

INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTU SENSU EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO:
OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO COM ANÁLISE MULTIPARAMÉTRICA

Autor: Álvaro Henrique Nogueira Bizão
Orientador: Dr. Wesley Renato Viali
Coorientadora: Cristiane Alvarenga Gajo
Coorientadora: Eloiza da Silva Nunes Viali

Rio Verde - GO

Junho - 2021

INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTU SENSU EM
ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE

CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO:
OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO COM ANÁLISE MULTIPARAMÉTRICA

Autor: Álvaro Henrique Nogueira Bizão
Orientador: Dr. Wesley Renato Viali
Coorientadora: Cristiane Alvarenga Gajo
Coorientadora: Eloiza da Silva Nunes Viali

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campos Rio Verde – Área de concentração Tecnologia e Ciência dos Materiais.

Rio Verde - GO

Junho - 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

B625c Bizão, Álvaro Henrique Nogueira
Concreto permeável com agregado reciclado:
otimização de traço com análise multiparamétrica /
Álvaro Henrique Nogueira Bizão; orientador Wesley
Renato Viali. -- Rio Verde, 2021.
84 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e
Sustentabilidade) -- Instituto Federal Goiano,
Campus Rio Verde, 2021.

1. Agregado reciclado. 2. Concreto permeável. 3.
Trabalhabilidade. I. Viali, Wesley Renato, orient.
II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: **Álvaro Henrique Nogueira Bizão**

Matrícula: **2019102331440026**

Título do Trabalho: **CONCRETO PERMEÁVEL COM AGREGADO RECICLADO: OTIMIZAÇÃO DE TRAÇO COM ANÁLISE MULTIPARAMÉTRICA**

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: __/__/__

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

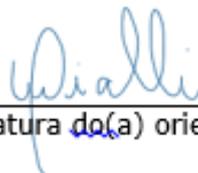
1. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde - GO, 23/11/2021.
Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
 INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 62/2021 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO

ATA Nº/41

BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos trinta dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e um, às 08h00min (oito horas), reuniram-se os componentes da banca examinadora em sessão pública realizada por videoconferência, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de mestrado, de autoria de **Álvaro Henrique Nogueira Bizão**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Wesley Renato Viali, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor para, em 45 minutos, proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o examinado, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade**, na área de concentração em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, a defesa perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60 (sessenta) dias** da sua ocorrência. A banca examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa dissertação em periódicos após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e para constar, foi lavrada a presente ata, que, após lida e achada conforme, será assinada eletronicamente pelos membros da banca examinadora.

Membros da banca examinadora:

Nome	Instituição	Situação no programa
Prof. Dr. Wesley Renato Viali	IF Goiano – Campus Rio Verde	Presidente
Prof. Dr. Caio Carvalho dos Santos	Instituto de Química - UNESP CAR	Membro externo

Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime	IF Goiano - Campus Rio Verde	Membro interno
------------------------------------	------------------------------	----------------

Documento assinado eletronicamente por:

- Bacus de Oliveira Nahime, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 29/09/2021 19:24:40.
- Caio Carvalho dos Santos, Caio Carvalho dos Santos - Professor Avaliador de Banca - Universidade Estadual Paulista (48031918000124), em 30/06/2021 11:10:25.
- Wesley Renato Viali, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/06/2021 11:07:36.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/06/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 280985
Código de Autenticação: 025758f9c0



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3620-5600

Aos meus pais, Antonio e Alila, pelo carinho e amor.

Ao meu irmão, Antonio, por todo apoio e paciência.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, e por sempre estar ao meu lado nessa caminhada me guiando pelos caminhos corretos.

Aos meus pais, Antonio Alexandre Bizão e Alila Silvia Nogueira Bizão, e meu irmão, Antonio, por sempre me apoiarem e estarem presentes na minha vida. Obrigado por nunca me deixar desistir dos meus sonhos. Amo muito vocês!

Aos meus professores, orientador e coorientadora, Wesley Renato Viali e Eloiza da Silva Nunes Viali, que sempre estiveram dispostos a ajudar em todos os momentos, sempre com bons conselhos e muita paciência. Obrigado por contribuir para me tornar um pesquisador e uma pessoa melhor.

Ao professor Bacus de Oliveira Nahime pela solicitude em permitir usar o laboratório da Universidade de Rio Verde (UniRV) para realização de ensaios. Obrigado pelas suas contribuições durante a pesquisa do mestrado.

Ao técnico de laboratório César Pereira Bezerra Filho pela prontidão e ensinamentos com os ensaios laboratoriais. Obrigado pela disposição e conhecimento.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Álvaro Henrique Nogueira Bizão, filho de Antonio Alexandre Bizão e Alila Silva Nogueira Bizão, nascido em 22 de outubro de 1994 na cidade de Rio Verde, Goiás. Concluiu o ensino médio no Colégio São Tomás, em Rio Verde, GO, no ano de 2011. Concluiu a graduação em Engenharia Civil na Universidade Federal de Viçosa em 2018. No ano de 2019 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada em Sustentabilidade, com área de concentração em “Engenharia Aplicada e Sustentabilidade” e linha de pesquisa em “Materiais de Construção Civil”.

RESUMO

BIZÃO, ÁLVARO HENRIQUE NOGUEIRA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, junho, 2021. **Concreto permeável com agregado reciclado: otimização de traço com análise multiparamétrica.** Orientador: Prof. Dr. Wesley Renato Viali. Co-orientadores: Prof^a Dr^a Cristiane Alvarenga Gajo; Prof^a Dr^a Eloiza da Silva Nunes Viali.

Uma boa dosagem de concreto permeável norteia-se fundamentalmente na permeabilidade e resistência mecânica, apesar de serem características divergentes. Para o Concreto Permeável com Agregado Reciclado de Concreto (ARC), este desafio é ainda maior pois propriedades como massa unitária, massa específica são menores para o ARC ao passo que a absorção água é maior, portanto para maioria dos estudos há decréscimo de resistência mecânica quando usado o ARC. Isto posto o processo de confecção de concreto permeável com agregado reciclado de concreto (ARC), apesar de ser bastante similar ao concreto permeável com agregado natural (AN), não pode ser realizado apenas com a substituição equivalente de um tipo de agregado pelo outro. Este trabalho visou a análise e elaboração de traços de concreto permeável com agregado reciclado de forma a otimizar prioritariamente as resistências mecânicas e permeabilidade. Através de ensaios preliminares e revisão bibliográfica foram estabelecidas 2 variáveis (água/cimento w/c e cimento:agregado) em 3 níveis (máximo, central e mínimo) totalizando 9 traços os quais foram testados para as resistências mecânicas e propriedades hidráulicas. A permeabilidade não foi um fator limitante pois sempre esteve acima do mínimo estabelecido por norma (10^{-3} m/s) para ser considerada um concreto permeável. Todos os traços atingiram a média de no mínimo 1,0 MPa de resistência a tração na flexão, sendo possível a utilização como concreto permeável moldado no local para Tráfego de pedestres. Alguns traços atingiram médias de maiores que 2,0 MPa sendo permitida a utilização para tráfego leve de acordo com norma NBR 16416. Um maior volume de pasta

de cimento, independentemente de seu teor w/c, levou às maiores resistências mecânicas. O uso do agregado ARC foi o principal fator limitante para se atingir resistências mecânicas maiores. Por meio de análise estatística foram estabelecidas fortes relações positivas entre a quantidade de pasta de cimento e as resistências mecânicas e negativas para permeabilidade e volume de vazios.

Palavras-chave: Agregado reciclado, Concreto permeável, Trabalhabilidade

ABSTRACT

BIZÃO, ÁLVARO HENRIQUE NOGUEIRA. Goiano Federal Institute of Education, Science, and Technology, June 2021. **Pervious concrete with recycled aggregate: mix ratio optimization with multiparametric analysis.** Advisor: Prof. Dr. Viali, Wesley Renato. Co-advisors: Prof. Dr. Gajo, Cristiane Alvarenga Gajo; Prof. Dr. Viali, Eloiza da Silva Nunes.

A proper pervious concrete grade is fundamentally based on its permeability and its mechanical strength, despite these features being on opposite ends of the spectrum. In Pervious Concrete with Recycled Concrete Aggregate (RCA), balancing these two characteristics, is even a greater challenge due to its properties such as unit mass and specific mass being lower and water absorption higher in RCA than in Regular Concrete. Therefore, most studies have shown that there is a decrease in mechanical strength when using RCA. Despite being similar to pervious concrete with natural aggregate (NA), making pervious concrete with recycled concrete aggregate (RCA) cannot be carried out only by replacing one type of aggregate for another equivalent. This paper aimed to analyze and define pervious concrete mix ratio with recycled aggregate focusing on optimizing mechanical strength and permeability. Through preliminary tests and literature review, two variables had been defined [water/cement (w/c) and cement: aggregate] in three mix proportion levels (maximum, central, and minimum), in a total of nine mix ratios, which were tested for mechanical strength and hydraulic properties. Permeability had not been a limiting factor because all batches had always been above the minimum standard ($10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) to be considered a pervious concrete according to Brazilian regulations. All mix ratios had reached an average of at least a bending tensile strength of 1.0 MPa, making it possible to be used as pervious concrete cast on site for Pedestrian Walkways. Some mix ratios had reached averages greater than 2.0 MPa, which can be used in lightly trafficked pavements according to ABNT/NBR (Brazilian Norms

acronym) 16416. A greater volume of cement paste had resulted in a greater mechanical strength, regardless of its w/c content. The use of RCA aggregate had been the main limiting factor to reach higher mechanical strengths. Through statistical analysis, strong positive correlations between the amount of cement paste and mechanical strength, and strong negative correlations between permeability and void content had been found.

Keywords: Pervious concrete, Recycled aggregate, Workability

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1	Comparação entre agregados naturais e reciclados de concreto, ambos usados no concreto permeável	9
Tabela 2	Resistências e espessuras mínimas para pavimentos permeáveis	20
Tabela 3	Traços usuais para concreto permeável	29
Tabela 4	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:5,5 na 1ª etapa	37
Tabela 5	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:5,5 na 2ª etapa	37
Tabela 6	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:4,5 na 1ª etapa	37
Tabela 7	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:4,5 na 2ª etapa	37
Tabela 8	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:3,5 na 1ª etapa	38
Tabela 9	Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:3,5 na 2ª etapa	38
Tabela 10	Níveis máximos (+1), mínimos (-1) e centrais (c) para cada variável	38
Tabela 11	Quantitativo de material para cada combinação	39
Tabela 12	Percentual de passantes para cada peneira dos agregados números 67, 7 e 8.	44
Tabela 13	Características físicas dos agregados reciclados	44
Tabela 14	Classificações em relação à trabalhabilidade do concreto, os teores adequados para cada nível de cimento:agregado estão em verde	47
Tabela 15	Análise de Variância	50
Tabela 16	Análise de Variância	56
Tabela 17	Sumário da otimização	58

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Depósito de corpos de prova em construtora de Rio Verde – GO	31
Figura 2	Trituração no britador de mandíbula	31
Figura 3	Processo de peneiramento dos agregados entre as peneiras 3,35 e 19,00 mm	31
Figura 4	Armazenagem dos agregados em tambor plástico	32
Figura 5	Processo de mistura do agregado que estava segregado antes dos ensaios	32
Figura 6	Avaliação do estado da massa de concreto	37
Figura 7	Cura com saco plástico nas primeiras 24 h	39
Figura 8	Colocação dos corpos de prova em tambor com água por 28 dias	40
Figura 9	Permeâmetro e seus componentes	42
Figura 10	Medidor de volume e balança	43
Figura 11	Corpo de prova utilizado no ensaio de permeabilidade e percentual de vazios	43
Figura 12	Gráfico de percentual de passantes em função da peneira com os valores máximos e mínimos das granulometrias de número 67, 7 e 8 e do ARC	45
Figura 13	Aspecto das amostras no ensaio preliminar de trabalhabilidade. (a) pouca água; (b) água em quantidade ideal; (c) excesso de água	47
Figura 14	Gráfico Boxplot de Compressão de cada traço de concreto	48
Figura 15	Gráfico Boxplot de resistência a tração na flexão de cada traço de concreto	48
Figura 16	Gráfico de relação entre resistência a compressão, cim:agreg e a/c	
Figura 17	Gráfico de relação entre resistência a tração na flexão, cim:agreg e a/c	49
Figura 18	Gráfico de volume pasta cimento x tração	51
Figura 19	Aspecto do concreto após rompimento por compressão (a) e por tração na flexão (b). Locais onde ocorreram rupturas: (c) interface do agregado natural com a pasta de cimento (ZTI), (d) através do grânulo do ARC e (e) pasta de cimento nova	52
Figura 20	Gráfico Boxplot de permeabilidade de cada traço de concreto	52
Figura 21	Gráfico Boxplot de percentual de vazios real de cada traço de concreto	53
Figura 22	Gráfico apresentando comparação entre os vazios calculados e os vazios reais para cada traço	54

Figura 23	Aspecto dos agregados	55
Figura 24	Gráfico de relação entre permeabilidade, cim:agreg e a/c	55
Figura 25	Gráfico de relação entre permeabilidade, cim:agreg e a/c	55
Figura 26	Gráfico de relações entre as repostas e correlação de Pearson	57
Figura 27	Gráfico da região em branco onde se encontram os valores desejados para otimizar	58

SUMÁRIO

	Página
1	INTRODUÇÃO 1
1.1	REFERÊNCIAS 2
2	OBJETIVOS 4
3	CAPÍTULO I 5
3.1	INTRODUÇÃO 6
3.1.1	Agregado reciclado de concreto na construção civil 6
3.1.2	Concreto permeável 7
3.1.3	Concreto permeável com agregado reciclado 8
3.2	RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO PERMEÁVEL 8
3.2.1	Agregado natural x ARC 8
3.2.2	Zona de transição interfacial (ZTI) 10
3.2.3	ARC 10
3.2.4	Granulometria dos agregados..... 12
3.2.5	Características da pasta de cimento 14
3.2.6	Alternativas para aumentar a resistência mecânica do concreto permeável 15
3.2.6.1	Sílica ativa..... 15
3.2.6.2	Fibras..... 16
3.2.7	Metodologias de dosagem..... 17
3.2.8	Permeabilidade <i>versus</i> resistência mecânica..... 18
3.3	CONCLUSÃO 20
3.4	REFERÊNCIAS 21
4	CAPÍTULO II 28
4.1	INTRODUÇÃO 30
4.2	OBJETIVOS 31

4.3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.3.1	Materiais	32
4.3.2	Métodos.....	34
4.3.2.1	Ensaio com o agregado.....	34
4.3.2.1.1	Segregação	34
4.3.2.1.2	Ensaio de granulometria.....	35
4.3.2.1.3	Ensaio de massa unitária.....	35
4.3.2.1.4	Ensaio de massa específica e teor de absorção	36
4.3.2.2	Seleção de parâmetros iniciais	37
4.3.2.2.1	Ensaio preliminar de trabalhabilidade.....	37
4.3.2.2.2	Combinações de traços.....	40
4.3.2.3	Ensaio no concreto permeável.....	41
4.3.2.3.1	Cura.....	41
4.3.2.3.2	Ensaio de resistência à compressão	42
4.3.2.3.3	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	42
4.3.2.3.4	Ensaio de permeabilidade	43
4.3.2.3.5	Ensaio de percentual de vazios	44
4.3.2.3.6	Otimização do traço	46
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.4.1	Características físicas dos agregados	46
4.4.2	Ensaio preliminar de trabalhabilidade.....	48
4.4.3	Ensaio de resistência mecânica	50
4.4.4	Ensaio hidráulico	54
4.4.5	Relações entre respostas.....	58
4.4.6	Otimização	59
4.5	CONCLUSÕES	60
4.6	REFERÊNCIAS.....	61
5	CONCLUSÃO GERAL.....	66

1 INTRODUÇÃO

O aumento das taxas de industrialização e urbanização devido ao crescimento da economia e população fez do concreto o material mais não sustentável existente visto o quanto consome de recursos naturais. (BEHERA *et al.*, 2014)

O concreto é responsável por aproximadamente 8% de toda emissão de dióxido de carbono mundial ao mesmo tempo em que a produção de cimento triplicou nas últimas duas décadas (WANG, B. *et al.*, 2021). Em suma, o sistema produtivo do concreto como um todo é altamente prejudicial e degradante para o meio ambiente.

Atualmente há uma crescente demanda para a realização de construções civis ambientalmente sustentáveis, sejam elas feitas de materiais reciclados, reutilização de matéria prima, reaproveitamento de água ou até mesmo com a utilização de energia de fontes renováveis. Dentre as práticas ambientalmente sustentáveis encontra-se a reciclagem de materiais para utilização como agregado na construção civil. O uso de agregado reciclado de concreto demolido pode ser útil para a proteção ambiental e econômica (VAISHNAVI DEVI *et al.*, 2021).

Dentre os impactos positivos da reciclagem de agregados estão a diminuição de disposição inadequadas de resíduos de construção e demolição manejo (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016), crescimento de vida útil dos aterros, redução de custos de gerenciamento de resíduos (LEITE, 2001), além da própria economia com extração de recursos naturais e seu processamento.

Outro inconveniente minimizado pelo concreto permeável é a impermeabilização do solo. O uso de técnicas e materiais convencionais para construção de edificações, estradas, pontes, etc têm um impacto negativo sobre o meio ambiente visto que estes geram uma superfície impermeável que funciona como uma barreira para a percolação da água (CHAITANYA; RAMAKRISHNA, 2021).

O concreto permeável surge como uma alternativa para lidar com os passivos ambientais da impermeabilização do solo. O concreto permeável aumenta o tempo de escoamento da água da chuva, reduz a necessidade de sistemas de coleta e retenção de

água, diminui os ruídos entre pneu e pavimento e reabastece os aquíferos. Além disso aumenta significativamente a qualidade da água drenada reduzindo a quantidade de metais pesados dissolvidos e concentrações de chumbo, zinco e cobre. (EL-HASSAN; KIANMEHR; ZOUAOU, 2019)

Apesar de haver relatos de mais de 150 anos de existência do concreto permeável, a popularização e o uso com sucesso em diversas aplicações só se tornou realidade nos últimos 20 anos. Este já vem sendo implantado com sucesso em pavimentos de estacionamento, calçadas e vias (LI, 2009).

A adição do agregado reciclado no concreto permeável, ou até mesmo a substituição total do agregado natural pelo agregado reciclado de concreto é uma solução que unifica tanto as vantagens da reciclagem de materiais quanto os benefícios intrínsecos do pavimento permeável.

Essa substituição, entretanto, requer bastante estudo e controle tecnológico visto algumas características únicas do agregado reciclado como menor densidade e maior absorção de água (VAISHNAVI DEVI *et al.*, 2021). O aumento da absorção de água do agregado reciclado significa que o concreto precisa de em torno de 5% mais de água para atingir a mesma trabalhabilidade. Se os agregados forem empregados em condições secas, alguns pesquisadores recomendam que devem ser saturados antes do uso. (ETXEBERRIA *et al.*, 2007)

Essas características diferenciadas dos agregados acabam gerando concretos com propriedades difíceis de serem previstas e via de regra com resistência mecânica menor. Dessa maneira entende-se que o estudo dos efeitos do agregado reciclado de concreto no concreto permeável é de suma importância.

1.1 REFERÊNCIAS

BEHERA, M. *et al.* Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501-516, 2014. Disponível em: DOI - 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003. Acesso em: set. 2020.

CHAITANYA, M.; RAMAKRISHNA, G. Enhancing the mechanical properties of pervious recycled aggregate concrete using silicafumes. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, Part 1, p. 634-637, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.549>. Acesso em: set. 2020.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOU, S. Properties of pervious concrete

incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164-175, 2019. Disponível em:
DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.325. Acesso em: out. 2020.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007. Disponível em:
DOI:10.1016/J.CEMCONRES.2007.02.002. Acesso em: set. 2020.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/21839>. Acesso em: set. 2020.

LI, J. Mix design of pervious recycled concrete. **Anais... GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics**, Changsha Hunan, China, 2009. Disponível em:
<http://worldcat.org/isbn/9780784410479>. Acesso em: out. 2020.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000100006>. Acesso em: nov. 2020.

VAISHNAVI DEVI, S. *et al.* Utilization of recycled aggregate of construction and demolition waste as a sustainable material. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, Part 7, p. 6649-6654, 2021. Disponível em> <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.013>. Acesso em: set. 2020.

WANG, B. *et al.* A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 171, n.15, Sept. 2020, p. 105565, 2021. Disponível em: DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105565. Acesso em: out. 2020.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como *Objetivo Geral* estudar o concreto permeável com agregado reciclado na investida de dosar um traço com propriedades otimizadas.

Os *Objetivos específicos* correspondem a:

- a) investigar os fatores que influenciam na resistência mecânica do concreto permeável;
- b) analisar as consequências da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado;
- c) analisar e comparar as propriedades físicas dos agregados reciclados;
- d) variar parâmetros na dosagem dos traços de concreto para experimentação;
- e) realizar os testes mecânicos e hidráulicos no concreto; e
- f) avaliar a influência e verificar correlações entre cada parâmetro variado e as respostas obtidas.

3 CAPÍTULO I

Revisão Resistência Mecânica do Concreto Permeável com Agregado Reciclado

Resumo:

O processo de confecção de concreto permeável com agregado reciclado de concreto (ARC), apesar de ser bastante similar ao concreto permeável com agregado natural (AN), não pode ser realizado apenas com a substituição equivalente de um tipo de agregado pelo outro. É necessário avaliar todas as implicações geradas por essa mudança. Características como massa unitária, massa específica são menores para o ARC ao passo que a absorção água é maior. A Zona de Transição Interfacial (ZTI) mostra-se como o principal elemento a ser analisado principalmente quando se trata de resistência mecânica. Para a maioria dos estudos houve decréscimo de resistência mecânica quando usado o ARC sendo atribuído principalmente à absorção água, porosidade e ZTI do ARC. A granulometria se mostrou o principal fator para variações na resistência mecânica e via de regra uma granulometria que promove maior contato entre as partículas levou a uma maior resistência mecânica. A pasta de cimento com adição de sílica ativa, fibras e modificações no teor água/cimento podem aumentar a resistência mecânica, entretanto o fator de maior significância é sua quantidade. Metodologias de dosagem são propostas de diversas maneiras, entretanto há uma imensa dificuldade em padronizar uma metodologia global e confiável.

Palavras-chave: Agregado reciclado de concreto, Concreto permeável, Zona de Transição Interfacial; pasta de cimento

3 CHAPTER I

Mechanical Strength Review of Pervious Concrete with Recycled Aggregate

Abstract:

Despite being quite similar to pervious concrete with natural aggregate (NA), making pervious concrete with recycled concrete aggregate (RCA) cannot be carried out replacing one type of aggregate for another equivalent. It is necessary to evaluate all the facts generated by this change. Characteristics such as unit mass and specific mass are lower and water absorption is higher in RCA than in regular concrete. The Interfacial Transition Zone (ITZ) is shown as the main element to be evaluated, especially regarding to mechanical strength. In most studies, there was a decrease in mechanical strength when RCA was used, which resulted primarily from RCA's water absorption, porosity, and ITZ. The size of aggregates had shown to be the main factor in variations in mechanical strength and, as a general rule, the size of aggregates that promotes greater contact among themselves had resulted in a higher mechanical strength. Cement paste with the addition of silica fume, fibers, and changes in the water/cement (w/c) content can increase mechanical strength; however, the most significant parameter is the amount of the material added. Concrete grade methodologies are suggested in different fashion; however, there is a highly significant challenge in establishing a global standard and reliable methodology.

Keywords: Cement paste, Interfacial Transition Zone, Pervious concrete, Recycled concrete aggregate

3.1 INTRODUÇÃO

3.1.1 Agregado reciclado de concreto na construção civil

Dentre as práticas ambientalmente sustentáveis para a construção civil encontra-se a reciclagem de materiais para utilização como agregado. Nesse contexto um agregado bastante utilizado é o agregado reciclado de concreto (ARC).

O ARC é definido como o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduos na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. (ABNT, 2004).

A reciclagem de concreto através da fabricação de agregados apresenta diversos impactos positivos para o meio ambiente como a diminuição da disposição inadequada de resíduos de construção e demolição (TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016), crescimento de vida útil dos aterros, redução de custos de gerenciamento de resíduos (LEITE, 2001), além da própria economia com extração de recursos naturais e seu processamento.

Com o atual nível de estudos e pesquisas relevantes a respeito do uso do ARC como material de construção civil, há inúmeras aplicações como enchimento de aterro, sub-base, base e superfície de pavimentos rodoviários e também produção de novos concretos para bases, pavimentação dentre outras construções (TAM; SOOMRO; EVANGELISTA, 2018).

Dentre as aplicações, este trabalho concentra-se na fabricação do concreto permeável com ARC.

3.1.2 Concreto permeável

O concreto permeável é um tipo de concreto feito com agregado graúdo, cimento, água e pode ou não conter agregados finos ou aditivos. O grande diferencial desse tipo de concreto é a sua elevada permeabilidade.

O concreto permeável é um material caracterizado pela presença de uma estrutura de poros interconectados que permite a percolação da água. A interconectividade dos poros na matriz é alcançada pela eliminação ou redução dos agregados finos de tal maneira que os agregados graúdos são revestidos somente com pasta de cimento (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016).

A propriedade de alta permeabilidade do concreto permeável permite reduzir o escoamento de água pluvial, manutenção da recarga das águas subterrâneas, remoção de poluentes, diminuição da necessidade de reservatórios de detenção e outras medidas onerosas. Além disso a permeabilidade do concreto melhora a segurança para os motoristas pois evita da água se empoçar na superfície da via. Um outro notável benefício é a capacidade de diminuir as temperaturas altas do clima quente ao contrário dos

pavimentos convencionais. (ALIABDO; ABD ELMOATY; FAWZY, 2018)

Como visto, o concreto permeável tem inúmeras vantagens hidrológicas e para os usuários. Seu uso se dá majoritariamente na pavimentação de vias, em áreas de estacionamento ou calçamento.

3.1.3 Concreto permeável com agregado reciclado

Do ponto de vista ambiental o concreto permeável com agregado reciclado alia os pontos positivos da reciclagem de materiais com os benefícios hidrológicos e para os usuários da pavimentação permeável.

Usualmente, e de forma eficaz, os concretos permeáveis já são fabricados com agregados naturais, a introdução do ARC como componente do concreto permeável, traz consigo um conjunto de particularidades que refletem no concreto, seja ele fresco ou endurecido.

Sendo assim, a confecção do concreto permeável com ARC não consiste somente em mudança equivalente de um tipo de agregado pelo outro. Há de se avaliar todas as implicações geradas por essa mudança na qualidade do concreto para então ser possível a elaboração de medidas a fim de manter o controle sobre o traço e sobre os procedimentos de dosagem.

3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA DO CONCRETO PERMEÁVEL

3.2.1 Agregado natural x ARC

Os agregados naturais são basicamente rochas trituradas até uma determinada faixa de tamanho. Os agregados reciclados são também provenientes do processo de trituração até um tamanho definido, entretanto utiliza-se como fonte de matéria prima concretos já curados.

Na reciclagem do concreto, durante o processo de trituração do concreto originário, fragmenta-se majoritariamente somente a argamassa, dando origem a um agregado em que cada grânulo engloba argamassa residual aderida juntamente com rochas do agregado graúdo do concreto originário.

Há uma série de distinções entre os agregados reciclados e os agregados naturais

se examinados isoladamente. Características como massa unitária, massa específica e absorção são bem diferentes entre esses dois tipos de agregado e acabam por dar comportamentos distintos aos concretos por eles gerados. A Tabela 1 compara os dois tipos de agregado.

Tabela 1 - Comparação entre agregados naturais e reciclados de concreto, ambos usados no concreto permeável

Referência	tipo de agregado	dimensões agregados		massa unitária		massa específica		absorção	
		natural	reciclado: concreto britado	natural	reciclado	natural	reciclado	natural	reciclado
		mm	mm	kg/m ³	kg/m ³	-	-	%	%
Tavares e Kazmierczak (2016)	natural; reciclado de concreto	19 mm ^a rocha basáltica	25 mm ^a	1510	1220	2,74	1,94	1,33	7,91
Oliveira (2019)	natural; reciclado de concreto	12,5 mm ^a rocha basáltica	12,5 mm ^a	1450	1200	-	-	3,55	10,12
Yap <i>et al.</i> (2018)	natural; reciclado de concreto	4,5 - 9,0 mm granito	4,5 - 9,5 mm	1433,1	1243,1	2,65	2,32	3,5	8,05
Aliabdo, Abd Elmoaty e Fawzy (2018)	natural; reciclado de concreto	9,5 - 12,5 mm rocha calcária; 19 - 25 mm rocha calcária	9,5 - 12,5 mm; 19 - 25 mm	1510 (9,5 mm) 1500 (19 mm)	1490 (9,5 mm) 1480 (19 mm)	2,53 (9,5 mm) 2,58 (19 mm)	2,40 (9,5 mm) 2,35 (19 mm)	1,50 (9,5 mm) 1,20 (19 mm)	2,70 (9,5 mm) 2,30 (19 mm)
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	natural; reciclado de concreto	9,5 - 12,5 mm	9,5 - 12,5 mm	-	-	2,72	2,54	1,48	5,07

^aDimensão máxima do agregado

Fonte: O Autor (2021).

Como pode ser observado no quadro 1 os agregados reciclados de concreto são comumente chamados de mais “leves” que os agregados naturais. Estes apresentam menores massas unitárias e menores massas específicas, além disso, pelo fato de terem argamassa residual, apresentam maiores teores de absorção de água.

De acordo Etxeberria *et al.* (2007), as propriedades físicas do agregado reciclado dependem de ambas qualidade e quantidade da argamassa residual aderida. A argamassa residual aderida é um material poroso e a sua porosidade depende do teor água/cimento do concreto que foi reciclado. O procedimento de trituração e a dimensão do agregado triturado tem influência na quantidade de argamassa aderida.

Em se tratando de absorção de água, essa propriedade é uma das mais significativas que difere o agregado natural do reciclado de concreto e pode ter influência tanto nas propriedades do concreto fresco quando do concreto endurecido. (ETXEBERRIA *et al.*, 2007)

A disponibilidade de água da pasta de cimento dita as reações do cimento, que se verifica no concreto endurecido, e também a trabalhabilidade do concreto fresco.

3.2.2 Zona de transição interfacial (ZTI)

A Zona de transição interfacial (ZTI) é a região da pasta de cimento ao redor das partículas de agregado que é afetada pela presença do próprio agregado. Pela maneira como é formada não tem uma zona bem delimitada, é na verdade uma região de transição. Essa região é tida como a interface mais importante do concreto (SCRIVENER; CRUMBIE; LAUGESSEN, 2004)

A resistência mecânica do concreto permeável é usualmente relacionada à composição mineral e porosidade da ZTI, e à ligação entre a pasta de concreto e o agregado (YANG, X. *et al.*, 2020)

É reconhecido que ZTI é a zona mais fraca do concreto tradicional, onde as fissuras de rompimento se iniciam, isso também é aplicável ao concreto permeável. (ZHONG; WILLE, K., 2018)

Além disso, o fato de o concreto permeável não ter preenchimento de argamassa faz com que a tensão se concentre nos pontos de contato entre os agregados quando estão sob carregamento. Portanto, as fissuras ocorrem primeiramente na camada de ligação entre o agregado e a pasta de cimento (ZTI) e depois se expandem para a borda do agregado e penetra os poros até o rompimento. (XIE *et al.*, 2020)

Para Ćosić *et al.* (2015), a fraqueza da ZTI pode ser parcialmente atribuída à diferente morfologia da pasta de cimento na delimitação com o agregado e parcialmente devido ao acúmulo de água na superfície dos agregados graúdos, onde o teor água/cimento local se torna maior.

Tendo em vista todos os aspectos que circundam a ZTI é válido salientar que a substituição do agregado natural por ARC leva a formação de mais uma ZTI. Neste caso temos duas ZTIs: uma é entre o agregado natural e a argamassa antiga e a outra é entre o agregado reciclado e a pasta de cimento nova. À vista disso, o ARC aumenta o grau de complexidade do concreto permeável e suas interações internas.

3.2.3 ARC

O efeito do ARC na resistência mecânica do concreto permeável permanece fonte de discussão.

Para Güneyisi *et al.* (2016), Tavares e Kazmierczak (2016), Zhang, Z. *et al.*

(2017), Aliabdo, Abd Elmoaty e Fawzy (2018), Oliveira (2019) e Chinchillas-Chinchillas *et al.* (2019), os agregados reciclados têm impacto negativo na resistência mecânica do concreto permeável se comparados nas mesmas condições de granulometria e pasta de cimento com os agregados naturais.

A redução da resistência mecânica do concreto permeável feito com agregado reciclado se dá devido à diversos fatores e a relevância de cada fator varia entre os autores.

Para Güneyisi *et al.* (2016) a redução na resistência à compressão é observada com o aumento do conteúdo de agregado reciclado. Isso é causado por duas importantes propriedades dos agregados reciclados que os diferem dos agregados naturais: uma é a fraca pasta de cimento residual aderida, a outra é a zona interfacial (ZTI) entre o agregado original e a pasta de cimento aderida. Quando o agregado reciclado é utilizado, uma ZTI a mais é criada, que é entre o agregado reciclado e a pasta de cimento (nova) do concreto permeável.

Para Yap *et al.* (2018) a argamassa aderida ao agregado reciclado absorve água da mistura e reduz a quantidade de água da pasta de cimento. Isso eventualmente resulta em ligações fracas entre a pasta de cimento (nova) e os agregados graúdos (reciclados) reduzindo assim a resistência à compressão.

Um decréscimo na resistência à compressão é observado para concretos porosos utilizando agregado reciclado. Isso pode ser devido à fraca ligação entre o agregado e a pasta de cimento e também parcialmente devido ao alto índice de vazios do agregado reciclado (AAMER RAFIQUE BHUTTA *et al.*, 2013).

De acordo com Yang, X. *et al.* (2020), a porosidade da ZTI é habitualmente relacionada a performance mecânica do concreto e que quanto maior essa porosidade menor é a resistência mecânica.

O maior diferencial do concreto permeável com ARC é a porosidade e nível de resistência atingido pela ZTI entre o ARC e a pasta de cimento, isso se deve à sua natureza de alta porosidade, fraca e de alta absorção de água do ARC pela sua argamassa aderida (ALSHAREEDAH; NASSIRI, 2020).

O uso do ARC no concreto permeável leva a um aumento de aproximadamente 190% na porosidade da ZTI (CHINCHILLAS-CHINCHILLAS *et al.*, 2019).

Por outro lado, existem descrições de alguns casos em que o ARC aumenta a resistência mecânica.

Zaetang *et al.* (2016) obteve resultados de aumento de resistência mecânica com a substituição por ARC no concreto permeável. Foram reportados ganhos na resistência

a compressão e resistência a abrasão para níveis de substituição de 20% a 80% em peso. O autor conclui que essa melhora nas características, apesar do ARC ser mais “fraco” que o natural, é resultado de uma melhor ligação entre os agregados e a pasta de cimento devido à superfície porosa e áspera do ARC.

Li (2009) expõe que os concretos permeáveis têm resistência mecânica muito menor do que os concretos convencionais. Deste modo a resistência do ARC em si tem pouca influência na resistência final do concreto permeável resultante. Somado a isso, a superfície áspera com estrutura porosa do ARC pode melhorar as ligações na ZTI do concreto permeável.

Como visto, apesar da maioria das fissuras de ruptura originarem na ZTI e o uso ARC estar intimamente vinculado a dinâmica de funcionamento dessa ZTI, não é somente esses dois fatores que alteram a qualidade do concreto permeável. É bastante comprovado que a granulometria e a pasta de cimento podem alterar essa dinâmica como é visto nos tópicos seguintes.

3.2.4 Granulometria dos agregados

Os concretos permeáveis têm, preferencialmente, uma granulometria em faixas estreitas de peneiras para que após a cura da estrutura do concreto possam ficar os poros entre os agregados.

Apesar de não existir uma regra para qual faixa granulométrica utilizar, usualmente na prática é mais viável a fabricação dos concretos com a granulometria comercial disponível no mercado, pois dispensa a necessidade de etapas extras de peneiramento.

Em se tratando de granulometria, Agar-Ozbek *et al.* (2013), investiga o concreto permeável em diferentes escalas granulométricas e conclui que as propriedades dos agregados são as que tem a influência mais forte nas propriedades mecânicas do concreto poroso pois os agregados graúdos são muito efetivos em formar uma estrutura “esqueleto”. As fissuras do concreto são localizadas com base nessa estrutura “esqueleto”, que é determinada pela graduação do agregado. Quando os agregados são menores as fissuras se desenvolvem pela pasta cimentícia, já para tamanhos maiores as fissuras normalmente se dão por dentro dos grãos dos agregados.

De acordo com Wang, K. *et al.* (2006), Yang, Z. *et al.* (2008), Jain e Chouhan

(2011), Agar-Ozbek *et al.* (2013), Fu *et al.* (2014), Ćosić *et al.* (2015) e GüneyisI *et al.* (2016), de maneira geral, tem-se que: se comparado a um mesmo traço da pasta de cimento, quanto menor for o tamanho do agregado maior será a resistência mecânica e vice-versa.

A explicação para tal fato é que quanto menor é o agregado maior área de contato entre o agregado e a pasta de cimento (ALIABDO; ABD ELMOATY; FAWZY, 2018; PARK; TIA, 2004; ZHONG; WILLE, K., 2016). Uma maior área distribui melhor os esforços e conseqüentemente resiste a maiores cargas.

Yu *et al.* (2019), por outro lado, argumenta que o aumento no tamanho do agregado, contribui positivamente para a resistência a compressão, entretanto quando o tamanho do agregado é maior que 7 mm, este não tem influência significativa na resistência à compressão.

Além do tamanho do agregado e da sua faixa granulométrica, é importante dar atenção à distribuição granulométrica dentro dessa faixa, a chamada graduação do agregado.

Existem 3 cenários possíveis para a graduação: contínua (bem graduada) onde há boa distribuição de agregados de cada tamanho; descontínua, onde há alguma faixa granulométrica que não é preenchida; uniforme, onde a faixa granulométrica é tão estreita que todos os grãos são praticamente do mesmo tamanho.

Cada tipo de graduação tem suas peculiaridades e principalmente em se tratando do concreto permeável, onde os poros entre os agregados são o ponto principal, a graduação rege boa parte da porosidade.

A escolha da graduação dos agregados graúdos depende dos requisitos para o concreto pronto. Uma graduação contínua é recomendada caso haja necessidade de maior resistência mecânica, por outro lado, uma maior permeabilidade é conquistada com o uso de graduação uniforme (SANDOVAL *et al.*, 2019)

Concretos feitos com agregados de graduação uniforme têm resistência mecânica menor. Concretos com graduação mista tem resistência mecânica maior pois existe a tendência da faixa granulométrica maior com boa distribuição em aumentar a área de contato, aumentando as ligações entre a pasta de cimento e o agregado. (NEPTUNE, 2008)

De maneira a equilibrar a graduação do agregado de modo a interferir nas propriedades de resistência mecânica, opta-se pela inserção de agregados miúdos.

A adição ou substituição com agregado miúdo ou até mesmo com areia na

investida de aumentar a resistência mecânica é evidenciada por Wang, K. *et al.* (2006), Alshareedah e Nassiri (2020), Barnhouse e Srubar (2016), Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015), Giustozzi (2016) e Pramod *et al.* (2019).

A adição, entretanto, deve ocorrer de maneira moderada pois o excesso causa problemas como a perda de permeabilidade (BONICELLI; GIUSTOZZI; CRISPINO, 2015; MAGUESVARI; NARASIMHA, 2013; ZHANG, Q. *et al.*, 2020).

Para Alshareedah e Nassiri (2020), agregados miúdos podem ser adicionados ao traço de concreto permeável tipicamente variando entre 5% a 10% da massa de agregado graúdo para aprimorar a resistência mecânica e durabilidade.

O aumento na resistência mecânica é atingido pois a areia melhora o intertravamento mecânico entre os agregados vizinhos por meio do espessamento da pasta de cimento e conseqüentemente da área de contato entre os agregados (IBRAHIM *et al.*, 2020).

3.2.5 Características da pasta de cimento

Com o intuito de aprimorar a resistência mecânica do concreto permeável existe, além da intervenção na granulometria dos agregados, a alternativa de modificar a pasta de cimento, seja em sua quantidade ou qualidade. A pasta de cimento desempenha o papel de conectar os agregados e evidentemente tem forte atuação na resistência mecânica do concreto permeável.

Güneyisi *et al.* (2016) defende que para os concretos permeáveis, como uma fina camada de pasta de cimento é suficiente para cobrir o agregado e a ruptura geralmente ocorre na ZTI, uma boa maneira de aumentar a resistência mecânica é aprimorar a qualidade da pasta de cimento e sua espessura.

Para o caso de aumento da espessura de pasta, Kassem *et al.* (2016) afirma que a resistência a compressão é dominada pela quantidade de pasta de cimento disponível para formar ligações entre os agregados, as propriedades mecânicas desta pasta, porém, têm pouco efeito na resistência do concreto.

Mesmo para um aumento do volume de pasta há um limite, segundo Yu *et al.* (2019) um aumento da espessura da pasta de cimento a incrementa a resistência à compressão, entretanto quando a pasta atinge por volta de 1,15 mm a resistência se mantém estável.

Jain e Chouhan (2011) e Sonebi e Bassuoni (2013) demonstram que, no geral, o aumento do teor água/cimento aumenta a resistência mecânica dos concretos permeáveis. Entretanto, para estes últimos autores, esta tendência ocorre somente até certo valor, quando além disso, a resistência mecânica começa a cair. Para teores água/cimento pequenos a pasta de cimento tem uma superfície com aparência opaca, o que indica insuficiência de água disponível para a hidratação do cimento. Em teores água/cimento muito altos, além do entupimento dos poros pela fluidez exagerada da pasta de cimento, pode-se levar a uma pasta de cimento mais porosa, ou seja, menos resistente.

Para Paul *et al.* (2004), a relação água/cimento não é clara para os concretos permeáveis, pois, ao contrário do concreto convencional, o volume de pasta de cimento é menor do que o necessário para preencher todos os vazios.

Portanto, conclui-se que dosar uma pasta de cimento com maior qualidade leva a um aumento das resistências mecânicas, entretanto existe um limiar em que essa melhora representa pouca ou nenhuma interferência na resistência mecânica final do concreto permeável.

3.2.6 Alternativas para aumentar a resistência mecânica do concreto permeável

3.2.6.1 Sílica ativa

A sílica ativa ou microssílica é um pó ultrafino mais comumente usado como um aditivo para a produção de concretos de alta resistência. Devido às suas características químicas de reação pozolânica (reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento Portland para formar silicato de cálcio hidratado) e efeito físico de “filler” (suas partículas extremamente pequenas e esféricas preenchem os poros da pasta de cimento) há um aumento da resistência mecânica do concreto, em geral, quando utiliza-se esse aditivo (CAMPOS; KLEIN; MARQUES FILHO, 2021; CHINCHILLAS-CHINCHILLAS *et al.*, 2019)

Apesar de ter a estrutura física diferente do concreto convencional, Yang, J. e Jiang (2002), Liu *et al.* (2018) e Mann (2014) relatam um aumento da resistência mecânica com a adição ou substituição de sílica ativa no traço do concreto permeável.

Mann (2014) detalha que a maior resistência mecânica é atingida especialmente

porque há uma diminuição da porosidade na pasta de cimento próxima à superfície dos agregados.

Liu *et al.* (2018) testou a substituição do cimento em volume por sílica ativa nos níveis de 3%, 6%, 9% e 12% e os maiores valores para resistência à compressão foram encontrados quanto maiores os teores.

Para Mann (2014) os concretos aumentaram a resistência mecânica quando foram adicionados de sílica nas doses de 3% e 5%, entretanto houve queda quando adicionou-se 7%.

3.2.6.2 Fibras

Assim como no concreto convencional, as fibras são adicionadas ao concreto permeável com o propósito de aumentar sobretudo a resistência mecânica à tração pois as fibras irão atravessar as fissuras, juntando as partes do concreto.

As fibras utilizadas são geralmente fibras de polipropileno (ALIABDO; ABD ELMOATY; FAWZY, 2018; KEVERN; BIDDLE; CAO, 2015; WANG, K. *et al.*, 2006), depois as fibras de aço (HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014; TOGHROLI *et al.*, 2018). Mais raramente, também existem estudos com fibras de celulose (GANESH *et al.*, 2018), sulfeto de polifenileno e fibra de vidro (HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014).

Os comprimentos também são variados podendo variar de 2,1 mm para as fibras menores como as de celulose, e de 12 a 56 mm para fibras de polipropileno que usualmente são mais longas.

No geral foi constatado que o uso de fibras tem influência insignificante para a resistência à compressão (ALIABDO; ABD ELMOATY; FAWZY, 2018; REHDER; BANH; NEITHALATH, 2014)

Correlações positivas foram encontrados para a resistência à tração verificados pelos ensaios de flexão e tração por compressão diametral (HESAMI; AHMADI; NEMATZADEH, 2014; PILS *et al.*, 2019; WANG, K. *et al.*, 2006)

De acordo com Rehder, Banh e Neithalath (2014), as fibras irão atrasar a abertura, propagação e coalescência de algumas fissuras, deste modo acomodando uma abertura maior de fissura antes da falha total.

Foi mostrado por Rehder, Banh e Neithalath (2014) e Pils *et al.* (2019) que para

algumas condições de traço e porosidade a adição de fibras irá diminuir a resistência a compressão, entretanto os benefícios do aumento na tração ainda sim deixa o uso delas atrativo.

Assim como qualquer aditivo as fibras requerem uma dosagem precisa e variam de acordo com o tipo de fibra, para as fibras de polipropileno por exemplo, Rehder, Banh e Neithalath (2014) não recomendam o teor maior que 1,0% (em volume) pois o excesso de fibras pode gerar dificuldades em homogeneizar a mistura e aglomeração de fibras, o que é maléfico para o concreto permeável.

3.2.7 Metodologias de dosagem

Visando atingir concretos permeáveis que combinam resistência mecânica, viabilidade técnica e financeira, durabilidade e funcionalidade alguns autores desenvolveram metodologias próprias de dosagem.

O ponto chave para o sucesso de um traço de concreto permeável em termos de durabilidade, resistência mecânica e permeabilidade é a continuidade da pasta de cimento com os agregados graúdos incorporados de tal maneira que se mantenham poros contínuos (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2008).

Essa mesma racionalidade é utilizada por Nguyen *et al.* (2014) em sua metodologia cuja quarta hipótese defende que a composição adequada da pasta de cimento garante que os agregados fiquem cobertos com pasta para ter resistência suficiente e que os espaços entre os agregados se mantenham vazios de modo que a água consiga fluir por dentro a matriz.

A metodologia do American Concrete Institute “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) também segue a mesma linha de pensamento visto que esta busca estabelecer uma quantidade mínima de pasta necessária a ligar os agregados enquanto mantém os vazios.

Apesar dos esforços ainda não há uma metodologia definitiva em que a partir de dados de entrada obtêm-se um quantitativo assertivo de materiais que irão resultar em um produto final com as qualidades pretendidas.

Procedimentos de tentativa e erro são recorrentes na maioria dos métodos em determinadas etapas fazendo-se necessário a confecção de lotes de teste para a verificação ou ensaios extras para obtenção de algum fator.

Li (2009) sugere uma metodologia direcionada à elaboração de concreto permeável com agregado reciclado. O teor água cimento, todavia, é estimado e deve ser modificado empiricamente caso os corpos de prova não atinjam a resistência mecânica adequada. Identicamente, a granulometria também pode ser modificada caso não haja permeabilidade adequada. Desta maneira a metodologia fica exposta aos inconvenientes dos procedimentos de tentativa e erro.

O informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) relata que a sua metodologia apresentada fornece uma base para a experimentação e que os resultados das tentativas podem ter que ser modificados para alcançar os resultados desejados.

Outro fato frequente é a especificidade dos métodos para um determinado tipo de agregado ou faixa granulométrica. Ainda que existam boas correlações entre variáveis e respostas, estas só são úteis para condições específicas pré-estabelecidas. Como é mostrado em Nguyen *et al.* (2014), Kassem *et al.* (2016), e Chandrappa e Biligiri (2018).

O trabalho de Chandrappa e Biligiri (2018) propõe equações e modelos matemáticos para predições das propriedades de densidade, resistência a compressão, permeabilidade e porosidade baseado no teor água cimento, na granulometria, no coeficiente de uniformidade e na relação cimento:agregado. Essas equações apesar de apresentarem boa correlação e serem úteis para a predição de algumas propriedades em certa faixa de variáveis, foram desenvolvidas somente para o tipo de agregado *crushed-calcareous* necessitando posterior validação para outros tipos de agregado.

Outro exemplos são os trabalhos de Kassem *et al.* (2016) e Nguyen *et al.* (2014) em que as dosagens dependem de testes laboratoriais envolvendo o agregado e a pasta de cimento. Ambas as metodologias dependem da mensuração da pasta de cimento necessária para envolver o agregado e fazem isto através de métodos similares. A questão é que são dependentes da viscosidade da argamassa e da granulometria do agregado, fazendo assim surgir uma especificidade para cada material e condição testada.

3.2.8 Permeabilidade *versus* resistência mecânica

A permeabilidade é sem dúvida é a característica mais importante do concreto permeável, é na maioria das vezes a razão pela qual se opta por sua utilização.

A permeabilidade é a propriedade do fluxo de líquido através dos vazios

acessíveis (porosidade efetiva) e de acordo com Čosić *et al.* (2015) é influenciada pela distribuição e interconectividade dos poros.

O concreto permeável tem dois tipos de porosidade. A primeira é a porosidade total, ou seja, a fração do volume de todos os vazios dividida pelo volume total de uma amostra e a segunda é a porosidade efetiva, que é a fração de volume de todos os vazios acessíveis dividido pelo volume total de uma amostra (MARTIN; PUTMAN, 2016).

Apesar de terem conceitos distintos, a permeabilidade e a porosidade estão estreitamente relacionadas (CUI *et al.*, 2017; SANDOVAL *et al.*, 2019)

A alta porosidade do concreto permeável faz com que o mesmo tenha resistência mecânica baixa se comparado ao concreto convencional, limitando sua empregabilidade em funções estruturais.

Sendo assim, infere-se que as propriedades de permeabilidade e resistência mecânica são inversamente proporcionais visto que um concreto muito permeável tende a ser menos resistente e um concreto menos permeável tende a ser mais resistente (CUI *et al.*, 2017).

Dado que o concreto apresenta porosidade fortemente influenciada pela sua composição granulométrica e quantidade de pasta, alterações nesses fatores influenciam tanto a resistência mecânica quanto a permeabilidade.

Na hipótese de alteração de granulometria, Aliabdo, Abd Elmoaty e Fawzy (2018), Yang, Z. *et al.* (2008) mostram que um aumento no tamanho do agregado aumenta a permeabilidade do concreto permeável.

Fu *et al.* (2014) evidencia que sob condições idênticas de porosidade, amostras com partículas menores têm menores volumes de poros conectados, produzindo caminhos com mais tortuosidade para o fluxo de água. Amostras com partículas maiores tem maiores áreas de seção de vazios e caminhos mais retilíneos. Deste modo, a velocidade de percolação da água e conseqüentemente a permeabilidade se diferenciam ainda quando se comparam mesmos valores de porosidade.

Em situações em que se aumenta a quantidade de pasta de cimento. É evidente que o aumento de volume da pasta de cimento diminui o tamanho e quantidade de poros, dificultando a permeabilidade. Tal fato é comprovado por Zhong e Wille, K. (2016).

Quando se opta por modificar a qualidade da pasta de cimento através de alteração no teor água cimento tem-se o seguinte efeito: O aumento do teor água/cimento produz volume de pasta de cimento em excesso do que é necessário para encapsular o agregado. O excedente de pasta colmata a estrutura aberta de poros aumentando a

resistência à compressão ao mesmo passo em que reduz o índice de vazios (SONEBI; BASSUONI, 2013).

Como visto anteriormente um dos grandes desafios do concreto permeável é fazê-lo atingir altas resistências mecânicas. Isso o tornaria praticável para instalação em locais de grandes carregamentos e no geral aumentaria sua gama de aplicações.

À vista disso pode-se afirmar que o conflito da permeabilidade versus a resistência mecânica é o grande guia para a elaboração de um concreto permeável de boa qualidade.

3.3 CONCLUSÃO

Como discutido durante o artigo, a resistência mecânica do concreto permeável é função de um conjunto de fatores que se inter-relacionam. A alteração de qualquer um desses fatores interfere na dinâmica das relações e inevitavelmente culmina em variações na resistência mecânica.

Devido a sua natureza porosa e leve, o concreto permeável tem dificuldade em atingir resistências mecânicas elevadas, sendo restrito seu uso em função estrutural. Mesmo para funções não estruturais há um grande desafio em balancear a permeabilidade e a resistência mecânica através da manipulação do traço e colocação de aditivos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas impõe um valor mínimo de permeabilidade para que o concreto seja considerado permeável, este valor é de 10^{-3} m/s. Já para a resistência mecânica os valores dependem da solicitação e da metodologia de ensaio de resistência conforme é descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistências e espessuras mínimas para pavimentos permeáveis

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

^adeterminação da resistência à compressão, conforme ABNT NBR 9781

^bdeterminação da resistência à flexão, conforme ABNT NBR 15805

^cdeterminação da resistência à flexão, conforme ABNT NBR 12142

Fonte: ABNT (2015).

O grande desafio é manter as propriedades do concreto permeável com agregado

reciclado de concreto próximas ou iguais às quando se usa o agregado natural e que ainda atenda às especificações da NBR 16416 (ABNT, 2015).

Comumente a alternativa mais simples e viável encontrada para a fabricação de concretos permeáveis com agregado reciclado com boa resistência mecânica é a modificação, com experimentação empírica, de diferentes teores de água/cimento, quantidades de agregado, granulometria ou até mesmo adições de novos componentes como fibras ou sílica ativa.

Estudos mais aprofundado na área da ciência dos materiais principalmente relacionando-os com as condições regionais, seja elas ambientais (precipitações, temperatura, sólidos suspensos no ar) e de disponibilidade de materiais (tipos de rocha, cimento, aditivos encontrados no mercado) serão fundamentais para o desenvolvimento de concretos permeáveis com agregado reciclado mais resistentes e econômicos.

3.4 REFERÊNCIAS

AAMER RAFIQUE BHUTTA, M. *et al.* Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243-1248, 2013. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.06.022. Acesso em: out. 2020.

AGAR-OZBEK, A. S. *et al.* Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480-490, 2013. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.040. Acesso em: set. 2020.

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**, v. 193, p. 105-127, 2018. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182. Acesso em: set. 2020.

ALSHAREEDAH, O.; NASSIRI, S. Pervious Concrete Mixture Optimzation, Physical, and Mechanical Properties and Pavement Design: A Review. **Journal of Cleaner Production**, p. 39, 2020. Disponível em: DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125095. Acesso em: set. 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15116:2004 Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos**, 12p., 2004. Primeira edição 31.08.2004, Válida a partir de 30.09.2004. Cancelada em 24/06/2021, substituída por: ABNT NBR 15116:2021. Disponível em: disciplinas.usp.br/pluginfile.php/5011100/mod_resource/content/0/NBR15116%20-%20Arquivo%20para%20impressão.pdf. Acesso em: out. 2020.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 16416:2015 - Pavimentos Permeáveis de Concreto - Requisitos e procedimentos** Rio de Janeiro, Primeira edição 06.08.2015, validade a partir de 06.09.2015, 25p., 2015. Disponível em: <https://pdfcookie.com/documents/nbr-16416-2015-pavimentos-permeaveis-de-concreto-requisitos-e-procedimentos-x20g5w86k9l3>. Acesso em: nov. 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R: Report on Pervious Concrete** **ACI Committee 522**. [s.l.: s.n.]. 2010. Disponível em: <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/522R-10web.pdf>. Acesso em: nov. 2020.

BARNHOUSE, P. W.; SRUBAR, W. V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 89-97, 2016. journal ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.014. Acesso em: nov. 2020.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.012>. Acesso em: out. 2020.

CAMPOS, H. F.; KLEIN, N. S.; MARQUES FILHO. Comparison of the Silica Fume Content for High-Strength Concrete Production : Chemical Analysis of the Pozzolanic Reaction and Physical Behavior by Particle Packing. v. 23, n. 5, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2020-0285>. Acesso em: nov. 2020.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: A hydrodynamic approach. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 627-637, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.035>. Acesso em: nov. 2020.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Methodology to develop pervious concrete mixtures for target properties emphasizing the selection of mixture variables. **Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements**, v. 144, n. 3, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JPEODX.0000061>. Acesso em: set. 2020.

CHINCHILLAS-CHINCHILLAS, M. J. *et al.* SEM image analysis in permeable recycled concretes with silica fume. A quantitative comparison of porosity and the ITZ. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2201, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12132201>. Acesso em: out. 2020.

CHINDAPRASIRT, P. *et al.* Cement paste characteristics and porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 894-901, 2008. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.007. Acesso em: nov. 2020

ĆOSIĆ, K. *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>. Acesso em: out. 2020.

CUI, X. *et al.* Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 1-9, 2017. Disponível em: DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002058. Acesso em: out. 2020.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007. Disponível em: DOI:10.1016/j.cemconres.2007.02.002. Acesso em: out. 2020.

FU, T. C. *et al.* The influence of aggregate size and binder material on the properties of pervious concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, Article ID 963971, v. 2014, p. 17, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/963971>. Acesso em: set. 2020.

GANESH, K. M. *et al.* Study of mechanical properties of pervious concrete as a pavement material by partial replacement of Ggbs in cement with addition of cellulose fibers. **International Journal of Engineering and Technology(UAE)**, v. 7, n. 3, p. 219-223, 2018. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=Lpz70mMAAAAJ&citation_for_view=Lpz70mMAAAAJ:d1gkVwhDpl0C. Acesso em: out. 2020.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, v. 111, n. 11, p. 502-512, 2016. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.136. Acesso em: out. 2020.

GÜNEYISI, E. *et al.* Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, journal ISSN:1359-5997, journal e-ISSN:1871-6873, v. 49, n. 1-2, p. 521-536, 2016. Disponível em: DOI:10.1617/s11527-014-0517-y. Acesso em: out. 2020.

HESAMI, S.; AHMADI, S.; NEMATZADEH, M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 680-691, 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.070. Acesso em: out. 2020.

IBRAHIM, H. A. *et al.* Hydraulic and strength characteristics of pervious concrete containing a high volume of construction and demolition waste as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 253, 119251p., 2020. Disponível em: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=7mT8WxEAAAJ&citation_for_view=7mT8WxEAAAJ:Y0pCki6q_DkC. Acesso em: out. 2020.

JAIN, A. K.; CHOUHAN, J. S. Effect of Shape of Aggregate on Compressive Strength and Permeability Properties of Pervious Concrete. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies**, v. 1, n. 1, p. 120-126, 2011. Disponível em: <https://www.technicaljournalsonline.com/ijaers/VOL%20I/IJAERS%20VOL%20I%20ISSUE%20I%20%20OCTOBER%20DECEMBER%202011/23%20IJAERS.pdf>. Acesso em: set. 2020.

KASSEM, H. A. *et al.* Method to investigate mix design parameters of pervious concrete mixtures. **Transportation Research Record**, 2577p., n. 1, p. 43-52, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2577-06>. Acesso em: out. 2020.

KEVERN, J. T.; BIDDLE, D.; CAO, Q. Effects of Macrosynthetic Fibers on Pervious Concrete Properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 9, p. 06014031, 2015. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0001213>. Acesso em: out. 2020.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. [s.l:s.n.]. 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/21839>. Acesso em: out. 2020.

LI, J. Mix design of pervious recycled concrete. GeoHunan International Conference: Challenges and Recent Advances in Pavement Technologies and Transportation Geotechnics, Changsha Hunan, China. **Anais...2009**. Disponível em: <http://worldcat.org/isbn/9780784410479>. Acesso em: out. 2020.

LIU, H. *et al.* Laboratory evaluation of eco-friendly pervious concrete pavement material containing silica fume. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9010073>. Acesso em: out. 2020.

MAGUESVARI, M. U.; NARASIMHA, V. L. Studies on Characterization of Pervious Concrete for Pavement Applications. 2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd CTRG). **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 198-207, 2013. Disponível em: doi: 10.1016/j.sbspro.2013.11.112. Acesso em: set. 2020.

MANN, D. **The effects of utilizing silica fume in portland cement pervious concrete**. 20p., 2014. A Thesis in Civil Engineering (Master of Science Degree), ProQuest Dissertations And Theses; Thesis (M.S.)--University of Missouri - Kansas City, 2014.; Publication Number: AAT 1562059; ISBN: 9781321083996; Source: Masters Abstracts International, Vol. 53-04, 98 p. Bibcode: 2014PhDT.....140M. Disponível: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014PhDT.....140M/abstract>. Acesso em: nov. 2020.

MARTIN, W. D.; PUTMAN, B. J. Comparison of methods for measuring porosity of porous paving mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 299-305, 2016. journal ISSN:0950-0618. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.038. Acesso em: nov. 2020.

NEPTUNE, A. **Investigation of the Effects of Aggregate Properties and Gradation on Pervious Concrete Mixtures**. (Master of Science Civil Engineering), Clemson University, Theses at TigerPrints. All Theses. 460, 178p., Clemson, South Carolina, U.S.A. 2008. Disponível em: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/460. Acesso em: out. 2020.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, 2019, p. 271-282, 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088. Acesso em: out. 2020.

OLIVEIRA, B. C. **Pavimento permeável incorporado com agregado reciclado de concreto**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade), Instituto Federal Goiano, 2019.

PARK, S. B.; TIA, M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 177-184, 2004. ISSN: 0008-8846. doi:10.1016/S0008-8846(03)00223-0. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0008884>. Acesso em: set. 2020.

PILS, S. E. *et al.* Pervious concrete: study of dosage and polypropylene fibers addiction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 1, p. 101-121, 10p., 2019. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000100009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/mzKthLNkPsFJtQZHb7RsLJc/?lang=en&format=pdf>. Acesso em: set. 2020.

PRAMOD, S. S. *et al.* Experimental investigation on effect of sand content in pervious concrete. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 5, p. 6027-6030, 4p. 2019. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5822.pdf>. Acesso em: out. 2020.

REHDER, B.; BANH, K.; NEITHALATH, N. Fracture behavior of pervious concretes: The effects of pore structure and fibers. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 118, p. 1-16, 2014. Disponível em: DOI:10.1016/j.engfracmech.2014.01.015. Acesso em: out. 2020.

SANDOVAL, G. F. B. *et al.* Correlation between permeability and porosity for pervious concrete (PC). **DYNA** (Colombia), v. 86, n. 209, p. 151-159, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v86n209/0012-7353-dyna-86-209-151.pdf>. Acesso em: set. 2020.

SCRIVENER, K. L.; CRUMBIE, A. K.; LAUGESSEN, P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. **Interface Science**, v. 12, n. 4, p. 411-421, 2004. Disponível em: DOI:10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4CCorpus ID: 135668900. Acesso em: nov. 2020.

SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147-154, 2013, journal ISSN :0950-0618. Disponível em: DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044. Acesso em: out. 2020.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272-292, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>. Acesso em: out. 2020.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016. Disponível em: DOI:10.1590/S1983-41952016000100006. Acesso em: set. 2020.

TENNIS, PAUL D.; LEMING, MICHAEL L.; AKERS, DAVID J. **Pervious Concrete Pavements**. [s.l.: s.n.]. 28p., 2004. PCI-Portland Cement Association, NRMCA-Portland Cement Association Concrete National Association ReadyMixed. ISBN 0-89312-242-4. Print History: First Printing 2004; Second Printing (rev.) 2004; Third Printing 2006; Fourth Printing (rev.) 2007; Fifth Printing 2008. 36p. URL:

<http://worldcat.org/isbn/0893122424>. Disponível em: https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete-applications/eb302-03.pdf?sfvrsn=ed4afdbf_2. Acesso em: nov. 2020.

TOGHROLI, A. *et al.* A review on pavement porous concrete using recycled waste materials. **Smart Structures and Systems**, v. 22, n. 4, p. 433-440, 2018. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2018.22.4.433>. Acesso em: set. 2020.

WANG, K. *et al.* Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete. NRMCA Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, Nashville, TN. **Anais...**2006. Disponível em: https://nanopdf.com/download/development-of-mix-proportion-for-functional-and-durable-pervious_pdf. Acesso em: set. 2020.

XIE, C. *et al.* Study on failure mechanism of porous concrete based on acoustic emission and discrete element method. **Construction and Building Materials**, v. 235, n.3, p. 117409, 2020. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117409. Acesso em: nov. 2020.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00088846>. Acesso em: set. 2020.

YANG, X. *et al.* Performance and ITZ of pervious concrete modified by vinyl acetate and ethylene copolymer dispersible powder. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117532, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117532>. Acesso em: set. 2020.

YANG, Z. *et al.* The aggregate gradation for the porous concrete pervious road base material. **Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition**, v. 23, n. 3, p. 391-394, 2008. Disponível em: DOI:10.1007/s11595-007-3391-4. Acesso em: out. 2020.

YAP, S. P. *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 155-165, 2018. Disponível em: DOI:10.1016/j.jclepro.2018.01.205. Acesso em: out. 2020.

YU, F. *et al.* Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 463-475, 2019. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140. Acesso em: set. 2020.

ZAETANG, Y. *et al.* Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15-21, 2016. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060. Acesso em: set. 2020.

ZHANG, Q. *et al.* Mix design for recycled aggregate pervious concrete based on response surface methodology. **Construction and Building Materials**, v. 259, 2020. Disponível em: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119776 . Acesso em: set. 2020.

ZHANG, Z. *et al.* Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112-118, 2017. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203. Acesso em: out. 2020.

ZHONG, R.; WILLE, K. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 177-187, 2016. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.051. Acesso em: set. 2020.

ZHONG, R.; WILLE, K. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 132-141, 2018. Disponível em: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175. Acesso em: set. 2020.

4 CAPÍTULO II

Análise multiparamétrica de concreto permeável com agregado reciclado

Resumo

Uma boa dosagem de concreto permeável norteia-se fundamentalmente na permeabilidade e resistência mecânica, apesar de serem características divergentes. Este trabalho visou a análise e elaboração de traços de concreto permeável com agregado reciclado de forma a otimizar prioritariamente essas duas características. Pelo fato do agregado reciclado de concreto (ARC) ter características de absorção e massa específica diferente dos agregados naturais, foi necessário primeiramente obter teores água/cimento que eram possíveis atingir trabalhabilidade adequada, isto foi feito através de um ensaio preliminar de trabalhabilidade em que constatado estes teores sendo de 0,32 a 0,36. Por meio de revisão bibliográfica foi também estabelecido relações cimento:agregado de 1:3,5 a 1:5,5. Desta maneira delineou-se um experimento em 3 níveis (máximo, central e mínimo), dessas 2 variáveis totalizando 9 traços e testou-se as resistências mecânicas e propriedades hidráulicas, além disso foi verificado se a metodologia de dosagem do American Concrete Institute (ACI) era apropriada para dosagem de traço nas condições do estudo. Conclui-se que os teores água/cimento e relações cimento:agregado testados se mostraram adequados para abranger todas as trabalhabilidades praticadas. A permeabilidade não foi um fator limitante pois sempre esteve acima do mínimo estabelecido por norma para ser considerada um concreto permeável. Todos os traços atingiram a média de no mínimo 1,0 MPa de resistência a tração na flexão, sendo possível a utilização como concreto permeável moldado no local para Tráfego de pedestres. Alguns traços atingiram médias de maiores que 2,0 MPa sendo permitida a utilização para

tráfego leve de acordo com norma NBR 16416. Um maior volume de pasta de cimento, independentemente de seu teor w/c, levou às maiores resistências mecânicas. O uso do agregado ARC foi o principal fator limitante para se atingir resistências mecânicas maiores. Por meio de análise estatística foram estabelecidas fortes relações positivas entre a quantidade de pasta de cimento e as resistências mecânicas e negativas para permeabilidade e volume de vazios.

Palavras-chave: Agregado reciclado, Análise multiparamétrica, Concreto permeável

4 CHAPTER II

Multiparametric Analysis of Pervious Concrete with Recycled Aggregate

Abstract

A proper pervious concrete grade is fundamentally based on permeability and mechanical strength, despite being features on opposite ends of the spectrum. This paper aimed to analyze and define pervious concrete mix ratio with recycled aggregate, focusing on optimizing these two characteristics. It was necessary to obtain water/cement (w/c) content first, making it possible to have a proper workability, due to the absorption characteristics of recycled concrete aggregate (RCA) and specific mass that is different from natural aggregates (NA); it was done through a preliminary workability test in which contents ranging was found from 0.32 to 0.36. On the basis of literature review, cement: aggregate ratios 1:3.5 to 1:5.5 had also been established. Thus, an experiment was carried out in three mix proportion levels (maximum, central, and minimum) from these two variables, in a total of nine mix ratios. The mechanical strength and hydraulic properties were tested. In addition, it was verified if the concrete grade methodology of the American Concrete Institute (ACI) was appropriate for the concrete mix ratio under these study conditions. It has been concluded that the water/cement content and cement: aggregate ratios used were appropriated to cover all workability tested. Permeability was not a limiting factor because all batches had always been above the minimum standard to be considered a pervious concrete, according to Brazilian regulations. All mix ratios had reached an average of at least a bending tensile strength of 1.0 MPa, making it possible

to be used as pervious concrete cast on site for Pedestrian Walkways. Some mix ratios had reached averages greater than 2.0 MPa which can be used in lightly trafficked pavements, according to ABNT/NBR (Brazilian Norms acronym) 16416. A larger volume of cement paste had resulted in higher mechanical strengths, regardless of its w/c content. The use of RCA aggregate had been the main limiting factor to reach higher mechanical strengths. Through statistical analysis, strong positive correlations between the amount of cement paste and mechanical strength and strong negative correlations between permeability and void content had been found.

Keywords: Multiparametric analysis, Pervious concrete, Recycled aggregate

4.1 INTRODUÇÃO

A fabricação de um concreto permeável com boa resistência mecânica e permeabilidade adequada é um grande desafio. Essas propriedades são, via de regra, antagônicas (CUI *et al.*, 2017) e o balanço entre elas é o principal aspecto que guia a dosagem desse tipo de concreto. A utilização do agregado reciclado de concreto, tem seu apelo ambiental (LEITE, 2001), entretanto soma ainda mais dificuldade à essa dosagem pois os agregados reciclados apresentam propriedades distintas dos agregados naturais como massa unitária, massa específica e teor de absorção (ALIABDO; ABD ELMOATY; FAWZY, 2018; OLIVEIRA, 2019; GÜNEYISI *et al.*, 2016; TAVARES; KAZMIERCZAK, 2016; YAP *et al.*, 2018). Essas propriedades, no geral, acarretam mudanças que diminuem a resistência mecânica do concreto permeável (CHINCHILLAS-CHINCHILLAS *et al.*, 2019; ZHANG, Z. *et al.*, 2017).

Há diversos fatores que influenciam na dosagem e conseqüentemente nas características finais do concreto endurecido. Tamanho de agregado, faixa granulométrica, teor água/cimento, relação cimento:agregado, uso de aditivos, adição de fibras, compactação, dentre outros. Há diversos trabalhos que investigam a variação desses fatores isoladamente, entretanto a associação entre eles deve ser também levada em conta.

Este trabalho investiga concretos permeáveis com agregado reciclado variando concomitantemente as componentes do traço que são mais viáveis de serem modificadas, o teor água cimento (w/c) e a relação cimento:agregado (cim:agreg).

Para iniciar o trabalho foi feita uma revisão bibliográfica objetivando apresentar

os traços usuais do concreto permeável e detalhar todos os fatores que podem levar a uma alteração no traço, com fundamento nisso tem-se as indicações iniciais das dosagens componente. A revisão apresentada na Tabela 3 levou em conta o tipo de agregado, granulometria, utilização de fibras ou aditivos, adição de areia e por fim as relações elementares de teor água/cimento e cimento:agregado.

Tabela 3 - Traços usuais para concreto permeável

Referência	Tipo de agregado	Aditivos	w/c (massa)	cimento: agregado (massa)	cimento Kg/m ³	agregado Kg/m ³	dimensões/especificações dos agregados	
							natural	reciclado
Park e Tia (2004)	natural	cinza volante; redutor de água; sílica ativa	0,25 - 0,31	1:3,18 - 1:6,72	217 - 454	1444 - 1458	5 - 10 mm rocha britada; 10 - 20 mm rocha britada	-
PauL <i>et al.</i> (2004)	natural	-	0,27 - 0,34	1:4 - 1:4,5	270 - 415	1190 - 1480	n° 67, n°8, n° 89 ^a	-
Wang, K. <i>et al.</i> (2006)	natural	areia; látex; fibra; incorporador de ar; redutor de água	0,22 - 0,27	1:4,38 - 1:4,81	287,74 - 355,97	1483,19 - 1601,86	9 - 12,5 mm rocha calcária; 9 - 12,5 mm cascalho de rio; 4,75 - 9 mm cascalho de rio	-
Mahboub <i>et al.</i> (2009)	natural	estabilizador de hidratação	0,25	1:4,26	355	1513	rocha calcária n° 89 ^a	-
Kevern, Schaefer e Wang, K. (2011)	natural	fibra; redutor de água; incorporador de ar; estabilizador de hidratação; modificador de viscosidade; latex; cinza volante; escória; areia	0,278 - 0,333	1:3,62 - 1:4,32	340 - 380	1380 - 1571	n° 4 ^a com 18% (massa) passante na peneira 4,75 mm	-
Zheng, Chen e Wang, B. (2012)	natural	-	0,33 - 0,42	1:8 - 1: 11	151,6 - 222,7	1668 - 1781,6	2,5 - 25 mm rocha calcária	-
Sonebi e Bassuoni (2013)	natural	superplastificante	0,28 - 0,40	1:2,89 - 1:4	350 - 415	1200 - 1400	rocha basáltica de tamanho único 20 mm	-
Ćosić <i>et al.</i> (2015)	natural; reciclado	-	0,33	1:6,16 - 1:5,35	300	1605,3 - 1848	4 - 16 mm dolomita	4 - 16 mm escória siderúrgica
Vázquez-Rivera <i>et al.</i> (2015)	natural	cinza volante; nanopartículas de óxido de ferro	0,34 - 0,40	1:4,0	-	-	4,75 - 9,5 mm rocha calcária	-
Güneyisi <i>et al.</i> (2016)	natural; reciclado	-	0,27 - 0,32	1:3,70 - 1:5,75	270 - 420	1554	9,5 - 12,5 mm	9,5 - 12,5 mm concreto britado
Tavares e Kazmierczak (2016)	natural; reciclado	fibras	0,3 - 0,41	1:2,39 - 1:4,84	336 - 539	1289 - 1628	19 mm ^b rocha basáltica	25 mm ^b concreto britado
Zhang, Z. <i>et al.</i> (2017)	natural; reciclado	redutor de água; cinza volante	0,337	1:4,34	350	1520	rocha britada	5 - 10 mm concreto e tijolo cerâmico britados
Aliabdo, Abd Elmoaty e Fawzy (2018)	natural; reciclado	borracha (particulada e fibra); fibra polipropileno; sílica ativa; látex	0,3	1:4,08	350	1430	9,5 - 12,5 mm rocha calcária; 19 - 25 mm rocha calcária	9,5 - 12,5 mm concreto britado; 19 - 25 mm concreto britado
Yap <i>et al.</i> (2018)	natural; reciclado	-	0,348	1:3,62 - 1:4,13	359	1300 - 1484	4,5 - 9,0 mm granito	4,5 - 9,5 mm concreto britado
Oliveira (2019)	natural; reciclado	aditivo redutor de água	0,3	1:4	362	1448	12,5 mm ^b rocha basáltica	12,5 mm ^b concreto britado

^aClassificação de acordo com a norma estadunidense C33/C33M: “Standard Specification for Concrete Aggregates” de 2018 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018)

^bDimensão máxima do agregado

Fonte: O autor (2021).

4.2 OBJETIVOS

O *Objetivo geral* deste estudo é dosar um traço de concreto permeável com agregado reciclado visando a otimização da resistência mecânica e permeabilidade.

Constituem *objetivos específicos*:

- a) analisar as propriedades físicas granulometria, massa unitária, massa específica e teor de absorção dos agregados reciclados;
- b) variar 2 parâmetros do traço básico do concreto permeável: teor água/cimento (massa) e relação cimento:agregado (massa) em 3 níveis cada e combinando-as, totalizando 9 traços para experimentação;
- c) realizar os testes de resistência a compressão, resistência a tração na flexão, permeabilidade e percentual de vazios;
- d) validar o uso da metodologia de dosagem proposto pela “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” aplicado com agregado reciclado de concreto;
- e) avaliar a influência e verificar correlações entre cada parâmetro variado e as propriedades analisadas através de superfícies de respostas; e
- f) otimizar o traço em relação às propriedades previamente testadas.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

4.3.1 Materiais

O objeto de estudo constitui em uma mistura determinada de três componentes: cimento Portland, agregado reciclado e água.

O cimento utilizado em todos os traços foi o Cimento Portland CPV de alta resistência inicial (ARI) da marca Ciplan. De acordo com as informações da Ficha de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) o cimento apresenta massa específica absoluta de 2,8 a 3,2 g/cm³, sendo adotado 3,0 g/cm³ para o estudo.

O agregado reciclado de concreto (ARC) foi obtido pela moagem com triturador de mandíbulas de corpos de prova utilizados em ensaios de resistência à compressão nas com resistências características de 20, 25 e 30 MPa de uma construtora na cidade de Rio Verde – GO (Figura 1). Os corpos de provas foram submetidos à um britador de mandíbula da Universidade de Rio Verde (UNIRV) (Figura 2) e depois às peneirados para a seleção dentro de um intervalo de granulometria de 3,35 a 19,0 mm (Figura 3). O agregado foi então armazenado em tambores plásticos de 100 L (Figura 4).



Figura 1 - Depósito de corpos de prova em construtora de Rio Verde – GO
Fonte: O autor (2021)



Figura 2 - Trituração no britador de mandíbula
Fonte: O autor (2021).



Figura 3 - Processo de peneiramento dos agregados entre as peneiras 3,35 e 19,00 mm
Fonte: O autor (2021).



Figura 4 - Armazenagem dos agregados em tambor plástico
Fonte: O autor (2021).

4.3.2 Métodos

4.3.2.1 Ensaios com o agregado

4.3.2.1.1 Segregação

Devido ao fato de o agregado sofrer bastante segregação, foram tomadas precauções para diminuir esse efeito nos experimentos.

Sempre anterior a todos os ensaios o agregado foi despejado sobre uma lona e feito um processo de mistura de modo a tomar uma amostra mais homogênea e diminuir o efeito da segregação. Este procedimento é mostrado na Figura 5.

Evitar a segregação é uma recomendação da NBR NM 26 Agregados – Amostragem de 2001 (ABNT, 2001).



Figura 5 - Processo de mistura do agregado que estava segregado antes dos ensaios
Fonte: O autor (2021).

4.3.2.1.2 *Ensaio de granulometria*

O ensaio de granulometria foi feito para verificar a viabilidade da utilização da metodologia de dosagem do capítulo do capítulo 6 - “Pervious Concrete Mixture Proportioning” do informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010). Essa metodologia só pode ser aplicada a certa faixa granulométrica (Tabela 12) e é possível a estimativa de percentual de vazios antes mesmo da confecção dos corpos de prova.

O Ensaio de granulometria foi feito de acordo com a NBR 248:2003 (ABNT, 2003) para obtenção da curva granulométrica do percentual de passantes em massa e seguiu os seguintes passos:

- a) homogeneizou-se o agregado e tomou-se 4 amostras de aproximadamente 6 quilos;
- b) secou-se as amostras à $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h;
- c) de cada amostra foi tomada uma massa de 500 gramas e colocou na coluna de peneiramento composta pelas malhas de abertura 25,0; 19,0; 12,5; 9,5; 4,75; 2,36; 1,18 e fundo;
- d) ligou-se o agitador por 5 min; e
- e) tirou-se a massa retida em cada peneira e pesou em balança de precisão.

4.3.2.1.3 *Ensaio de massa unitária*

O ensaio de Massa Unitária foi realizado nos conformes da NBR NM 45 (ABNT, 2006) e seguiu os seguintes passos:

- a) definiu-se um recipiente com massa e volume fixo (V_b) e homogeneizou-se o agregado recém despejado do tambor;
- b) colocou-se o agregado em um volume de aproximadamente 1/3 do volume do recipiente;
- c) com uma haste metálica, foram dados 25 golpes no agregado distribuídos pela seção;
- d) repetiu-se o procedimento (2) e (3) mais 2 vezes de modo a encher totalmente o recipiente até aborda superior;
- e) com a haste metálica, rasou-se a superfície até ficar nivelada com as bordas;

- f) pesou-se a massa do balde + agregado e subtraiu-se a massa do balde de modo a ficar somente a massa do agregado (M_{arc}); e
- g) foram tomadas 6 repetições e então calculou-se a média.
- A Massa Unitária (ρ_{ap}), foi determinada através da Equação (1):

$$\rho_{ap} = \frac{M_{arc}}{V_b} \quad (1)$$

em que:

ρ_{ap} = massa unitária (kg/m³)

M_{arc} = massa do agregado (kg)

V_b = volume do recipiente (m³)

4.3.2.1.4 Ensaio de massa específica e teor de absorção

Os ensaios de determinação da Massa Específica do agregado seco (d) e Teor de Absorção (A) foram realizados de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009) e seguiu-se os seguintes procedimentos:

- a) após a homogeneização da amostra, tomou-se uma quantidade de aproximadamente 4 quilogramas de agregado graúdo;
- b) em um recipiente, enxaguou-se os agregados em água de modo a retirar todo o material pulverulento;
- c) secou-se a amostra à 105 °C +/- 5 °C por 24 h;
- d) pesou-se em balança de precisão a massa de 4,00 quilogramas (M);
- e) submergiu-se o agregado em água a temperatura ambiente por 24 h;
- f) colocou-se o agregado em um cesto aramado dentro da água e determinou-se a massa do agregado submerso (M_a);
- g) retirou-se a amostra da água, espalhou-a uniformemente sobre um pano absorvente e secou-a de modo que toda a água visível foi eliminada;
- h) pesou-se a massa do agregado saturado superfície seca (M_s); e
- i) todos os procedimentos foram repetidos 3 vezes.

A Massa Específica do agregado seco (d) foi determinada pela Equação (2) e a Absorção (A) foi determinado pela Equação (3).

$$d = \frac{M}{M_s - M_a} \quad (2)$$

$$A = \frac{M_s - M}{M} \times 100 \quad (3)$$

em que:

d = massa específica do agregado seco (g/cm^3)

A = absorção de água (%)

M = massa do agregado seco em estufa (g)

M_s = massa do agregado saturado superfície seca (g)

M_a = massa do agregado submerso (g)

4.3.2.2 Seleção de parâmetros iniciais

Anteriormente a moldagem, confecção dos corpos de prova e ensaios para avaliação das propriedades endurecidas do concreto permeável, foi feito o ensaio preliminar de trabalhabilidade para selecionar os traços que seriam posteriormente testados.

Somente com os resultados do ensaio preliminar de trabalhabilidade foi possível a determinação de quantitativos de materiais que gerariam concretos com boa trabalhabilidade e conseqüentemente corpos de prova adequados.

4.3.2.2.1 Ensaio preliminar de trabalhabilidade

Com o intuito de avaliar quais são os níveis extremos mais adequados de teor água/cimento (massa), para se trabalhar em cada nível da relação cimento:agregado (massa) realizou-se um ensaio preliminar de trabalhabilidade.

Como a quantidade de água ideal depende da quantidade de cimento, foram designados 3 valores de relação cimento:agregado (massa): 1:3,5; 1:4,5 e 1:5,5 (baseados no quadro 1) e para cada valor foi testado a trabalhabilidade em nove teores água/cimento (massa): 0,26; 0,28; 0,30; 0,32; 0,34; 0,36; 0,38 e 0,40.

O ensaio preliminar de trabalhabilidade foi baseado no método “ball-in-hand” (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2015) e (PAUL *et al.*, 2004) em que a trabalhabilidade é avaliada pelo operador com base na capacidade do

material de formar uma esfera sem se desmontar. Para o caso do concreto permeável além da avaliação da capacidade do material de se manter aglomerado em formato esférico é importante fazer considerações sobre a consistência e o aspecto visual da pasta de cimento, principalmente em relação ao escorrimento.

O ensaio seguiu os seguintes passos:

- a) homogeneizou-se o agregado e tomou-se 30,00 kg;
- b) a betoneira é molhada com água de mangueira e virada de boca para baixo por 5 minutos de maneira e ficar úmida, mas sem água em excesso;
- c) os agregados são colocados na betoneira;
- d) é colocado água suficiente para ficar no estado de Agregado Saturado Superfície Seca. Para as quantidades de 30,00 kg, com teor de umidade medido de 3,5 % de e absorção de 5,03% são necessários 0,459 kg de água;
- e) a betoneira foi ligada por 4 min de modo a deixar o agregado uniformemente umedecido;
- f) foi pesado a quantidade de cimento inicial correspondente a cada traço e colocado junto ao agregado na betoneira, estes são misturados por 2 min;
- g) adicionou-se a quantidade inicial de água ($w/c=0,26$ ou $w/c=0,28$) e misturou-se por 1 min, em seguida desligou-se a betoneira;
- h) com uma amostra com as mãos, faz-se uma bola e os operadores avaliam e classificam a mistura (Figura 6);
- i) a amostra foi devolvida para a betoneira, ligou-se a mesma e adicionou-se mais água para o próximo teor água/cimento. Após 1 min, desligou-se a betoneira;
- j) repete-se o passo (8) e (9) por mais 3 vezes até se obter a trabalhabilidade para os teores $w/c = 0,38$ ou $0,40$ (dependendo da etapa); e
- k) o teste foi então finalizado e descartou-se a massa de concreto.

Para cada traço os testes são realizados em 2 etapas a primeira etapa consiste em avaliação dos teores $w/c = 0,26; 0,30; 0,34$ e $0,38$, a segunda etapa é feita com os teores $w/c = 0,28; 0,32; 0,36$ e $0,40$. Desta maneira abrangem-se todos os teores no intervalo de $w/c = 0,26$ até $w/c = 0,40$.



Figura 6 - Avaliação do estado da massa de concreto
Fonte: O autor (2021).

As Tabelas 4, 5, 6, 7, 8 e 9 demonstram os quantitativos utilizados em todos os ensaios, a última coluna dos quadros (acréscimos) mostra a massa de água que foi adicionada por vez para alterar os teores de água/cimento.

Tabela 4 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:5,5 na 1ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos
			ARC kg	cimento kg	água kg	água kg
+	1:5,5	0,26	30,001	5,455	1,418	0,218
		0,30	30,001	5,455	1,636	0,218
		0,34	30,001	5,455	1,855	0,218
		0,38	30,001	5,455	2,073	-

Fonte: O autor (2021).

Tabela 5 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:5,5 na 2ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos
			ARC kg	cimento kg	água kg	água kg
+	1:5,5	0,28	30,001	5,455	1,527	0,218
		0,32	30,001	5,455	1,746	0,218
		0,36	30,001	5,455	1,964	0,218
		0,40	30,001	5,455	2,182	-

Fonte: o autor (2021).

Tabela 6 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:4,5 na 1ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos
			ARC kg	cimento kg	água kg	água kg
cent	1:4,5	0,26	30,001	6,667	1,733	0,267
		0,30	30,001	6,667	2,000	0,267
		0,34	30,001	6,667	2,267	0,267
		0,38	30,001	6,667	2,533	-

Fonte: O aautor (2021).

Tabela 7 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:4,5 na 2ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos
			ARC kg	cimento kg	água kg	água kg
cent	1:4,5	0,28	30,001	6,667	1,867	0,267
		0,32	30,001	6,667	2,133	0,267
		0,36	30,001	6,667	2,400	0,267
		0,40	30,001	6,667	2,667	-

Fonte: O autor (2021).

Tabela 8 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:3,5 na 1ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos água kg
			ARC kg	cimento kg	água kg	
-	1:3,5	0,26	30,001	8,572	2,229	0,343
		0,30	30,001	8,572	2,572	0,343
		0,34	30,001	8,572	2,914	0,343
		0,38	30,001	8,572	3,257	-

Fonte: O autor (2021).

Tabela 9 - Quantitativos para o ensaio de trabalhabilidade para cimento:agregado = 1:3,5 na 2ª etapa

ID	cimento: agregado - (massa)	água/ cimento - (massa)	massas			acréscimos massa água kg
			ARC kg	cimento kg	água kg	
-	1:3,5	0,28	30,001	8,572	2,400	0,343
		0,32	30,001	8,572	2,743	0,343
		0,36	30,001	8,572	3,086	0,343
		0,40	30,001	8,572	3,429	-

Fonte: O autor (2021).

4.3.2.2.2 Combinações de traços

Com os resultados do ensaio preliminar de trabalhabilidade, obteve-se os teores água/cimento (w/c) em que se conseguia trabalhabilidade adequada para cada um dos 3 níveis da relação cimento:agregado. Foram selecionados os teores água/cimento máximo e mínimo que satisfazem todas as combinações cimento:agregado e também calculado a média desse teor para ser o central.

Seguindo essa lógica foram encontrados 3 níveis (mínimo, central e máximo) para 2 variáveis (teor água/cimento e relação cimento:agregado) (Tabela 10).

Tabela 10- Níveis máximos (+1), mínimos (-1) e centrais (c) para cada variável

níveis	água/cimento	cimento:agregado
+1	0,36	5,5
-1	0,32	3,50
central	0,34	4,50

Fonte: O autor (2021).

Combinando cada variável com seus máximos, mínimos e centrais foi possível encontrar 9 combinações de traço como é mostrado na Tabela 11.

Foram dosados 50 litros de concreto para a confecção de 4 corpos de prova cilíndricos de diâmetro 10 cm por 20 cm de altura para ensaio de resistência à compressão, 3 corpos de prova prismáticos de 10 cm de largura por 10 cm de altura por 40 cm de comprimento para ensaio de resistência à tração na flexão e 3 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura para ensaio de permeabilidade.

A metodologia de dosagem do informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) foi utilizada para estimar a

porcentagem de vazios de cada lote conforme mostra a última coluna da Tabela 11. Esse percentual, entretanto, é uma estimativa e foi medido posteriormente.

Tabela 11 - Quantitativo de material para cada combinação

ID	combinações		água/ cimento	cimento: agregado	massas			% vazios
					ARC	cimento	água	
					kg	kg	kg	
			- (massa)	- (massa)				% (volume)
++	+1	+1	0,36	5,50	68,449	12,445	4,480	26,13
+-	-1	+1	0,32	5,50	68,449	12,445	3,982	27,15
+--	+1	-1	0,36	3,50	68,449	19,557	7,040	16,25
--	-1	-1	0,32	3,50	68,449	19,557	6,258	17,82
+c	+1	c	0,36	4,50	68,449	15,211	5,476	22,28
-c	-1	c	0,32	4,50	68,449	15,211	4,867	23,52
c+	c	+1	0,34	5,50	68,449	12,445	4,231	26,65
c-	c	-1	0,34	3,50	68,449	19,557	6,649	17,02
cc	c	c	0,34	4,50	68,449	15,211	5,172	22,86

Fonte: O autor (2021).

4.3.2.3 Ensaios no concreto permeável

4.3.2.3.1 Cura

Após a moldagem os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos para cura por 24 h. Depois de passado esse tempo, os mesmos foram desenformados e colocados em tambores com água para a cura úmida. O método de cura é mostrado nas Figuras 7 e 8.



Figura 7 – Cura com saco plástico nas primeiras 24 h

Fonte: O autor (2021).



Figura 8 - Colocação dos corpos de prova em tambor com água por 28 dias
Fonte: O autor (2021).

4.3.2.3.2 *Ensaio de resistência à compressão*

Ao 27º dia de cura em água os corpos de prova cilíndricos foram retirados para serem secos ao ar livre e serem capeados com enxofre. Após o processo de capeamento foi feito o ensaio de resistência à compressão conforme a NBR 5739 Concreto - ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de 1994 (ABNT, 1994).

Utilizou-se uma prensa hidráulica onde aplicou-se carga até a ruptura do corpo de prova, a resistência foi calculada através da Equação (4):

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (4)$$

em que:

f_c = resistência a compressão (MPa)

F = força máxima de ruptura (N)

D = diâmetro do corpo de prova (mm)

4.3.2.3.3 *Ensaio de resistência à tração na flexão*

Ao 27º dia de cura em água os corpos de prova prismáticos foram retirados para serem secos ao ar livre. Após a secagem foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão de acordo com a NBR 12142/MB 3483: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos (ABNT, 1991).

As resistências foram calculadas da seguinte maneira [Equação (5), Equação (6)]:

$$f_{ctm} = \frac{p l}{b d^2} \quad (5)$$

$$f_{ctm} = \frac{3 p a}{b d^2} \quad (6)$$

em que:

f_{ctm} = resistência à tração na flexão (MPa)

p = carga máxima aplicada (N)

l = distância entre cutelos de suporte (mm)

b = largura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm)

d = altura média do corpo-de-prova na seção de ruptura (mm)

a = distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo, obtida com aproximação de 1 mm.

*a Equação (6) é usada somente quando a ruptura não se dá dentro do terço médio do corpo-de-prova.

4.3.2.3.4 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi feito a partir de corpos-de-prova moldados em tubos de PVC com diâmetro nominal de 100mm. Estes corpos de prova foram encaixados em um permeâmetro conforme adaptação de Costa *et al.* (2018), Fernandes (2019) e Jacob *et al.* (2018) com carga de coluna de água de 1 m (Figura 9).

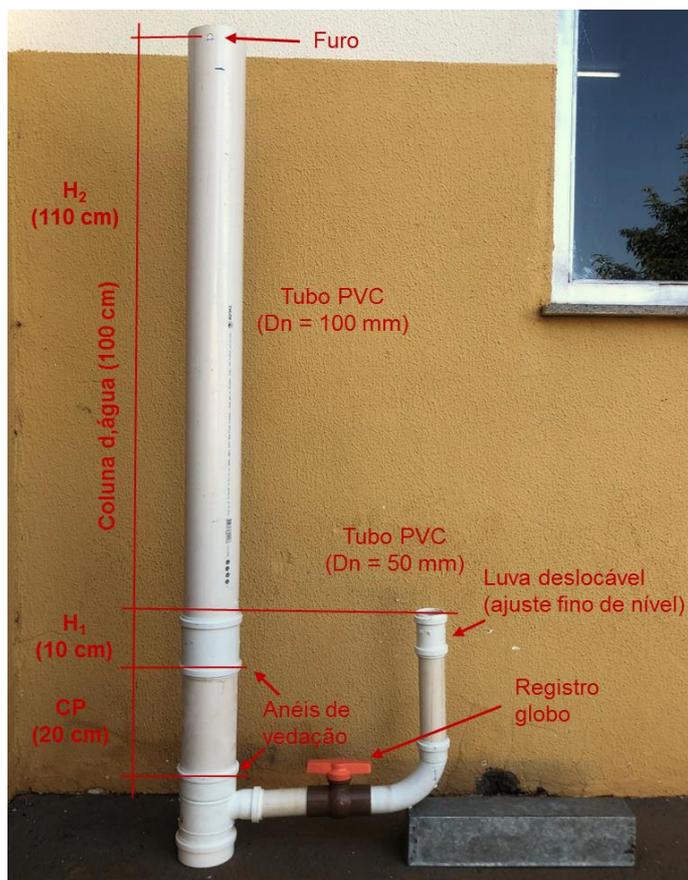


Figura 9 - Permeâmetro e seus componentes
Fonte: O autor (2021).

A permeabilidade foi calculada a partir da Equação (7):

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (7)$$

em que:

K = coeficiente de permeabilidade (m/s)

A_1 = área da seção transversal do corpo de prova (m²)

A_2 = área da seção transversal do dreno (m²)

L = comprimento do corpo de prova (m)

t = tempo para passagem de água pelo corpo-de-prova (s)

h_1 = altura do topo da coluna de água (m)

h_2 = altura do dreno (m)

4.3.2.3.5 Ensaio de percentual de vazios

Para o ensaio de percentual de vazios real utilizou-se um medidor de volume

desenvolvido pelo autor (Figura 10) e seguiu-se os seguintes passos:

- a) colocou-se os corpos de prova para secarem na sombra por 24 h;
- b) com o medidor vazio completou-se com água até o nível da torneira;
- c) com a torneira fechada, inseriu-se o corpo de prova no medidor e esperou a água se estabilizar;
- d) abriu-se a torneira deixando a água fluir para um recipiente sobre uma balança;
- e
- e) tomou-se a massa de água.



Figura 10 - Medidor de volume e balança
Fonte: O autor (2021).

Com a massa de água deslocada pelo corpo de prova (Figura 11) é possível medir o volume deslocado por esse corpo de prova. Descontou-se o volume do tubo de PVC que envolve o corpo de prova e calculou-se o volume teórico do cilindro interior ao corpo de prova.



Figura 11 - Corpo de prova utilizado no ensaio de permeabilidade e percentual de vazios
Fonte: O autor (2021).

O percentual de vazios foi calculado pela Equação (8):

$$\% \text{ vazios} = \left(\frac{\text{Vol. int. tubo} - \frac{(M_{H_2O \text{ cp}} - M_{H_2O \text{ tubo}})}{D_{H_2O}}}{\text{Vol. int. tubo}} \right) \times 100 \quad (8)$$

em que:

% vazios = percentual de vazios (%)

Vol. int. tubo = volume do interior do tubo (cm³)

M_{H₂O cp} = massa de água deslocada pelo corpo de prova (g)

M_{H₂O tubo} = massa de água deslocada pelo tubo vazio (g)

D_{H₂O} = densidade da água em função da temperatura (g/cm³)

4.3.2.3.6 Otimização do traço

Após a análise dos resultados dos ensaios de resistência mecânica e hidráulicos, foi possível fazer a otimização do traço do concreto.

Com o software *Minitab* 19, foi feita a otimização com os seguintes parâmetros: maximização de resistência à compressão nos intervalos de 6,00 a 11,00 MPa, maximização de resistência a tração na flexão nos intervalos de 1,5 a 2,2 MPa e maximização de permeabilidade nos intervalos de 1 x 10⁻² e 2 x 10⁻².

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Características físicas dos agregados

Para a avaliação dos resultados da granulometria foi utilizado como referência as granulometrias estipuladas pela norma ASTM C33/C33M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018) (Tabela 12).

Tabela 12 - Percentual de passantes para cada peneira dos agregados números 67, 7 e 8.

denominação	tamanho aberturas	percentual passante por peneira, abertura quadrada (mm)						
		25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18
67	19,0 a 4,75 mm	100	100 a 90	...	55 a 20	10 a 0	5 a 0	-
7	12,5 a 4,75 mm	-	100	100 a 90	70 a 40	15 a 0	5 a 0	-
8	9,5 a 2,36 mm	-	-	100	100 a 85	30 a 10	10 a 0	5 a 0

Fonte: Adaptado de C33/C33M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2018).

A intenção da utilização deste comparativo foi assegurar a viabilidade do emprego da metodologia de dosagem do informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) para estimar o percentual de vazios antes do concreto pronto, um dos pré-requisitos para a aplicação desta metodologia é que o agregado esteja dentro das faixas granulométricas de denominação 67, 7, 8 ou entre elas.

Como pode ser observado no Figura 12, o ARC tem a granulometria que se encaixa entres os limites máximos e mínimos do agregado denominado número 67, desta maneira abre a possibilidade da estimativa do percentual de vazios. A comparação entre as granulometrias do ARC e as referências são mostradas na Figura 12.

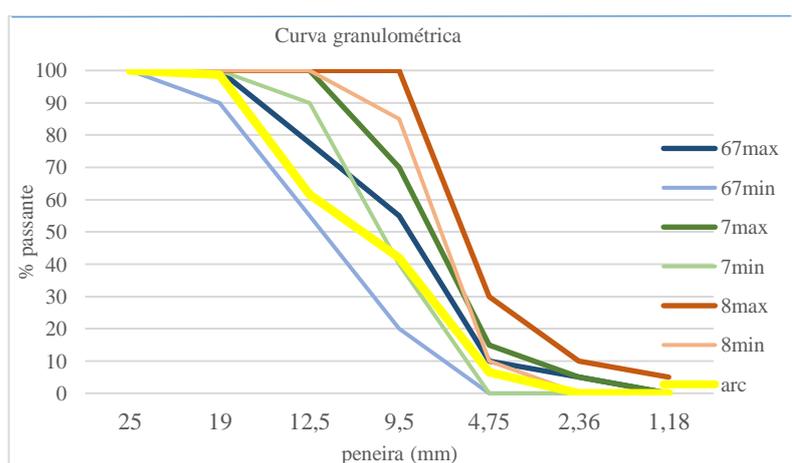


Figura 12 - Gráfico de percentual de passantes em função da peneira com os valores máximos e mínimos das granulometrias de número 67, 7 e 8 e do ARC

Fonte: O autor (2021).

A estimativa de percentual de vazios de acordo com o capítulo 6 - “Pervious Concrete Mixture Proportioning” do informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010) é somente validada com os testes de percentual de vazios real.

Os valores de Massa Unitária (Tabela 13) estão próximos das médias descritas na Tabela 1, em que mostram diversos estudos realizados com agregado reciclado de concreto, isto demonstra a concordância com os parâmetros de pesquisa mundiais e a consistência dos dados obtidos visto que os desvios padrão e os coeficientes de variação, ambos estão baixos. Esta tabela também apresenta os valores médios de Massa específica do agregado seco e Absorção.

Tabela 13 - Características físicas dos agregados reciclados

	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Massa unitária (kg/m ³)	1382,8	10,8	0,78

(continua...)

Tabela 13 - Características físicas dos agregados reciclados

	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Massa específica agregado seco (g/cm ³)	2,429	0,00483	0,2
Absorção (%)	5,037	0,173	3,44

(Conclusão)

Fonte: O autor (2021).

4.4.2 Ensaio preliminar de trabalhabilidade

Na avaliação de cada teor água/cimento para todos os traços de concreto em relação à trabalhabilidade, condições da massa e consistência da pasta de cimento, o concreto passou por uma transição de muito “seco” até extremamente “molhado” a medida em que se aumentava o teor água cimento pelo acréscimo de água.

Uma pasta de cimento com pouca água tem o aspecto opaco indicando que não há água suficiente para dar fluidez a pasta e nem a hidratação do cimento (JAIN; CHOUHAN, 2011). A pasta pode parecer com aspecto corrugado e por vezes pode aparecer pequenos “arranhões” no agregado nas partes em que falta pasta, isso se deve ao fato da pasta ficar extremamente viscosa com textura pastosa quase sólida.

Uma pasta de cimento com água em excesso mantém-se com aspecto exacerbadamente brilhante e muito fluida. Os agregados menores tendem a se unir em uma só massa contínua e na maioria das vezes a pasta começa a escorrer.

A pasta de cimento na consistência ideal apresenta um aspecto brilhante, mas que ainda mantém uma viscosidade tal que não flui através dos agregados (PAUL *et al.*, 2004), nem “funde” os agregados menores em uma só massa. Cada grânulo do agregado é recoberto com pasta suficiente para cobri-lo por inteiro e com espessura que possibilita a manutenção dos poros se unindo com os agregados próximos apenas nos pontos em que se tocam.

A Figura 13 mostra o aspecto visual de amostras nos três estados em que podem se encontrar ao longo do ensaio.

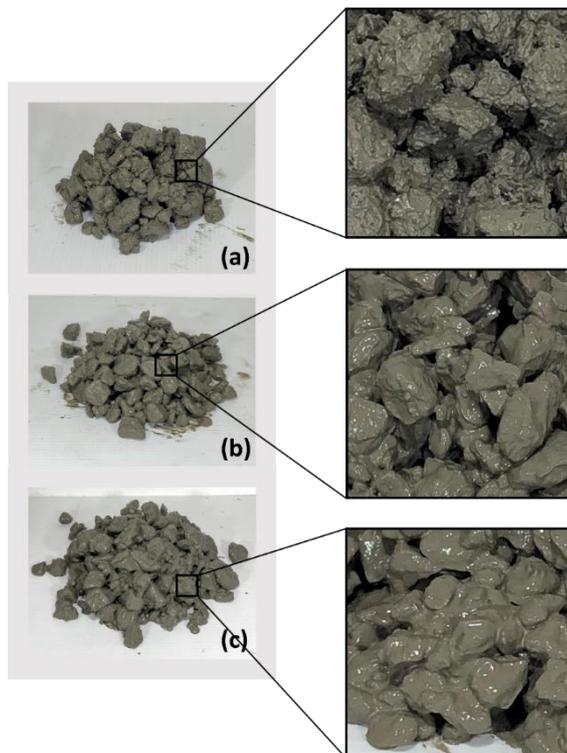


Figura 12 – Aspecto das amostras no ensaio preliminar de trabalhabilidade. (a) pouca água; (b) água em quantidade ideal; (c) excesso de água

Fonte: O autor (2021).

A classificação das amostras foi feita em 3 categorias de cores que foram organizadas na Tabela 14 e são explicadas a seguir:

- a) vermelho: pasta de cimento com consistência inadequada, não gera corpos de prova satisfatórios;
- b) amarelo: pasta de cimento com consistência inadequada apesar de ser possível a moldagem de corpos de prova se fossem tomados cuidados quanto à compactação; e
- c) verde: pasta de cimento com consistência adequada na qual é possível a moldagem de corpos de prova satisfatórios.

É importante ressaltar que não somente a aparência visual foi analisada, pois esta não contempla todas as características para uma classificação criteriosa, foram levados em conta o escoamento da pasta e principalmente o aspecto tátil.

Tabela 14 - estão em verde Classificações em relação à trabalhabilidade do concreto, os teores adequados para cada nível de cimento:agregado

cimento: agregado	Teores água/cimento								
	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42
1:3,5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Yellow	Red	Red
1:4,5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red
1:5,5	Red	Red	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow	Red

Fonte: O autor (2021).

Desta maneira pode-se concluir que os teores água/cimento em que é possível uma trabalhabilidade adequada para cada nível cimento:agregado é de 0,32 a 0,36.

4.4.3 Ensaios de resistência mecânica

Os ensaios de resistência a compressão e tração na flexão obtiveram os resultados apresentados nas Figuras 14 e 15.

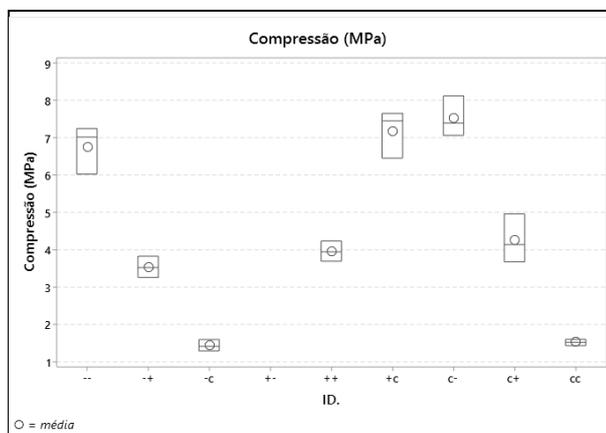


Figura 14 - Gráfico Boxplot de Compressão de cada traço de concreto

Fonte: O autor (2021).

Nota: O traço +- não foi medido devido a uma falha na prensa

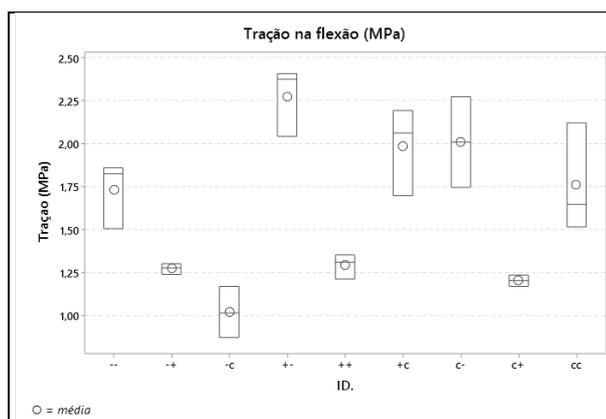


Figura 15 - Gráfico Boxplot de resistência a tração na flexão de cada traço de concreto

Fonte: O autor (2021).

Pode ser observado que os maiores valores de resistência a compressão são dos traços de ID. --, ++c e c-. De forma bastante similar, para a resistência à tração na flexão, destacam-se os melhores traços ID. --, +-, ++c, c- e cc.

O pior traço tanto na compressão quanto na tração foi o traço -c. Para a compressão ainda se evidencia o traço cc (Figura 14 e 15).

Os gráficos de contorne que demonstram as relações entre a resistência mecânica e a relação cim:agreg e teor a/c estão nas Figuras 16 e 17.

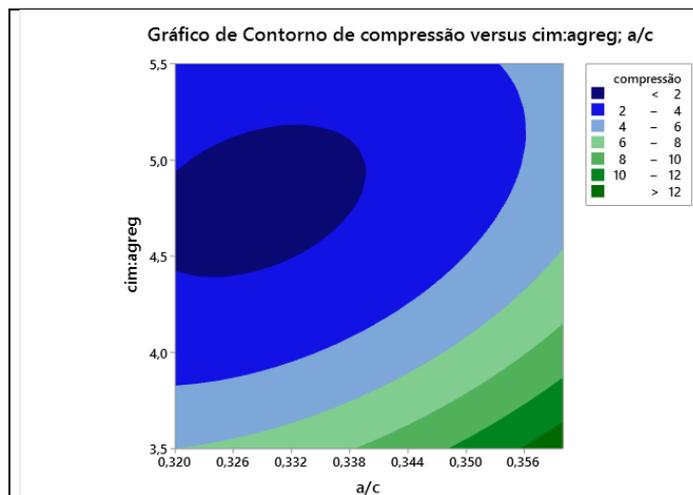


Figura 16 - Gráfico de relação entre resistência a compressão, cim:agreg e a/c
Fonte: O autor (2021).

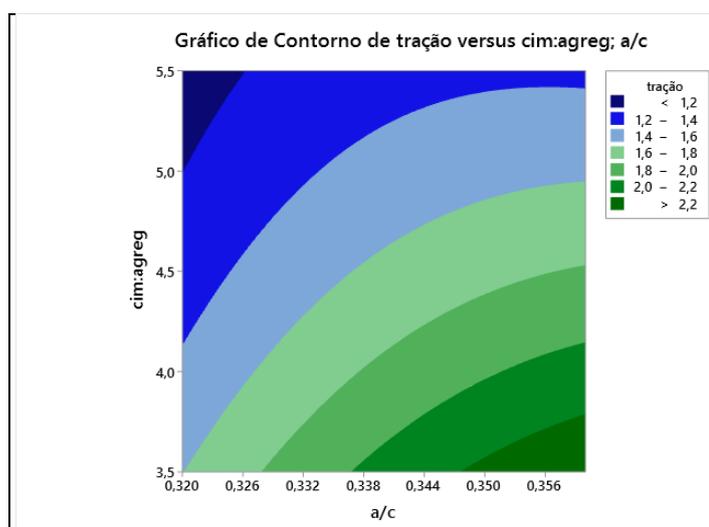


Figura 17 - Gráfico de relação entre resistência a tração na flexão, cim:agreg e a/c
Fonte: O autor (2021).

Com a análise das Figuras 16 e 17, observa-se que para ambos os gráficos, as curvas com valores superiores estão localizadas nas extremidades onde há os maiores teores a/c e as menores relações cim:agreg.

Para os valores de menor resistência mecânica há uma leve diferença entre a compressão e a tração.

Na resistência à compressão existe um mínimo acentuado para os teores a/c de 0,32 a 0,338 combinados com uma relação cim:agreg de 4,5 a 5,0.

Na resistência a tração na flexão o comportamento é inversamente proporcional pois os mínimos estão exatamente na extremidade oposta aos máximos mostrando que os menores valores vêm da combinação de maiores relações cim:agreg e menores teores a/c.

A Tabela 15 demonstra as análises de variâncias feitas para os ensaios de resistência mecânica na tentativa de encontrar um modelo que representa as relações entre a/c e $cim:agreg$ para as respostas de resistência. As equações advindas dessa análise incorporam somente os termos com valor $-p < 0,05$, que são as significativas.

Tabela 15 - Análise de Variância

Termo	Valor-P	
	compressão	tração na flexão
Modelo	0,0000001	0,0000475
Linear	0,0000000	0,0000044
a/c	0,0000004	0,0004990
cim:agreg	0,0000000	0,0000155
Quadrado	0,0000086	0,7151725
(a/c) ²	0,0069223	0,4862699
(cim:agreg) ²	0,0000019	0,6341152
Interação com 2 Fatores	0,0011504	0,0935965
a/c*cim:agreg	0,0011504	0,0935965

Fonte: O autor (2021).

Para os dois casos os Valores-P são significativos linearmente. Há uma diferença, entretanto, quando se chega nos valores quadráticos e de interação quando só há significância para a resposta compressão. Isto posto, tem-se as Equações (8) e Equação (9) em que só estão os termos significativos e também os valores de R^2 ajustado e predito.

$$\begin{aligned} \text{compressão} = & 333 - 1971 (a/c) - 3,41 \text{ cim: agreg} + 3568 (a/c)^2 \\ & + 3,010 (\text{cim: agreg})^2 - 77,5 (a/c) \times (\text{cim: agreg}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$R^2 (\text{ajustado}) = 76,89 \% ; R^2 (\text{predito}) = 70,41 \%$$

$$\begin{aligned} \text{tração} = & -33,8 + 182 (a/c) - 1,40 \text{ cim: agreg} \end{aligned} \quad (9)$$

$$R^2 (\text{ajustado}) = 67,28 \% ; R^2 (\text{predito}) = 57,00 \%$$

O concreto permeável com agregado reciclado apresentou todos os seus traços com valores de resistência mecânica e permeabilidade maior que o mínimo requerido pela norma NBR 16416 Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015).

Todos os traços atingiram a média de no mínimo 1,0 MPa de resistência a tração na flexão, sendo possível a utilização como concreto permeável moldado no local para Tráfego de pedestres. Os traços +- e c- atingiram médias de maiores do que 2,0 MPa sendo permitida a utilização para tráfego leve.

Via de regra os traços que continham as maiores quantidades de pasta de cimento por volume são os que provaram ter as maiores resistências mecânica a tração ao passo que as menores quantidades de pasta de cimento por volume apresentaram as mais baixas resistências a tração (Figura 18). Essa tendência foi seguida a despeito dos teores água

cimento. Isso indica que o volume de pasta têm a maior influência sobre a resistência mecânica independente do seu teor água cimento assim como relatado por Kassem *et al.* (2016).

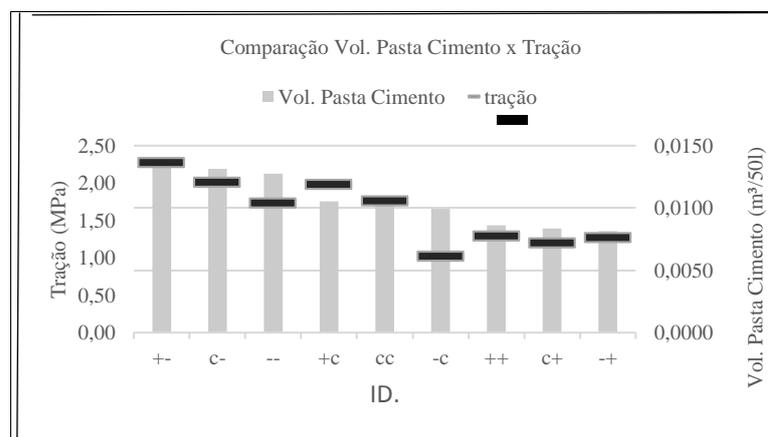


Figura 18 - Gráfico de volume pasta cimento x tração
Fonte: O autor (2021).

O rompimento dos concretos na compressão (Figura 19a) e na tração a flexão (Figura 19b) se deu de maneira semelhante e ocorreu por 3 meios distintos:

Ruptura na ZTI (Figura 19c): as rupturas se propagaram nas regiões de contato entre a pasta de cimento e os agregados naturais a chamada Zona de Transição Interfacial (ZTI) (XIE *et al.*, 2020; ZHONG; WILLE, K. 2018). Nesse tipo de propagação, o agregado natural não se rompe ao meio, e sim na ligação com a pasta de cimento, restando sua face natural exposta, isto ocorre independente se a pasta de contato era a antiga ou a nova.

Ruptura através do ARC (Figura 19d): a ruptura se propaga através dos agregados reciclados, principalmente os maiores (AGAR-OZBEK *et al.*, 2013). Quando isto ocorre o plano de ruptura atinge apenas a pasta de cimento antiga do agregado e não a parte que continha o agregado natural.

Ruptura da pasta de cimento nova (Figura 19e): juntamente com o rompimento da pasta de cimento antiga (faz parte do ARC), a pasta de cimento nova também pode sofrer ruptura com a mesma facilidade. Não foram observados planos de ruptura entre a pasta de cimento antiga e a nova, o que sugere que a adesão entre as duas pastas de cimento é satisfatória.

O modo como ocorreram e o caminho dos planos de ruptura levam a concluir que o fator mais determinante na resistência mecânica é o próprio agregado reciclado, principalmente a qualidade da pasta de cimento antiga desse agregado, e que a qualidade da nova pasta pouco influencia na resistência final. Isso pode ser visto pois em 2 modos

de ruptura (Figura 19c e 19d) os pontos de fraqueza estão na pasta antiga e suas ligações com o agregado natural.



Figura 19- Aspecto do concreto após rompimento por compressão (a) e por tração na flexão (b). Locais onde ocorreram rupturas: (c) interface do agregado natural com a pasta de cimento (ZTI), (d) através do grânulo do ARC e (e) pasta de cimento nova
Fonte: O autor (2021).

4.4.4 Ensaios hidráulicos

Os ensaios hidráulicos compreendem nos ensaios que se relacionam com os poros do concreto permeável, sejam os poros interligados onde é possível medir o percentual de vazios ou na permeabilidade que é o fluxo de água através desses poros. Os valores de permeabilidade e percentual de vazios real constam nas figuras 20 e 21.

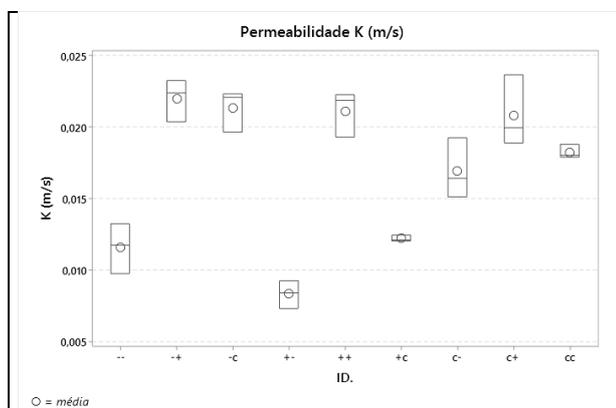


Figura 20 - Gráfico Boxplot de permeabilidade de cada traço de concreto
Fonte: O autor (2021).

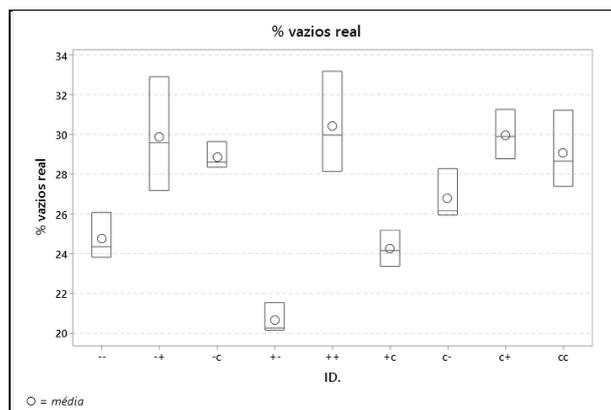


Figura 21 - Gráfico Boxplot de percentual de vazios real de cada traço de concreto
Fonte: O autor (2021).

Em uma primeira análise percebe-se que as Figuras 20 e 21 seguem exatamente as mesmas tendências. Isto era extremamente presumível visto que ambas as características estão intimamente ligadas e a diferença de uma para a outra é o fluxo de água.

É válido lembrar que pela metodologia usada para medir a quantidade de vazios real (descrito em 1.3.2.3.5 – Ensaio de percentual de vazios) é mensurado somente os vazios interligados, o que deixa uma margem de erro para existirem mais vazios que não são conectados, entretanto estes não fazem diferença para a permeabilidade.

Para ambos os gráficos os maiores valores são de ID. --, +-, ++, c-, c+ e cc. enquanto que os menores estão em ID. ++, +- e +c.

Todos os valores de K foram maiores do que 10^{-3} , que é o mínimo requerido pela norma NBR 16416 Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015) para ser considerado um concreto permeável. O menor valor, correspondente ao ID.+- é de $8,24 \times 10^{-3}$ e é mais que 8 vezes maior do que o mínimo exigido. Isso dá ao concreto, além de uma permeabilidade notável, uma melhor proteção contra a colmatação.

O gráfico (Figura 22) apresenta a comparação calculada do percentual de vazios e o real.

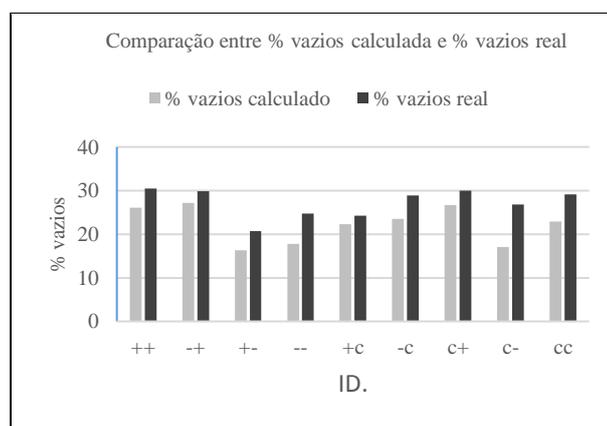


Figura 22 - Gráfico apresentando comparação entre os vazios calculados e os vazios reais para cada traço
Fonte: O autor (2021).

Pode-se observar que o percentual de vazios real é sempre maior que os vazios calculados, com uma média de diferença de 18,70%. Entretanto é possível perceber que ambos seguem exatamente a mesma tendência.

A Figura 22 mostra que, no que diz respeito ao uso da estimativa de percentual de vazios pela Metodologia do informe “ACI 522R-10 Report on Pervious Concrete” (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2010), apesar das tendências de percentual de vazios serem compatíveis há uma diferença notável entre os valores de vazios calculado e real.

Neste trabalho essa diferença pode ser atribuída a dois principais motivos:

O primeiro é o fato de os agregados terem formatos bastante irregulares (Figura 23). Jain e Chouhan (2011) e Kothari e Rath (2016) demonstram que quanto mais irregulares são os agregados maior a permeabilidade. Formatos irregulares, apesar de não serem incomuns para agregados graúdos, se tornam bastante acentuados pelo fato de serem reciclados e também pela forma como foram obtidos, o triturador de mandíbula, que “estoura” os corpos de prova e depois não promove nenhum tipo de processo abrasivo de maneira a tirar as irregularidades e superfície áspera.

O segundo é a alta absorção do agregado reciclado. O ensaio de percentual de vazios levou em conta a absorção do agregado e, pelo fato do agregado reciclado ter mais absorção, os concretos apresentaram maior percentual de vazios. Os vazios da própria partícula de agregado não contribuem para o fluxo de água, entretanto, pela metodologia utilizada, são mensurados.



Figura 23 - Aspecto dos agregados
Fonte: O autor (2021).

Os gráficos (Figuras 24 e 25) mostram as relações entre as variáveis cim:agreg e a/c e as respostas K e percentual de vazios.

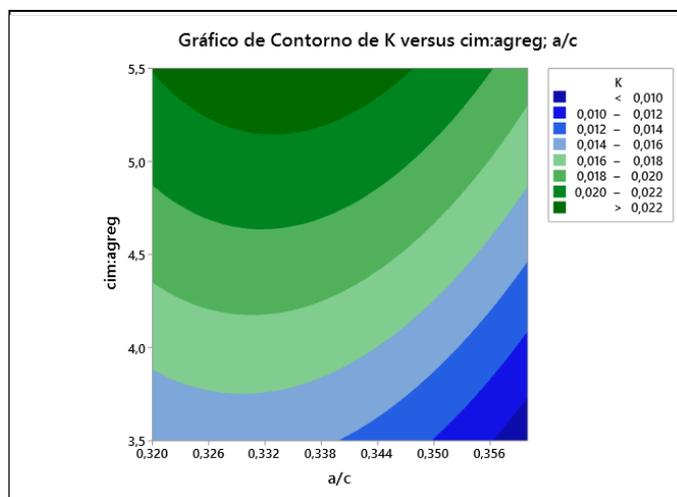


Figura 24 - Gráfico de relação entre permeabilidade, cim:agreg e a/c
Fonte: O autor (2021).

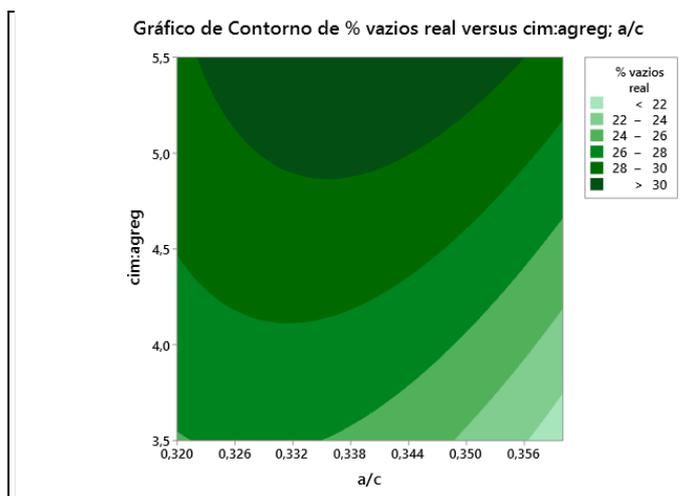


Figura 25 - Gráfico de relação entre percentual de vazios, cim:agreg e a/c
 Fonte: O autor (2021).

Com base na similaridade entre as tendências das repostas de K e % de vazios os gráficos de contorno seguiram também as mesmas orientações.

Observa-se que o aumento do teor a/c e a diminuição da relação cim:agreg influenciam de forma a diminuir o % de vazios e consequentemente a permeabilidade. Do outro lado do espectro, um aumento na relação cim:agreg e diminuição do teor a/c aumentam ambos as repostas. Isto solidifica mais uma vez de forma prática a estreita relação que há entre essas duas repostas.

O percentual de vazios não é descrito por norma pois o que realmente importa é a permeabilidade, porém como está sendo mostrado oferece um forte indicativo da permeabilidade.

A Tabela 16 demonstra as análises de variâncias feitas para os ensaios de % de vazios real e permeabilidade K na tentativa de encontrar um modelo que representa as relações entre a/c e cim:agreg para essas repostas. As equações advindas dessa análise incorporam somente os termos com Valor- $p < 0,05$, que são as significativas.

Tabela 16 - Análise de Variância

Termo	Valor-P	
	% vazios real	permeabilidade
Modelo	0,000069	0,000062
Linear	0,000016	0,000006
a/c	0,0064500	0,0025346
cim:agreg	0,0000013	0,0000006
Quadrado	0,0376170	0,0884541
(a/c) ²	0,0121187	0,0318516
(cim:agreg) ²	0,6904881	0,6844008
Interação com 2 Fatores	0,0480627	0,4581642
a/c*cim:agreg	0,0480627	0,4581642

Fonte: O autor (2021).

Para os dois casos os Valores-P são significativos linearmente e quadráticos. A exceção está no termo (cim:agreg)² para a % de vazios real e (cim:agreg)² e interação com 2 fatores para permeabilidade. Eliminando esse termo tem-se a Equação (10) e a Equação (11) e também os valores de R² ajustado e predito.

$$\begin{aligned} \text{permeabilidade} &= -0,670 + 4,12 (a/c) - 0,0015 \text{ cim: agreg} \\ R^2 (\text{ajustado}) &= 70,41 \% ; R^2 (\text{predito}) = 60,99 \% \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \% \text{ vazio real} &= -500 + 3324 (a/c) - 13,90 \text{ cim: agreg} - 5374 (a/c)^2 \\ &+ 58,10 (a/c) \times (\text{cim: agreg}) \\ R^2 (\text{ajustado}) &= 70,09 \% ; R^2 (\text{predito}) = 58,79 \% \end{aligned} \quad (10)$$

4.4.5 Relações entre repostas

As relações entre as repostas podem demonstrar tendências e serem úteis para previsão de comportamentos mesmo não sendo feita a mensuração de todas as repostas (Figura 26).

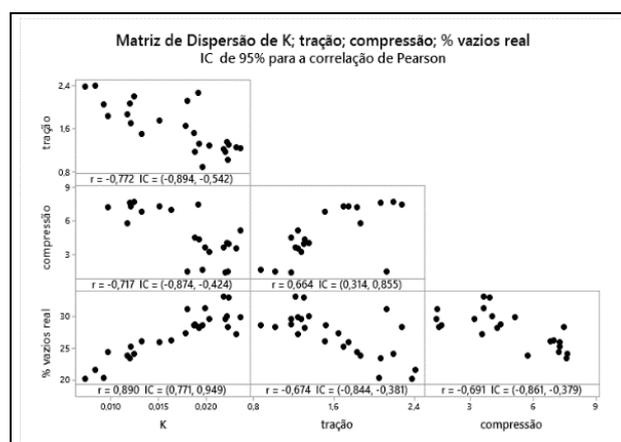


Figura 26 - Gráfico de relações entre as repostas e correlação de Pearson
Fonte: O autor (2021).

Pela análise da Figura 26, é possível estabelecer algumas relações entre as características medidas.

A mais evidente das tendências fica por conta da permeabilidade K (m/s) e do percentual de vazios real ($r=0,890$), ambas têm forte correlação positiva.

Outras correlações que se mostraram verdadeiras dizem respeito à permeabilidade e à resistência mecânica tanto à compressão quanto à tração na flexão, os valores r foram -0,717 e -0,772 respectivamente. Isso vai de acordo com o esperado pois uma menor permeabilidade significa que os agregados estão mais interligados, seja por uma pasta de concreto mais espessa (menor relação cim:agreg) ou seja porque receberam uma compactação de modo a ficarem mais juntos. De qualquer maneira isso gera maior resistência mecânica.

O mesmo silogismo é válido para o percentual de vazios a resistência mecânica. Os valores r foram -0,674 para tração na flexão e -0,691 para compressão. Quanto menor o percentual de vazios, mais unidos estarão os agregados formando uma estrutura de pasta de cimento com mais pontos de contato e conseqüentemente mais forte.

4.4.6 Otimização

Com o intuito de descobrir o traço que gerará as melhores repostas foi feita a otimização dos traços, graficamente exibido pela Figura 27.

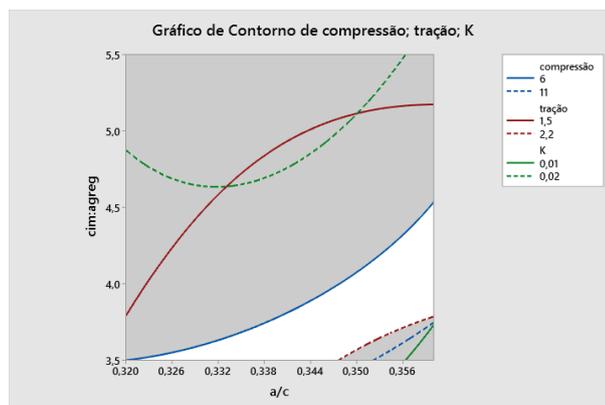


Figura 27 - Gráfico da região em branco onde se encontram os valores desejados para otimizar
Fonte: O autor (2021).

Para a otimização percebe-se que existe uma zona em que todas as condições propostas em no item “1.3.2.3.6 Otimização do traço” foram atendidas. A busca pelo máximo dentro desse intervalo tem o sumário e a predições mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Sumário da otimização

Solução	a/c	cim:agreg	compressão (MPa)	tração (Mpa)	K (m/s)
	0,3470	3,5	9,75	2,19	$1,27 \times 10^{-2}$

Fonte: O autor (2021).

Através do Sumário da otimização é possível prever a existência de um traço com quantitativos de $a/c = 0,3470$ e $cim:agreg = 3,5$ que irá resultar em um concreto com elevada resistência à compressão (9,75 MPa) e à tração na flexão (2,19 MPa) concomitantemente. Podendo ser usado para Tráfego Leve e que mantém permeabilidade de aproximadamente 10 vezes maior do que a exigida, ambas características de acordo com a NBR 16416 Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015).

4.5 CONCLUSÕES

Para a granulometria testada, os teores água/cimento e relação cimento:agregado se mostraram adequados. A resistência mecânica mínima exigida por norma foi atingida, algumas amostras com teor a/c mais elevadas ainda sim apresentaram algum grau de colmatação no fundo dos corpos de prova, apesar de ainda conseguirem manter a permeabilidade, isso é um forte indício de que não é apropriado aumentar ainda mais o teor a/c na tentativa de produzir mais pasta de cimento.

As respostas variaram de acordo com o esperado tanto para tendências de

permeabilidade quanto de resistências mecânica. Foi possível concluir que o principal fator que garante resistência mecânica é a estrutura “esqueleto” que a pasta de cimento forma ao ligar os agregados. Essa estrutura forma-se devido à uniforme distribuição de pasta e também ao seu volume. Quanto maior o volume de pasta e quanto melhor distribuída for, mais o concreto permeável será resistente. Desta maneira pode-se concluir que a granulometria e a compactação, que neste trabalho foram fixas, são também os aspectos importantes a serem estudados.

Um grande fator limitante e que claramente foi uma possível fonte de erros foi a compactação dos corpos de prova. Seguir a metodologia de moldagem de corpos de prova de concreto convencional descrita pela NBR 5738 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova não se mostrou confiável quando aplicada ao concreto permeável pois este é extremamente sensível a compactação e a aplicação manual, como demonstrada na norma, abre uma série de erros experimentais por parte do operador. Desta maneira sugere-se o estudo de uma metodologia padrão e automatizada para este tipo de concreto.

O principal limitante da resistência mecânica do concreto permeável com agregado reciclado é o próprio agregado reciclado. Sendo assim acredita-se que para melhorar essas características o ideal é alterar a compactação e adição de finos na pasta de cimento, desta maneira aumenta-se a espessura da pasta sem necessariamente ter que aumentar o teor água/cimento para não prejudicar a permeabilidade.

4.6 REFERÊNCIAS

AGAR-OZBEK, A. S. *et al.* Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480-490, 2013. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.12.040. Acesso em: set. 2020.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 12142/MB 3483:1991**. Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 5p., 1991. Data de Publicação : 30/12/1991, válida a partir de : 30/01/1992. Cancelada em 27/10/2010, substituída por: ABNT NBR 12142:2010. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/qdownload/nbr-12142-2010-concreto-determinacao-da-resistencia-a-traao-na-flexao-de-corpos-de-prova-prismaticospdf-pdf-free.html>. Acesso em: mar. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 5739:1994** - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 4p., 1994. Disponível em: <http://files.israel-tecnico-qualidade.webnode.com/200001169-522fc532a8/NBR%205739%20-%20Concreto%20->

%20Ensaio%20de%20Compress%C3%A3o%20de%20Corpos-de-pro.pdf. Acesso em: mar. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). ABNT. **NBR NM 26:2000. Agregados - Amostragem**. Válida a partir de 29.06.2001, 10p. Rio de Janeiro, Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/03/nbr-nm-0026-2001-agregados-amostragem.pdf>. Acesso em: abr. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 248:2003. Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Válida a partir de 01.09.2003, 6p. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr_nm248_2003.pdf. Acesso em: mar. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 45:2006/Err.1:2006. Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios**. Válida a partir de 30.04.2006 Primeira edição 31.03.2006, 18p., Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/norma-brasileira-abnt-nbr-pdf-free.html>. Acesso em: mar. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR NM 53:2009. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. 8p., Rio de Janeiro, 2009. Cancelada em 07/05/2021, substituída por: ABNT NBR 16917:2021, ABNT NBR NM 53:2003/Err.1:2006. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17827/material/Nbr_nm53_2003.pdf. Acesso em: abr. 2021.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 16416:2015 - Pavimentos Permeáveis de Concreto - Requisitos e procedimentos**, Rio de Janeiro, Primeira edição 06.08.2015, validade a partir de 06.09.2015, 25p., 2015. Disponível em: <https://pdfcookie.com/documents/nbr-16416-2015-pavimentos-permeaveis-de-concreto-requisitos-e-procedimentos-x20g5w86k9l3>. Acesso em: nov. 2020.

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**, v. 193, p. 105-127, 2018. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.182. Acesso em: set. 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R: Report on Pervious Concrete** ACI Committee 522. [s.l.: s.n.]. 2010. Disponível em: <https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/522R-10web.pdf>. Acesso em: nov. 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-860: Standard Test Method for Determining the Consistency of Refractory Castable Using the Ball-In-Hand Test** 4p., Philadelphia, U.S.A., 2015. Disponível em: <https://www.ortonceramic.com/dir.cfm/en/ASTM%20C860/>. <https://www.scribd.com/document/427027877/Standard-Test-Method-for-Determining-the-Consistency-of-Refractory-Castable-Using-Ball-In-Hand>. Acesso em: mar. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C33/C33M: Standard Specification for Concrete Aggregates**. Philadelphia, 2018 Edition, March 15, 2018.

Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=ASTM%20C33%2FC33M&item_s_key=00517362. Acesso em: fev. 2021.

CHINCHILLAS-CHINCHILLAS, M. J. *et al.* SEM image analysis in permeable recycled concretes with silica fume. A quantitative comparison of porosity and the ITZ. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2201, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12132201>. Acesso em: out. 2020.

ĆOSIĆ, K. *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>. Acesso em: out. 2020.

COSTA, F. B. P. *et al.* Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952018000500013>. Acesso em: fev. 2021.

CUI, X. *et al.* Experimental study on the relationship between permeability and strength of pervious concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 11, p. 1-9, 2017. Disponível em: DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002058. Acesso em: out. 2020.

FERNANDES, W. E. H. **Concreto permeável para aplicação em pavimentação intertravada a partir de concreto de pós reativos-CPR**, 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/25749>. Acesso em: mar. 2021.

GÜNEYISI, E. *et al.* Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, journal ISSN:1359-5997, journal e-ISSN:1871-6873, v. 49, n. 1-2, p. 521-536, 2016. Disponível em: DOI:10.1617/s11527-014-0517-y. Acesso em: out. 2020.

JACOB, A. *et al.* Evaluation of compressive strength and permeability of pervious concrete using micro silica. **Technical Research Organisation India**, ISSN (PRINT): 2393-8374, (ONLINE): 2394-0697, v.5, n.7, p. 7-12, 2018. Disponível em: <http://troindia.in/journal/ijcesr/vol5iss7/7-12.pdf>. Acesso em: mar. 2021.

JAIN, A. K.; CHOUHAN, J. S. Effect of Shape of Aggregate on Compressive Strength and Permeability Properties of Pervious Concrete. **International Journal of Advanced Engineering Research and Studies**, v. 1, n. 1, p. 120-126, 2011. Disponível em: <https://www.technicaljournalonline.com/ijaers/VOL%20I/IJAERS%20VOL%20I%20ISSUE%20I%20%20OCTBER%20DECEMBER%202011/23%20IJAERS.pdf>. Acesso em: set. 2020.

KASSEM, H. A. *et al.* Method to investigate mix design parameters of pervious concrete mixtures. **Transportation Research Record**, 2577p., n. 1, p. 43-52, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2577-06>. Acesso em: out. 2020.

KEVERN, J. T.; SCHAEFER, V. R.; WANG, K. Mixture proportion development and performance evaluation of pervious concrete for overlay applications. **ACI Materials**

Journal, v. 108, n. 4, p. 439-448, 2011. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/289748306>. Acesso em: out. 2020.

KOTHARI, V. P.; RATH, S. M. Experimental Study on Pervious Concrete by Varying Size and Shape of Aggregate. **International Journal on Recend Innovation Trends in Computing and Communication** (ISSN: 2321-8169), v. 4, n. 4, p. 235-240, 2016. Disponível em: <http://www.ijritcc.org>. Acesso em: dez.2020.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. [s.l.:s.n.]. 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/21839>. Acesso em: out. 2020.

MAHBOUB, K. C. *et al.* Pervious concrete: Compaction and aggregate gradation. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 6, p. 523-528, 2009. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/285749975_Pervious_Concrete_Compaction_and_Aggregate_Gradation. Acesso em: mar. 2021.

OLIVEIRA, B. C. **Pavimento permeável incorporado com agregado reciclado de concreto**. [S.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade), Instituto Federal Goiano, 2019.

PARK, S. B.; TIA, M. An experimental study on the water-purification properties of porous concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 177-184, 2004. ISSN: 0008-8846. doi:10.1016/S0008-8846(03)00223-0. Disponível em:
<http://www.sciencedirect.com/science/journal/0008884>. Acesso em: mar. 2021.

SONEBI, M.; BASSUONI, M. T. Investigating the effect of mixture design parameters on pervious concrete by statistical modelling. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 147-154, 2013, journal ISSN :0950-0618. Disponível em:
 DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.044. Acesso em: out. 2020.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 75-89, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000100006>. Acesso em: set. 2020.

TENNIS, PAUL D.; LEMING, MICHAEL L.; AKERS, DAVID J. **Pervious Concrete Pavements**. [s.l.: s.n.]. 28p., 2004. PCI-Portland Cement Association, NRMCA-Portland Cement Association Concrete National Association ReadyMixed. ISBN 0-89312-242-4. Print History: First Printing 2004; Second Printing (rev.) 2004; Third Printing 2006; Fourth Printing (rev.) 2007; Fifth Printing 2008. 36p. URL:
<http://worldcat.org/isbn/0893122424>. Disponível em: https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete-applications/eb302-03.pdf?sfvrsn=ed4afdbf_2. Acesso em: nov. 2020.

VÁZQUEZ-RIVERA, N. I. *et al.* Optimization of pervious concrete containing fly ash and iron oxide nanoparticles and its application for phosphorus removal. **Construction and Building Materials**, v. 93, n. 12, p. 22-28, 2015. Disponível em:
 DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.05.110. Acesso em: dez. 2020.

WANG, K. *et al.* Development of Mix Proportion for Functional and Durable Pervious Concrete. NRMCA Technology Forum: Focus on Pervious Concrete, Nashville, TN. **Anais...**2006. Disponível em: https://nanopdf.com/download/development-of-mix-proportion-for-functional-and-durable-pervious_pdf. Acesso em: set. 2020.

XIE, C. *et al.* Study on failure mechanism of porous concrete based on acoustic emission and discrete element method. **Construction and Building Materials**, v. 235, n.3, p. 117409, 2020. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117409. Acesso em: nov. 2020.

YAP, S. P. *et al.* Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 155-165, 2018. Disponível em: DOI:10.1016/j.jclepro.2018.01.205. Acesso em: out. 2020.

ZHANG, Z. *et al.* Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 135, p. 112-118, 2017. Disponível em: DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.203. Acesso em: set. 2020.

ZHENG, M.; CHEN, S.; WANG, B. Mix design method for permeable base of porous concrete, 6p. **International Journal of Pavement Research and Technology**, ISSN 1997-1400, v. 5, n. 2, p. 102-107, 2012. Disponível em: <http://www.ijprt.org.tw/reader/pdf.php?id=228>. Acesso em: jan. 2021.

ZHONG, R.; WILLE, K. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 132-141, 2018. Disponível em: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.175. Acesso em: set. 2020.

5 CONCLUSÃO GERAL

Face ao exposto conclui-se que:

- a) a especificidade dos materiais de cada região dificulta uma metodologia global de criação de traços, entretanto os mesmos princípios podem ser aplicados em todas as situações, com alguns ajustes;
- b) o agregado reciclado de concreto tem imenso potencial de substituir por completo o agregado natural no caso do concreto permeável visto que foi possível atingir os requisitos mínimos da norma ABNT NBR 16416 tanto para resistência mecânica quanto para permeabilidade; e
- c) para as condições do trabalho a permeabilidade sempre esteve bastante acima do mínimo requerido pela ABNT NBR 16416, não sendo um fator limitante.

Sugerem-se temas para futuras pesquisas a saber:

- a) mudança de granulometria e estudo de seus efeitos, inclusive com adição de areia;
- b) proposição de métodos mais assertivos e precisos de compactação de forma a padronizar melhor todos os corpos de prova;
- c) estudo da colocação de aditivos como redutores de água ou incorporadores de ar;
- d) adição de fibras com estudo do traço e propriedades mecânicas; e
- e) testes de colmatação e potencial de restauração de permeabilidade.