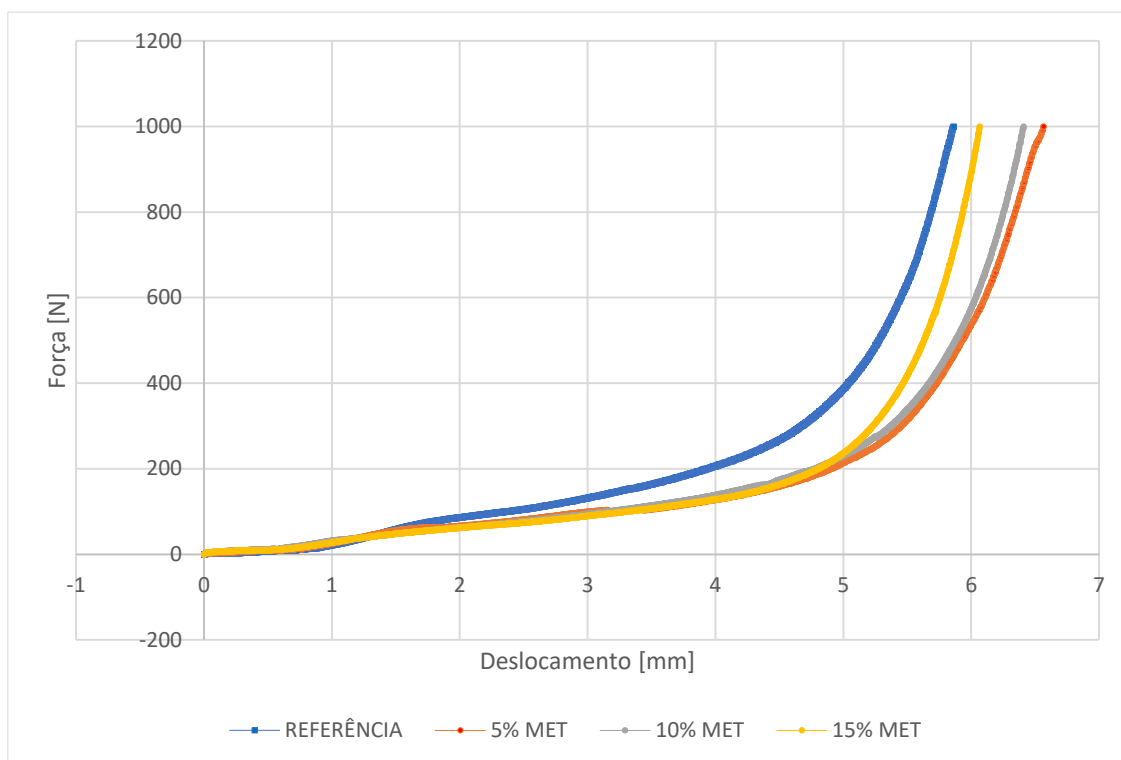
referência é de 7,82%. E nos concretos permeáveis moldados com as pastas de substituição (5%, 10% e 15%), com as mesmas considerações, os teores de água (H) ideais são, respectivamente, 8,28%, 8,74% e 9,20%.

Diante dessa situação, foi necessária uma adaptação na metodologia adotada inicialmente, o que foi denominado de segunda fase da segunda etapa, ou seja, foram implementados ensaios complementares no estudo do comportamento reológico das pastas. Foi realizado o ensaio de *squeeze flow*, com a intenção de comprovar a similaridade na trabalhabilidade das pastas cimentícias estudadas.

4.1.2 Comportamento Reológico da Pasta Cimentícia (*squeeze flow*)

O Gráfico 1 indica o comportamento reológico das pastas, as quais foram utilizadas no processo de moldagem dos corpos de prova com o concreto permeável em estudo.

Gráfico 1 - Resultados do ensaio squeeze-flow (1 mm/s) – Pastas cimentícias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o Gráfico 1, verifica-se que o ensaio do *squeeze flow* confirma que todas as pastas de substituições obedecem a um comportamento reológico similar

nos trechos iniciais da curva, quando solicitado um esforço de até 200 N com o deslocamento de massa de aproximadamente 5 mm.

4.1.3 Densidade da Pasta Cimentícia nos Estados Fresco e Endurecido

A Tabela 22 registra os dados obtidos nos ensaios realizados após a adequação na relação água cimento e na relação água ligante para a pasta referência, seguida da aplicação da variação definida no subtópico anterior para as substituições de 5%, 10% e 15%.

Tabela 22 - Dados da pasta cimentícia utilizada no concreto permeável

PASTA	M_C	M_{MET}	M_a	a/c	a/l	A	d	$\rho_{m\acute{a}x}$	F_c
REFERÊNCIA	2.000,00	-	680,00	0,34	0,34	3,95	2,00	1.817,61	44,48
5% MET	1.900,00	100,00	720,00	0,38	0,36	3,97	1,97	1.778,06	35,55
10% MET	1.800,00	200,00	780,00	0,43	0,39	3,80	1,93	1.708,66	32,46
15% MET	1.700,00	300,00	800,00	0,47	0,40	3,77	1,91	1.700,43	33,04

Legenda:

M_C = Massa de cimento (g) - M_{MET} = Massa de metacaulim (g) - M_a = Massa de água (g) - a/c = relação água cimento - a/l = relação água ligante - F_c = Resistência média à compressão axial (MPa) - d_{FRESCO} = densidade de massa da pasta (g/cm³) - A = teor de ar incorporado na pasta (%) - $\rho_{m\acute{a}x}$ = densidade de massa aparente endurecido (kg/m³)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 22, nas colunas referentes aos dados obtidos nos ensaios de determinação da densidade de massa da pasta, tanto no estado fresco como no estado endurecido, percebe-se que, à medida que aumenta o teor de substituição, reduz a densidade da pasta. A densidade das pastas no estado fresco apresenta uma variação de 2,00 a 1,91 g/cm³, enquanto no estado endurecido a densidade da pasta varia de 1.817,61 a 1.700,43 Kg/m³, partindo da pasta referência e chegando ao maior percentual de substituição utilizado.

Quanto ao teor de ar incorporado na pasta no estado fresco, há a mesma tendência, conforme aumenta o teor de substituição reduz o teor de ar incorporado na pasta, exceto para o teor de substituição de 5% do cimento por metacaulim, em que os dados obtidos apresentam uma pequena elevação.

4.1.4 Resistência a Compressão Axial da Pasta Cimentícia (28 dias)

Com a redução no teor de água, comparando os dados de resistência à compressão axial das pastas cimentícias nas Tabelas 21 e 22, verifica-se um aumento substancial no valor da resistência. A exemplo da pasta referência com aumento de

resistência de 118,47%, seguido dos aumentos na resistência nas pastas de substituições no percentual de 5%, 10% e 15% do cimento por metacaulim, respectivamente na ordem de 96,08%, 95,90% e 117,80%.

Nos dados registrados na Tabela 22, na coluna referente aos valores encontrados para a resistência à compressão axial após os ajustes realizados na relação água/ligante nas pastas estudadas, percebe-se, também, que, à medida que aumentam os percentuais de substituição do cimento por metacaulim, a resistência diminui.

4.1.5 Considerações sobre a Pasta Cimentícia

A substituição do cimento por metacaulim resultou em perda de resistência na pasta cimentícia. O fator que exerceu maior influência nessa ocorrência foi o acréscimo no teor de água e a redução da quantidade de cimento, os quais superaram a contribuição do metacaulim para o aumento da resistência. Apesar de ocorrer uma redução da resistência, o que se esperava gerar um aumento no teor de vazios, se observou um comportamento contrário, uma queda no teor de ar incorporado provavelmente em decorrência do uso do metacaulim.

4.2 CONCRETO PERMEÁVEL

Neste subtópico, apresentar-se-ão os resultados dos ensaios realizados nas misturas de concreto permeável, nas quais foram realizadas as substituições parciais de cimento Portland por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, bem como na mistura referência. As discussões e as análises dos resultados serão baseadas nos métodos descritos na metodologia, considerando que, para a análise das misturas no estado fresco, foram executados os ensaios de inspeção tátil visual de escoamento da mistura, consistência da mistura (tronco de cone) e densidade. Enquanto que no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral, resistência à degradação por impacto e abrasão, densidade, índice de vazios e a determinação do coeficiente de permeabilidade. Além disso, serão apresentadas as análises de imagens digitais (ImageJ) para determinação da espessura de pasta aderida ao agregado, bem como

as análises da variância dos resultados. Na Tabela 23 estão apresentadas as médias dos resultados obtidos nos ensaios realizados nas misturas de concreto permeável.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios realizados nas misturas de concreto permeável

Misturas	f_c	f_{ct}	P	d	I_v	D	U	k
REFERÊNCIA	16,85	2,60	53,64	2.018,08	27,09	2.075,22	25,71	0,00319
5% MET	18,09	2,73	56,18	1.993,80	28,00	2.138,98	19,27	0,00507
10% MET	13,78	2,63	50,04	1.984,89	28,01	2.099,75	23,44	0,00418
15% MET	15,98	2,18	51,99	1.942,82	29,29	1.985,73	27,65	0,00282

Legenda:

f_c - Resistência à compressão axial (MPa)

P - Resistência à degradação por impacto e abrasão (%)

I_v - Índice de vazios no estado endurecido (%)

U - Índice de vazios no estado fresco (%)

f_{ct} - Resistência à tração na compressão diametral (MPa)

d - Densidade no estado endurecido (kg/m³)

D - Densidade no estado fresco (kg/m³)

k - Coeficiente de permeabilidade (m/s)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos subtópicos a seguir será tratado os dados individualmente e no item 4.3 será realizado um tratamento relacionando os parâmetros entre si.

4.2.1 Consistência

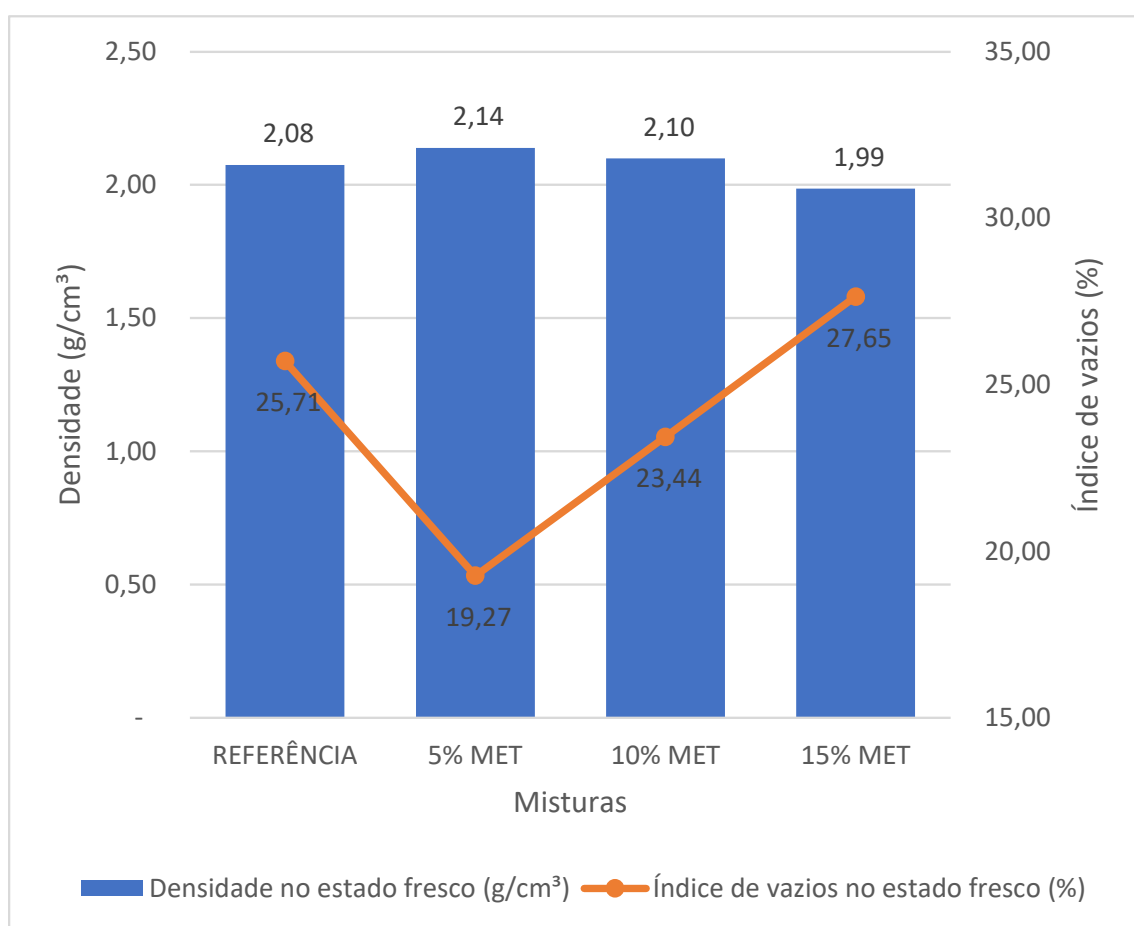
Em todas as misturas, o abatimento do tronco de cone foi igual a 0,00 mm. Ao se retirar o tronco de cone, a mistura se manteve estável quanto à forma. Esse efeito decorre da baixa trabalhabilidade. Os resultados apresentam conformidade com os resultados dispostos nas normas da ABNT NBR 16416 (2016) e ACI 522R (2010), da mesma maneira que foram auferidos por Bauer *et al.* (2020) e Sandoval *et al.* (2019), os quais afirmam que o abatimento do tronco de cone para concretos permeáveis deve estar entre 0 e 20 mm.

Autores como Ribeiro (2014) e Xie *et al.* (2018) afirmam que, tratando-se de concretos permeáveis, é de suma importância realizar uma inspeção tátil visual na mistura. Tal inspeção tem como objetivo identificar alguns fatores que influenciam na trabalhabilidade da mistura, tais como brilho, escoamento, adesão da pasta no entorno do agregado graúdo e a formação de aglomeração dos grãos ao se apertar uma pequena porção com a mão. Nos testes realizados no concreto permeável com substituição parcial de cimento Portland por metacaulim nos percentuais de 5%, 10% e 15%, todas as misturas apresentaram o mesmo comportamento.

4.2.2 Densidade e Índice de Vazios no Estado Fresco

O Gráfico 2 apresenta os resultados auferidos nesta pesquisa para densidade e índice de vazios no estado fresco.

Gráfico 2 - Densidade e índice de vazios no estado fresco



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o Gráfico 2, no eixo horizontal estão identificadas a mistura referência e as misturas com as substituições parciais do cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%. No eixo vertical principal, como resposta por colunas, apresenta as médias dos resultados das densidades no estado fresco para cada proporção. E no eixo vertical secundário, como resposta por linhas, apresenta os índices de vazios em porcentagem, além de considerar na escala os limites, mínimo e máximo, respectivamente com os valores de 15,00% e 35,00%, segundo ACI 522 (2010).

Ao se comparar os resultados do índice de vazios com os resultados da densidade, verifica-se uma tendência lógica de que, à medida que aumenta a densidade, há uma redução do índice de vazios.

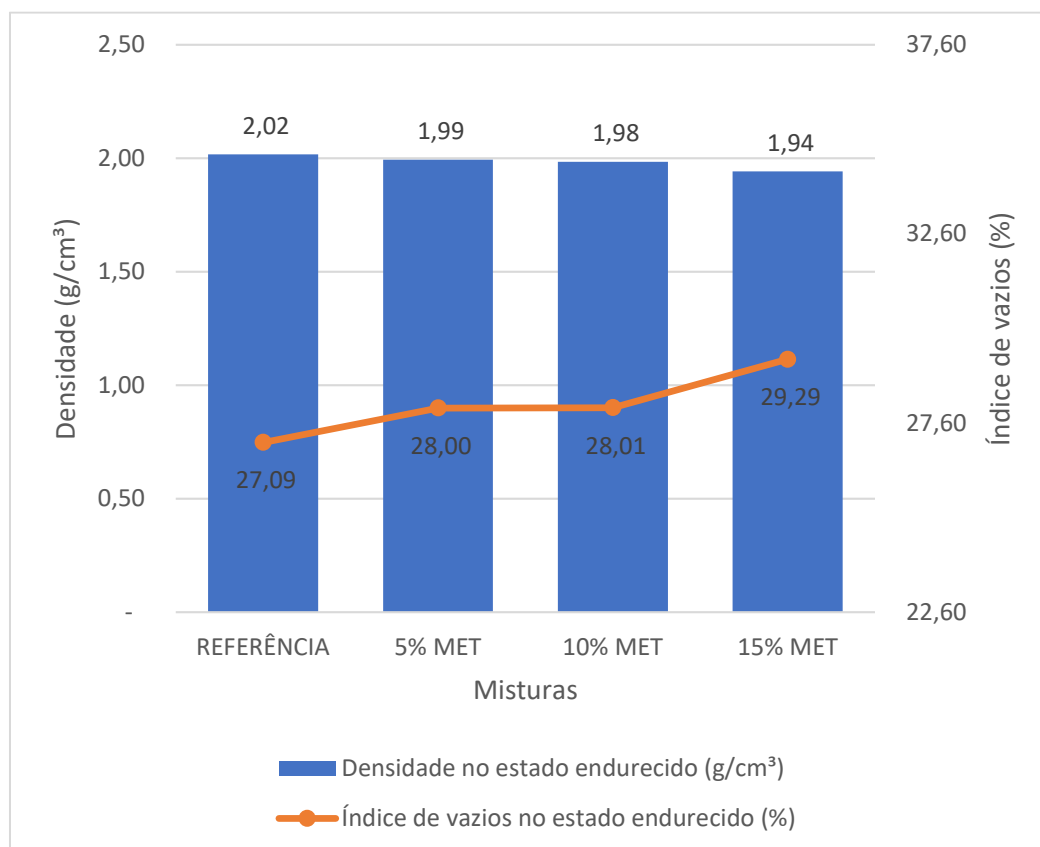
Segundo a norma da ACI 522 (2010), todos os valores médios encontrados nesta pesquisa para o índice de vazios no estado fresco estão acima do limite mínimo de 15% e abaixo do limite máximo de 35%. O menor e o maior valor do índice de vazios, 19,27% e 27,65%, ocorreram respectivamente nas misturas com 5% de metacaulim (5%MET) e com 15% de metacaulim (15%MET), as demais misturas, referência e 10% de metacaulim (10%MET), apresentaram, respectivamente, os seguintes percentuais de índice de vazios: 25,71% e 23,44%. Esse comportamento discrepante pode ser justificado pela influência do teor de pasta utilizado e da variação na relação água/material cimentício, os quais afetam diretamente as propriedades do concreto permeável.

Os subitens a seguir apresentam os resultados referentes aos ensaios realizados nas amostras no estado endurecido.

4.2.3 Densidade e Índice de Vazios no Estado Endurecido

No Gráfico 3, verifica-se a demonstração dos resultados para a densidade e o índice de vazios nas misturas de concreto permeável no estado endurecido.

Gráfico 3 - Densidade e índice de vazios no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 3 apresenta a mesma disposição comparativa dos dados no Gráfico 2, exceto pela distribuição na escala do eixo vertical secundário, em que os limites, mínimo e máximo, são respectivamente os valores de 22,60% e 37% segundo ASTM C1754 (2012). Verifica-se o mesmo comportamento no comparativo densidade *versus* índice de vazios, no estado fresco, demonstrado no Gráfico 2, à medida que aumenta a densidade há uma redução do índice de vazios. Ocorre que, no estado endurecido, o comportamento do gráfico apresenta uma inclinação mais suave da linha, o que evidencia o consumo da água de emassamento, seja pelas reações químicas seja pela evaporação, no processo de cura do concreto.

Neste Gráfico 3, é notório um comportamento crescente, a partir da referência, para o índice de vazios e um comportamento decrescente para densidade também a partir da referência. Fato esse verificado no Gráfico 2, somente a partir da substituição de 5%.

A Tabela 24 descreve a análise dos dados referentes ao índice de vazios no estado endurecido, considerando os decréscimos dos volumes de vazios (AV), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada mistura analisada.

Tabela 24 - Análise dos dados dos índices de vazios do concreto permeável no estado endurecido

Misturas	Média (%)	DV	DP	CV
REFERÊNCIA	27,09	-	2,73	10,08
5% MET	28,00	-3,00	0,91	3,25
10% MET	28,01	-3,00	1,79	6,39
15% MET	29,29	-8,00	1,24	4,23
Legenda:	DV – Decréscimo de volume de vazios (%) DP – Desvio padrão (%) CV – Coeficiente de variação (%)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

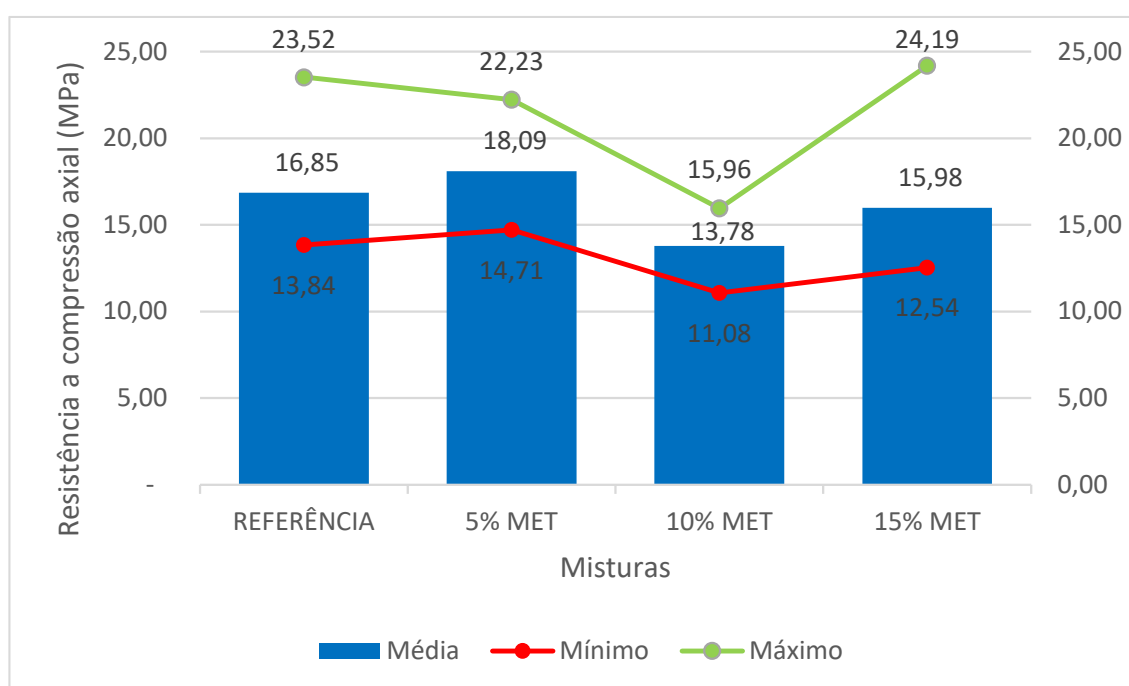
As menores variações foram em relação às substituições nos percentuais de 5% e 10%, com o mesmo valor de decréscimo do volume de vazios, correspondendo a 3% do índice de vazio médio de referência, enquanto a maior variação ocorreu com a substituição no percentual de 15%, com o decréscimo de 8%. Percebe-se que os decréscimos dos índices de vazios das misturas com substituições de 5%, 10% e 15% em relação à referência foram todos negativos, visto que todos os valores desses

índices foram maiores que o da mistura referência, o que indica que na verdade houve um acréscimo no índice de vazios.

4.2.4 Resistência à Compressão Axial

Os resultados alcançados para as diferentes misturas nos ensaios de resistência à compressão axial média (f_c em MPa), realizados aos 28 dias após a moldagem, estão dispostos no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resultados dos ensaios de resistência a compressão axial



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o Gráfico 4, percebe-se que o maior valor médio de resistência à compressão axial ocorreu na amostra com 5% de metacaulim (18,09 MPa). Para as demais misturas referência, 10% MET e 15% MET, os valores médios foram, respectivamente, de 16,85 MPa; 13,78 MPa e 15,98 MPa.

Considerando esses dados, pode-se afirmar que todos os resultados ficaram acima do valor mínimo disposto pela norma da ABNT NBR 16416 (2015) que estabelece o valor de 2,5 MPa e pela norma da ACI 522R-10 (2010), que estabelece o valor mínimo de 2,8 MPa.

A Tabela 25 descreve a análise dos dados de resistência à compressão axial considerando os decréscimos de resistência (DR), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada mistura analisada.

Tabela 25 - Análise dos dados de resistência à compressão axial

Misturas	Média (MPa)	DR	DP	CV
REFERÊNCIA	16,85	-	3,39	20,12
5% MET	18,09	-7,36	2,23	12,33
10% MET	13,78	18,22	1,66	12,05
15% MET	15,98	5,16	4,28	26,78
Legenda:	DR – Decréscimo de resistência à compressão axial (%) DP – Desvio padrão (MPa) CV – Coeficiente de variação (%)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentre as misturas analisadas, a que apresentou maior decréscimo de resistência no valor percentual de 18,22% da referência foi a mistura com 10% MET, e a mistura que apresentou o menor decréscimo de resistência foi a mistura com 15% MET no valor percentual de 5,16% da referência. A amostra com 5% MET apresentou um decréscimo de resistência à compressão negativo igual a 7,36%. O sinal negativo está indicando na verdade um acréscimo de resistência.

Considerando o desvio padrão, a mistura com 15% de metacaulim apresentou o valor de 4,28 MPa, o qual indica o maior grau de dispersão, enquanto a mistura com 10% de metacaulim apresentou o valor igual a 1,66 MPa, o qual indica o menor grau de dispersão. As misturas referências e 5% de metacaulim apresentaram valores intermediários para o desvio padrão.

O coeficiente de variação seguiu o mesmo comportamento variando entre 12,05% e 26,78. Com o objetivo de complementar esses resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 27.

Foi realizada uma análise linear, verificando a relação das misturas de concreto permeável denominadas referência, 5% MET, 10% MET e 15% MET com os resultados de resistência à compressão axial. O mesmo tratamento será utilizado nos itens a seguir que tratam da resistência à tração por compressão diametral, perda de massa por impacto e por abrasão e coeficiente de permeabilidade. Os dados coletados nos ensaios receberam o tratamento estatístico por análise de variância – ANOVA. Esse método consiste em comparar três ou mais grupos de dados e verificar

se as respostas da variável medida, fator único, diferem entre si estatisticamente. Além disso, também é possível comparar diferentes respostas de variáveis distintas, fator duplo, por meio da análise de variáveis, conforme foi realizado por Azerêdo (2012).

Na realização das análises, dos cálculos de média e desvio padrão nesta pesquisa, foi utilizado o programa Excel. As análises consistiram em comparar a variância das médias em um grupo de resultados e o fator analisado foi o valor-p, realizando as seguintes verificações:

Primeiro: se o valor-p $> 0,05$, então os dados não são estatisticamente significativos, considerando que o nível de significância será maior que 5%, por conseguinte com uma confiabilidade da resposta menor que 95%. Assim, não é possível afirmar que existe uma relação significativa entre a variável e a resposta.

Segundo: se o valor-p $\leq 0,05$, então os dados são estatisticamente significativos, considerando que possui um nível de significância menor ou igual a 5%, com uma confiabilidade do resultado maior ou igual a 95%. Assim, pode-se afirmar que existe uma relação significativa entre a variável e a resposta.

Tabela 26 - ANOVA da resistência à compressão axial

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	163,13	3,00	54,38	3,57	0,03	2,95
Dentro dos grupos	425,99	28,00	15,21			
Total	589,12	31,00				
Legenda	SQ – Soma dos quadrados					
	MQ – Média quadrática					
	gl – Graus de liberdade					

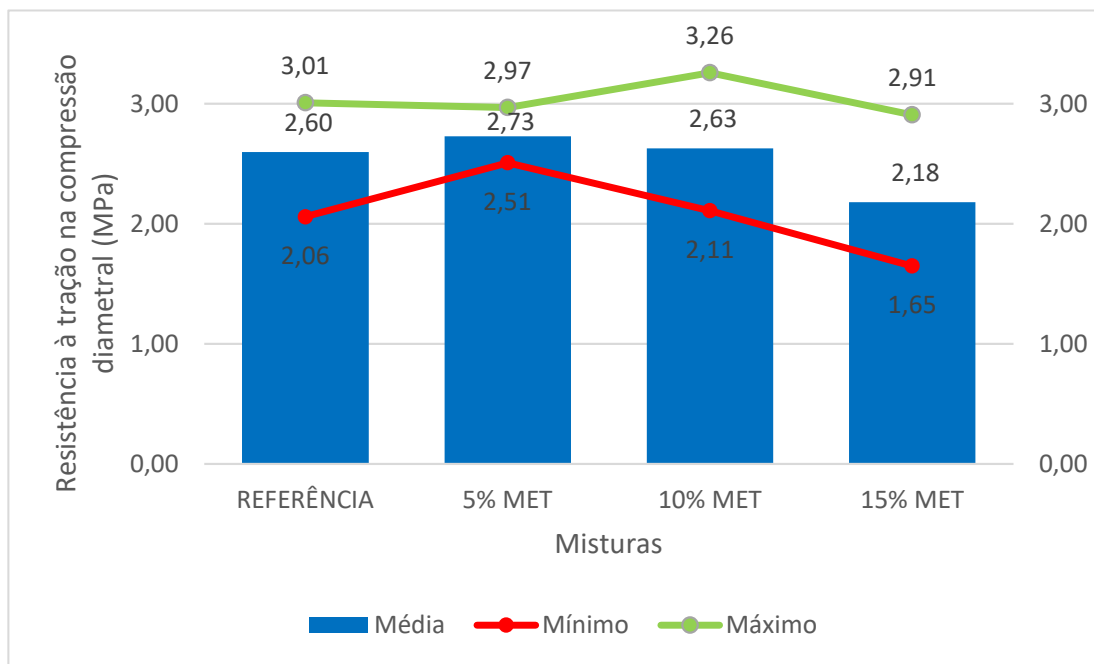
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 26 demonstra o valor-p de 0,03, valor menor que 0,05. Assim, a confiabilidade dos dados é maior que 95%, portanto se pode afirmar que as substituições parciais de cimento Portland por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, nas misturas de concreto permeável, influenciam significativamente na resistência à compressão axial analisada.

4.2.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

No Gráfico 5, estão dispostos os resultados médios obtidos para as diferentes misturas nos ensaios de resistência à tração por compressão diametral ($f_{ct,d}$ em MPa), realizados aos 28 dias após a moldagem.

Gráfico 5 - Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor.

Está demonstrado no gráfico, duas linhas de comparação. A linha vermelha representando os valores mínimos e a linha verde representando os valores máximos de resistência à tração por compressão diametral para cada mistura.

No Gráfico 5, percebe-se que o maior valor médio da resistência à tração por compressão diametral foi o registrado para a mistura com 5% MET (2,73 MPa), o menor valor médio para as resistências à tração por compressão diametral foi de 2,18 MPa para a mistura com 15% MET e os valores intermediários de resistência à tração na compressão diametral são iguais a 2,60 MPa e 2,63 MPa, respectivamente, referentes à mistura referência e à mistura com 10% MET.

Em todas as misturas, o valor de resistência à tração por compressão diametral foi maior que os valores estabelecidos pela norma da ABNT NBR 16416 (2015) e os valores verificados nas pesquisas realizadas por Batezini *et al.* (2021), Martins Filho *et al.* (2020) e Pils *et al.* (2019).

Dos resultados demonstrados no Gráfico 5, observa-se que a substituição parcial do cimento pelo metacaulim nas proporções de 5% e 10% causou um acréscimo de resistência.

Para comparar a resistência à tração na compressão diametral das misturas com substituição parcial do cimento pelo metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15% com a mistura referência, foi realizada uma análise dos dados de resistência à tração na compressão diametral considerando os decréscimos de resistência (DR), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para cada mistura analisada, conforme descrito na Tabela 27.

Tabela 27 - Análise dos dados de resistência à tração na compressão diametral

Misturas	Média (MPa)	DR	DP	CV
REFERÊNCIA	2,60	-	0,29	11,15
5% MET	2,73	-5,00	0,20	7,33
10% MET	2,63	-1,15	0,40	15,21
15% MET	2,18	16,15	0,49	22,48
Legenda:	DR – Decréscimo de resistência à tração na compressão diametral (%) DP – Desvio padrão (MPa) CV – Coeficiente de variação (%)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dentre as misturas analisadas, a única que apresentou decréscimo de resistência no valor percentual de 16,15% da referência foi a mistura com 15% MET. Nas demais amostras, 5% e 10%, o sinal negativo está indicando, na verdade, que houve um acréscimo de resistência.

Em relação ao coeficiente de variação, o maior e o menor valor percentual apresentados foram das misturas com 15% de metacaulim e 5% de metacaulim, respectivamente, iguais 22,48% e 7,33%. Com o objetivo de complementar esses resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 29.

Tabela 28 - ANOVA da resistência à tração na compressão diametral

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	1,40	3,00	0,47	3,59	0,03	2,95
Dentro dos grupos	3,64	28,00	0,13			
Total	5,04	31,00				
Legenda	SQ – Soma dos quadrados					
	MQ – Média quadrática					
	gl – Graus de liberdade					

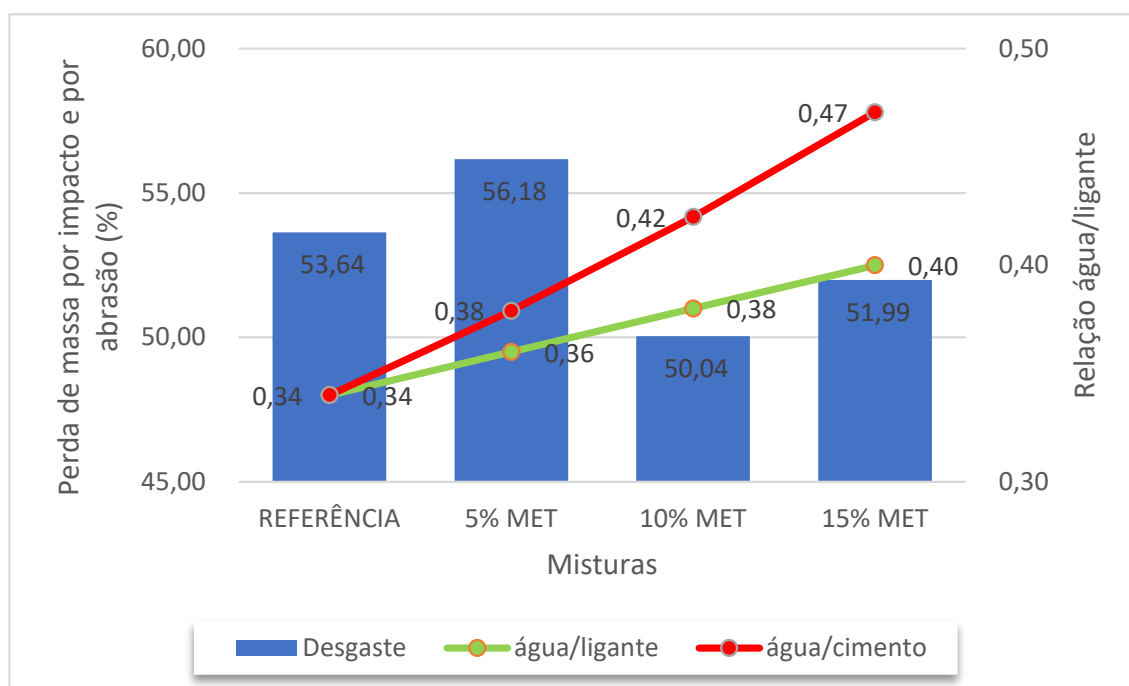
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 28 demonstra que as substituições parciais de cimento Portland por metacaulim nas misturas de concreto permeável influenciam significativamente na resistência à tração por compressão diametral analisada.

4.2.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão

No Gráfico 6, estão dispostos os resultados médios obtidos para as diferentes misturas nos ensaios de resistência à degradação por impacto e por abrasão (%), realizados aos 28 dias após a moldagem.

Gráfico 6 - Resultados dos ensaios de resistência à degradação por impacto e por abrasão



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 29 exhibe os valores da resistência à degradação por impacto e por abrasão (RDIA), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) para as misturas examinadas.

Tabela 29 - Análise dos dados da resistência à degradação por impacto e por abrasão

Misturas	Média (%)	RDIA	DP	CV
REFERÊNCIA	53,64	-	1,22	2,27
5% MET	56,18	-4,74	8,98	15,98
10% MET	50,04	6,71	3,36	6,71
15% MET	51,99	3,08	14,89	28,64
Legenda:	RDIA – Resistência à degradação por impacto e por abrasão (%) DP – Desvio padrão (%) CV – Coeficiente de variação (%)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tanto a norma da ABNT NBR 16416 (2016) como a norma ACI 522R (2010) não estabelecem limites para a resistência à degradação por impacto e por abrasão. Foi realizada uma análise numérica comparando a perda de massa que as misturas com substituição de cimento por metacaulim obtiveram em relação à mistura referência de concreto permeável. Com o objetivo de complementar esses resultados, realizou-se a análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 - ANOVA da resistência à degradação por impacto e por abrasão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	60,96	3	20,32	0,26	0,85	4,07
Dentro dos grupos	630,30	8	78,79			
Total	691,26	11				
Legenda	SQ – Soma dos quadrados					
	MQ – Média quadrática					
	gl – Graus de liberdade					

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 30 demonstra o valor-p igual a 0,85. Portanto, valor maior que 0,05. Assim, a confiabilidade dos dados é menor que 95%, se pode afirmar que as substituições parciais de cimento Portland por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, nas misturas de concreto permeável, não influenciam significativamente na perda de massa por impacto e por abrasão.

4.2.7 Coeficiente de Permeabilidade

Na Tabela 31, estão registrados os valores para os coeficientes de permeabilidade K (m/s) e para o índice de vazios no estado endurecido, obtidos para

o concreto referência e para o concreto com as substituições parciais do cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, nos ensaios realizados aos 28 dias após a moldagem.

Tabela 31 - Coeficientes de permeabilidade *versus* índice de vazios no estado endurecido

Misturas	Índice de vazios no estado endurecido (%)	Coeficiente de permeabilidade (m/s)
REFERÊNCIA	27,09	0,00319
5% MET	28,00	0,00507
10% MET	28,01	0,00418
15% MET	29,29	0,00282

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores dos coeficientes de permeabilidade encontrados são superiores aos valores estabelecidos pela norma da ABNT NBR 16416 (2016) e pelo relatório do comitê ACI 522 (2010), respectivamente 1.10^{-3} e $1,4.10^{-3}$, como se verifica por meio dos resultados dos ensaios realizados apresentados na Tabela 32. Resultados esses similares aos resultados apresentados por Tennis, Leming e Akers (2004) compreendidos no intervalo de 0,2 cm/s a 0,54 cm/s, bem como os apresentados nas Tabelas 7 e 8, as quais apresentam os resultados obtidos por diversos autores.

Os resultados médios dos coeficientes de permeabilidade no estado endurecido, os decréscimos do coeficiente de permeabilidade (DCP), bem como os desvios padrão (DP) e os coeficientes de variação (CV) estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Análise dos dados dos coeficientes de permeabilidade

Misturas	Média (m/s)	DCP	DP	CV
REFERÊNCIA	0,00319	-	0,00106	33,23
5% MET	0,00507	-58,93	0,00048	9,47
10% MET	0,00418	-31,03	0,00121	28,95
15% MET	0,00282	11,06	0,00123	43,62
Legenda:	ICP – Decréscimo do coeficiente de permeabilidade (%) DP – Desvio padrão (m/s) CV – Coeficiente de variação (%)			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando a Tabela 32, percebe-se que houve um aumento do coeficiente de permeabilidade em 58,93%, na substituição parcial do cimento por metacaulim na proporção de 5%, em relação ao concreto referência e que a maior variabilidade do conjunto de dados da amostra, indicando uma medida de dispersão na ordem de 43,62%, ocorreu para substituição parcial do cimento por metacaulim na proporção de 15% em relação ao concreto referência.

Nas substituições de cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, constata-se um decréscimo linear do coeficiente de permeabilidade em função do aumento de metacaulim na mistura. No entanto, para se confirmar a relevância dos resultados encontrados para o coeficiente de permeabilidade foi realizada uma análise de variância apresentada na Tabela 34.

Tabela 33 - ANOVA do coeficiente de permeabilidade

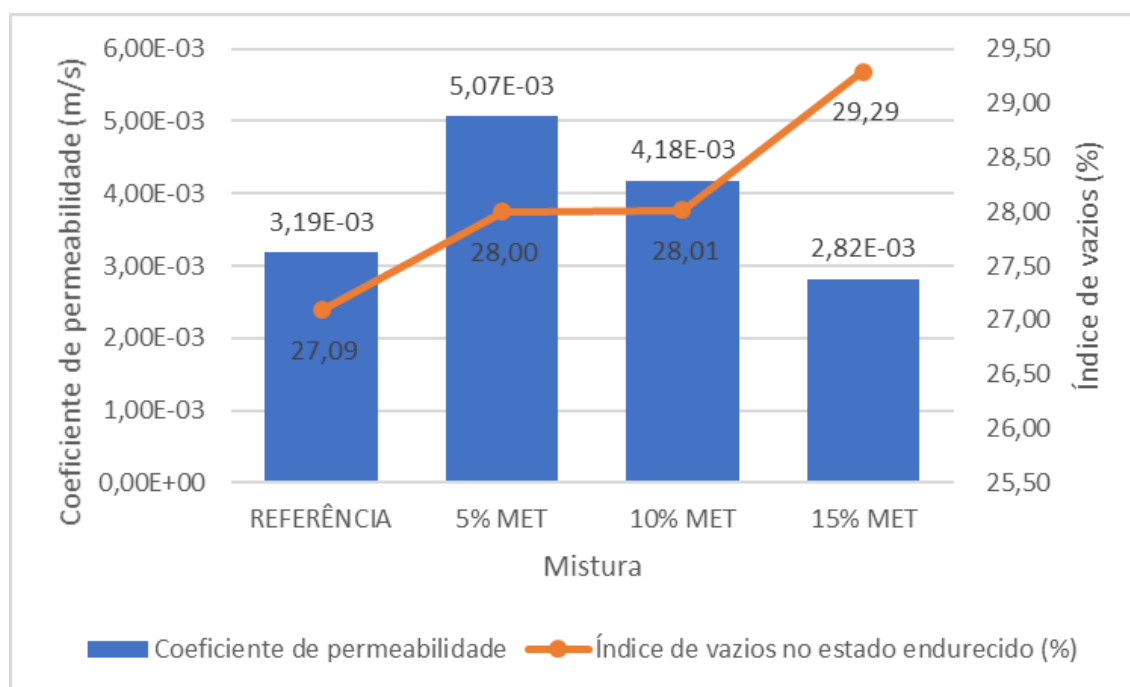
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor P	F crítico
Entre grupos	$1,54.10^{-5}$	3	$5,13.10^{-6}$	4,75	0,01	3,24
Dentro dos grupos	$1,73.10^{-5}$	16	$1,08.10^{-6}$			
Total	$3,27.10^{-5}$	19				
Legenda	SQ – Soma dos quadrados					
	MQ – Média quadrática					
	gl – Graus de liberdade					

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando o valor-p de 0,01, na Tabela 33, pode-se afirmar que as substituições parciais de cimento Portland por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, nas misturas de concreto permeável, influenciam significativamente no coeficiente de permeabilidade.

Os resultados do coeficiente de permeabilidade *versus* índice de vazios no estado endurecido estão representados também em forma de gráfico, no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Coeficientes de permeabilidade *versus* índice de vazios no estado endurecido



Fonte: Elaborado pelo autor.

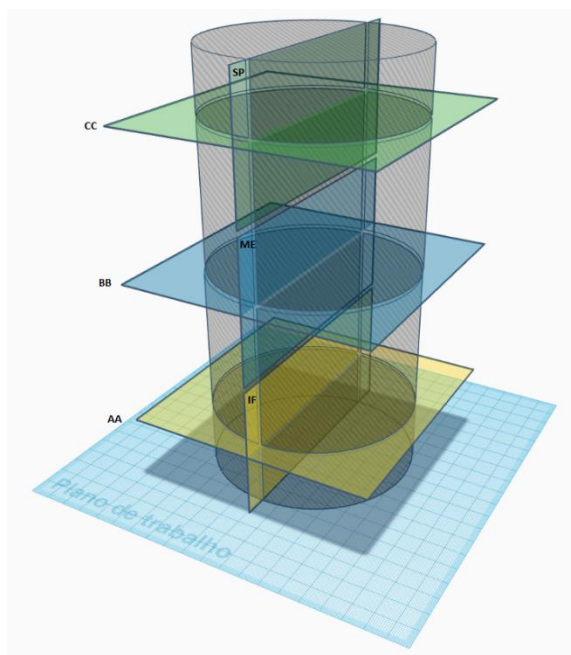
No Gráfico 7, é possível verificar um comportamento interessante, aquém do comportamento desejado. Esperava-se verificar, no comparativo representado, um aumento da permeabilidade simultâneo ao aumento do índice de vazios, conforme se observa no comportamento gráfico entre o concreto referência e o concreto com substituição parcial de cimento por metacaulim na proporção de 5%. Contudo, entre as substituições, constata-se que, conforme aumenta o teor de substituição, há um aumento no índice de vazios e uma redução no coeficiente de permeabilidade. Corrobora na explicação desse fenômeno a afirmação de Schwetz et al. (2015) de que, além de um elevado índice de vazios, para se obter uma elevada permeabilidade, deve haver uma conexão entre os vazios que se comportem como dutos no interior do concreto permeável.

4.2.8 Espessura de Pasta e Densidades Parciais

Para a determinação da espessura de pasta e para a determinação das densidades parciais ao longo da altura do corpo de prova, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, foram realizados cortes em camadas distintas, seções

transversais dispostas em plano de corte do corpo de prova na direção horizontal e seções longitudinais dispostas em plano de corte do corpo de prova na direção vertical, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 19 - Plano de corte do CP.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim foram realizadas medições nas seções transversais (AA, BB e CC), nas seções longitudinais com 03 camadas (SP, ME e IF). Os resultados encontrados estão dispostos nas tabelas a seguir, Tabela 34 e Tabela 35, e no Gráfico 8. Ambos referenciados nos próximos subitens com análise comparativa ao final do subitem 4.2.8.1.1., para seções transversais e longitudinais com três camadas. Já no subitem 4.2.8.1.2., apresentam-se as medidas realizadas nas seções longitudinais com 04 camadas (SP, MS, MI e IF) as quais serão comparadas às densidades parciais com valores dispostos na Tabela 36.

4.2.8.1 Espessura de pasta nas seções transversais

Para determinação da espessura de pasta nas seções transversais dispostas no plano de corte do corpo de prova na direção horizontal, foram utilizadas duas amostras, sendo realizadas 50 medidas da espessura de pasta, utilizando o software ImageJ, para cada camada representada pelos cortes AA, BB e CC, referentes às

distintas misturas para cada amostra. Assim, estão representados na Tabela 34 os resultados médios encontrados para espessura de pasta em cada seção.

Tabela 34 - Espessura de pasta nas seções transversais com 03 camadas.

Misturas	Camadas	Seções	Espessura (mm)
REFERÊNCIA	Superior (SP)	CC	0,80
REFERÊNCIA	Meio (ME)	BB	0,77
REFERÊNCIA	Inferior (IF)	AA	0,71
5% MET	Superior (SP)	CC	0,67
5% MET	Meio (ME)	BB	0,65
5% MET	Inferior (IF)	AA	0,63
10% MET	Superior (SP)	CC	0,83
10% MET	Meio (ME)	BB	0,82
10% MET	Inferior (IF)	AA	0,81
15% MET	Superior (SP)	CC	0,85
15% MET	Meio (ME)	BB	0,78
15% MET	Inferior (IF)	AA	0,75

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.8.1.1 Espessura de pasta nas seções longitudinais (03 camadas)

Na Tabela 35, estão os resultados médios encontrados para espessura de pasta em cada seção longitudinal, medição realizada em 03 camadas.

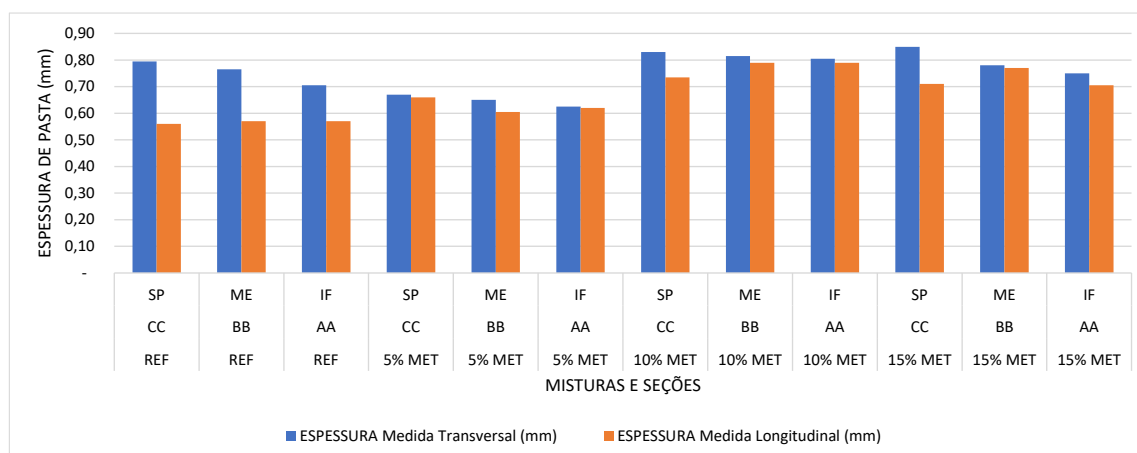
Tabela 35 - Espessura de pasta nas seções longitudinais com 03 camadas

Misturas	Camadas		Espessura (mm)
REFERÊNCIA	Superior (SP)	SP	0,56
REFERÊNCIA	Meio (ME)	ME	0,57
REFERÊNCIA	Inferior (IF)	IF	0,57
5% MET	Superior (SP)	SP	0,61
5% MET	Meio (ME)	ME	0,62
5% MET	Inferior (IF)	IF	0,63
10% MET	Superior (SP)	SP	0,74
10% MET	Meio (ME)	ME	0,79
10% MET	Inferior (IF)	IF	0,79
15% MET	Superior (SP)	SP	0,71
15% MET	Meio (ME)	ME	0,77
15% MET	Inferior (IF)	IF	0,71

Fonte: Elaborada pelo autor.

Considerando as medidas realizadas em três camadas, o Gráfico 8 mostra o comportamento da espessura de pasta comparando as medidas realizadas nas seções transversais com as medidas realizadas nas seções longitudinais.

Gráfico 8 - Espessura de pasta - Medidas transversais e longitudinais



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que a sequência da base para o topo do corpo de prova é de AA para CC, pode-se verificar que os valores médios dispostos para a espessura de pasta medida nas seções transversais (AA, BB e CC) apresentam um comportamento uniforme, quando comparado aos valores médios medidos nas regiões longitudinais (SP, ME e IF) para as substituições, com exceção da região longitudinal denominada SP nos percentuais de substituição 10% e 15%. Excluindo essas se percebe uma uniformidade dos valores médios de espessura de pasta. No geral as camadas superiores são mais espessas que as camadas inferiores.

4.2.8.1.2 Espessura de pasta nas seções longitudinais (04 camadas)

Nas seções longitudinais dispostas no plano de corte do corpo de prova na direção vertical, foram utilizadas duas amostras, sendo realizadas um total de 50 medidas da espessura de pasta, utilizando o software ImageJ, para cada camada representada pelas regiões Superior (SP), meio superior (MS), meio inferior (MI) e inferior (IF), referente às distintas misturas para cada amostra. Bem como, duas medidas de densidade parcial para cada camada das distintas misturas. Assim, estão representados na Tabela 36 os resultados médios encontrados.

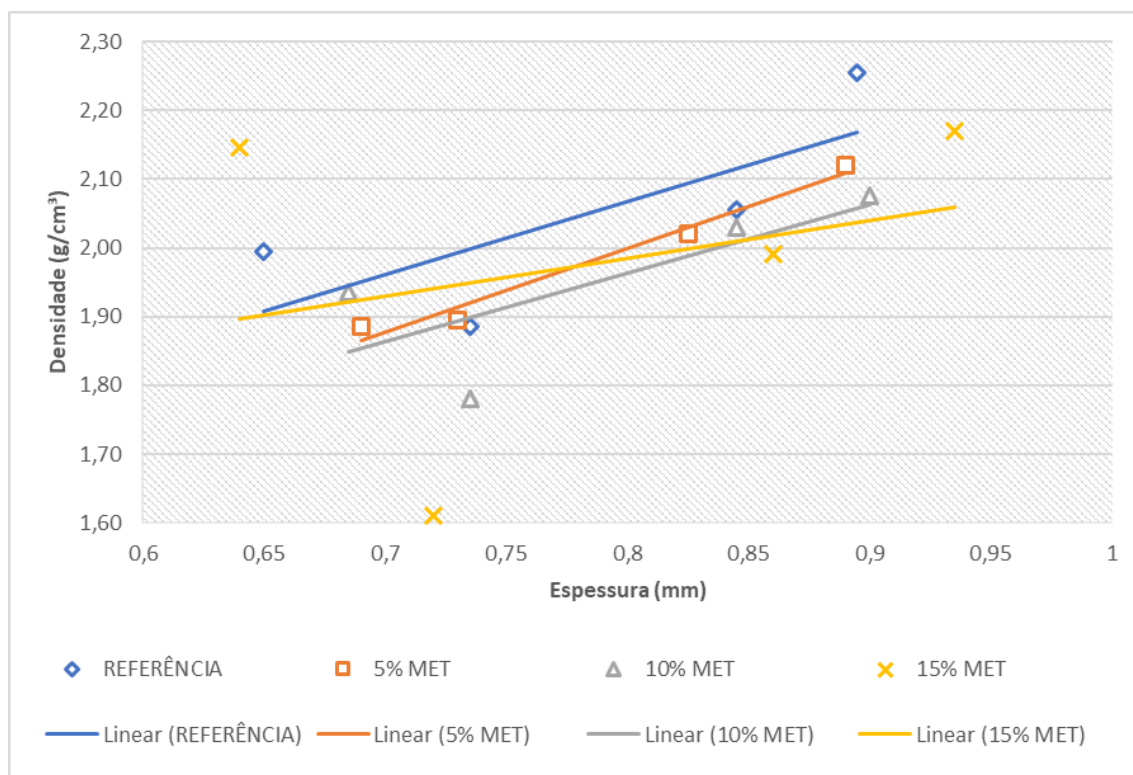
Tabela 36 - Espessura de pasta e densidades parciais

Misturas	Camadas		Espessura (mm)	Densidade (g/cm ³)
REFERÊNCIA	Superior	(SP)	0,65	2,00
REFERÊNCIA	Meio Superior	(MS)	0,90	2,26
REFERÊNCIA	Meio Inferior	(MI)	0,85	2,06
REFERÊNCIA	Inferior	(IF)	0,74	1,89
5% MET	Superior	(SP)	0,69	1,89
5% MET	Meio Superior	(MS)	0,83	2,02
5% MET	Meio Inferior	(MI)	0,89	2,12
5% MET	Inferior	(IF)	0,73	1,90
10% MET	Superior	(SP)	0,69	1,94
10% MET	Meio Superior	(MS)	0,85	2,03
10% MET	Meio Inferior	(MI)	0,90	2,08
10% MET	Inferior	(IF)	0,74	1,78
15% MET	Superior	(SP)	0,64	2,15
15% MET	Meio Superior	(MS)	0,94	2,17
15% MET	Meio Inferior	(MI)	0,86	1,99
15% MET	Inferior	(IF)	0,72	1,61

Fonte: Elaborada pelo autor.

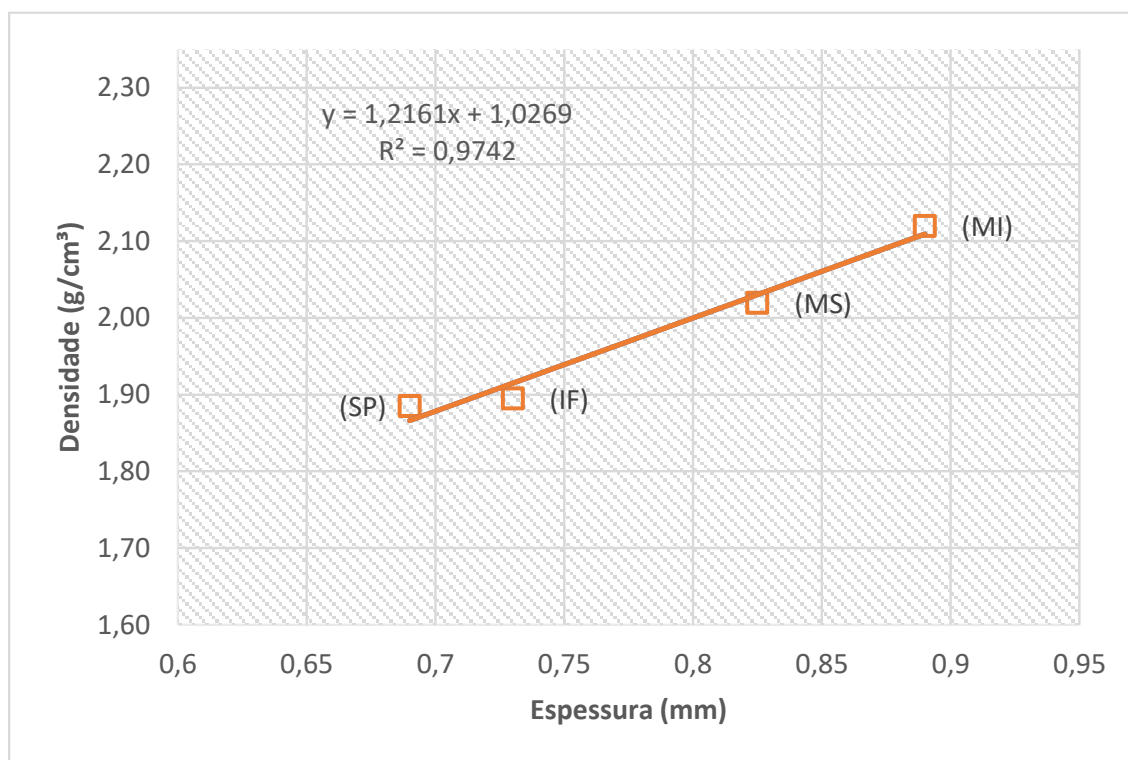
Observando os dados contidos na Tabela 36, é notório que, ao longo das camadas verticais (SP, MS, MI e IF), todas as misturas obedecem a comportamentos similares, tanto para espessura de pasta como para densidades parciais, com valores maiores nas camadas ao meio (MS e MI) do corpo de prova.

Para uma visualização mais evidente da relação entre a espessura de pasta e a densidade parcial, considerando as camadas, foi elaborado o Gráfico 9 demonstrando os mesmos resultados representados na Tabela 35.

Gráfico 9 - Espessura de pasta *versus* densidades parciais

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se um comportamento similar nas linhas que representam as misturas referência, 5% MET e 10% MET, o que não se repete na linha que representa a mistura denominada 15% MET. Dentre os resultados representados no Gráfico 8, foi dado destaque à mistura denominada 5% MET, por apresentar melhores resultados $R^2=0,97$ como pode ser observado no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Espessura de pasta *versus* densidades parciais (Mistura 5% MET)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fica demonstrada graficamente a excelente relação existente entre a densidade e a espessura de pasta, embora haja uma variação ao longo da altura do corpo de prova com comportamento não linear, uma vez que essa mistura apresenta os maiores valores tanto para espessura de pasta como para densidades parciais, nas camadas ao meio (MS e MI) do corpo de prova. Portanto, pode-se afirmar que o método aplicado foi eficiente, trazendo resultados significativos à problemática de escoamento da pasta cimentícia ao longo do corpo de prova concentrando-se nas camadas inferiores com vedação dos poros, identificada pelos autores Costa *et al.* (2021), Gentil (2020) e Xie *et al.* (2018).

4.3 RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DO CONCRETO PERMEÁVEL

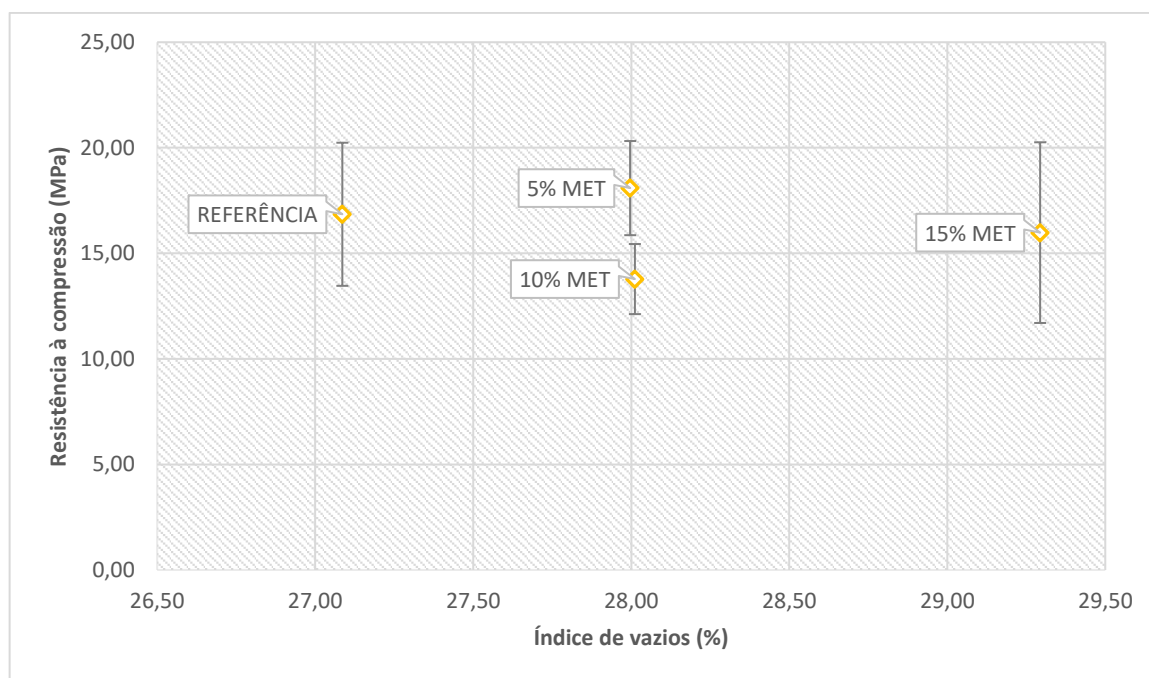
Em itens anteriores, foram realizados comparativos entre alguns parâmetros, tais como densidade *versus* índice de vazios no estado fresco, densidade *versus* índice de vazios no estado endurecido, coeficientes de permeabilidade *versus* índice de vazios no estado endurecido e o comparativo entre espessura de pasta *versus* densidades parciais. Na sequência, excluindo estes, serão realizadas algumas

relações concebíveis entre os parâmetros analisados individualmente, com base nos valores auferidos nesta pesquisa experimental para os concretos permeáveis com substituição parcial do cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%.

4.3.1 Resistência à Compressão Axial *Versus* Índice de Vazios

O gráfico 11 demonstra que os dados obtidos não apresentam uma relação forte ($R^2 > 70\%$) entre a resistência à compressão, medida em MPa e o índice de vazios, medido em %, para as misturas de concreto permeável com substituição parcial do cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%.

Gráfico 11 - Resistência à compressão axial *versus* índice de vazios



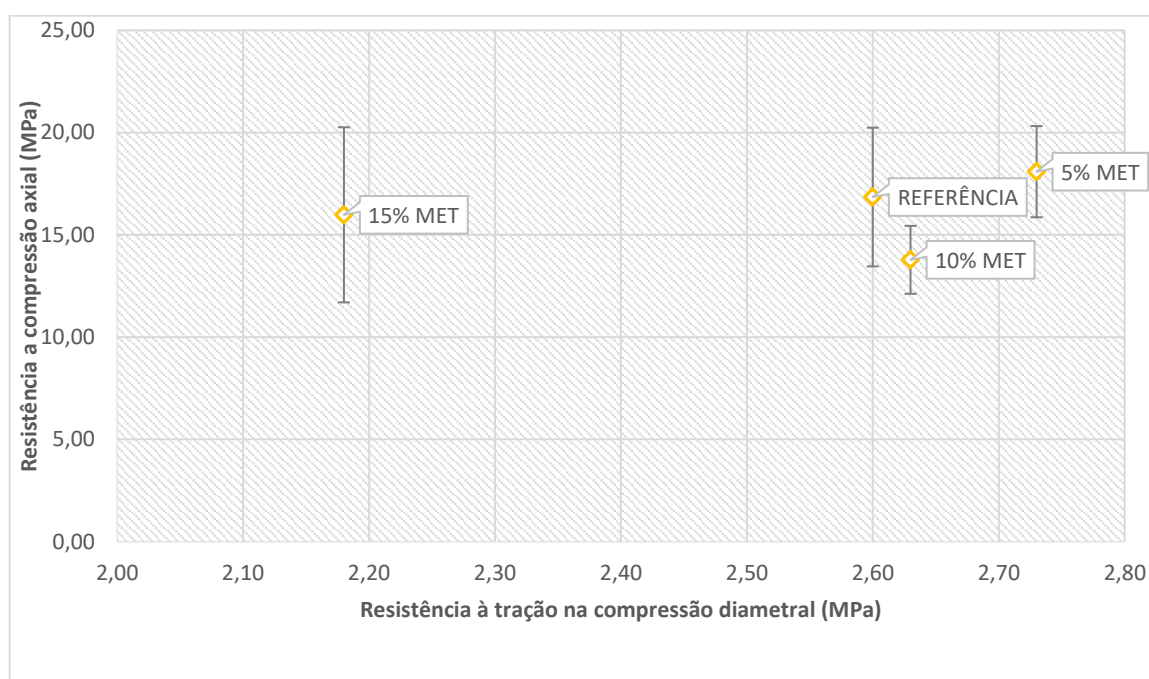
Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, observando o Gráfico 11, é possível apurar que, na substituição parcial do cimento por metacaulim na proporção de 5% com o aumento do índice de vazios, há um aumento na resistência à compressão. Já nas substituições com 10% MET e 15% MET, em comparação à referência, com o aumento no índice de vazios há uma redução da resistência à compressão, o que fora também notado por Dellate e Cleary (2006), Farias *et al.* (2019) e Ibrahim *et al.* (2014) em seus experimentos.

4.3.2 Resistência à Compressão Axial *Versus* Resistência à Tração por Compressão Diametral

No Gráfico 12, estão indicados, no eixo X, os valores de resistência à tração na compressão diametral medidos em MPa e, no eixo Y, os valores de resistência à compressão axial medidos em MPa, obtidos neste experimento, para cada mistura de concreto permeável estudada.

Gráfico 12 - Resistência à compressão axial *versus* resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor.

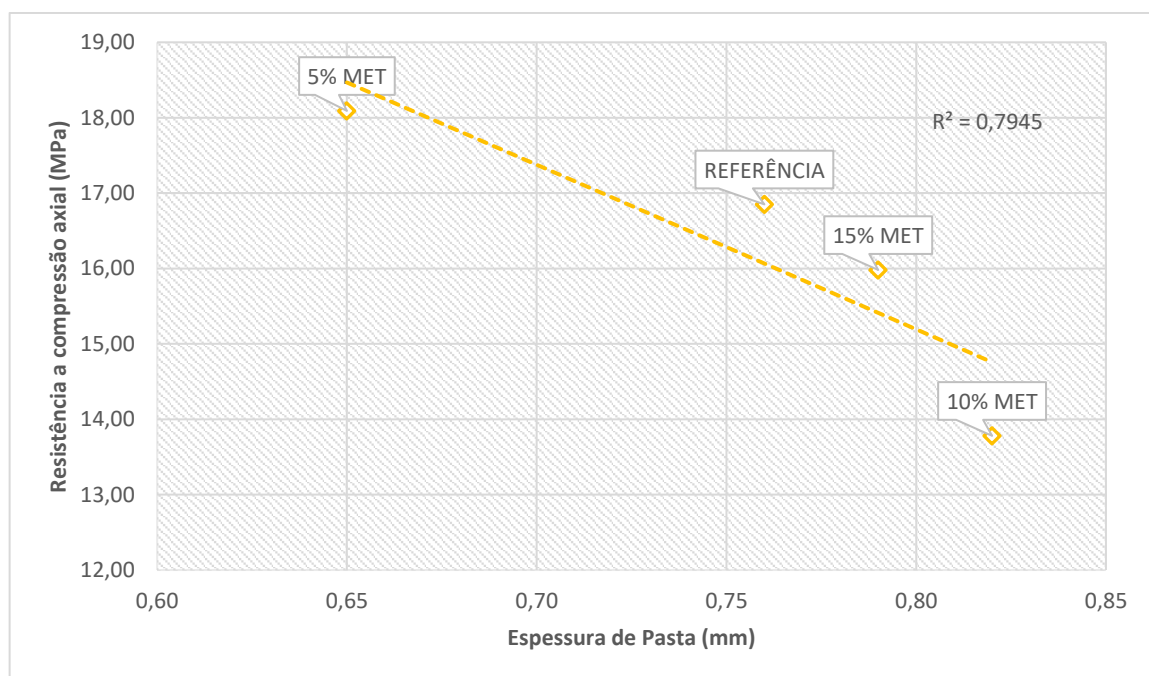
Conforme demonstrado no Gráfico 12, os dados obtidos não apresentam uma relação forte ($R^2 > 70\%$) entre as resistências à compressão e à tração na compressão diametral, para o concreto permeável. Contudo é possível averiguar um ganho de resistência, tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na compressão diametral, quando se realiza a substituição parcial do cimento por metacaulim na proporção de 5%. Já nas demais substituições esse comportamento não se mantém.

4.3.3 Resistência à Compressão Axial *Versus* Espessura de Pasta Transversal

Existe uma relação entre resistência à compressão axial e a espessura de pasta que gera uma reta que representa os valores encontrados na pesquisa. A partir desta reta, é possível identificar a melhor relação entre esses parâmetros para ambas as substituições parciais de cimento por metacaulim (5%, 10% e 15%), representada por uma função linear (Equação 3), a qual pode prever a resistência à compressão axial (MPa) com um coeficiente de determinação R^2 de 0,79.

$$y = -21,83x + 32,657 \quad \text{Equação (3)}$$

Gráfico 13 - Resistência à compressão axial *versus* espessura de pasta transversal



Fonte: Elaborado pelo autor.

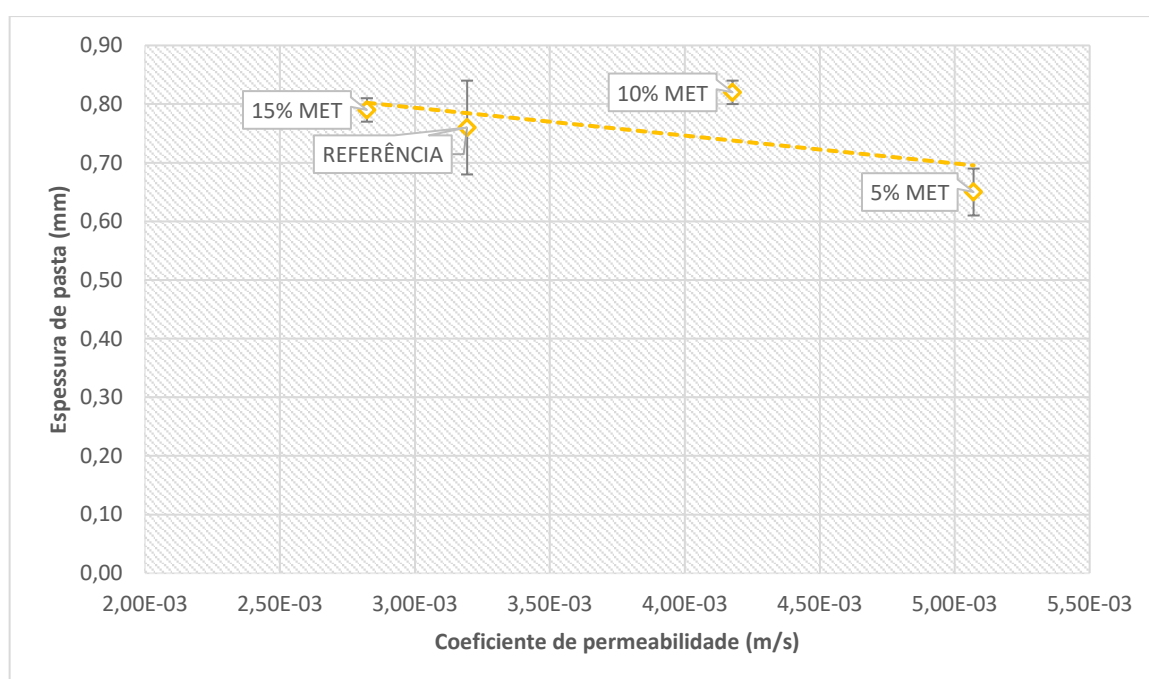
Observou-se, a partir do Gráfico 13, que a mistura denominada 5% MET apresenta o maior valor para a resistência à compressão axial, superior à mistura referência, o que não ocorreu com as demais substituições, 10% MET e 15% MET, e o menor valor de espessura de pasta. Resumindo, os menores valores de espessura de pasta originam as maiores resistências à compressão axial nas misturas. Tomando a mistura referência como base, esse comportamento foi atingido na mistura com o percentual de substituição de 5% positivamente, com o ganho de resistência à compressão axial e redução da espessura de pasta. E negativamente, com perda de resistência à compressão axial e aumento da espessura de pasta nos percentuais de

substituições de 10% e 15%. Contrariando o observado por Guneyisi *et al.* (2016) e Torres, Hu e Ramos (2015), que relatam que o aumento na espessura da pasta de cimento melhora a resistência à compressão do concreto permeável e que esse processo acarretará menores índices de vazios e menores valores de permeabilidade.

4.3.4 Espessura de Pasta *Versus* Coeficiente de Permeabilidade

O Gráfico 14 registra, no eixo X, os valores de coeficiente de permeabilidade medidos em m/s e, no eixo Y, os valores de espessura da pasta medidos em mm (média das medidas nas seções transversais), obtidos neste experimento, para cada mistura de concreto permeável estudada.

Gráfico 14 - Espessura de pasta *versus* coeficiente de permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

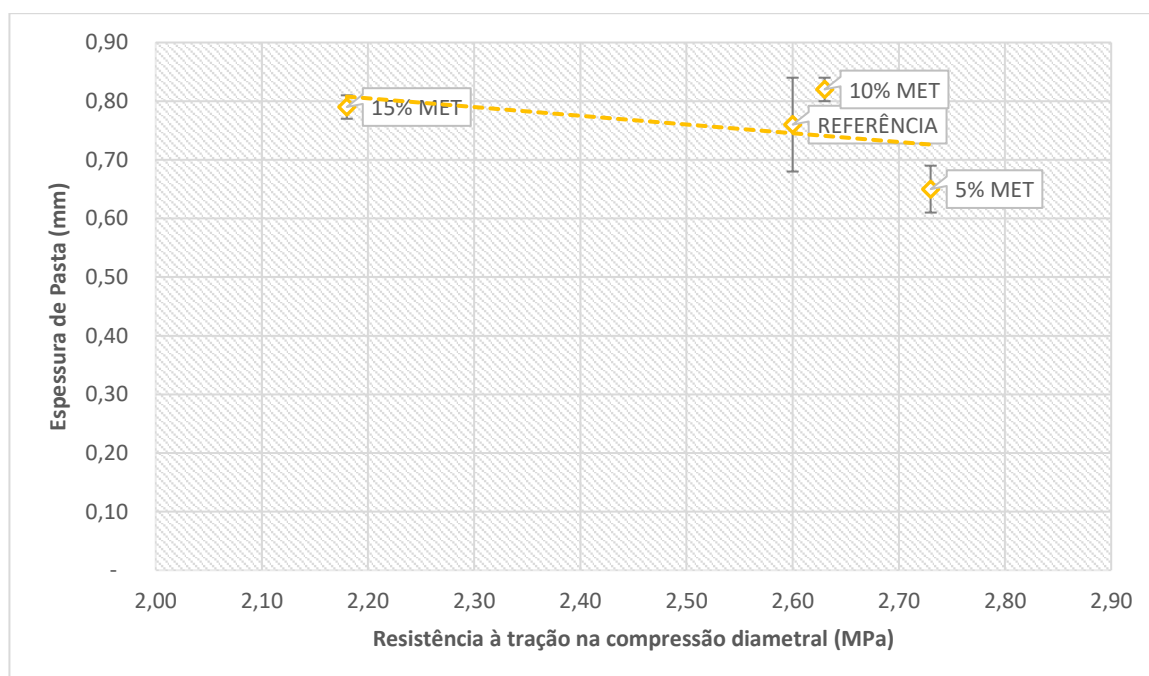
No Gráfico 14, foram identificados os desvios padrão para a espessura de pasta medida nas seções transversais. Verifica-se que os dados obtidos não apresentam uma relação forte ($R^2 > 70\%$) entre a espessura da pasta cimentícia e o coeficiente de permeabilidade. Contudo a reta de tendência da função demonstra o mesmo comportamento relatado por Torres, Hu e Ramos (2015) em seus estudos referentes à relação da espessura da pasta de cimento com a permeabilidade. À medida que a espessura de pasta de cimento aumenta, a permeabilidade diminui. Esse

comportamento pode ser explicado em função da redução dos vazios à medida que a espessura de pasta de cimento fica maior. Ressaltam-se os resultados encontrados para a substituição parcial do cimento por metaculim no percentual de 5%, o qual se destaca apresentando o maior valor para o coeficiente de permeabilidade e o menor valor para espessura de pasta.

4.3.5 Espessura de Pasta *Versus* Resistência à Tração por Compressão Diametral

No Gráfico 15, foram identificados os desvios padrão para a espessura de pasta medida nas seções transversais. Verifica-se que os dados obtidos não apresentam uma relação forte ($R^2 > 70\%$) entre os valores de resistência à tração na compressão diametral, medidos em MPa, e os valores de espessura da pasta, medidos em mm (média das medidas nas seções transversais), obtidos neste experimento, para cada mistura de concreto permeável estudada.

Gráfico 15 - Espessura de pasta *versus* resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o Gráfico 15, constata-se que a mistura denominada 5% MET apresenta o maior valor de resistência à tração na compressão diametral, superior aos

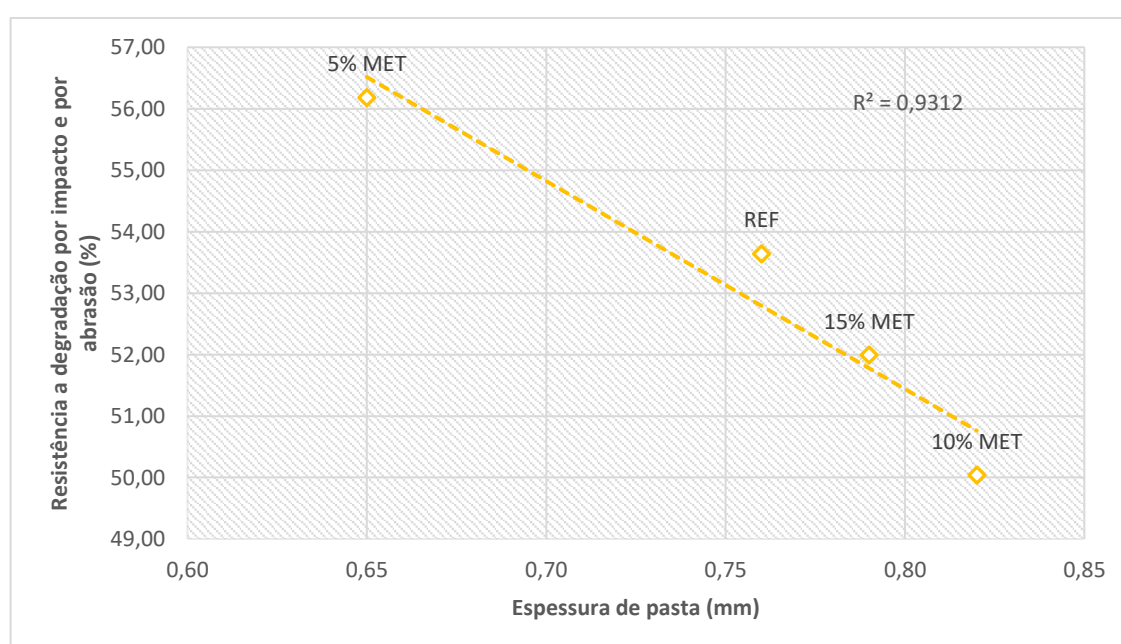
valores apresentados pela mistura referência, 10% MET e 15% MET, e o menor valor de espessura de pasta dentre os apresentados por todas as misturas de concreto permeável. A reta da função linear apresenta comportamento similar ao apresentado pela reta da função linear que representa a relação da espessura de pasta com o coeficiente de permeabilidade, ilustrado no Gráfico 13, ou seja, à medida que a espessura de pasta de cimento aumenta, a resistência à tração na compressão diametral diminui.

4.3.6 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão *Versus* Espessura de Pasta

Uma relação entre resistência à degradação por impacto e por abrasão e a espessura de pasta foi desenvolvida, conforme o Gráfico 16. A partir deste é possível identificar a melhor relação entre esses parâmetros para ambas as substituições parciais de cimento por metacaulim, representada por uma função linear (Equação 4), a qual pode prever a resistência à degradação por impacto e por abrasão (%) com um coeficiente de determinação R^2 de 0,93.

$$y = -33,845x + 78,516 \quad \text{Equação (4)}$$

Gráfico 16 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão versus espessura de pasta



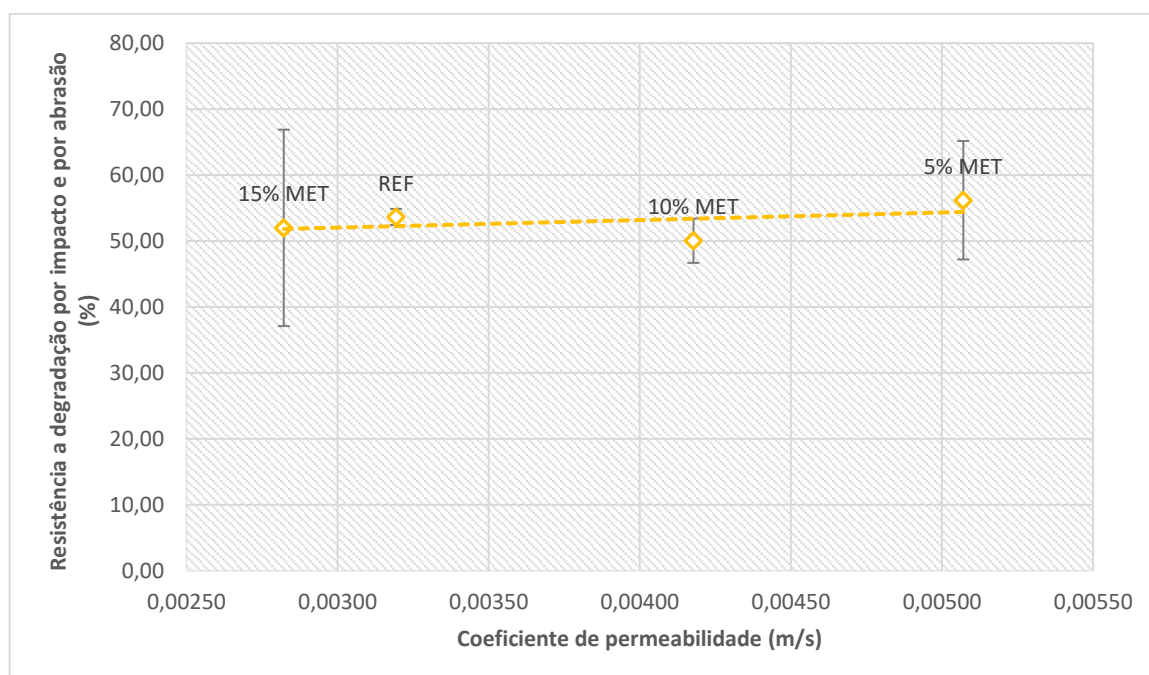
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 16, o qual ilustra a relação entre resistência à degradação por impacto e por abrasão e a espessura de pasta, verifica-se que a mistura denominada 5% MET proporciona o maior valor percentual de resistência à degradação por impacto e por abrasão e os menores valores de espessura de pasta. Superiores à mistura referência, o que não ocorreu com as demais substituições, 10% MET e 15% MET.

4.3.7 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão *Versus* Permeabilidade

O Gráfico 17 registra, no eixo X, os valores dos coeficientes de permeabilidade (m/s) e, no eixo Y, os valores de resistência à degradação por impacto e por abrasão (%) obtidos neste experimento, para cada mistura de concreto permeável estudada.

Gráfico 17 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão *versus* coeficiente de permeabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico 17, pode-se observar que os maiores percentuais de resistência à degradação por impacto e por abrasão ocorreram para as misturas que apresentaram maiores coeficientes de permeabilidade, a exemplo das misturas 15% MET, REF e 5% MET que demonstram um comportamento crescente tanto para resistência à

degradação por impacto e por abrasão como para o coeficiente de permeabilidade. A exceção é a mistura com 10% MET que, apesar de obedecer ao comportamento crescente para o coeficiente de permeabilidade, decresce na resistência à degradação por impacto e por abrasão. Se destaca os resultados encontrados para a mistura 5% MET que apresentou os maiores valores, tanto para os percentuais de resistência a degradação por impacto e por abrasão como para o coeficiente de permeabilidade. Esse fato ocorreu contrariando o resultado esperado, pois quanto menor é a compacidade entre os agregados das misturas, deriva melhor permeabilidade e assim maior facilidade de desprendimento dos agregados no teste degradação por impacto e abrasão.

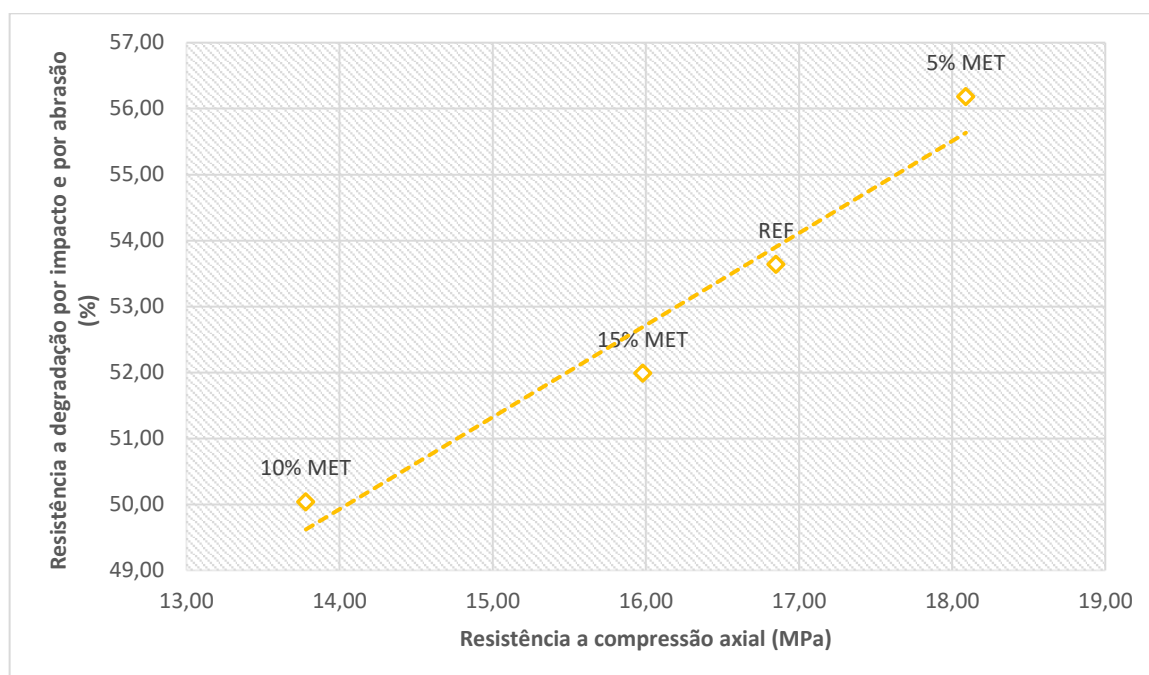
4.3.8 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão *Versus* Resistência à Compressão Axial

Uma relação entre resistência à degradação por impacto e por abrasão e a resistência à compressão aos 28 dias foi desenvolvida, conforme Gráfico 18. A partir deste é possível identificar a melhor relação entre esses parâmetros para ambas as substituições parciais de cimento por metacaulim, representada por uma função linear (Equação 5), a qual pode prever a resistência à degradação por impacto e por abrasão (%) com um coeficiente de determinação R^2 de 0,95.

$$y = 1,3952x + 30,396$$

Equação (5)

Gráfico 18 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão *versus* resistência à compressão axial



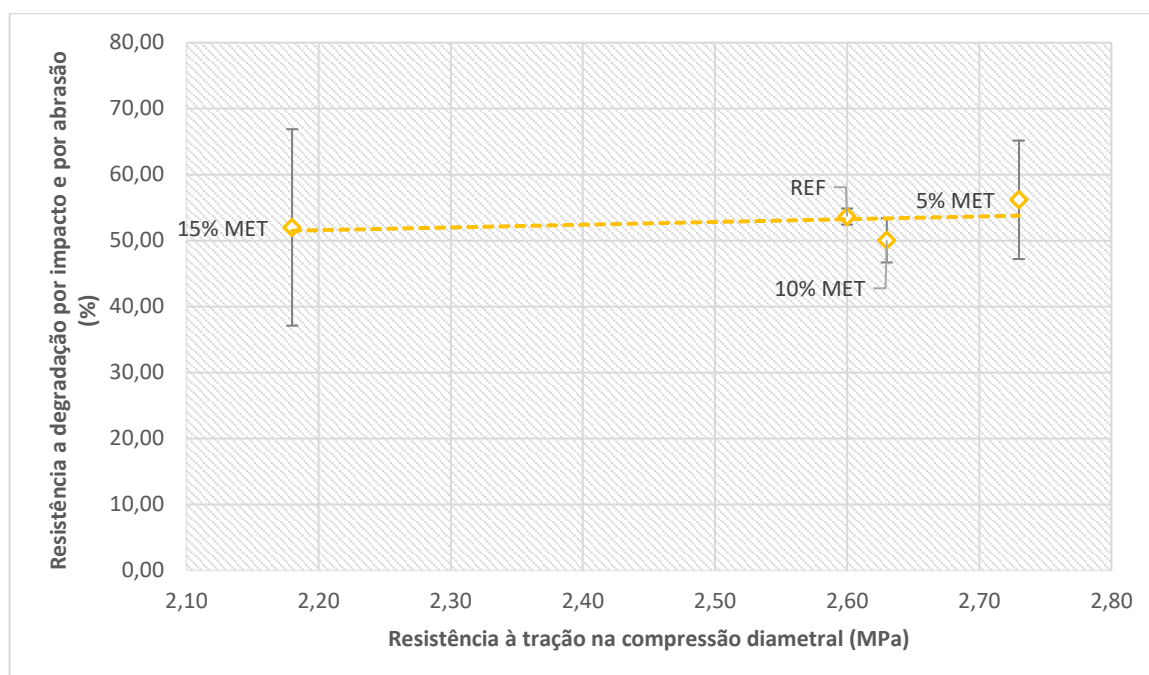
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 18, verifica-se que a mistura denominada 5% MET proporciona o maior valor percentual de resistência à degradação por impacto e por abrasão e os maiores valores de resistência à compressão. Superiores à mistura referência, o que não ocorreu com as demais substituições, 10% MET e 15% MET.

4.3.9 Resistência à Degradação por Impacto e por Abrasão *Versus* Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os dados obtidos não apresentam uma relação forte ($R^2 > 70\%$) entre a resistência à tração na compressão diametral e a resistência à degradação por impacto e por abrasão para as misturas de concreto permeável com substituições parciais do cimento por metacaulim nas proporções de 5%, 10% e 15%, como pode ser observado no Gráfico 19. Contudo foram identificados os desvios padrão referentes às médias da resistência à degradação por impacto e por abrasão para as misturas de concreto permeável.

Gráfico 19 - Resistência à degradação por impacto e por abrasão *versus* resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o Gráfico 19, verifica-se que a mistura denominada 5% MET proporciona o maior valor percentual de resistência à degradação por impacto e por abrasão e o maior valor de resistência à tração na compressão diametral. Valores superiores à mistura referência, o que não ocorreu com as demais substituições, 10% MET e 15% MET.

Após a análise dos resultados, foram constatadas diferentes respostas sobre as misturas analisadas. No capítulo seguinte, será realizada uma recapitulação desses resultados e a apresentação das conclusões obtidas nesta pesquisa.

5 CONCLUSÃO

Este estudo procurou, além da melhora na consistência da pasta nas misturas de concreto permeável com a utilização de materiais alternativos como o metacaulim, uma análise de questões básicas, porém fundamentais, tais como a influência desse material na substituição parcial do cimento Portland nas propriedades mecânicas, hidráulicas e na espessura da pasta cimentícia. Considerando as explanações dos resultados expostas em cada item analisado neste estudo, apresenta-se, nos parágrafos seguintes, uma síntese das contribuições obtidas.

Para que a consistência final das misturas de concreto permeável seja controlada, é necessário o controle da consistência da pasta cimentícia. É notório que a consistência do concreto permeável é dependente também, dentre outras variáveis, do método de compactação. O método proposto para determinação da consistência da pasta se mostrou eficaz, uma vez que foi comprovado pelo ensaio do *squeeze flow* que todas as pastas de substituições obedecem a um comportamento reológico similar quando solicitadas a um esforço de até 200 N com o deslocamento de massa de aproximadamente 5 mm. Assim, esse procedimento se apresenta com uma possível solução às misturas muito fluidas, as quais podem apresentar precipitação das pastas nos poros e prejudicar a obtenção da propriedade desejada. Bem como as misturas de consistência seca, as quais necessitam de maiores quantidades de golpes para atingir a densidade adequada. Portanto, o controle da relação água/material cimentício, a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim nos teores adotados mostraram-se eficientes, exercendo uma influência significativa na consistência da pasta cimentícia utilizada no concreto permeável.

Nesta pesquisa, os resultados encontrados para a espessura de pasta apresentaram relações significativas, quando comparados às propriedades mecânicas de resistência à compressão axial (coeficiente de determinação entre a espessura de pasta e a resistência à compressão axial foi de 79,45%) e o coeficiente de determinação entre a espessura de pasta e a resistência à degradação por impacto e por abrasão foi de 93,12%. Já quando comparados os resultados da espessura de pasta com a resistência à tração na compressão diametral e com o coeficiente de permeabilidade, não apresentaram relações significativas. Este fato pode possivelmente ser atribuído à fixação do teor de pasta, que propiciou à pasta um comportamento reológico similar para todas as substituições realizadas e a uniforme distribuição da densidade de pasta ao

longo de cada camada avaliada. Esses aspectos colaboram para uma baixa variação na espessura de pasta nas seções analisadas.

Os resultados comprovam a melhora ocorrida no concreto permeável, quando se compara a mistura referência à mistura com substituição parcial do cimento por metacaulim no percentual de 5%, para a resistência à compressão axial no valor de 18,09 MPa (aumento de 7,36%), para resistência à tração por compressão diametral de 2,73 MPa (aumento de 5,00%) e para a resistência à degradação por impacto e por abrasão no percentual de 56,18% (aumento de 4,74%), além do valor do coeficiente de permeabilidade 0,00507 m/s (aumento de 58,93%). Enquanto que, ao comparar a mistura referência à mistura com percentual de 10% de substituição do cimento Portland por metacaulim, observou-se uma piora na maioria das propriedades e o teor de 15% se mostrou inviável. Portanto, a substituição parcial do cimento Portland por metacaulim na proporção de 5% influenciou positivamente as propriedades mecânicas do concreto permeável e a espessura de pasta aderida ao agregado graúdo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste item, serão apresentadas algumas sugestões para subsidiar futuras pesquisas e estudos complementares sobre o tema:

- a) desenvolvimento de um protótipo de corpo de prova, similar ao utilizado nos ensaios de CBR (com devidas adaptações), apropriado a simular em laboratório as condições de campo na prática de execução do pavimento utilizando concreto permeável moldado *in loco*;
- b) desenvolvimento de um método de dosagem nacional para o concreto permeável com o volume de pasta constante;
- c) desenvolvimento de uma metodologia para determinação das áreas de pasta, de agregado e de poros por camadas predeterminadas;
- d) estudo comparativo das resistências mecânicas do concreto permeável com dosagem padrão, utilizando todos tipos de cimento utilizados na confecção de concreto e fabricados no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ALIABDO, A. A.; ABD ELMOATY, A. E. M.; FAWZY, A. M. Experimental investigation on permeability indices and strength of modified pervious concrete with recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 193, p. 105-127, 2018. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182.
- ALVES, P. B. **Concreto permeável para pavimentação urbana com uso de resíduos de construção e demolição produzidos na usina de reciclagem de São José do Rio Preto**. 2016. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade UNESP, Ilha Solteira, 2016.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-06**: pervious concrete. Farmington Hills, MI: Technical Documents, 2006.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 522. **ACI report on pervious concrete**. Farmington Hills, MI: ACI, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1688-14**: standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete Farmington Hills, MI: ACI, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1747-13**: standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion. Farmington Hills, MI: ACI, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1754-12**: standard Test method for density and void content of hardened pervious concrete. Farmington Hills, MI: ACI, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C192-19**: standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. Farmington Hills, MI: ACI, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C494-19**: standard specification for chemical admixtures for concrete. Farmington Hills, MI: ACI, 2019.
- ANDRADE, D. da S., SILVA, A. C., M., SANTA BÁRBARA, L. de S. Concreto permeável com adições minerais altamete reativas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 2, n. 5, p. 1549-1568, 2019.
- ANDRADE, L. B. de. **Análise das propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido utilizando resíduo de caulim**. 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.
- AQUINO, Samuel Medeiros de *et al.* Estudo do uso do resíduo de caulim nas propriedades de concreto permeável (POROSO). *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO DO IFPB, 3., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa, 2019. p. 1-11.

ARAÚJO, G. G.; PRISZKULNIK, S. Concreto permeável para pavimentação. *In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 13, 2017; *MOSTRA DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA*, 7, 2017. **Anais [...]**. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12142**: concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13280**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13292**: solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15839**: argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16416**: pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16541**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16889**: concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16917**: agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972**: agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16974**: agregado graúdo - Ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17054**: agregado graúdo - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222**: concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7809**: agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9833**: concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

AZERÊDO, A. F. N. de. **Estudo do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. 2012. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

AZZOUT, Y. *et. al.* Techniques alternatives emassainissement pluvial. Paris: Technique et Documentation - **Lavoisier**, [S. l.], p. 372 ,1994.

BAIRAGI, N. K.; VIDYADHARA, H. S.; RAVANDE, K. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 188–193, 1990.

BALDUSCO, R.; NOBRE, T. R. S.; ÂNGULO, S. C.; QUARCIONI, V. A. Reatividade e resistência mecânica de pastas reidratadas de cimento de alto forno. *In*: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, 5., 2017, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza, 2017.

BARBOSA, M. P.; PEREIRA, K. K. Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil na região de Campinas. *In*: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 20., 2015, Campinas; Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 5., 2015, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: PUC Campinas, 2015.

BATEZINI, R. **Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) -- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2019.

BATEZINI, R. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013.

BATEZINI, R. *et al.* Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 177-194, jun. 2021.

BATEZINI, R.; BALBO, J. T. Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete. **IBRACON Structures and Materials Journal**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 248–259, 2015.

BAUER, A. L. *et al.* Evaluation of the impact of two types of steel fibers (SE), mono and 3D, on concrete properties, when added isolated or blended. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 464-482, jun. 2020.

BECHARA, L. A. da C. **Concreto poroso como revestimento de pavimento permeável**: alternativa de drenagem urbana não estrutural à Região Metropolitana de Belém. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

BETIOLI, A. M. *et al.* Rheological characterization of cement paste: association of complementary techniques. **Ambiente Construído**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 37-48, 2009.

BEZERRA, D. de P. **Propriedades de concreto permeável contendo resíduo de caulim**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2023.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 31, p. 67-73, 2012.

BIZÃO, Á. H. N. **Concreto permeável com agregado reciclado**: otimização de traço com análise multiparamétrica. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Instituto Federal Goiano (IFGO), Rio Verde, 2021.

BONICELLI, A.; ARGUELLERS, G. M.; PUMAREJO, L. G. F. Improving Pervious Concrete Pavements for Achieving More Sustainable Urban Roads. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 161, p. 1568-1573, 2016.

CANDIAN FILHO, E. L. *et al.* Concreto permeável com areia descartada de fundição: propriedades mecânicas e hidráulicas. **Revista Matéria**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 1-14, 12 ago. 2021. doi.org/10.1590/S1517 707620220001.1354

CARDOSO, F. A., PILEGGI, R.G., JOHN, V.M. Caracterização reológica de argamassas através do método de squeeze-flow. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 6, 2005. Florianópolis. **Anais [...]**, Florianópolis: ANTAC, 2005. p 121-143.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete : A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 123, p. 627–637, 2016a

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, X.; ZHOU, W. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 42, p. 97–104, 2013.

ĆOSIC, K. *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 78, p. 69-76, 2015.

COSTA, F. B. P. **Análise e desenvolvimento misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2019.

COSTA, F. B. P. *et al.* Pervious concrete for desired porosity: influence of w/c ration and a rheology-modifying admixture. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 268, 121084, 2021.

DAMINELI, B. L. *et al.* **CIB 2013 World Congress Mitigating CO2 emissions from the cement industry**: potencial of feasibility versus the Market challenge. Brirbaine, Australia, 2013.

DELATTE, N. J.; CLEARY, J. Developing a structural design method for pervious concrete pavement. **Proceedings, National Stone, Sand and Gravel Association**. [S. l.], 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **DNIT 064**: pavimento rígido - Determinação da consistência do concreto pelo consistômetro VeBe - Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2004.

FARIA, A. da C. de; SANTANA, J. G.; BARBOSA, J. M.; DONATO, M. Draining concrete floor: study of granulometry that favors drainage and minimum affects strength. *In*: CONGRESS OF RESEARCH AND TEACHING IN TRANSPORT OF ANPET, 33., Balneário Camboriú, SC, 2019. **Anais [...]**. Balneário Camboriú, SC, 2019.

FERNANDES, W. E. H. **Concreto permeável para aplicação em pavimentação intertravada a partir de concreto de pós reativos - CPR**. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, 2019.

FONSECA, E. A. **Avaliação do desempenho de concreto permeável com o uso de fibras**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -- Universidade Católica de Brasília (UCB), Brasília, DF, 2016.

FU, L. B.; ZHANG, Y. Experimental study on mechanical properties of pervious concrete. **Applied Mechanics and Materials**, [S. l.], v. 174-177, p. 999-1002, 2002.

FU, T. F.; YEIH, W.; CHANG, J. J.; HUANG, R. The influence of aggregate size and bindermaterial on the properties of pervious concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, 21 Oct. 2014.

FULLER, W. B.; THOMPSON, S. E. **The laws of proportioning concrete**. New York: Amekioan S., 1907.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 52, p. 494-503, 2014.

GENTIL, F. S. **Estudo de parâmetros que influenciam as propriedades de concretos permeáveis com agregados reciclados**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2020.

GENTIL, F. S.; KAZMIERCZAK, C. S.; SENTENA, J. A. A. La influencia de la trabajabilidad y adherencia de la pasta en el concreto permeable producido con agregado de concreto reciclado. *In*: CONGRESO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA VIÁRIA, 2019, Popayán, COL. **Anais [...]**. Popayán, COL: Universidad del Cauca, 2019.

GHAFOORI, N.; DUTTA, S. Laboratory investigation of compacted no-fines concrete for paving materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 183-191, 2002.

GIRARDI, R; FINOCCHIARO, P. S. Concreto permeável produzido com agregado reciclado. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, [S. l.], v. 5, p. 19-26, 2017.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 111, p. 502-512, 2016.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, 2009.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; KAREEM, Q.; IPEK, S. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures**, [S. l.], v. 49, p. 521-536, 2016.

HARBER, P. J. **Applicability of no-fines concrete as a road pavement a dissertation submitted by**. 2005. 232 f. Dissertation (Bachelor of Engineering (Civi) -- Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, AUS, 2005.

HARIYADI; TAMAI, H. Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the pumice aggregate. **Procedia Engineering**, [S. l.], v. 125, p. 732-738, 2015.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 53, p. 680-691, 2014.

HOPPE FILHO, J.; CARDOSO, F. A.; CINCOTTO, M. A. Técnicas de caracterização reológica de argamassas. **Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil**, Porto Alegre, v. 3, p. 103-120, 2006.

HUANG, B; WU, H.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer- modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, p. 818-23, 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**, [S. l.], v. 50, p. 524-529, 2014.

JIMMA, B. E.; RANGARAJU, P. R. Chemical admixtures dose optimization in pervious concrete paste selection – A statistical approach. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 101, p. 1047-1058, 2015.

JIMMA, B. E.; RANGARAJU, P. R. Film-forming ability of flowable cement pastes and its application in mixture proportioning of pervious concrete. **Computers and Chemical Engineering**, [S. l.], v. 71, p. 273-282, 2014.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste – a miniature slump test. **Cement Concrete and Aggregates**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 95-102, Winter 1980.

KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R. Clogging in permeable concrete : a review. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 193, p. 221–233, 2017.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Applied Acoustics**, [S. l.], v. 71, n. 7, p. 607-615, 2010.

KOLENDA, F. *et al.* Identification of rheological parameters by the squeezing test. **Powder Technology**, [S. l.], v. 130, n. 1, p. 56- 62, fev. 2003.

KRISHNA, M.; ZHUGE, Y.; KARUNASENA, W. Clogging mechanism of permeable concrete: a review. **Concrete 2013**: understanding concrete conference, [S. l.], n. 1, p. 16-18, 2013.

KRUG, L. F. **Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz**: estudo como adição pozolânica em concreto. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS), Porto Alegre, 2014.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v. 34, n. 11, p. 1975-1980, nov. 2004.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhance permeable concrete: an experimental investigation. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 24, p. 2664-2671, 2010.

MAHBOUB, K. C., CANLER, J., RATHBONE, R., ROBI, T., DAVIS, B., ROBL, T. Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. **ACI Mater J.**, [S. l.], v.106, p. 523-528, 2009.

MARIANO, H. R. **Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis**. 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás (UFGO), Goiânia, 2014.

MARTINS FILHO, S. T. et al. Characterization of pervious concrete focusing on nondestructive testing. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 483-500, 2020.

MEDDAH, M. S.; AL-JABRI, K.; HAGO, A. W.; AL-HINAI, A. S. Effect of granular fraction combinations on pervious concrete performance. **Materials today: Proceedings**, [S. l.], v. 4, p. 9700-9704, 2017.

MEETEN, G. H. Squeeze flow of soft solids between rough surfaces. **Rheologica Acta**, Berlim, v. 43, n. 1, p. 6 - 16, fev. 2004.

MIKAMI, R. J. **Dosagem e otimização de misturas de concreto permeável por controle de porosidade pelo método do grau de compactação**. 2022. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais - Área de Concentração: Desenvolvimento e Caracterização de Materiais) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2022.

MOHAMMED, B. S. *et al.* Case studies in construction materials properties of nano-silica modi fi ed pervious concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 8, p. 409–422, 2018.

MONTEIRO, Anna Carolina Neves. **Concreto poroso: dosagem e desempenho**. 2010. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) -- Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Góias, Goiânia, 2010.

NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, [S. l.], v. 61, p. 802-813, 2010.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 73, p. 271- 282, 2014.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis produzidos com agregado reciclado de concretol**. 2017. 108 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) -- Curso de Pós-

graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), Campinas, 2017.

PHAN, T. H.; CHAOUICHE, M.; MORANVILLE, M. Squeeze flow of self-compacting cement pastes. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE THROUGH SCIENCE AND ENGINEERING*, 2., 2006, Quebec. **Anais [...]**. Quebec: RILEM, 2006.

PILS, S. E. *et al.* Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 101-121, fev. 2019. FapUNIFESP 41952019000100009.

PUTMAN, B. J.; NEPTUNE, A. I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 25, p. 3480-3485, 2011.

RANGELOV, M.; NASSIRI, S.; HASELBACH, L.; ENGLUND, K. Using carbon fibers composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 126, p. 875-885, 2016.

RIBEIRO, A. **Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Curso de Engenharia Civil, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

RIZVI, R., TIGHE, S., HENDERSON, V., NORRIS, J. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement. **Transportation Research Record**, [S. l.], p. 132-140, 2010.

SANDOVAL, G. F. B. *et al.* Pervious concrete made with electric furnace slag (FEA): mechanical and hydraulic properties. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 1-9, jun. 2019.

SANTOS, F. N. *et al.* Estudo reológico da pasta de cimento com metacaulim e / ou carga de calcário utilizando o Projeto de Mistura de Experimentos. **Materiais de Construção e Construção**, [S. l.], v. 143, p. 92–103, 2017.

SCHACKOW, A. *et al.* Permeable concrete plates with wastes from the paper industry: reduction of surface flow and possible applications. **Construction And Building Materials**, [S. l.], v. 250, p. 118896, jul. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118896>.

SCHWETZ, P. F. *et al.* Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve. *In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DA PATOLOGIA DA CONSTRUÇÃO*, 13., Lisboa, 2015. **Anais [...]**. Lisboa, 2015.

SILVA, L. S. *et al.* Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. **RCT-Revista de Ciência e Tecnologia**, [S. l.], v. 5, n. 8, 2019.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. Estudo da influência dos agregados de concreto reciclado em concretos permeáveis. **Revista IBRACON Estruturas Materiais**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016.

TEIXEIRA, M. da C. **Estudo da colmatação em concretos permeáveis para tráfego leve e de pedestres**. 2020. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará (UFPA), Tucuruí, PA, 2020.

TENNIS, P. D.; LEMING, M. L.; AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements. Technical report, EB302.02**. Skokie, Illinois: Portland Cement Association: Silver Spring, Maryland, National Ready Mixed Concrete Association, 2004.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 95, p. 850–859, 2015.

TRINDADE, A. L. B.; LOPES, P. H. F. **Caracterização de concreto para pavimento permeável baseado em materiais de construção reciclados**. Relatório técnico do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, 2018.

VERIAN, K. P.; ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation & Recycling**, [S. l.], v. 133, p. 30-49, 2018.

VIDAL, A. S. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal do Rio de Janeiro, (UFRJ), Rio de Janeiro, 2014.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Concreto permeável [imagem]**. São Paulo: Votorantim, 2020. Disponível em: Votorantimcimentos.com.br/produtos/concreto. Acesso em: 21 mar. 2020.

WU, H. *et al.* Laboratory evaluation of abrasion resistance of portland cement pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S. l.], v. 27, n. September, p. 1239-1247, 2002.

XIE, X. *et al.* Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 168, p. 732–746, 2018.

XU, C. *et al.* Application of recycled concrete aggregates and crushed bricks on permeable concrete road base. **Road Materials and Pavement Design**, [S. l.], v. 22, n. 10, p. 2181-2196, 2021. doi.org/10.1080/14680629.2020.1742193.

YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 62, p. 38–46, 2014.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, [S. l.], v.33, p.381-386, 2003.

YAP, S. P. *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 181, p. 155–165, 2018.

YU, F.; SUN, D.; WANG, J.; HU, M. Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 209, p. 463-475, 2019.

ZAETANG, Y.; WONGSA, A.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Use of lightweight aggregates in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], n. 48, 585–591, 2013.

ZHANG, Yi *et al.* Effects of specimen shape and size on the permeability and mechanical properties of porous concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 266, p. 121074, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121074>

ZHAO, Jinhui *et al.* Novel Backwashing maintenance method for permeable concrete pavement: two-Year field study. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [S. l.], v. 146, n. 4, p. 04020003, 2020. Doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001456.

ZHENG, M., CHEN, S. WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete. **International Journal of Pavement Research Technology**, [S. l.], v. 5, p.102-7, 2012.

ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 98, p. 51–60, 2015.

APÊNDICE A - DADOS EXPERIMENTAIS

PASTA CIMENTÍCIA – 28 DIAS

CP	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)				DENSIDADE (kg/m³) ENDURECIDO			
	REF	5%	10%	15%	REF	5%	10%	15%
01	67,22	38,62	32,80	46,14	1.817,02	1.776,32	1.756,15	1.703,20
02	42,77	28,35	37,60	54,79	1.801,42	1.787,66	1.775,51	1.701,95
03	44,10	40,71	17,89	34,23	1.816,17	1.781,49	1.738,00	1.710,96
04	50,72	48,66	40,28	29,39	1.828,47	1.777,05	1.739,05	1.711,09
05	26,88	33,78	36,47	21,60	1.801,58	1.778,91	1.746,01	1.680,27
06	22,91	19,73	27,39	32,86	1.821,10	1.778,11	1.738,93	1.677,20
07	54,89	36,86	29,67	28,84	1.824,70	1.781,52	1.423,58	1.718,32
08	35,95	48,32	42,40	36,84	1.813,15	1.787,05	1.735,41	1.713,50
09	55,69	38,49	32,09	20,51	1.821,87	1.772,17	1.725,63	1.689,22
10	43,68	21,97	28,05	25,18	1.830,58	1.760,31	1.708,31	1.698,56

CONCRETO PERMEÁVEL – 28 DIAS

CP	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (MPa)				RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)			
	REF	5%	10%	15%	REF	5%	10%	15%
01	15,37	17,46	12,58	24,19	2,75	2,95	3,26	1,70
02	14,79	16,48	-	20,84	2,87	2,97	2,77	1,98
03	18,92	17,35	14,32	12,54	2,45	2,89	2,30	2,28
04	13,84	19,39	11,08	16,20	2,68	2,53	2,11	1,65
05	19,16	22,23	14,63	13,76	3,01	2,59	3,05	2,19
06	15,11	14,71	12,94	12,88	2,50	2,51	2,39	1,90
07	23,52	18,02	15,96	13,16	2,06	2,58	2,39	2,91
08	14,11	19,10	14,95	14,31	2,49	2,83	2,76	2,87

CP	DENSIDADE (kg/m³) ENDURECIDO				ÍNDICE DE VAZIOS (%) ENDURECIDO			
	REF	5%	10%	15%	REF	5%	10%	15%
01	1.999,43	1.964,99	2.037,72	1.988,19	28,59	29,27	25,10	27,36
02	1.946,99	1.984,16	1.986,76	1.940,02	30,55	28,40	28,17	29,40
03	2.023,77	2.021,98	1.957,92	1.908,88	26,61	26,82	29,03	30,72
04	2.037,38	2.005,30	1.946,78	1.924,06	26,45	27,67	29,83	29,88
05	2.082,85	1.992,55	1.995,28	1.952,97	23,23	27,82	27,94	29,11

CP	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE (m/s)			
	REF	5%	10%	15%
01	0,00349	0,00454	0,00223	0,00167
02	0,00479	0,00560	0,00493	0,00443
03	0,00227	0,00477	0,00516	0,00318
04	0,00321	0,00488	0,00377	0,00332
05	0,00220	0,00556	0,00480	0,00151

CORPO DE PROVA 01 - CORTE TRANSVERSAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	REF			5%		
	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC
01	0,71	1,13	0,79	0,63	0,46	0,60
02	1,00	0,82	0,79	0,73	0,51	0,87
03	0,76	0,67	1,23	0,61	0,43	0,61
04	1,00	0,83	0,66	0,46	0,43	0,43
05	0,93	0,71	0,69	0,46	0,39	0,68
06	0,86	0,78	0,93	0,80	0,46	0,65
07	0,79	0,62	0,49	0,52	0,38	0,50
08	0,95	0,77	1,02	0,61	0,66	0,66
09	1,10	0,46	1,25	0,43	0,57	0,44
10	0,55	1,12	0,66	0,65	0,73	0,51
11	0,76	0,63	0,68	0,62	0,66	0,75
12	1,00	0,36	1,33	0,49	0,62	0,70
13	0,95	0,67	0,96	0,49	0,70	0,53
14	0,88	1,27	1,24	0,46	0,65	0,41
15	0,71	1,17	1,15	0,46	0,65	0,84
16	1,10	1,21	0,94	0,40	0,66	0,58
17	1,31	1,17	0,65	0,59	0,52	0,90
18	0,60	0,47	1,40	0,65	0,78	0,59
19	0,71	1,15	1,12	0,46	0,77	0,71
20	1,33	0,63	0,85	0,68	0,73	0,73
21	0,77	1,02	1,04	0,76	0,57	1,03
22	0,82	0,93	0,65	0,58	0,96	0,57
23	1,14	1,09	0,60	0,50	0,38	0,61
24	0,88	1,03	1,00	0,61	0,58	0,50
25	1,46	0,62	1,04	0,36	0,68	0,73
26	0,69	1,65	1,01	0,61	0,38	0,65
27	0,44	1,09	1,24	0,35	0,73	0,51
28	1,04	1,09	0,90	0,70	0,73	0,63
29	0,66	0,62	0,81	0,70	0,49	0,64
30	0,63	0,71	0,62	0,43	0,73	0,58
31	0,78	0,65	0,97	0,78	0,56	0,76
32	0,73	0,77	0,85	0,53	0,67	0,90
33	0,50	1,20	0,46	0,58	0,87	0,74
34	0,21	1,07	1,08	0,48	0,48	0,54
35	1,05	0,76	0,73	0,73	0,60	1,07
36	0,62	0,34	0,77	0,65	0,43	0,61
37	0,50	0,49	1,19	0,45	0,63	0,51
38	0,65	1,05	1,10	0,66	0,66	0,62
39	0,97	0,64	0,90	0,54	0,59	0,58
40	1,01	1,06	0,99	0,68	0,55	0,67
41	0,95	0,82	0,65	0,69	0,55	0,71
42	0,73	0,77	0,78	0,33	0,68	0,99
43	0,61	0,59	0,95	0,49	0,44	0,43
44	1,43	1,31	0,86	0,54	0,84	0,64

45	0,67	1,41	1,02	0,38	0,75	0,74
46	0,35	2,15	0,69	0,51	0,78	0,79
47	0,52	1,65	1,04	0,50	0,61	0,42
48	0,89	0,68	0,55	0,53	0,61	0,61
49	0,57	1,73	0,63	0,53	0,57	0,58
50	0,85	0,54	1,08	0,61	0,83	0,47

CORPO DE PROVA 01 - CORTE TRANSVERSAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	10%			15%		
	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC
01	0,76	0,73	0,77	0,91	0,66	1,21
02	0,99	0,85	0,61	0,78	1,03	1,02
03	0,61	0,80	0,80	1,02	0,70	1,00
04	0,74	1,14	0,82	0,65	0,73	0,87
05	0,85	0,80	0,74	0,55	0,75	0,62
06	0,70	0,59	0,79	0,43	0,52	0,73
07	0,65	0,54	0,57	1,02	0,74	1,21
08	0,65	0,76	0,54	0,39	0,46	0,85
09	0,38	0,54	0,57	0,66	0,83	1,07
10	0,92	0,88	1,42	0,66	0,65	0,80
11	0,91	0,95	0,88	0,46	0,58	0,91
12	0,84	1,19	0,76	0,80	0,80	0,75
13	1,21	0,94	1,05	1,37	0,80	0,77
14	0,76	0,82	0,84	0,81	0,56	0,65
15	0,80	0,76	0,67	0,81	0,45	1,00
16	0,75	0,72	1,12	0,65	0,74	1,70
17	0,70	0,73	0,62	0,65	0,78	1,04
18	0,76	1,26	0,68	1,22	0,97	0,87
19	1,00	1,33	0,74	0,87	0,92	0,59
20	0,62	0,89	1,24	0,78	0,53	0,78
21	0,65	0,38	1,10	0,61	0,95	0,73
22	0,78	0,57	0,88	0,52	0,58	0,95
23	1,50	0,78	0,57	0,51	0,88	0,62
24	0,62	1,24	0,68	0,53	0,53	0,79
25	0,97	0,69	0,77	0,34	0,68	1,00
26	1,30	1,06	0,85	0,65	0,62	0,96
27	0,43	1,04	0,77	0,66	0,76	0,73
28	0,42	0,87	0,84	1,30	1,12	0,80
29	0,66	0,95	0,92	1,03	0,85	1,24
30	1,00	0,51	0,54	0,71	1,02	0,53
31	0,60	0,65	0,92	0,66	0,78	0,80
32	0,89	0,88	0,58	1,15	0,90	1,06
33	0,57	0,69	0,61	0,91	1,27	1,23
34	0,61	0,52	1,09	0,80	0,99	0,65
35	0,80	0,50	0,78	0,70	0,84	0,82
36	0,77	0,76	0,65	0,74	0,55	0,75
37	0,68	0,84	0,82	0,79	1,12	1,18
38	0,89	0,87	0,60	0,67	1,04	0,77
39	0,69	0,99	0,98	0,84	0,57	1,02
40	1,02	0,59	0,53	0,85	1,06	0,81
41	0,71	0,61	0,57	0,72	0,87	0,66
42	0,62	0,49	0,73	0,90	0,91	0,85
43	1,14	0,76	0,65	1,30	0,57	0,86
44	0,72	0,43	0,64	0,73	0,78	0,89
45	1,04	0,77	0,71	0,73	0,57	0,94
46	0,40	0,95	0,66	0,89	0,79	0,65
47	1,39	0,76	0,67	0,82	0,85	0,46
48	0,51	0,70	1,26	0,90	0,63	0,91

49	0,66	0,83	0,49	0,77	0,73	0,71
50	0,49	0,57	1,14	0,82	1,50	1,06

CORPO DE PROVA 02 - CORTE TRANSVERSAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	REF			5%		
	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC
01	0,89	0,55	0,82	0,85	0,69	0,65
02	0,50	0,77	0,82	0,63	0,43	0,89
03	0,53	0,55	0,69	0,61	0,46	0,35
04	0,66	0,83	0,58	1,00	0,46	0,77
05	0,39	0,33	0,93	0,98	0,65	0,63
06	0,69	0,80	0,63	0,53	0,80	0,65
07	0,63	0,63	0,58	0,50	0,81	0,57
08	0,57	0,31	1,06	0,71	0,74	0,65
09	0,66	0,89	0,84	0,31	0,56	0,67
10	0,49	0,64	0,70	0,68	0,74	0,53
11	0,88	0,68	0,79	0,59	0,66	0,60
12	0,33	0,51	0,90	0,42	0,54	0,66
13	0,52	0,50	0,75	0,71	0,52	0,49
14	0,73	0,52	0,59	0,46	0,58	0,65
15	0,50	0,69	0,51	0,83	0,61	0,54
16	0,41	0,44	0,89	0,83	0,59	1,07
17	0,55	0,56	0,55	0,93	1,16	0,77
18	0,99	0,61	0,67	0,96	0,73	0,78
19	1,24	0,54	0,63	0,87	0,69	0,70
20	0,63	0,63	0,54	0,58	0,39	0,68
21	0,40	0,63	0,64	0,38	0,59	0,70
22	0,56	0,58	0,78	0,61	0,76	0,27
23	0,68	0,89	0,83	0,73	0,77	0,91
24	0,43	0,69	0,84	0,62	0,85	0,78
25	0,67	1,16	0,80	0,96	0,84	0,60
26	0,47	0,59	0,67	0,79	0,51	1,39
27	0,89	0,61	0,64	0,48	1,31	0,87
28	0,47	0,63	0,59	0,69	0,51	0,55
29	0,43	0,63	1,07	0,57	0,46	0,61
30	0,46	0,35	0,74	0,61	0,60	0,82
31	0,38	0,36	0,84	1,22	0,51	0,63
32	0,50	0,43	0,55	0,80	0,61	0,61
33	0,45	0,44	0,48	0,56	0,78	0,89
34	0,61	0,53	0,71	0,55	0,67	0,57
35	0,40	0,39	0,80	0,77	0,50	0,38
36	0,42	0,67	0,47	0,57	1,14	0,82
37	0,65	0,63	0,57	0,76	0,70	0,57
38	0,73	0,44	0,79	0,82	0,79	0,51
39	0,64	0,90	0,64	0,76	0,40	0,62
40	0,96	0,39	0,61	0,51	0,65	0,78
41	0,54	1,20	0,39	0,77	1,25	1,25
42	0,38	0,62	0,52	0,51	0,89	0,70
43	0,65	0,51	0,51	1,02	0,60	0,91
44	0,47	0,66	0,52	0,80	0,83	1,27
45	0,50	0,62	0,63	0,31	0,72	0,53
46	0,44	0,66	0,69	0,90	0,46	0,74
47	0,57	0,50	0,53	0,40	0,70	0,42
48	0,66	0,82	0,99	0,72	0,61	0,62
49	0,64	0,75	0,58	1,07	0,82	0,46
50	0,64	0,48	0,66	0,42	1,00	0,58

CORPO DE PROVA 02 - CORTE TRANSVERSAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	10%			15%		
	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC	SEÇÃO AA	SEÇÃO BB	SEÇÃO CC
01	0,92	0,61	0,79	0,78	1,13	0,83
02	0,73	1,09	0,95	0,97	0,53	0,92
03	0,62	1,15	1,34	1,25	0,89	0,54
04	0,61	0,52	0,98	0,95	0,72	0,57
05	0,77	0,69	0,65	0,58	0,74	0,98
06	0,67	0,79	0,46	0,41	0,54	0,36
07	0,66	1,00	0,98	0,52	0,65	0,42
08	1,24	1,02	0,50	0,55	0,77	0,56
09	0,62	0,87	1,11	0,97	0,82	0,68
10	0,67	0,87	0,65	0,43	0,84	0,83
11	1,32	0,79	0,90	0,52	0,49	0,69
12	0,76	0,72	1,06	0,63	1,11	0,69
13	0,87	0,65	0,95	0,70	0,67	0,78
14	0,77	0,40	0,81	1,31	0,83	0,82
15	0,48	0,65	1,07	0,34	0,55	0,65
16	0,86	0,57	1,13	1,01	1,11	0,95
17	0,72	0,58	0,57	0,69	0,78	0,91
18	0,51	0,74	1,12	0,67	0,74	0,76
19	1,15	0,75	0,54	1,05	0,67	0,81
20	0,57	0,56	0,68	0,58	0,84	0,91
21	0,85	0,92	0,92	0,51	0,78	0,75
22	0,71	0,69	0,69	0,54	1,32	0,83
23	0,77	0,70	0,57	0,61	0,77	0,89
24	1,06	0,73	0,89	0,50	0,73	0,95
25	0,69	0,81	0,51	0,50	0,89	0,89
26	0,87	0,79	1,05	0,65	0,66	0,82
27	1,05	0,80	1,02	0,70	0,89	0,86
28	1,18	0,58	1,35	0,57	0,69	0,95
29	0,87	0,66	0,57	0,63	0,65	0,85
30	1,09	1,07	0,83	0,70	0,63	0,68
31	0,57	0,88	0,72	0,59	0,77	0,82
32	0,69	0,78	0,76	0,57	0,69	1,11
33	0,80	1,52	1,37	0,56	0,62	0,36
34	1,25	1,51	0,89	0,89	1,04	1,02
35	0,73	1,36	0,82	0,61	0,72	1,27
36	1,02	1,26	0,85	0,46	0,58	0,78

37	0,76	0,86	1,02	0,38	0,59	1,08
38	0,81	0,80	0,72	1,30	0,76	1,00
39	1,03	0,93	0,66	1,00	0,78	1,04
40	0,89	0,56	1,49	0,81	1,16	1,00
41	0,65	0,41	1,20	0,75	0,75	1,02
42	0,72	1,33	0,87	0,70	0,97	0,73
43	0,76	1,13	1,31	0,76	0,82	0,86
44	1,55	0,70	0,71	0,88	0,91	0,99
45	0,79	0,79	0,66	0,70	0,65	1,21
46	0,60	0,46	0,97	0,86	0,54	0,76
47	0,69	0,80	0,78	0,81	0,67	0,78
48	0,76	0,99	1,05	0,73	0,55	0,73
49	1,14	1,11	0,65	0,90	0,71	0,66
50	0,65	0,89	0,68	0,75	0,54	0,58

RESUMO ESPESSURA MÉDIA DE PASTA_SEÇÃO TRANSVERSAL

DIREÇÃO	CP	CORTE	REFERÊNCIA	5% MET	10% MET	15% MET
CORTE TRANSVERSAL	CP 01	CC	0,90	0,65	0,78	0,88
		BB	0,92	0,61	0,79	0,79
		AA	0,82	0,56	0,78	0,78
	CP 02	CC	0,69	0,69	0,88	0,82
		BB	0,61	0,69	0,84	0,77
		AA	0,59	0,69	0,83	0,72
MÉDIA		CC	0,80	0,67	0,83	0,85
		BB	0,77	0,65	0,82	0,78
		AA	0,71	0,63	0,81	0,75
GERAL			0,76	0,65	0,82	0,79

CORPO DE PROVA 03 - CORTE LONGITUDINAL - 03 CAMADAS

MEDIDAS	REF			5%		
	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF
01	0,74	0,31	0,88	0,81	0,70	0,62
02	0,65	0,40	0,39	0,88	0,46	0,58
03	0,28	0,42	0,49	1,02	0,91	0,65
04	0,20	0,55	0,66	0,78	0,53	0,57
05	0,56	0,71	0,61	0,48	0,57	0,58
06	0,36	0,89	0,50	1,37	0,55	0,61
07	0,41	0,34	0,64	0,89	0,34	0,46
08	0,51	0,74	0,77	0,41	0,52	0,54
09	0,47	0,47	0,37	0,73	0,61	0,35
10	0,50	0,54	0,46	0,90	0,58	0,43
11	0,73	0,86	0,34	0,78	0,62	0,54
12	0,43	0,30	0,42	0,32	0,50	0,59
13	0,43	0,39	0,55	0,46	0,80	0,74
14	0,46	0,78	0,73	0,75	0,99	0,38
15	0,65	0,33	0,51	0,69	0,72	0,46
16	0,49	0,42	0,68	0,34	0,46	0,32
17	0,41	0,45	0,55	0,61	0,53	0,48

18	0,50	0,55	0,50	0,67	0,46	0,61
19	0,62	0,51	0,96	0,81	0,70	0,65
20	0,42	0,42	0,41	0,63	0,73	0,45
21	0,30	0,51	0,51	0,43	0,50	0,46
22	0,30	0,35	0,62	0,93	0,65	0,51
23	0,40	0,67	0,86	0,46	0,87	0,48
24	0,39	0,66	0,69	0,99	0,54	0,51
25	0,17	0,44	0,57	0,95	0,76	0,75
26	0,53	0,66	0,57	0,60	0,54	0,54
27	0,52	0,66	0,77	1,05	0,54	0,50
28	0,51	0,54	0,40	0,40	0,66	0,61
29	0,46	0,40	0,71	1,30	0,59	0,57
30	0,79	0,46	0,39	0,50	0,36	0,66
31	0,44	0,37	0,56	0,97	0,57	1,06
32	0,48	0,64	0,79	0,39	0,48	0,63
33	0,54	0,47	0,59	0,60	0,92	0,53
34	0,58	0,51	0,77	0,99	0,58	0,70
35	0,48	0,53	0,54	0,45	0,83	0,43
36	0,61	0,51	0,75	1,25	0,77	0,66
37	0,51	0,53	0,70	0,43	0,57	0,46
38	0,54	0,82	1,08	0,61	0,62	0,69
39	0,59	0,59	0,44	0,85	0,72	0,46
40	0,52	0,63	0,47	0,43	0,45	0,65
41	0,59	0,72	0,39	0,58	0,62	0,85
42	0,59	0,74	0,54	0,61	0,49	0,65
43	0,51	0,71	0,63	0,63	0,30	0,57
44	0,72	0,47	0,41	0,54	0,40	0,75
45	0,68	0,37	0,91	0,61	0,46	0,43
46	0,43	0,41	0,47	0,79	0,38	0,49
47	0,45	0,94	0,62	0,50	0,43	0,82
48	0,55	0,39	0,58	0,72	0,51	0,40
49	0,55	1,06	0,55	0,59	0,51	0,38
50	0,61	0,40	0,31	0,81	0,68	0,60

CORPO DE PROVA 03 - CORTE LONGITUDINAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	10%			15%		
	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF
01	0,49	0,70	0,69	0,71	0,55	0,72
02	0,63	0,80	0,78	0,76	0,38	0,38
03	0,70	1,02	0,83	0,65	0,63	0,81
04	0,79	1,07	0,61	0,65	0,60	0,69
05	1,40	0,57	1,12	0,97	0,51	0,57
06	1,02	0,55	0,80	0,98	0,58	0,57
07	0,57	0,61	0,63	1,14	0,71	0,83
08	1,43	0,60	0,55	0,63	0,83	0,68
09	1,88	0,62	0,75	0,61	0,70	0,51
10	0,71	0,52	0,86	0,98	0,58	0,91
11	0,65	0,83	1,09	0,66	0,61	0,73
12	0,54	0,73	0,87	0,66	1,04	0,82
13	0,86	1,16	1,09	0,46	0,99	0,76
14	0,65	0,54	0,57	0,71	0,46	0,81
15	0,74	0,76	0,81	0,93	0,75	0,76
16	0,70	0,82	0,72	0,89	0,87	0,62
17	0,81	0,71	1,10	0,68	0,76	0,72
18	0,65	0,97	1,44	0,50	0,65	1,15
19	0,68	0,76	0,52	0,69	0,55	0,62
20	0,90	0,60	1,92	0,41	0,70	0,78
21	0,90	0,71	0,54	0,65	0,68	1,20

22	0,56	0,77	0,46	0,87	0,85	1,22
23	0,68	0,80	0,87	0,46	0,75	0,75
24	0,51	0,70	0,54	0,65	1,16	0,93
25	0,74	1,09	1,00	1,03	0,76	0,50
26	0,49	0,46	0,81	0,39	0,65	0,61
27	0,46	0,70	0,60	0,83	0,94	0,92
28	0,75	0,33	0,61	1,10	1,10	0,75
29	0,30	0,84	0,73	0,84	0,98	0,55
30	0,75	0,67	0,96	0,63	0,68	0,54
31	1,00	1,10	0,76	0,97	1,00	0,56
32	0,81	1,18	0,84	0,65	1,11	0,87
33	0,80	1,10	1,04	0,67	0,76	0,54
34	0,87	0,79	1,13	0,66	0,71	0,67
35	0,66	0,95	0,81	0,50	0,66	0,54
36	0,80	0,95	1,31	0,89	0,91	0,57
37	0,66	1,02	0,84	0,53	1,32	0,41
38	0,57	1,02	0,76	0,38	0,66	0,65
39	0,70	0,96	0,69	0,65	0,78	0,51
40	0,70	0,73	0,62	0,56	0,53	0,73
41	0,65	0,80	1,05	0,72	0,74	0,66
42	1,16	0,79	0,65	0,73	0,75	0,57
43	0,63	0,56	0,81	0,63	0,68	0,63
44	0,49	0,63	0,49	0,71	0,89	0,75
45	0,62	0,66	0,94	0,75	0,62	0,53
46	0,78	0,73	0,82	0,78	0,61	0,87
47	0,68	0,50	1,54	0,95	0,65	0,75
48	0,76	0,46	0,57	0,60	0,93	0,70
49	1,07	0,73	1,11	0,58	0,92	0,82
50	0,94	0,89	0,70	0,62	0,61	0,55

CORPO DE PROVA 04 - CORTE LONGITUDINAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	REF			5%		
	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF
01	0,54	0,56	0,42	0,53	0,41	0,73
02	0,86	0,47	0,42	0,50	0,49	0,57
03	0,33	0,38	0,49	0,43	0,55	0,50
04	0,44	0,84	0,57	0,43	0,89	0,42
05	0,50	0,56	0,51	0,72	0,62	0,58
06	0,58	0,56	0,49	0,38	0,43	0,59
07	0,33	0,42	0,82	0,61	0,46	0,63
08	0,72	0,60	0,69	0,69	0,42	0,38
09	0,59	0,63	0,65	0,47	0,72	0,38
10	0,61	0,73	0,57	0,61	0,77	0,66
11	0,66	0,44	0,58	0,40	0,51	0,52
12	0,44	0,70	0,80	0,84	0,66	0,65
13	0,62	0,49	0,31	0,60	1,00	0,43
14	0,41	0,70	0,51	0,90	0,64	0,65
15	0,62	0,86	0,62	0,88	0,49	0,62
16	0,46	0,44	0,56	0,78	0,34	0,53
17	0,72	1,15	0,53	0,68	0,50	0,43
18	0,39	0,66	0,41	0,63	0,89	0,97
19	0,39	0,57	0,39	0,63	0,61	0,84
20	0,57	0,89	0,57	0,77	0,87	0,58
21	0,56	0,82	0,44	1,07	0,35	0,69
22	0,45	0,55	1,44	1,18	0,57	0,64
23	0,82	0,35	0,54	0,46	0,49	0,73
24	0,77	1,18	0,49	0,48	0,52	0,61

25	0,57	0,58	0,28	0,73	0,88	0,49
26	0,36	0,61	0,39	0,67	0,87	0,53
27	0,50	0,39	0,71	0,65	0,46	0,43
28	0,75	0,85	0,39	0,57	0,49	0,85
29	0,54	0,68	0,43	0,82	0,52	0,66
30	0,77	0,55	0,47	0,36	0,88	0,63
31	1,46	0,45	0,55	0,73	0,90	0,82
32	0,86	0,84	0,34	0,61	0,50	0,88
33	0,55	0,49	0,67	0,66	0,60	1,20
34	0,44	0,45	0,39	0,61	0,59	1,00
35	0,66	0,52	0,62	0,43	0,54	0,70
36	0,56	0,47	0,39	0,42	0,51	0,43
37	0,84	0,51	0,80	0,48	0,71	0,78
38	0,46	0,47	0,53	0,70	0,65	0,67
39	1,03	0,44	0,44	0,54	0,94	0,98
40	0,49	0,71	0,51	0,70	0,61	0,66
41	1,29	0,67	0,47	0,35	0,65	0,77
42	0,58	0,47	0,44	0,52	1,03	0,70
43	0,75	0,57	0,70	0,84	0,81	0,82
44	0,77	0,41	0,33	0,38	0,53	0,57
45	0,53	0,32	0,31	0,61	0,55	0,89
46	0,80	0,28	0,70	0,66	0,48	0,44
47	0,73	0,82	0,63	0,50	0,50	1,02
48	0,47	0,61	0,86	0,46	0,46	0,58
49	0,62	0,51	0,70	0,52	0,70	1,08
50	0,48	0,44	0,80	0,54	0,42	0,51

CORPO DE PROVA 04 - CORTE LONGITUDINAL - 03 CAMADAS						
MEDIDAS	10%			15%		
	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF	SEÇÃO SP	SEÇÃO ME	SEÇÃO IF
01	0,68	0,77	0,81	0,56	0,83	0,59
02	0,59	1,19	0,33	0,52	0,75	0,96
03	0,95	0,82	0,82	0,38	0,93	1,06
04	0,69	0,97	0,95	0,49	1,14	0,59
05	0,34	0,54	0,92	0,45	0,98	0,75
06	0,30	0,57	0,61	0,64	1,24	1,06
07	0,80	0,73	0,35	1,06	0,84	0,77
08	0,57	0,73	1,21	0,76	1,16	1,23
09	0,63	0,79	0,69	1,14	0,69	0,89
10	0,97	0,52	0,76	0,50	0,82	0,64
11	0,96	0,65	0,54	0,55	0,53	0,75
12	1,07	1,15	0,97	0,50	0,68	0,52
13	0,66	0,31	0,42	0,49	1,05	0,87
14	0,57	0,44	0,78	0,75	0,83	0,64

15	0,51	1,21	0,70	0,46	0,54	0,46
16	0,58	0,78	0,72	0,54	0,58	0,72
17	0,65	0,70	0,87	0,39	1,09	0,60
18	0,58	0,87	0,88	0,77	0,59	0,45
19	0,82	0,84	0,77	0,73	0,84	0,79
20	0,66	0,70	1,15	0,56	0,52	0,69
21	0,80	1,05	0,57	0,72	0,63	0,85
22	0,62	1,27	0,49	0,91	0,39	0,45
23	1,11	0,58	0,99	0,74	0,98	0,40
24	0,71	0,68	0,90	0,64	0,38	0,68
25	0,41	0,74	0,66	0,86	1,08	0,65
26	0,66	0,90	0,70	0,72	0,79	0,51
27	0,98	0,68	0,77	1,01	0,90	0,52
28	0,58	0,38	1,04	0,82	1,27	0,64
29	0,70	0,83	0,57	0,43	0,69	0,57
30	0,77	0,40	0,60	0,80	0,70	0,93
31	0,58	0,39	0,94	0,41	0,80	0,50
32	0,97	0,75	0,51	0,56	0,75	0,79
33	0,66	0,63	0,63	1,01	0,97	0,94
34	0,65	0,62	0,50	0,44	0,59	0,64
35	0,61	0,65	0,65	1,16	1,06	0,62
36	0,84	1,37	1,11	0,80	0,80	0,62
37	0,83	0,66	0,88	0,91	0,69	0,40
38	0,73	0,92	0,57	0,78	0,74	0,86
39	0,79	0,73	0,57	2,09	0,66	0,69
40	0,87	0,46	0,51	0,61	0,49	0,66
41	0,76	0,54	0,91	0,77	0,42	0,70
42	0,51	1,31	0,89	0,99	0,49	0,82
43	0,59	0,59	0,94	0,80	0,54	0,74

44	0,84	0,63	0,89	0,69	0,99	0,61
45	0,58	1,53	0,65	0,82	0,90	0,42
46	0,98	1,44	0,50	0,56	0,77	0,44
47	0,70	1,13	0,48	0,52	0,56	0,43
48	0,66	0,75	0,61	0,59	0,69	0,82
49	0,95	1,25	0,51	0,72	1,14	1,25
50	0,70	1,36	0,65	0,49	0,54	0,90

RESUMO ESPESSURA MÉDIA DE PASTA_03 CAMADAS_SEÇÕES LONGITUDINAIS

DIREÇÃO	CP	CORTE	REFERÊNCIA	5% MET	10% MET	15% MET
CORTE LONGITUDINAL	CP 03	Superior (SP)	0,50	0,71	0,76	0,71
		Meio (ME)	0,55	0,59	0,77	0,76
		Inferior (IF)	0,59	0,57	0,85	0,71
	CP 04	Superior (SP)	0,62	0,61	0,71	0,71
		Meio (ME)	0,59	0,62	0,81	0,78
		Inferior (IF)	0,55	0,67	0,73	0,70
	MÉDIA	Superior (SP)	0,56	0,66	0,74	0,71
		Meio (ME)	0,57	0,61	0,79	0,77
		Inferior (IF)	0,57	0,62	0,79	0,71
GERAL						
			0,57	0,63	0,77	0,73

CORPO DE PROVA 03 - CORTE LONGITUDINAL - 04 CAMADAS								
MEDIDAS	REF				5%			
	SP	MS	MI	IF	SP	MS	MI	IF
01	0,65	0,59	0,87	73	0,82	0,75	0,66	0,77
02	0,69	0,95	0,82	0,73	0,33	0,83	0,61	0,77
03	0,32	0,56	0,54	0,86	0,47	1,23	1,19	0,57
04	0,58	0,73	0,71	0,43	0,42	1,16	0,89	0,35
05	0,56	0,77	0,77	0,39	0,77	0,41	1,37	0,53
06	0,54	1,15	0,66	0,66	0,91	0,64	0,89	1,11
07	0,43	0,52	0,94	0,62	0,87	0,99	0,73	0,56
08	0,35	0,58	0,58	0,81	0,71	0,55	0,58	0,71
09	0,69	0,96	0,47	1,09	0,30	0,69	0,81	0,59
10	0,54	1,16	0,66	0,87	1,12	0,76	0,66	0,54
11	0,43	0,51	0,68	0,77	0,58	0,92	1,53	1,00
12	0,56	0,70	0,58	0,35	0,44	0,85	1,04	0,76
13	0,46	1,06	0,86	0,40	0,80	0,67	0,87	0,86
14	0,67	0,52	0,91	0,39	0,59	0,66	1,64	0,99
15	0,47	0,66	0,99	0,52	0,49	0,70	1,24	0,67
16	0,50	0,45	0,63	0,66	0,58	0,54	0,85	0,49
17	0,73	0,67	1,07	0,44	0,49	0,49	0,76	0,81
18	0,83	0,77	1,13	0,54	0,85	0,69	0,87	0,90
19	0,60	1,23	0,65	0,62	0,74	0,61	0,57	0,47

20	0,87	0,56	0,58	0,60	0,50	0,55	0,85	0,65
21	1,02	0,81	1,10	0,48	0,47	1,27	0,70	0,69
22	0,90	1,00	0,79	0,60	0,66	0,94	0,93	0,47
23	0,64	0,77	0,67	0,91	0,89	0,53	0,66	0,66
24	0,55	1,32	0,78	0,90	0,78	0,60	0,78	0,92
25	0,62	0,64	0,54	0,63	0,56	1,29	0,80	0,69
26	0,69	1,27	1,01	0,81	0,66	1,04	0,71	0,76
27	0,71	0,48	0,45	1,17	0,44	1,23	0,88	0,60
28	0,45	0,94	0,43	0,77	0,38	0,95	0,70	0,60
29	0,39	0,47	0,60	0,70	0,76	0,48	0,77	0,72
30	0,35	1,08	0,95	1,22	0,69	0,76	1,23	0,82
31	0,66	0,69	0,48	0,74	0,61	1,13	0,53	0,63
32	0,87	1,19	0,91	0,89	0,90	0,77	0,77	0,59
33	0,43	0,81	0,74	0,71	0,97	1,03	0,98	0,71
34	0,50	0,49	0,47	1,17	0,57	0,70	0,76	0,66
35	0,20	0,73	0,96	0,63	0,58	0,84	0,76	0,59
36	0,62	0,77	0,77	0,62	0,67	0,91	1,04	1,05
37	0,64	0,51	0,89	0,52	0,87	0,65	1,04	0,82
38	0,49	0,83	0,73	0,74	0,80	0,65	0,88	0,66
39	0,49	0,79	0,49	0,68	0,70	1,07	0,93	0,40
40	0,62	0,53	0,81	0,98	0,47	1,07	0,94	1,04
41	0,68	0,70	0,87	0,50	0,60	0,62	0,87	0,97
42	0,47	1,07	1,09	0,80	0,77	0,69	0,77	0,75
43	0,64	1,29	0,68	0,95	0,45	0,73	0,66	0,91
44	0,74	0,67	0,52	0,76	1,02	1,08	1,05	0,65
45	0,55	0,74	0,93	0,62	0,77	0,59	1,05	1,06
46	0,78	1,23	0,93	0,69	0,53	0,68	0,78	0,74
47	0,72	0,60	0,95	0,81	0,39	0,93	0,79	0,67
48	0,59	1,00	0,82	0,93	0,92	0,92	0,77	0,58
49	0,54	0,60	0,81	0,60	0,77	0,71	0,66	0,77
50	0,79	0,78	0,67	0,64	0,73	0,67	0,79	0,91

CORPO DE PROVA 03 - CORTE LONGITUDINAL - 04 CAMADAS								
MEDIDAS	10%				15%			
	SP	MS	MI	IF	SP	MS	MI	IF
01	0,77	0,47	0,59	0,76	0,52	1,19	0,78	0,66
02	0,83	0,58	0,66	0,52	0,81	1,35	0,96	0,85
03	0,67	0,91	1,10	0,47	0,75	0,64	0,93	0,85
04	0,77	1,46	1,23	0,62	0,70	0,90	0,70	0,60
05	0,42	0,77	0,93	0,74	0,94	1,17	0,86	0,32
06	0,79	1,23	1,28	0,42	0,43	0,69	1,03	0,71
07	0,68	1,43	0,93	0,61	0,78	1,20	1,42	0,83
08	0,74	0,69	0,61	0,66	0,56	0,83	0,93	0,88
09	0,73	0,85	0,49	0,74	0,43	1,10	0,80	0,63
10	0,52	0,77	0,78	0,36	1,13	0,67	0,90	1,04
11	0,83	0,74	0,76	0,95	0,58	0,58	0,97	0,85
12	0,49	0,90	0,69	1,12	0,60	1,29	0,99	0,96
13	0,31	0,85	1,88	1,22	0,54	0,82	0,69	0,91
14	0,43	0,85	0,83	0,61	0,70	0,79	0,50	0,78
15	0,54	1,29	0,88	0,68	0,66	0,87	0,90	0,98
16	0,50	0,87	0,99	0,87	0,86	1,45	0,91	0,83
17	0,73	0,77	0,71	0,93	0,33	0,63	0,89	0,92
18	0,59	0,94	0,71	0,51	0,37	0,96	0,92	0,47
19	0,52	1,00	0,49	0,94	0,57	0,76	0,67	0,81
20	0,65	0,87	1,69	0,70	0,62	1,16	0,87	0,97
21	0,72	1,16	1,19	0,49	0,81	0,97	0,71	0,54
22	0,96	0,83	0,65	0,44	0,69	0,87	0,82	1,16
23	0,67	0,78	0,94	0,92	0,82	0,77	0,56	0,69

24	0,56	0,85	0,83	0,83	0,77	1,16	0,54	0,71
25	0,45	0,82	0,93	0,80	0,47	1,12	0,90	0,85
26	0,77	0,71	0,81	0,80	0,83	0,61	0,67	0,54
27	0,54	1,15	1,33	0,46	0,64	0,94	0,57	0,55
28	0,93	1,13	1,28	1,16	0,55	0,76	0,67	0,81
29	0,56	0,88	0,69	0,49	0,70	1,36	1,00	0,69
30	0,49	0,82	1,24	0,63	0,31	1,19	0,85	0,90
31	0,31	0,72	0,48	0,99	0,61	0,82	0,85	1,00
32	0,59	1,20	0,67	0,62	0,42	0,94	0,47	0,62
33	0,80	0,72	1,26	0,38	0,70	1,23	1,24	0,96
34	0,50	0,83	1,11	0,87	0,67	0,71	0,71	0,69
35	0,57	0,85	1,23	0,58	1,08	1,33	0,70	0,71
36	0,41	0,77	0,58	0,76	0,44	0,77	0,76	1,26
37	1,47	0,61	0,74	0,91	0,38	0,87	1,13	1,35
38	0,45	0,85	0,96	0,80	0,45	0,85	1,36	0,86
39	1,43	0,61	0,69	0,80	0,70	1,24	1,81	0,89
40	1,77	1,19	0,89	0,47	0,83	1,01	1,13	0,56
41	0,54	1,04	0,67	1,14	0,40	0,73	1,99	0,68
42	1,18	0,63	0,78	0,78	0,81	0,85	1,25	0,54
43	0,45	0,51	0,61	0,50	0,57	1,01	1,24	0,95
44	1,11	0,62	0,78	0,88	1,01	1,09	1,29	0,67
45	1,07	0,91	1,02	1,43	0,55	1,05	1,04	0,66
46	0,60	0,40	1,05	0,60	0,80	0,90	0,77	0,46
47	0,43	0,71	1,07	0,78	0,82	1,70	0,55	0,45
48	0,57	0,86	1,16	0,57	0,93	1,11	1,87	0,81
49	0,64	0,77	1,51	1,46	0,90	0,92	0,52	0,43
50	0,71	1,00	1,13	0,39	1,19	1,09	1,27	0,98

CORPO DE PROVA 04 - CORTE LONGITUDINAL - 04 CAMADAS								
MEDIDAS	REF				5%			
	SP	ME	MI	IF	SP	ME	MI	IF
01	0,75	0,99	0,90	1,31	0,74	0,74	0,48	0,56
02	0,70	0,49	1,09	0,98	0,79	0,68	0,87	0,57
03	1,10	0,53	0,83	0,85	0,82	0,88	0,85	0,56
04	1,02	0,52	0,61	1,06	0,90	1,24	1,02	0,53
05	0,79	0,59	0,95	0,81	0,59	0,85	0,76	0,66
06	1,51	1,00	0,99	0,80	1,06	1,30	0,70	0,56
07	0,83	0,82	1,35	0,61	0,53	0,89	0,77	0,90
08	0,98	0,65	1,27	0,62	0,56	0,65	0,78	0,65
09	0,85	1,28	1,07	0,87	0,70	0,85	0,96	0,57
10	0,47	1,15	1,28	0,76	0,45	0,62	0,88	0,78
11	0,58	0,96	0,69	0,54	0,56	0,91	0,71	1,05
12	0,35	0,99	0,58	0,69	0,41	1,50	0,98	0,54
13	0,93	1,09	0,79	1,01	0,49	0,71	1,10	0,56
14	0,70	0,62	0,66	0,52	0,88	1,26	0,48	0,70
15	0,42	1,26	0,82	0,66	0,44	0,82	0,94	1,08
16	0,54	1,01	0,94	0,71	0,92	0,66	0,96	0,83
17	0,39	0,69	1,09	0,52	0,93	0,83	1,19	0,77
18	0,56	0,62	0,83	1,18	0,54	0,70	0,61	0,58
19	0,52	0,67	0,88	0,88	0,72	0,85	0,92	1,20
20	0,85	0,42	1,22	0,71	0,96	1,13	0,98	0,70
21	0,77	0,54	0,94	0,54	1,20	0,75	1,14	0,98
22	0,66	1,02	1,22	0,76	0,46	1,19	1,35	0,52
23	0,58	0,82	0,59	0,71	0,72	0,39	0,85	1,00
24	0,60	0,90	0,82	0,78	1,27	0,67	1,10	0,66
25	0,57	0,96	0,81	0,71	0,66	1,05	1,03	0,81
26	0,58	1,28	0,72	0,81	0,66	0,83	0,82	0,55

27	0,75	1,20	0,92	0,54	0,48	0,72	0,58	0,41
28	0,54	1,60	1,27	1,09	0,42	1,12	1,41	0,82
29	0,73	1,29	0,97	1,42	0,76	0,76	1,26	0,45
30	0,56	1,09	1,09	0,93	0,89	1,24	0,81	0,60
31	0,54	2,04	1,27	0,45	0,87	0,90	1,07	1,28
32	0,66	1,04	0,60	0,55	0,86	0,92	1,33	0,99
33	0,62	1,51	0,65	0,56	0,48	0,90	1,04	0,50
34	0,80	1,01	0,69	0,43	0,81	0,50	0,85	0,74
35	0,58	0,67	1,12	0,78	0,57	1,00	0,62	0,52
36	0,54	0,57	1,27	0,60	0,63	0,70	0,85	1,12
37	0,60	1,16	0,58	0,58	0,59	1,48	1,08	0,77
38	0,69	1,17	1,35	1,04	0,85	0,98	0,50	0,43
39	0,71	1,50	1,21	0,48	0,47	0,50	1,47	1,16
40	0,62	0,93	1,48	0,74	0,51	0,82	1,00	0,56
41	0,67	0,93	0,64	0,87	0,74	0,59	0,66	1,07
42	1,24	0,95	0,35	0,96	0,98	0,50	1,03	0,62
43	0,42	0,65	1,40	0,85	0,70	1,00	0,54	0,70
44	1,39	1,72	0,59	0,80	0,90	1,36	0,67	0,62
45	0,66	0,88	0,59	0,48	0,74	0,80	0,81	0,75
46	0,41	1,17	0,93	0,58	0,74	0,60	1,30	0,89
47	0,62	1,42	0,71	0,86	0,79	0,56	0,65	0,66
48	0,93	1,50	0,92	0,58	0,82	0,68	0,85	0,59
49	0,86	1,01	0,96	0,62	0,72	0,55	0,70	0,62
50	0,50	0,65	0,81	0,90	0,56	0,53	1,02	1,12

CORPO DE PROVA 04 - CORTE LONGITUDINAL - 04 CAMADAS								
MEDIDAS	10%				15%			
	SP	MS	MI	IF	SP	MS	MI	IF
01	0,64	0,56	0,81	0,72	0,77	0,54	0,80	0,66
02	0,78	0,52	0,73	0,59	0,85	0,90	0,80	0,64
03	0,41	0,82	0,38	0,54	0,64	0,56	0,62	0,46
04	0,77	0,61	0,82	1,06	0,56	0,55	0,63	0,40
05	0,93	0,83	1,09	0,75	0,44	1,39	0,58	0,90
06	0,58	0,55	0,55	0,77	0,72	0,71	0,43	0,58
07	0,87	0,72	1,48	0,55	0,47	0,50	0,53	0,62
08	1,00	0,88	0,82	0,40	0,38	0,73	0,67	0,39
09	0,88	0,58	0,47	0,91	0,57	0,89	0,88	0,33
10	0,64	0,89	1,10	0,66	0,98	1,00	0,69	0,54
11	0,72	0,63	0,88	0,62	0,48	0,89	0,59	0,66
12	0,74	0,71	0,91	0,64	1,04	0,57	0,75	0,62
13	0,64	0,83	0,69	0,66	0,47	0,74	1,17	1,12
14	0,48	0,79	0,58	0,81	0,43	0,97	0,73	0,45
15	1,40	0,83	1,48	1,13	0,42	0,59	0,87	0,45

16	0,62	0,99	0,73	0,47	0,33	1,24	1,01	0,39
17	0,55	0,78	1,32	0,66	0,47	0,82	1,23	0,47
18	0,35	1,07	0,64	0,47	0,49	1,08	0,70	0,43
19	0,71	0,70	1,27	0,97	0,47	1,00	0,39	0,99
20	0,50	0,43	1,04	0,66	0,49	0,80	0,74	1,02
21	0,43	0,55	1,69	0,65	0,42	0,74	0,53	0,98
22	0,39	0,67	0,66	0,45	0,78	0,70	0,67	0,80
23	0,66	1,01	0,66	0,60	0,85	0,83	1,00	0,53
24	0,71	0,80	0,95	0,77	0,58	0,90	1,14	0,90
25	0,64	0,25	0,60	0,69	0,71	0,67	0,66	0,39
26	0,39	1,44	0,64	0,97	0,46	0,93	0,85	0,37
27	1,21	0,86	1,39	0,67	0,52	1,42	0,69	0,49
28	0,56	1,16	0,72	0,32	0,42	0,65	0,70	0,31
29	1,11	0,67	0,49	0,66	1,43	0,54	0,55	0,63
30	0,99	1,09	0,93	0,61	0,39	0,60	0,82	0,76
31	0,54	0,64	0,45	0,80	0,93	0,87	0,74	0,47
32	0,62	1,35	0,62	0,50	0,53	0,85	1,05	0,62
33	0,57	1,12	0,82	0,83	0,40	1,69	0,77	0,73
34	0,73	0,93	0,73	0,52	0,42	0,71	0,62	0,70
35	0,47	0,99	0,79	0,90	0,52	0,87	0,68	0,96
36	0,81	0,77	0,95	0,74	0,58	0,86	0,46	0,69
37	0,54	0,58	0,89	0,67	0,60	1,06	0,62	0,47
38	0,60	0,73	1,19	0,71	0,52	1,68	0,92	0,35
39	0,69	0,93	0,85	0,66	0,40	0,99	1,50	1,21
40	0,46	0,96	0,75	0,65	0,61	0,66	0,63	0,58
41	0,70	0,83	0,73	1,02	0,67	0,55	0,49	0,67
42	0,77	1,15	0,62	0,86	1,11	0,74	0,50	0,49
43	0,82	0,78	0,82	0,54	0,62	0,78	1,40	0,92
44	0,73	1,12	0,62	1,01	0,64	1,24	1,27	1,28

45	0,83	0,69	0,71	1,00	0,42	1,16	0,49	0,58
46	0,61	1,62	0,91	0,77	0,50	0,64	0,82	0,95
47	0,58	0,62	1,18	0,60	0,59	1,64	0,62	0,85
48	0,47	0,98	1,41	1,19	0,72	1,34	1,41	0,58
49	0,39	0,83	0,67	0,97	0,80	0,93	0,89	0,82
50	0,43	0,49	1,11	0,96	0,79	0,60	0,66	0,56

RESUMO ESPESSURA MÉDIA DE PASTA_SEÇÃO LONGITUDINAL

DIREÇÃO	CP	CORTE	REFERÊNCIA	5% MET	10% MET	15% MET
CORTE LONGITUDINAL	CP 03	Superior (SP)	0,60	0,66	0,70	0,67
		MeioSuperior (MS)	0,80	0,80	0,86	0,98
		MeioInferior (MI)	0,76	0,87	0,93	0,94
		Inferior (IF)	0,71	0,72	0,74	0,78
	CP 04	Superior (SP)	0,70	0,72	0,67	0,61
		MeioSuperior (MS)	0,99	0,85	0,83	0,89
		MeioInferior (MI)	0,93	0,91	0,87	0,78
		Inferior (IF)	0,76	0,74	0,73	0,66
	MÉDIA	Superior (SP)	0,65	0,69	0,69	0,64
		MeioSuperior (MS)	0,90	0,83	0,85	0,94
		MeioInferior (MI)	0,85	0,89	0,90	0,86
		Inferior (IF)	0,74	0,73	0,74	0,72
	GERAL		0,78	0,78	0,79	0,79

RESUMO DENSIDADE PARCIAL DO CONCRETO (g/cm³)

DIREÇÃO	CP	ALTURA: SEGMENTO	REFERÊNCIA	5% MET	10% MET	15% MET
CORTE TRANSVERSAL	CP 01	TOPO-CC	2,00	1,85	1,95	2,15
		CC-BB	2,25	2,05	2,09	2,16
		BB-AA	2,10	2,14	2,10	1,95
		AA-FUNDO	1,86	1,83	1,77	1,60
	CP 02	TOPO-CC	1,99	1,92	1,92	2,14
		CC-BB	2,26	1,99	1,97	2,18
		BB-AA	2,01	2,10	2,05	2,03
		AA-FUNDO	1,91	1,96	1,79	1,62
	MÉDIA	TOPO-CC	2,00	1,89	1,94	2,15
		CC-BB	2,26	2,02	2,03	2,17
		BB-AA	2,06	2,12	2,08	1,99
		AA-FUNDO	1,89	1,90	1,78	1,61

GERAL		2,05	1,98	1,96	1,98
-------	--	------	------	------	------