



COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE CONCRETOS DE
RESISTÊNCIA NORMAL E DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO AGREGADOS
DE RESÍDUOS DE CONCRETO E METACAUULIM

Juliano de Freitas Dutra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho
Mayara Amario

Rio de Janeiro
Dezembro de 2021

COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE CONCRETOS DE
RESISTÊNCIA NORMAL E DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO AGREGADOS
DE RESÍDUOS DE CONCRETO E METACAULIM

Juliano de Freitas Dutra

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Mayara Amario

Aprovada por: Prof. Romildo Dias Toledo Filho

Prof.^a Mayara Amario

Dr.^a Caroline Santana Rangel

Dr. Marco Pepe

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2021

Dutra, Juliano de Freitas

Comportamento mecânico e durabilidade de concretos de resistência normal e de alta resistência contendo agregados de resíduos de concreto e metacaulim / Juliano de Freitas Dutra. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

XV, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Mayara Amario

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 79-90.

1. RCD 2. ARC 3. Dosagem científica 4. Durabilidade 5. Metacaulim I. Toledo Filho, Romildo Dias *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

*Dedico este trabalho a meus pais,
Francisco e Telma.*

“É ótimo celebrar o sucesso, mas mais importante ainda é assimilar as lições trazidas pelos erros que cometemos”

Bill Gates

Agradecimentos

Ao sentar para relembrar alguns momentos, escrever e agradecer a todas aquelas pessoas que sempre estiveram ao meu lado, desde sempre, nunca me deixando desanimar e sempre me colocando para cima, foi impossível segurar as lágrimas em meus olhos. Nunca imaginei que esta seria a parte mais difícil e emocionante de se escrever, da minha dissertação. Mas, quem me conhece, sabe o quão grato e sentimental eu sou. Acredito que isso não seja para menos, pois não foi fácil enfrentar os desafios acadêmicos e pessoais para chegar até aqui.

Inicialmente, agradeço à Deus, por estar sempre me guiando em todos os momentos, não me desamparando em momento algum.

Agradeço ao Romildo e a Mayara, por confiarem em mim e aceitarem me orientar. Obrigado por toda atenção prestada, todo conhecimento transmitido, na qual sou muito grato. Agradeço também à Carol, por todo apoio em todas as etapas deste trabalho. Deixo um agradecimento especial para vocês duas, Mayara e Carol, que além do papel exercido durante esta caminhada, acima de tudo, foram minhas amigas, sempre procurando estar por perto e me fazer sentir acolhido.

Agradeço também ao Marco Pepe e ao Paulo Roberto por terem aceitado ser membros da minha banca, para assim contribuir e enriquecer todo este trabalho. Muito obrigado. A participação de vocês foi de fundamental importância.

Agradeço a uma parte fundamental e muito importante para que este sonho pudesse ser realizado, minha família. Em especial, aos meus pais, Francisco e Telma e meu irmão, Luis Felipe. Obrigado por todo apoio, pelo incentivo constante, por nunca me deixarem desanimar e por sempre apoiarem meus sonhos e por sempre acreditarem em mim, até mais que eu mesmo. Agradeço também aos meus avós, por todas as orações prestadas durante toda a caminhada percorrida até aqui. Agradeço aos meus tios que também foram fontes inesgotáveis para mim. Obrigado por todo empenho, preocupação e incentivo que vocês me deram. Sou muito grato por todo carinho que vocês sempre tiveram comigo. Não poderia deixar de agradecer também, meus primos. Que, apesar de serem novos e as

vezes não compreenderem muito as nossas decisões, sempre me deixaram claro a saudade e o carinho que vocês têm comigo. Amo muito vocês.

Agradeço, em especial, a Rafaella, por desde o primeiro encontro na UFRJ, na fila da bolsa, já ter cruzado o meu caminho e se tornado família no Rio de Janeiro. Felizmente, por um excelente motivo, não conseguimos concluir esta etapa juntos, na mesma universidade. Mas quero que você saiba que sou muito grato por todos os momentos compartilhados com você, por todo apoio, sempre estando presente. Estou com muita saudade.

Igor, Lucas e Nivalda, quero que vocês saibam que vocês foram peças fundamentais para a concretização deste sonho. Muito obrigado por todo companheirismo durante os perrengues das disciplinas, dos cupons de almoço grátis e todos os passeios e risadas compartilhados.

Um agradecimento mais que especial ao meu quarteto formado por mim, Lucas, Maíra e Marianna. Eu não sei explicar o que teria sido de mim sem todo o apoio de vocês desde o primeiro dia de pesquisa. Muito obrigado por todo apoio de sempre, por todos os desafios vencidos juntos, por todas as descobertas e todos os perrengues enfrentados juntos também. Serei eternamente “*team*” RCD. Não poderia deixar de agradecer também os alunos de iniciação científica Daniel e Paulo. Vocês foram peças fundamentais em grande parte desta pesquisa.

Agradeço também aos amigos que se tornaram família, que o NUMATS me apresentou. Amanda, Bruno, Nathália, Pedro, Yassin e Carol, que apesar de ter chegado há pouco tempo, não é menos importante. Saibam que vocês foram peças fundamentais para mim. Obrigado por todo apoio, por sempre acreditarem em meu potencial, por sempre me incentivarem, nunca me deixando abater pelos desafios do cotidiano. Obrigado por se tornarem parte da minha família, por me acolherem nesta cidade. Obrigado por toda preocupação de sempre. Eu não tenho palavras suficientes para agradecer vocês.

Gostaria de fazer um agradecimento especial aos meus amigos Abílio, Alan, André e Renata. Não sei nem o que falar de vocês que apesar da distância geográfica, sempre se fizeram presentes em meu cotidiano. Muito obrigado pelo apoio, carinho, preocupação e incentivo de sempre. Obrigado por sempre terem acreditado em mim. Obrigado por todas as ligações, todas as mensagens, sempre a meu lado. Amo muito vocês.

Agradeço também a todos os meus amigos de São Pedro do Avaí, Belo Horizonte, Vale do Aço, Inhapim e Bahia. Vocês para mim são família. Obrigado por todos os momentos de compreensão, paciência, incentivo e todo carinho que sempre tiveram comigo. Saibam que vocês são parte fundamental em minha vida.

Se eu conheço um laboratório mais família que o meu, eu desconheço. NUMATS não é somente um laboratório de pesquisa acadêmica, este lugar é um abrigo, é família. Gostaria de agradecer a todos vocês, alunos e técnicos, que sempre me ajudaram em todos os momentos para que esta pesquisa fosse realizada. Vocês são parte fundamental desta conquista. Quero que saibam que a realização deste sonho também é de vocês. Muito obrigado por tudo.

Agradeço também à minha segunda família no Rio. Alberto, Camila, Lucas, Rafael, Thiago e todos os demais que esta cidade maravilhosa me apresentou. Vocês são minha família também. Obrigado por sempre se preocuparem comigo. Obrigado por todos os conselhos, todo apoio de sempre e todas as alegrias compartilhadas.

Agradeço também a todos os laboratórios da UFRJ que me auxiliaram na execução de várias atividades para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

À LafargeHolcim pela doação de todo cimento utilizado para produzir os concretos do estudo.

À CAPES e a Fundação COPPETEC pelo apoio financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPORTAMENTO MECÂNICO E DURABILIDADE DE CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E DE ALTA RESISTÊNCIA CONTENDO AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO E METACAULIM

Juliano de Freitas Dutra

Dezembro/2021

Orientadores: Romildo Dias Toledo Filho

Mayara Amario

Programa: Engenharia Civil

No presente estudo, avaliou-se o comportamento mecânico e a durabilidade de concretos de classe C30 e C60, utilizando 100% de agregado graúdo reciclado de concreto e 15% de metacaulim como Material Cimentício Suplementar (MCS), dosados seguindo os princípios do Modelo de Empacotamento Compressível (MEC). O comportamento de tensão *versus* deformação e a resistência à tração das misturas foram determinadas após 28 e 90 dias de cura e a durabilidade foi avaliada a partir de ensaios de absorção de água por capilaridade e penetração acelerada de íons cloretos aos 90 dias de cura. Em acréscimo, foram realizados ensaios físicos de absorção total de água, índice de vazios e massa específica na mesma idade. A utilização do metacaulim como MCS conduziu a misturas com uma menor quantidade total de materiais cimentícios (redução de até 40%). Todas as misturas apresentaram abatimento de 180 ± 30 mm e as resistências de projeto foram alcançadas para os 28 dias de idade. Devido a tendência em alcançar maior desempenho à resistência à compressão em idades iniciais, não se observou acréscimos expressivos (de 2-6%) de resistência nas misturas com metacaulim até 90 dias. Já as misturas contendo apenas cimento Portland, por sua vez, alcançaram um desempenho de (8-17%) ao longo do tempo. Ao se utilizar 100% de agregado reciclado, obteve-se uma maior quantidade de volume total de argamassa, porém a mesma não ocasionou perda de durabilidade nos concretos com a presença de metacaulim. Para ambas as classes, a utilização de metacaulim mostrou tendência de melhoria na durabilidade dos concretos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL BEHAVIOR AND DURABILITY OF NORMAL STRENGTH AND
HIGH STRENGTH CONCRETE CONTAINING WASTE CONCRETE
AGGREGATE AND METACAULIN

Juliano de Freitas Dutra

December/2021

Advisors: Romildo Dias Toledo Filho

Mayara Amario

Department: Civil Engineering

In the present study, the mechanical behavior and durability of classes C30 and C60 concretes were evaluated, using 100% recycled coarse concrete aggregate and 15% of metakaolin as Supplementary Cementitious Material (SCM), dosed following the principles of the Compressible Packing Model (CPM). The stress versus strain behavior and the tensile strength of the mixtures were determined after 28 and 90 days of curing and the durability was evaluated from capillary water absorption tests and accelerated penetration of chloride ions at 90 days of cure. In addition, physical tests of total water absorption, void index and specific mass at the same age were carried out. The use of metakaolin as SCM led to mixtures with a lower total amount of cementitious materials (up to 40% reduction). All mixtures showed a slump of 180 ± 30 mm and design strengths were reached for 28 days of age. Due to the tendency to achieve greater compressive strength performance at early ages, no expressive increases (2-6%) of resistance were observed in the mixtures with metakaolin for up to 90 days. For the mixtures containing only Portland cement, they achieved a performance of (8-17%) over time. By using 100% recycled aggregate, a greater amount of total mortar volume was obtained, but it did not degrade the durability of concrete with the presence of metakaolin. For both classes, the use of metakaolin showed a tendency of improvement in the concrete durability.

Sumário

<i>Lista de Figuras</i>	<i>xiii</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>xvi</i>
<i>Capítulo 1 Introdução</i>	<i>1</i>
1.1 <i>Motivação</i>	<i>1</i>
1.2 <i>Objetivos</i>	<i>3</i>
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	<i>3</i>
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	<i>3</i>
1.2.3 <i>Estrutura da dissertação</i>	<i>3</i>
<i>Capítulo 2 Revisão Bibliográfica</i>	<i>5</i>
2.1 <i>Definição, composição e geração dos resíduos de construção e demolição</i>	<i>5</i>
2.2 <i>Propriedades dos agregados reciclados de concreto</i>	<i>8</i>
2.3 <i>Concreto Reciclado com inserção de agregados reciclados de concreto</i>	<i>12</i>
2.3.1 <i>Métodos de dosagem</i>	<i>12</i>
2.3.2 <i>Propriedades dos concretos reciclados</i>	<i>14</i>
2.3.3 <i>Adição de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) em concreto reciclado</i>	<i>17</i>
<i>Capítulo 3 Materiais e Métodos</i>	<i>25</i>
3.1. <i>Materiais</i>	<i>25</i>
3.1.1. <i>Produção e beneficiamento do agregado graúdo reciclado</i>	<i>25</i>
3.2. <i>Caracterização dos materiais</i>	<i>27</i>
3.2.1. <i>Caracterização dos agregados</i>	<i>27</i>
3.2.2. <i>Cimento e Metacaulim</i>	<i>29</i>

3.2.3.	Superplastificante	31
3.3.	<i>Dosagem e composição das misturas</i>	33
3.3.1.	Parâmetros necessários para a aplicação do Método de Empacotamento Compressível (MEC).....	33
3.3.2.	Composição das misturas	40
3.3.3.	Produção, moldagem e cura dos concretos reciclados	43
3.4.	<i>Métodos de ensaios</i>	45
3.4.1.	Abatimento do tronco de cone.....	46
3.4.2.	Resistência à compressão axial.....	46
3.4.3.	Resistência à tração por compressão diametral	47
3.4.4.	Absorção total, índice de vazios e massa específica	48
3.4.5.	Absorção de água por capilaridade.....	50
3.4.6.	Penetração acelerada de íons cloreto	52
<i>Capítulo 4 Apresentação e análise dos resultados</i>		55
4.1	<i>Abatimento do tronco de cone</i>	55
4.2	<i>Comportamento mecânico</i>	57
4.3	<i>Absorção total de água, índice de vazios e massa específica</i>	66
4.4	<i>Absorção de água por capilaridade</i>	69
4.5	<i>Penetração acelerada por íons cloretos</i>	74
<i>Capítulo 5 Considerações Finais</i>		76
5.1	<i>Conclusões</i>	78
5.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	79
<i>Referências Bibliográficas</i>		80

Lista de Figuras

Figura 2.1: Diagrama esquemático da antiga e da nova zona ITZ	10
Figura 2.2: Propostas avaliadas para melhorar a dosagem de concretos reciclados.....	13
Figura 2.3: DRX das misturas RM0-0, RM100-0 e RM100-15.....	18
Figura 2.4: (a) substituição por cinza volante; (b) substituição por metacaulim.....	19
Figura 2.5: Resistência à compressão da substituição de cimento Portland comum por cinza volante com 100% de AGRC	20
Figura 2.6: Resistência à compressão da substituição de cimento Portland comum por metacaulim com 100% de AGRC	21
Figura 2.7: Resistência à tração para 28 dias.....	22
Figura 2.8: Resultados obtidos para a resistência à penetração de íons cloreto dos concretos reciclados com teores de metacaulim.....	23
Figura 3.1: (a) fração grossa após a britagem; (b) Processo de peneiramento; (c) Pilha de homogeneização	26
Figura 3.2: Curva granulométrica dos agregados	27
Figura 3.3: Composição granulométrica do cimento CPV – ARI.....	30
Figura 3.4: Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI	32
Figura 3.5: Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV ARI e adição de metacaulim	32
Figura 3.6: Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) posicionamento do pistão antes da vibração; (b) posição do pistão após vibração; (c) leitura da posição do pistão, através do catetômetro	34
Figura 3.7: Etapas do ensaio de demanda d'água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar.....	36
Figura 3.8: Misturador mecânico utilizado e aparelho de Vicat.....	38
Figura 3.9: Betoneira do fabricante GMEG – MOTOMIL com capacidade de 120l.....	44
Figura 3.10: (a) inserção dos agregados; (b) mistura após inserção de 50% da água; (c) adição do cimento; (d) mistura pronta.....	45
Figura 3.11: (a) preparação dos moldes diretamente na mesa vibratória; (b) preenchimento das camadas de concreto.....	45

Figura 3.12: Procedimento realizado para obtenção do abatimento do tronco de cone .	46
Figura 3.13: Resistência à compressão axial	47
Figura 3.14: Resistência à tração por compressão diametral.....	48
Figura 3.15: Ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica: (a) corpos de prova imersos em água; (b) ebulição; (c) pesagem dos corpos de prova imersos em água	49
Figura 3.16: Ensaio de absorção capilar: (a) selagem do corpo de prova com plástico filme; (b) corpo de prova imerso em lâmina d'água.....	51
Figura 3.17: Curva típica de absorção total de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo.....	52
Figura 3.18: (a) amostra selada com SikaDur 32®; (b) preparação das amostras para o ensaio de migração de íons cloreto.....	53
Figura 3.19: (a) posicionamento da amostra na célula de acrílico; (b) equipamento utilizado no ensaio de migração de íons cloretos.....	54
Figura 4.1: Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial para os concretos: (a) e (b): 28dias; (c) e (d): 90dias	57
Figura 4.2: Curvas típicas de tensão <i>versus</i> deformação axial para os concretos: (a) e (b): 28dias; (c) e (d): 90dias.....	58
Figura 4.3: Comparação entre as resistências à compressão obtidas experimentalmente e as resistências teóricas previstas pelo programa Betonlab: (a) cimento; (b) cimento + metacaulim.....	62
Figura 4.4: Resistência à compressão em função do fator a/mc efetivo.....	63
Figura 4.5: Valores médios de resistência à tração por compressão diametral.....	63
Figura 4.6: Relação entre os resultados médios de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial.....	65
Figura 4.7: (a) absorção total de água (%); (b) índice de vazios (%).....	66
Figura 4.8: Massa específica (kg/m^3)	68
Figura 4.9: Comportamento de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de cura - (a) e (c): cimento; (b) e (d): cimento + metacaulim.....	69
Figura 4.10: Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadra – (a) e (b): 90 dias.....	71

Figura 4.11: Correlação entre Absorção capilar (g/cm^3) x Índice de vazios (%); (a): misturas contendo apenas cimento; (b) misturas contendo cimento + metacaulim.....73

Figura 4.12: Carga elétrica passante das misturas submetidas ao ensaio de penetração acelerada de íons cloretos.....74

Figura 4.12: Penetração acelerada por íons cloretos (C) x Índice de vazios (%) – (a): misturas contendo apenas cimento; (b) misturas contendo cimento + metacaulim.....76

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Propriedades analisadas dos agregados	28
Tabela 3.2: Composição química do cimento e do metacaulim	30
Tabela 3.3: Resistência à compressão do cimento (MPa)	31
Tabela 3.4: Caracterização do superplastificante	31
Tabela 3.5: Tamanho dos grãos e compactação experimental de cada classe de cada material	35
Tabela 3.6: Valores encontrados da calibração de " p ", " q " e " $kp(t)$ "	39
Tabela 3.7: Composição das misturas de concreto	41
Tabela 3.8: Dados adicionais da composição das misturas	43
Tabela 3.9: Índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloreto	54
Tabela 4.1: Resultado de abatimento do tronco de cone obtidos para os concretos produzidos	55
Tabela 4.2: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 e 90 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)	60
Tabela 4.3: Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)...69	
Tabela 4.4: Valores dos pontos de transição e absorvidade dos concretos produzidos...72	
Tabela 4.5: Classificação diante o índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloretos74	

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

A indústria da construção civil é um setor responsável, em grande parte, pela economia mundial, com geração de empregos e com uma ligação direta com a produção de insumos, equipamentos e serviços gerados para realização das atividades do mesmo (PAZ & LAFAYETTE, 2016). Consequentemente, o setor gera uma grande quantidade de resíduos oriundos de suas mais diversas atividades, que são descartados de forma imprópria em diversos lugares, como: áreas urbanas, riachos, estradas e locais impróprios, ocasionando poluição ambiental e visual do meio (CONTRERAS *et al.* 2016).

Se tratando de números, Akhtar e Sarmah (2018) estimaram que a geração mundial de resíduos gira em torno de 3 bilhões de toneladas por ano. Só no Brasil, esse número é, em média, 70 milhões de toneladas anualmente, mas esse valor é variável de acordo com o Índice de Desenvolvimento Humano (CONTRERAS *et al.* 2016). E nos últimos anos, estudos sobre a reciclagem desses resíduos de demolição vêm sendo realizados com a finalidade de substituírem os agregados naturais (AN) por agregados reciclados em concretos (KISKU, 2017). E, vale ressaltar que uma pesquisa feita por Etxeberria e Vegas (2015) estimou que os resíduos de construção e demolição (RCD) são diversos e acredita-se que 75% do RCD é composto por tijolos e concretos.

O agregado é um componente fundamental para a produção de concretos e sua qualidade possui grande influência nas propriedades que se quer alcançar (OPER *et al.* 2017). Portanto, é fundamental realizar a caracterização do mesmo para avaliar se a sua utilização é adequada ou não. A principal característica encontrada nos Agregados de Resíduos de Concreto (ARC), de acordo com Kisku (2016), é a verificação de argamassa aderida (pasta de cimento mais agregado miúdo) na superfície do agregado original, que passa a fazer parte do ARC. Com isso, sua presença afeta nas propriedades que estão relacionadas a sua deformação, durabilidade e no desempenho mecânico do concreto reciclado.

Em relação as propriedades mecânicas, Amario (2019) utilizou o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por De Larrard (1999), para realizar a dosagem dos concretos reciclados, levando em consideração todas as propriedades que os ARC possuem. Com essa metodologia, a pesquisadora comprovou que, diante uma dosagem realizada de forma adequada para a produção de concretos reciclados, a resistência do mesmo é compatível com a dos concretos naturais.

Contudo, outro problema enfrentado para um melhor desenvolvimento do concreto reciclado é a alta porosidade que esse material possui, o que, conseqüentemente, afeta negativamente não só suas propriedades mecânicas, mas também a sua durabilidade. Assim, como forma de diminuir o volume de poros existentes nos concretos reciclados, a substituição do cimento por certos teores de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) vem sendo analisada.

Além disso, dentre os materiais utilizados para a produção do concreto, o cimento é o material que mais libera dióxido de carbono, diante o seu processo de produção. Portanto, realizar a substituição do cimento por Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) não só contribui para a diminuição do volume dos poros, mas também diminui o impacto causado pelo mesmo (ZHANG *et al.* 2019).

Alguns estudos (KOU e POON, 2013; KURAD *et al.* 2017; MUDULI e MUKHARJEE, 2018; MUDULI e MUKHARJEE, 2019) vêm mostrando que o uso de MCS, como cinza volante e metacaulim, acarretam uma melhoria nas propriedades mecânicas e de durabilidade com até certos teores de substituição do cimento por MCS, juntamente com determinados teores de substituição de AN por ARC. Porém, entre os MCS citados, o metacaulim foi o que apresentou melhor desempenho nos concretos reciclados, diante levantamento realizado.

Assim, diante o exposto, o presente estudo possui a finalidade de analisar a influência da substituição de 100% do agregado gráúdo natural da fração Brita 1 por agregados reciclados de concreto, provenientes de resíduos de demolição e de mesma fração, juntamente com a substituição parcial do cimento Portland CPV – ARI por metacaulim, avaliando o comportamento físico, mecânico e de durabilidade aos 28 e 90 dias de cura, em concretos de resistência normal (30 MPa) e alta resistência (60 MPa).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é analisar a influência da substituição de agregados graúdos naturais por agregados reciclados e a substituição parcial do cimento Portland CPV – ARI por metacaulim, no comportamento físico, mecânico e de durabilidade, em concretos de classe C30 e C60.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar dosagem de concretos com metacaulim pelo MEC, considerando a eficiência do MCS para se obter misturas com a mesma resistência à compressão aos 28 dias de cura, em comparação aos concretos naturais.
- Avaliar o comportamento tensão *versus* deformação aos 28 e 90 dias de cura para as misturas produzidas com a substituição de agregado natural por agregado reciclado, juntamente com a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim.
- Determinar durabilidade através de ensaios de absorção de água por capilaridade e penetração acelerada de íons cloretos para os concretos de classe C30 e C60.

1.2.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado é composta por cinco capítulos:

- *Capítulo 1:* introdução do assunto abordado na dissertação. O mesmo apresenta a motivação para este estudo, o objetivo geral e os objetivos específicos.
- *Capítulo 2:* aborda uma revisão de literatura, em busca de um melhor entendimento sobre resíduos de construção e demolição, as propriedades de agregados e concretos reciclados e formas de melhorias de suas propriedades de durabilidade.

- *Capítulo 3:* apresenta todos os materiais utilizados na pesquisa, assim como os métodos de ensaio para avaliação das propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade dos concretos que foram submetidos.
- *Capítulo 4:* apresentação e análise dos resultados dos ensaios realizados nos concretos.
- *Capítulo 5:* consiste na apresentação das conclusões baseadas nos objetivos específicos e geral, determinados para esta dissertação.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas para a produção desta dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Definição, composição e geração dos resíduos de construção e demolição

A ABNT NBR 10004 (2004) define resíduos nos estados semissólidos que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Com o intuito de buscar a diminuição dos impactos ambientais oriundos diante a geração de resíduos provenientes da construção civil, uma vez que esse resíduo representa um grande percentual dos resíduos sólidos gerados nas áreas urbanas e que sua má disposição é prejudicial, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), determinou-se as seguintes definições na Resolução nº 307 de 2002:

I - Resíduos da construção civil: são aqueles oriundos de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

II - Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

III - Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

IV - Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

V - Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

A resolução CONAMA 307 (2002) classifica os resíduos sólidos da construção civil como:

I - Classe A: São os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B: São os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C: São os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D: São resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Esta resolução é a principal se tratando de gestão dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) e que dispõe sobre a responsabilidade dos municípios implantarem seus planos de gerenciamento, diretrizes e procedimentos para a administração adequada desses resíduos.

Segundo Duan *et al.* (2015) a expansão populacional urbana provoca um aumento na demanda de produtos, bens e serviços, o que leva à necessidade do crescimento industrial e ao consequente aumento na geração de resíduos. E, além do crescimento populacional, a legislação, o planejamento regional e a indústria da construção do país também são fatores que irão influenciar na quantidade e na composição dos RCD.

As altas taxas de geração de RCD é um aspecto crucial para o setor da construção (YAZDANBAKHSI, 2018). Na Europa, foi estimado uma geração de 858 milhões de toneladas no ano de 2014, representando cerca de 34,7% da geração total de RCD (EUROSTAT, 2017). No mesmo ano, nos Estados Unidos, foram gerados cerca de 534 milhões de toneladas (EPA, 2016). No Brasil, esse número chegou a 45,1 milhões de toneladas de RCD em 2016, o que proporcionou uma taxa de geração de 0,6 kg/habitante (ABRELPE, 2017).

O RCD é composto por vários tipos de materiais oriundos das mais diversas atividades realizadas pelo setor (DI MARIA *et al.* 2018). Sormunen e Kärki (2019) explicam que os RCD são compostos por sobras e quebras de blocos cerâmicos, tijolos, gesso, solos, metais, concretos, argamassas entre outros. E, no Brasil, a maior parte dos RCD são oriundos de atividades de demolições e reformas, cerca de 60% (FAVARETTO *et al.*, 2017).

Portanto, acredita-se que uma das maiores limitações para o uso desse material é a vasta gama de sua heterogeneidade. Mesmo que em uma quantidade insignificante, a presença de contaminantes como vidro, plástico, madeira e solos podem acarretar negativamente nas propriedades dos agregados reciclados produzidos (SILVA *et al.*, 2019; AKHTAR & SARMAH, 2018 e OPER *et al.*, 2017). Assim, uma solução para se obter um maior controle dos RCDs produzidos e diminuir consideravelmente a quantidade de contaminantes é realizar a segregação desse material gerado diante cada etapa da obra executada.

Esses resíduos são vistos como um material de baixa periculosidade, impactando mais pelo grande volume produzido. Porém, em sua heterogeneidade, encontra-se também materiais orgânicos, produtos perigosos e embalagens diversas que podem ajudar na proliferação de insetos e de outras doenças (AKHTAR, 2018).

Existem vários fatores que, quando executados de forma inadequada, contribuem para a geração de RCD durante a atividades de execução ou de demolição de obras. Dentre eles,

destaca-se: a gestão adotada pelas construtoras, o gerenciamento e compatibilização dos projetos, logística dos canteiros de obras, técnicas construtivas, mão de obra, materiais, entre outros fatores que podem interferir na geração de RCD (ISLAM *et al.*, 2019).

Atualmente, muitos estudos buscam dar uma determinada aplicação, na própria construção, para o resíduo gerado. E, Di Maria *et al.* (2018), Salesa *et al.* (2017) e Bravo *et al.* (2015) acreditam que hoje a prática de reciclagem mais comum para RCD é a produção de agregados reciclados (AR), já que sua maioria é composta por uma grande quantidade de concreto, argamassa e rochas (SHI *et al.*, 2016).

Além de causar uma diminuição da extração de recursos naturais quando, por exemplo, agregados naturais (AN) deixam de ser utilizados e, como substitutos, são usados agregados reciclados, existem outros pontos positivos com a realização da reciclagem dos RCD. Ulubeyli *et al.* (2017) afirmam que com essa reciclagem é possível conservar áreas de preservação ambiental, aumentar a vida útil de aterros, acarretar na diminuição da poluição e de gastos energéticos, além de criação de empregos.

2.2 Propriedades dos agregados reciclados de concreto

A norma da ABNT NBR 15116 (2004) apresenta a principal classificação para agregados de RCD. A mesma os classifica da seguinte forma:

- Agregado de resíduo de concreto (ARC): são os agregados que possuem, em sua fração graúda, o mínimo de 90%, em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas;
- Agregado de resíduo misto (ARM): são agregados que possuem, em sua fração graúda, o máximo de 89,9%, em massa de resíduos à base de cimento Portland e rochas.

Akhtar & Sarmah (2018) afirmam que os ARC são oriundos de um processo de cominuição do concreto existente para serem utilizados como agregados em novos concretos. Seu processamento deve acontecer de forma que otimize sua produção utilizável, em termos de quantidade e qualidade. A qualidade do concreto original, a presença de contaminantes e o processamento do próprio ARC influenciam diretamente a sua composição (NOGUCHI *et al.*, 2015).

O agregado é um componente fundamental para a produção de concretos e sua qualidade interfere diretamente nas propriedades do material que se deseja alcançar, uma vez que o concreto possui aproximadamente 75% de agregados em sua composição (KOPER *et al.*, 2017).

Assim, é de grande importância entender suas características para garantir boas propriedades em sua aplicação (VERIAN *et al.*, 2018). Como exemplo, é importante estudar a sua composição granulométrica, para que seja possível produzir concretos trabalháveis, com capacidade satisfatória para que possa conduzir a um melhor comportamento mecânico.

Como citado anteriormente, a NBR 15116 (2004) apresenta duas classificações para os agregados de RCD: ARC e ARM. Entre as duas classes definidas pela NBR 15116, os ARC possuem uma absorção de água menor do que os ARM. E, através do levantamento realizado por Amario (2015), constatou-se que a absorção de água dos ARC nas primeiras 24 horas, podem ser significativas dependendo da composição do agregado e de sua granulometria. O mesmo ocorre para a massa específica das classes de agregado reciclado, o ARC possui massa específica maior que os ARM, porém menor que a do agregado natural. Diante da menor porosidade dos ARC, eles apresentam uma massa específica maior quando comparados com os ARM.

Alberte e Handro (2021) realizaram um levantamento de todo histórico de utilização de agregados reciclados no mundo. E os mesmos observaram que várias normas internacionais recomendam que, dentre a diversidade de materiais que compõem os resíduos de construção e demolição, os mais indicados são aqueles que são compostos de, no mínimo, 90% de resíduos de concretos e argamassas. Portanto, diante sua menor porosidade, quando comparada com os ARM, e por ter uma maior aceitação mundial, optou-se pela utilização dos ARC para o desenvolvimento deste estudo, por apresentarem melhor desempenho do que os ARM.

Muitos estudos apresentam diferenças entre AN e ARC (KAPOOR *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2016; SNYDEN, 2016; SILVA *et al.*, 2015). Shi (2016) e Kisku (2016) afirmam que é comum verificar argamassa aderida (pasta de cimento mais agregado miúdo) na superfície do agregado original, que passa a fazer parte do ARC. A argamassa aderida é mais porosa e menos densa que a matriz agregada, diante sua origem, e a mesma cria um sistema mais leve no ARC. Sua qualidade e quantidade é influenciada diante a qualidade

do concreto original e da fração de tamanhos dos agregados (GONZALES-TABOADA *et al.*, 2016).

Portanto, sua presença afeta as propriedades que estão relacionadas à deformação (módulo de elasticidade, retração por secagem e fluência), durabilidade (absorção de água e permeabilidade) e ao desenvolvimento mecânico do concreto reciclado (GONZALES-TABOADA *et al.*, 2016; GRDIC *et al.*, 2010).

Suryawanshi (2015) observou que a fração de argamassa aderida (em volume da amostra) diminui com o aumento no tamanho do diâmetro do agregado. Entretanto, a presença da mesma diminui a massa específica e aumenta a capacidade de absorção dos ARC em relação aos AN (KISKU *et al.*, 2017). E, diante estudos realizados por Le *et al.* (2017), Leite e Monteiro (2016) e Shi (2016), o fato de os ARC conterem argamassa aderida ocasiona o surgimento de uma nova *Interfacial Transition Zone* (ITZ). Zhang *et al.* (2015) explicam que a ITZ é a região mais fraca do concreto diante sua maior porosidade e fissuras existentes nas pastas de cimento endurecido. Essa nova ITZ possui porosidade que parece ser influenciada pelas condições iniciais de umidade do ARC, juntamente com a resistência do concreto de origem do ARC.

Menegatti (2021) explica que, diferentemente do concreto convencional, no concreto reciclado, a ITZ ocorre em três momentos diferentes, que são: entre o grão de agregado natural que originou o ARC e a argamassa envelhecida aderida a este grão (ITZ 1); entre o grão de agregado natural e a nova argamassa (ITZ 2) e entre a argamassa aderida e a nova argamassa do concreto (ITZ 3). Este esquema pode ser melhor entendido e está representado na Figura 2.1.

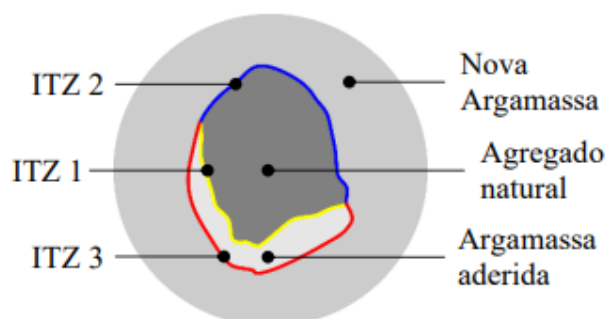


Figura 2.1: Diagrama esquemático da antiga e da nova zona ITZ
Fonte: Menegatti, 2021

González-Taboada *et al.* (2016) afirmam que as características das ITZ originais dependem da qualidade e da quantidade de argamassa aderida, característica na qual afeta várias propriedades do concreto reciclado. Assim, um concreto de alta resistência possui uma relação a/c mais baixa e uma estrutura menos porosa, o que ocasiona um agregado reciclado menos poroso do que aqueles oriundos de um concreto de baixa resistência, pois possui uma relação a/c mais alta e uma maior porosidade.

Portanto, quando o novo concreto é produzido com uma relação a/c mais baixa, a resistência a compressão possui uma maior influência da ITZ antiga (ITZ 1). Já quando o concreto é produzido com uma relação a/c mais alta, a ITZ 3 passa a ser determinante. Isso ocorre, pois o ARC com uma maior absorção de água tende a liberar água para a interface entre a argamassa aderida e a nova argamassa, ocasionando um maior fator a/c na região da ITZ 3 (DING *et al.* 2021).

Devido à presença de argamassa aderida, a textura da superfície dos Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC) é mais porosa e rugosa do que a do agregado natural. E, além da textura do agregado, características como o tamanho do agregado, seu teor de umidade, absorção de água e a sua forma são características que influenciarão nas propriedades no estado fresco do concreto, como a trabalhabilidade e à densidade úmida do concreto (KOU, F., POON, C., 2013; HENSCHEN, 2012).

Um ponto benéfico que os concretos reciclados apresentam é o ganho ambiental. Apesar de ser amplamente reconhecido que o cimento é o maior contribuinte para todos os impactos na fabricação de concreto, qualquer mudança diferencial na carga de impacto entre agregados naturais e reciclados pode ser significativa o suficiente para promover o ganho de sustentabilidade do concreto. Pois, apesar de uma menor contribuição ao impacto total gerado por AR, agregados reciclados graúdos e miúdos representam até 80% da massa de concreto, portanto uma comparação entre a pegada ecológica do concreto feito com agregados naturais ou reciclados pode mostrar que, ao fechar o ciclo de construção, são obtidas melhorias ambientais líquidas (RODRÍGUEZ-ROBLES *et al.* 2019).

Marinkovic *et al.* (2017) afirmam que, na maioria dos casos em que existe uma substituição de agregados, os resultados geralmente são benéficos para os concretos que contêm agregado reciclado. Por exemplo, Knoeri *et al.* (2013) mostraram que os impactos ambientais do concreto reciclado foram reduzidos para 70% quando comparados com os

impactos causados pelos concretos convencionais. Turk *et al.* (2015) alcançaram resultados semelhantes: os impactos foram reduzidos quando comparado os concretos reciclados com os convencionais. Porém, os principais motivos que ocasionaram nestas melhorias foram encargos evitados, como a diminuição de aterro de resíduos e sua reciclagem.

2.3 Concreto Reciclado com inserção de agregados reciclados de concreto

2.3.1 Métodos de dosagem

Wijayasundara *et al.* (2017) acreditam que o processo de dosagem da mistura é um ponto importante a ser avaliado para obter um concreto compatível entre os concretos produzidos com ARC e os concretos produzidos com AN. Ambas as misturas se diferem diante o ARC ser considerado um material mais poroso, com características superficiais fracas devido à argamassa aderida.

Amario *et al.* (2017) afirmam que o processo de dosagem do concreto convencional não é adequado para realizar a dosagem dos concretos reciclados. O processo de dosagem do concreto convencional é adequado para a execução do mesmo, porém utiliza-se esta dosagem e realiza-se a substituição em volume, de agregados naturais por agregados reciclados, o que já não é considerado adequado uma vez que eles não possuem as mesmas propriedades e comportamentos nos concretos. Uma vez que, como citado no tópico 2.2, a diferença existente entre os AN e os ARC, isto é, a presença de argamassa aderida afeta totalmente o comportamento do material reciclado, e esta característica não é levada em consideração quando o concreto reciclado é dosado da forma mais comum, em que se dosam concretos convencionais.

Ao longo do tempo, com o intuito de buscar uma melhor inserção dos ARC na matriz dos concretos reciclados, alguns estudos buscaram formas de realizar a dosagem de materiais, incluindo a fundo as propriedades que os ARC possuem. A Figura 2.2, apresenta um pouco das propostas desenvolvidas para ocasionar em melhores propriedades dos concretos reciclado com a inserção de ARC.

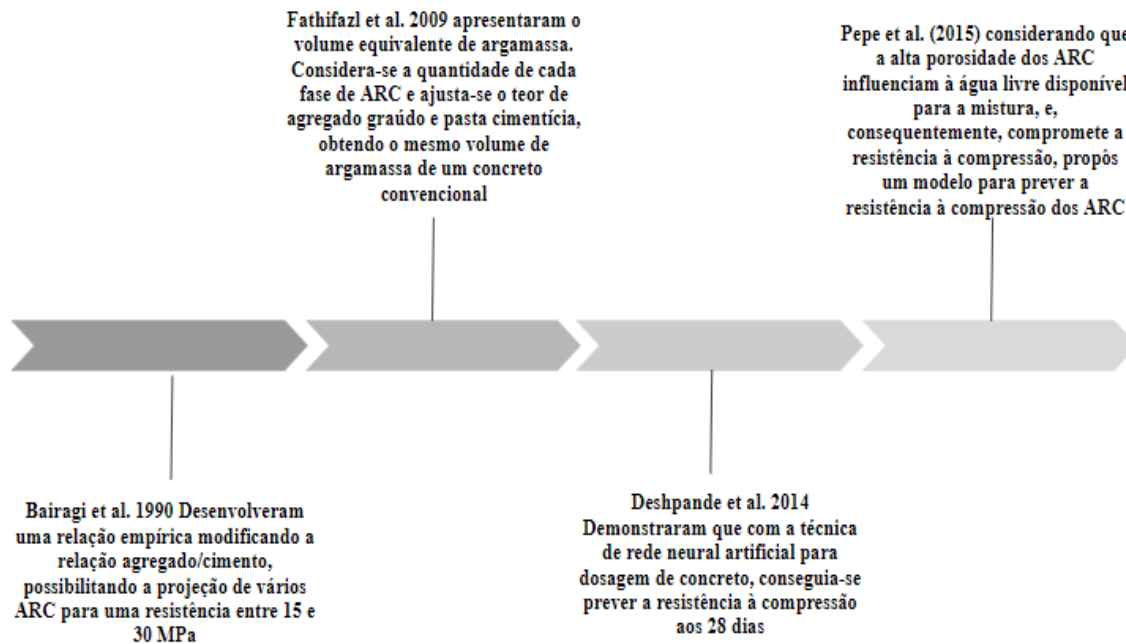


Figura 2.2: Propostas avaliadas para melhorar a dosagem de concretos reciclados
Fonte: Adaptado de AMARIO (2017)

Mesmo com o desenvolvimento de métodos para proporcionar melhoria no método de dosagem de materiais para concretos reciclados, De Brito *et al.* (2012) comentam que nenhum padrão/diretriz internacional ou algum produtor de concreto considera os ARC viáveis para fins de produção de concreto estrutural. Amario *et al.* (2017) acreditam que isso pode ser devido a limitação das metodologias propostas para sua aplicação ou pelo fato delas não permitirem uma análise de todas as propriedades.

Assim, a partir deste pressuposto, Amario *et al.* (2017) realizaram um estudo na qual buscou estender o *Compressive Packing Model (CPM)*, que foi desenvolvido por De Larrard (1998), para o caso da dosagem de concretos reciclados. O CPM é uma teoria na qual é executada com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*. Nele, é possível realizar a otimização dos traços de concretos e argamassas analisando algumas propriedades dos estados fresco e endurecido, de acordo com o objetivo que se deseja alcançar. Portanto, é necessário que o operador informe todos os dados de cada material que será utilizado para realização do traço.

Amario *et al.* (2017) produziram misturas estruturais para três classes de resistência (25, 45 e 65 MPa), com substituição dos AN por ARC variando nos teores entre 0 e 100%. Após realizar análises referentes às propriedades mecânicas, concluiu-se que, com a utilização da teoria CPM, foi possível produzir concretos estruturais reciclados sem afetar as propriedades analisadas.

2.3.2 Propriedades dos concretos reciclados

Algumas principais características dos ARC, como citado no item 2.2, é sua maior capacidade de absorção de água, sua superfície mais áspera e sua forma irregular (KURDA *et al.*, 2017). Portanto, a trabalhabilidade do concreto reciclado tende a ser menor do que quando comparado aos concretos convencionais. Essa redução da trabalhabilidade causada com a adição de ARC ocorre, pois o mesmo exige um aumento da água total, já que o material possui uma maior absorção de água, para que possa manter a mesma trabalhabilidade que um concreto convencional possui.

Porém, estudos realizados (Amario, 2019; Rangel, 2019; Andrade, 2018) mostraram que foi possível manter a trabalhabilidade dos concretos reciclados quando comparados com os concretos convencionais, com a utilização do método de dosagem científico, CPM, mencionado no item 2.3.1. Os autores acreditam que outro ponto a ser levado em consideração para a obtenção deste resultado foi a compensação de água realizada. Verian *et al.* (2018) acreditam que os concretos reciclados necessitam de uma água total adicional entre 5 e 15% a mais do que para os concretos convencionais e estudos realizados por Amario *et al.* (2017) e Pepe *et al.* (2016) mostraram que, durante o processo de mistura dos concretos, os ARCs absorveram apenas metade de sua capacidade total de absorção de água. Portanto, para a mistura dos concretos deste trabalho, foi considerado apenas 50% da absorção de água dos agregados reciclados.

Já algumas propriedades do estado endurecido do concreto, como propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade podem ser prejudicadas. Este fato pode ser justificado diante a existência de duas ITZs quando utilizamos agregado reciclado: uma formada entre o agregado original e a argamassa aderida e outra zona entre o agregado reciclado e a nova argamassa. E, a ITZ, é considerada a parte mais fraca do concreto pelo fato de possuir uma maior quantidade de poros e fissuras, ocasionando em uma menor resistência à compressão dos concretos reciclados quando os comparamos com os concretos convencionais. Outro fato observado é que a diminuição na resistência também pode ser explicada diante da maior quantidade de água na mistura, para alcançar uma trabalhabilidade desejável do concreto (KURDA *et al.*, 2018, KURDA *et al.*, 2017). A presença de argamassa aderida nas superfícies do ARC também contribui para a menor resistência à compressão do concreto reciclado, por possuir menor densidade (KURDA *et al.*, 2018), pois como a densidade da argamassa aderida é menor, conseqüentemente a

mesma possui uma quantidade maior de poros, tornando assim a parte mais fraca do concreto.

Em relação à resistência à tração dos concretos reciclados, Amario (2019) comentou que esta propriedade está diretamente relacionada à resistência à compressão. Ou seja, quanto maiores forem os valores de resistência à compressão, maiores serão os valores de resistência à tração do concreto reciclado. Portanto, diante uma diminuição na resistência à compressão dos concretos reciclados, esperava-se que o mesmo ocorresse para a resistência à tração. Assim, verificou-se que as resistências à tração, à flexão e módulo de elasticidade obtiveram uma queda diante o aumento do teor de substituição de agregados (SILVA *et al.* 2015; SILVA *et al.* 2016; KISKU *et al.* 2017).

Estudos apresentam uma diminuição para algumas propriedades mecânicas dos concretos reciclados (IMAM *et al.*, 2019; BAO *et al.*, 2020), porém Amario (2019) e Rangel (2019) comprovaram que, com uma dosagem adequada da mistura do concreto reciclado, é possível manter-se desejável a resistência que se quer alcançar. Isso foi possível quando se utilizou os princípios do *Compressible Packing Model (CPM)*, que foi desenvolvido por De Larrard (1998) e De Larrard (2014), e executado com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*, na qual o procedimento já foi explanado no item 2.3.1 deste trabalho. A autora produziu duas classes de resistência à compressão, uma de 35MPa e outra de 60MPa. Os concretos reciclados para ambas as classes de resistência possuíam pelo menos uma fração, 100% de brita 0 ou 100% de brita 1, de agregado graúdo reciclado de concreto provenientes de resíduos de demolição e de resíduos de concreto produzido em laboratório. E, após 28 dias de cura do concreto reciclado, observou-se que as resistências à compressão e à tração, para todas as misturas que continham AGRC, se mantiveram quando comparadas com as misturas de concretos convencionais, ou seja, que possuíam somente AN.

Já a capacidade que os concretos reciclados possuem em resistir as ações ambientais e químicas sem perdas relevantes em seu desempenho, ou seja, sua durabilidade, está totalmente relacionada à porosidade do concreto (AMARIO, 2019). Nobre *et al.* (2020) afirmam que a absorção de água é uma das propriedades que distingue os concretos reciclados dos concretos convencionais. A maior porosidade do agregado reciclado de concreto causado pela argamassa aderida em sua superfície confere uma maior capacidade de absorção de água. E, quanto maior for a quantidade de argamassa aderida, maior será a porosidade e a absorção de água do concreto (GUO *et al.*, 2018).

A durabilidade dos concretos reciclados é geralmente menor do que a dos concretos convencionais (SILVA e DE BRITO, 2015; SILVA *et al.* 2015; KISKU *et al.* 2017; GUO *et al.* 2018). Como exemplo, Kou e Poon (2015) obtiveram valores variando entre 5,14 e 8,63%, em comparação de 1,1% para os concretos convencionais. Outra análise também foi realizada por Thomas *et al.* (2018). Os autores concluíram que, diante o aumento do teor de substituição dos AN pelos AGRC, ocorre uma diminuição da durabilidade do concreto e a mesma possui um ganho, quando se realiza um aumento da quantidade de cimento na mistura.

A durabilidade dos ARC depende de suas propriedades químicas que são quantificadas pela solidez do sulfato e cloretos presentes (KISKU, 2016). O tempo que a estrutura de concreto ficou exposta determina a quantidade de espécies iônicas contidas no material de origem, que pode aumentar o risco de reação álcali-sílica no concreto contendo ARC (VERIAN, 2018).

Bao *et al.* (2020) também analisaram a migração de íons cloreto em concretos reciclados. Os autores substituíram agregados graúdos naturais em teores de 30, 50 e 100% por agregados graúdos reciclados de concreto provenientes de concreto produzido em laboratório. E, após realizar as análises, concluiu-se que o coeficiente de difusão (facilidade de penetração) aumentou diante do aumento do teor de substituição de agregados. Tais resultados revelam que os teores e a qualidade dos ARC possuem um efeito desfavorável na resistência à penetração de íons cloreto, podendo ser atribuído ao aumento da porosidade total diante da estrutura porosa do material.

O resultado obtido por Bao *et al.* (2020) está de acordo com o que é encontrado na literatura por vários outros pesquisadores (MUDULI & MUKHARJEE, 2020; VERIAN *et al.*, 2018; GUO *et al.*, 2018). O concreto reciclado sempre tende a apresentar uma maior migração de íons cloreto, principalmente diante o aumento da substituição de AN por AR. Os mesmos explicam que este fato é decorrente a maior porosidade que o agregado possui, por ser constituído em uma argamassa envelhecida aderida em seus grãos.

Porém, Wang *et al.* (2016) relataram que a durabilidade do concreto RCA pode ser melhorada pela adição de materiais pozolânicos. A adição desses materiais, chamados de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), nas misturas de concreto serão explanadas no item a seguir.

2.3.3 Adição de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) em concreto reciclado

Outra possibilidade que vem acrescentando melhorias nas propriedades do concreto reciclado é a inserção de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS), também conhecidos como adições minerais e/ou pozolanas, na matriz cimentícia. Alguns estudos (KOU e POON, 2013; KURAD *et al.* 2017; MUDULI *et al.* 2018; MUDULI *et al.* 2019) vem mostrando que o uso de MCS, como cinza volante e metacaulim, acarretam em uma melhoria com até certos teores de substituição do cimento por MCS, juntamente com determinados teores de substituição de AN por ARC.

Os resultados de alguns estudos existentes sobre o uso de MCS em concreto (YANG *et al.*, 2015; GOLEWSKI, 2017; FAN e MILLER, 2018) indicam que essa incorporação é prática e econômica para a sustentabilidade do concreto. Por exemplo, a intensidade de CO₂ liberada por unidade de resistência do concreto pode ser reduzida significativamente substituindo o cimento Portland por MCS em até 20%, em massa.

Além de benefícios ambientais, a utilização de MCS, como metacaulim, na matriz cimentícia causam um melhor desempenho dos concretos reciclados, sejam eles nas misturas frescas ou endurecidas. Isso ocorre devido à reação pozolânica que esses materiais possuem com os produtos de hidratação do cimento (reação entre o SiO₂ e Al₂O₃ presentes no MK com o Ca(OH)₂ presente na hidratação do cimento), o que resulta em uma aceleração da hidratação do cimento e podem ocasionar em uma diminuição de poros das misturas. Essa redução de poros pode ser ocasionada diante a formação de géis adicionais (C-S-H), oriundos da reação, que passam a ocupar parte dos poros existentes.

Muduli e Mukharjee (2020) realizaram uma análise microscópica (DRX) dos produtos de hidratação de misturas de concreto de referência (RM0-0) somente com materiais naturais, outra mistura de concreto contendo 100% de substituição do agregado natural de Brita 1 por ARGC (RM100-0) e uma análise dos produtos de hidratação de concreto que possuía 100% de substituição do agregado natural de Brita 1 por AGRC juntamente com a substituição do cimento por metacaulim (RM100-15). E, a partir dos resultados obtidos, observou-se que todas as misturas apresentaram a formação de fases cristalinas de diferentes produtos de hidratação, como portlandita, etringita, alumina e outros. As misturas RM0-0 e RM100-0 apresentaram picos semelhantes. Entretanto, a mistura RM100-15 apresentou menores picos de hidróxido de cálcio cristalino (portlandita),

mostrando uma redução na taxa de formação de hidróxido de cálcio na pasta de cimento. Esta diminuição, mostra a evidência de consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na reação pozolânica de MK, na qual fornece gel adicional de CSH. Esse gel adicional ocupa parte dos poros existentes, o que acaba ocasionando uma desconectividade de poros do concreto, impedindo assim a passagem de fluidos. Além disso, pode-se notar que os picos fracos de CSH aumentam para a mistura de concreto que contém MK (RM100-15). Este mesmo comportamento foi apresentado por Barbhuija *et al.* (2015). A Figura 2.3 apresenta a análise de DRX realizada por Muduli e Mukharjee (2020).

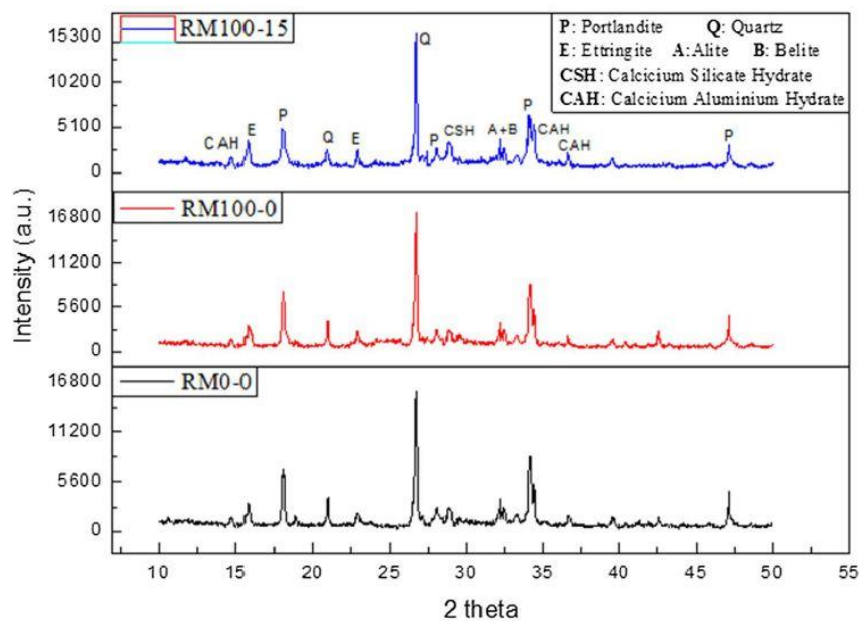
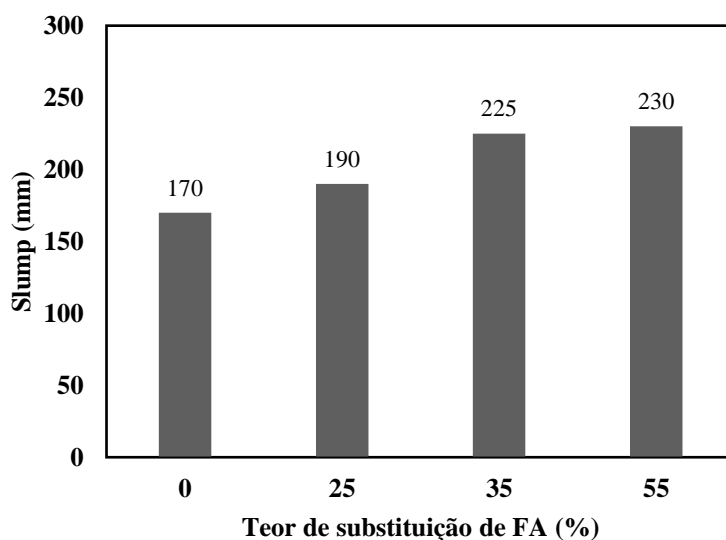


Figura 2.3: DRX das misturas RM0-0, RM100-0 e RM100-15
FONTE: Muduli e Mukharjee (2020)

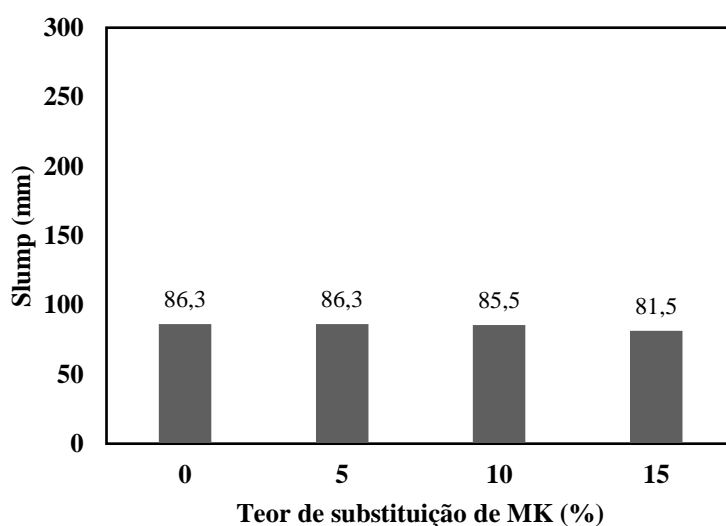
Em alguns casos, a melhora dos concretos reciclados com a presença de materiais pozolânicos também pode ser explicada diante um efeito filler que esses materiais possuem, quando apresentam granulometria menor que a do cimento. Assim, eles ocasionam um melhor empacotamento da mistura, preenchendo parte dos vazios e, conseqüentemente, acarretam em uma diminuição do volume de poros existentes no concreto (APRIANTI *et al.* 2015; ZHAO *et al.*, 2015; LE E LUDWIG, 2016; FATHI E LAMEIE, 2017; DE BELIE *et al.* 2018).

Kou e Poon (2013) estudaram a substituição de cimento Portland por *fly ash* (FA), do inglês, cinza volante, diante os teores de 0, 25, 35 e 55%, juntamente com 100% de AGRC. Muduli e Mukharjee (2019) estudaram a substituição do cimento Portland por

metacaulim nos teores de 0, 5, 10, 15 e 20%, também com substituição do AN por 100% AGRC. A Figura 2.4 apresenta o abatimento do tronco de cone para ambos os autores.



(a)



(b)

Figura 2.4: (a) substituição por cinza volante; (b) substituição por metacaulim
Fonte: Adaptado de KOU e POON (2013); MUDULI e MUKHARJEE (2019)

Diante a Figura 2.4, podemos observar que houve um aumento do valor do *slump* quando se aumentou o teor de substituição de cimento por cinza volante. Já com o aumento do teor de substituição de cimento por metacaulim ocorreu uma diminuição da trabalhabilidade, porém todos permaneceram dentro uma faixa próxima entre si. Muduli e Mukharjee (2019) acreditam que esta diminuição está ligada à maior área superficial de grãos do metacaulim, que levam a uma porção de água sendo absorvida na superfície, o que diminui a trabalhabilidade.

Em relação a resistência à compressão desses concretos, Xie *et al.* (2020) afirmam que existem dois fatores que precisam ser melhor analisados para que se consiga uma melhoria que contenham ARC e MCS, que são: as propriedades inferiores inertes que os ARC possuem, e encontrar um MCS que possua uma composição química bem próxima ao cimento Portland.

Kou e Poon (2013) observaram que, com o aumento do teor de cinza volante de 0, 25, 35 e 55%, contendo 100% de AGRC, obteve-se uma diminuição na resistência à compressão de 10,3%, 16,3% e 25,5%, respectivamente, em relação a mistura que possuía 100% de AGRC e sem cinza volante (referência). Essa propriedade foi analisada aos 28 e 365 dias de cura do concreto reciclado e, após um ano de cura, a resistência à compressão ainda era menor do que a mistura de referência. Já para as misturas que continham metacaulim, Muduli e Mukharjee (2019) observaram que com um teor de substituição de 5, 10 e 15% de cimento por metacaulim, conseguiu-se um ganho na resistência à compressão de 4,3, 10,6 e 12,4% respectivamente. Já com um teor de substituição de 20%, houve uma queda desta propriedade de aproximadamente 8,2%. As Figuras 2.5 e 2.6, apresentam os resultados alcançados com ambas as substituições, cinza volante e metacaulim.

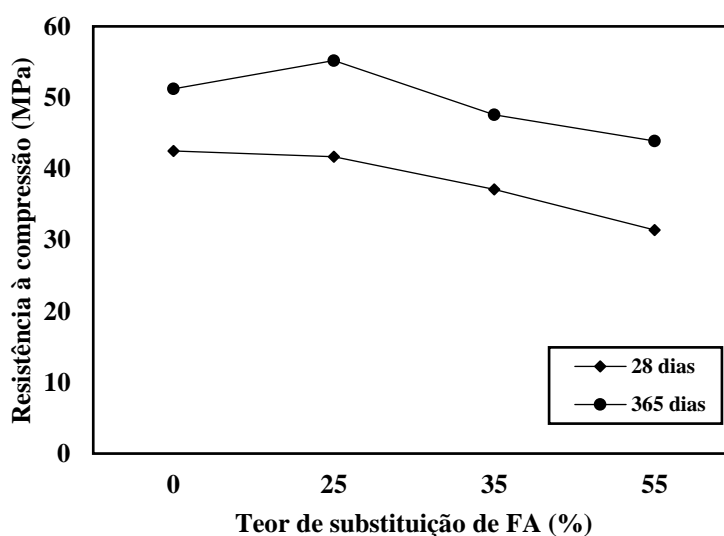


Figura 2.5: Resistência à compressão da substituição de cimento Portland comum por cinza volante com 100% de AGRC

Fonte: Adaptado de KOU e POON (2013)

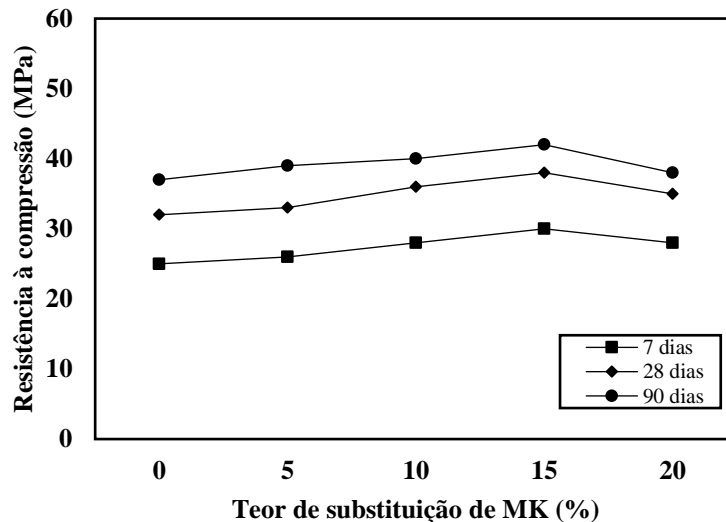


Figura 2.6: Resistência à compressão da substituição de cimento Portland comum por metacaulim com 100% de AGRC

FONTE: Adaptado de MUDULI e MUKHARJEE (2019)

Muduli e Mukharjee (2019) explicam que esse ganho na resistência com a inserção de metacaulim pode ser explicado diante a três mecanismos inerentes ao metacaulim no concreto: o efeito de carga, a reação pozolânica do metacaulim com o Ca(OH)_2 e a aceleração da hidratação do cimento Portland Comum. Os autores afirmam que, diante o tamanho mais fino das partículas do metacaulim, os mesmos preenchem os vazios entre as partículas comparativamente maiores do que as do cimento, levando assim a um melhor empacotamento das partículas, resultando em uma densificação da ITZ. Além disso, a reação pozolânica do metacaulim com o Ca(OH)_2 , gera um gel adicional que contribui para o desenvolvimento da resistência e refinamento dos poros na mistura de concreto. O efeito da reação pozolânica e de preenchimento que o metacaulim possui também pode ser confirmado por um estudo de caracterização microestrutural realizado por Barbhuiya *et al.* (2015), onde a queda da resistência à compressão com o teor de 20% de substituição do cimento por metacaulim pode ser o resultado de um efeito de diluição do clínquer do cimento (MUDULI E MUKHARJEE, 2019).

Já em relação a resistência à tração, Kou e Poon (2013) mostraram que, para 28 dias de cura, as misturas de concreto contendo 100% de ARGCC e os teores de 0, 25, 35 e 55% de substituição do cimento por cinza volante ocasionou em uma diminuição da propriedade. E para as misturas que continham 0, 5, 10, 15 e 20% de metacaulim, Muduli e Mukharjee (2019) observaram um ganho na resistência à tração quando substituiu em até 15%. Os autores comentam que a resistência à tração é muito influenciada pela força da ITZ. E,

como já falado anteriormente, o uso de metacaulim reduz o volume de poros dentro do concreto, o que ocasiona no fortalecimento da ITZ, criando uma microestrutura densa e compacta, e consequentemente, contribui para o aprimoramento da resistência à tração. A Figura 2.7 apresenta os resultados obtidos, com ambas as substituições, para a resistência à tração.

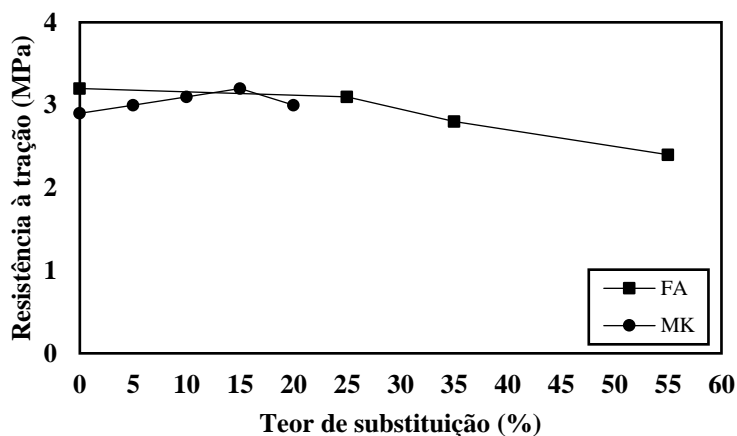


Figura 2.7: Resistência à tração para 28 dias
FONTE: Adaptado de MUDULI e MUKHARJEE (2019)

Outro ponto ressaltado é que acredita-se que o metacaulim contribui mais com a utilização de AGRC do que quando se utiliza somente AN. Esse comportamento pode ser diante à existência de mais poros e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ extras na argamassa aderida de AGRC do que em AN, que se hidrata e melhora a ITZ e a ligação na interface (MUDULI E MUKHARJEE, 2019).

Muduli e Mukharjee (2019) também analisaram a absorção de água do concreto reciclado. E diante a inserção de 100% de AGRC, observou-se que com a inserção da pozolana, houve uma diminuição da propriedade de 4,96%, 10,97%, 25,2% e 9,7% quando ocorreu a substituição em 5, 10, 15 e 20% de cimento por metacaulim, em relação ao concreto de referência. Porém, observou-se que de 15 para 20% de substituição ocorreu um aumento da absorção de 20,7%.

Os autores explicam que os produtos de hidratação insolúveis da reação pozolânica do metacaulim bloqueiam os poros do concreto, impedindo a passagem de água. Além disso, o efeito de preenchimento que o metacaulim possui, neste caso, faz com que as partículas do metacaulim diminuam o volume de poros do concreto, melhorando a resistência à penetração de água.

A migração de íons cloreto também é uma propriedade importante para a durabilidade do concreto. Nawaz *et al.* (2020) explica que a penetração de cloretos pode afetar o aço de reforço na estrutura do concreto reciclado. Portanto, uma mistura de concreto que apresenta uma maior resistência à penetração de cloretos terá uma alta durabilidade.

Muduli e Mukharjee (2019) analisaram a migração de íons cloreto para os concretos reciclados com inserção de metacaulim. Observou-se que um teor de até 15% de substituição acarretou em uma maior resistência a este fenômeno. Isso também pode ser explicado conforme ocorrido na absorção de água. O maior volume de vazios acontece nos concretos que possuem uma maior porosidade, portanto, com o efeito de preenchimento do metacaulim, há uma melhora no empacotamento da mistura, ocasionando uma diminuição do volume de poros no concreto, aumentando, assim, a resistência a penetração de íons cloreto. Esta diminuição também pode ser explicada diante a capacidade de fixação química de cloretos formando sal de Friedel, além de apresentar maior tendência para formar C-A-S-H do que C-S-H. O sal de Friedel é resultado da reação entre o aluminato presente no cimento e no metacaulim com o cloreto, formando cloroaluminatos de cálcio (sal de Friedel).

A Figura 2.8 apresenta os resultados encontrados para as duas idades de cura do concreto que foram avaliadas e observou-se que, para 90 dias de cura, a penetrabilidade foi um pouco maior, mas não significativo, quando comparada com os 28 dias de cura do concreto.

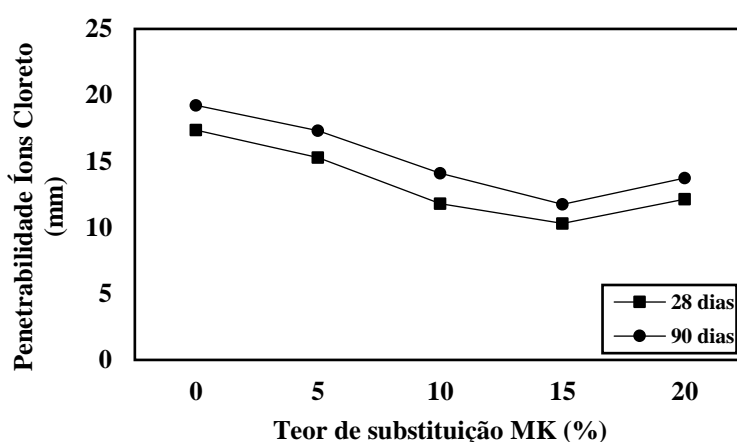


Figura 2.8: Resultados obtidos para a resistência à penetração de íons cloreto dos concretos reciclados com teores de metacaulim

Fonte: Adaptado de MUDULI e MUKHARJEE (2020)

Em geral, Medina (2011) apresentou em sua revisão que a adição do metacaulim, em substituição parcial ao cimento Portland (substituição em massa de até 15%), produz mais produtos hidratados devido à reação pozolânica, aumenta a resistência à compressão, reduz o pH e, conseqüentemente, a concentração de íon hidroxila (OH^-) na água de poro, além de reduzir a permeabilidade de pastas e concretos. Porém, alguns estudos indicam que, para o consumo total do hidróxido de cálcio oriundo da hidratação do cimento, 15% de metacaulim é insuficiente, sendo necessário teores mais elevados (30% – 40%) de metacaulim de alta reatividade (ORIOLO e PERA, 2000).

Além disso, Medina (2011) apresenta estudos que revelam que, através do ensaio de Chapelle, que mede a quantidade consumida do hidróxido de cálcio, demonstrou que a reatividade pozolânica do metacaulim é maior do que a de cinzas volantes. Outro ponto relevante é que o metacaulim é um produto natural, reagindo mais rapidamente nas primeiras idades do que as cinzas volantes, e mais lentamente mais tarde. Portanto, a partir de todo pressuposto de melhorias que o metacaulim pode apresentar, listadas aqui no decorrer do levantamento, para este trabalho, o metacaulim foi o material pozolânico escolhido para compor os concretos no teor de 15% de substituição.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Diante do apresentado no capítulo anterior, torna-se evidente que o uso de agregados reciclados de concreto aliado à utilização de materiais pozolânicos, pode contribuir positivamente para a melhoria do desempenho ambiental de concretos. Porém, visto que esse é um assunto bem recente, mais estudos são necessários para avaliar a sua viabilidade. Nesse contexto, para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizada a substituição do Agregado Graúdo Natural (AGN), de classe B1, por Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC), provenientes de resíduos de demolição. Esses agregados foram utilizados na fração de Brita 1 (de 9,5 a 19 mm). Além dos AGRC, realizou-se também a substituição parcial de cimento por 15% de metacaulim. A seguir será apresentado o procedimento utilizado para o processo de produção do AGRC, a caracterização de todos os materiais que foram utilizados para a produção dos concretos reciclados e todos os métodos de ensaios que foram realizados.

3.1. *Materiais*

3.1.1. Produção e beneficiamento do agregado graúdo reciclado

Para este trabalho, utilizou-se agregado reciclado de concreto proveniente de concreto de uma usina de reciclagem de resíduos de demolição, localizada em São Paulo, Brasil, denominado RCA_B1, na qual não se conhece as suas propriedades químicas e físicas e de idade indeterminada. Este fato é decorrente diante o resíduo ser oriundo de diferentes origens de concretos de demolição.

Este agregado reciclado foi produzido por Amario (2019) e Rangel (2019), na qual as autoras avaliaram diversas origens de agregados reciclados e constataram que os resíduos provenientes da reciclagem de resíduos de demolição é o que gera maior quantidade de agregados graúdos. Portanto, a partir desse pressuposto, os autores avaliaram o comportamento mecânico deste material, constatando que essa propriedade é mantida quando comparada com os concretos convencionais (aqueles que possuem somente

agregados naturais). Assim, surgiu-se a necessidade de avaliar o desempenho de durabilidade dos concretados reciclados produzidos com o mesmo.

Para a produção desse agregado reciclado, inicialmente, realizou-se a britagem do resíduo. O resultado final da britagem não divide os grãos em agregados graúdos e miúdos, pois a separação não é feita em malha de peneira normalizada, portanto, logo após a britagem, foi necessário realizar o processo de peneiramento de todo o material produzido, para que essa separação fosse realizada. Para o processo de peneiramento mecânico, foram utilizadas as peneiras de 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm e após o peneiramento classificou-se os agregados em Brita 1 e Brita 0. Após todo o procedimento, os materiais foram armazenados em *big bags* com capacidade de 1 tonelada. E, por fim, foi realizado uma homogeneização dos agregados reciclados com o intuito de uniformizar grandes quantidades do material. Em seguida, o material foi armazenado novamente em *big bags* até a realização da secagem. A Figura 3.1 apresenta parte da produção realizada com os agregados reciclados.



Figura 3.1: (a) fração grossa após a britagem; (b) Processo de peneiramento; (c) Pilha de homogeneização

Fonte: AMARIO (2019) e RANGEL (2019)

3.2. Caracterização dos materiais

Os agregados utilizados foram caracterizados com base nas determinações definidas nas normas vigentes da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. A seguir, será apresentado todo o procedimento realizado para o processo de caracterização juntamente com os resultados obtidos.

3.2.1. Caracterização dos agregados

Para este trabalho, como agregado graúdo foram utilizadas Brita 1, com dimensão máxima de 19 mm, e Brita 0, com dimensão máxima de 9,5 mm. Ambas foram obtidas de rochas graníticas da pedreira BritaBrás, no Rio de Janeiro. Já o agregado miúdo utilizado foi uma areia natural quartzosa proveniente do Rio Guandu, no Rio de Janeiro, com dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm.

A composição granulométrica foi realizada com base na norma NBR ABNT NM 248 (2003). Foi utilizado o peneiramento mecânico a seco para determinação da granulometria dos agregados. A Figura 3.2 apresenta a composição granulométrica dos agregados reciclados e naturais. A partir do gráfico apresentado, pode-se observar que o RAC_B1 produzido possui basicamente a mesma composição granulométrica que o Nat_B1.

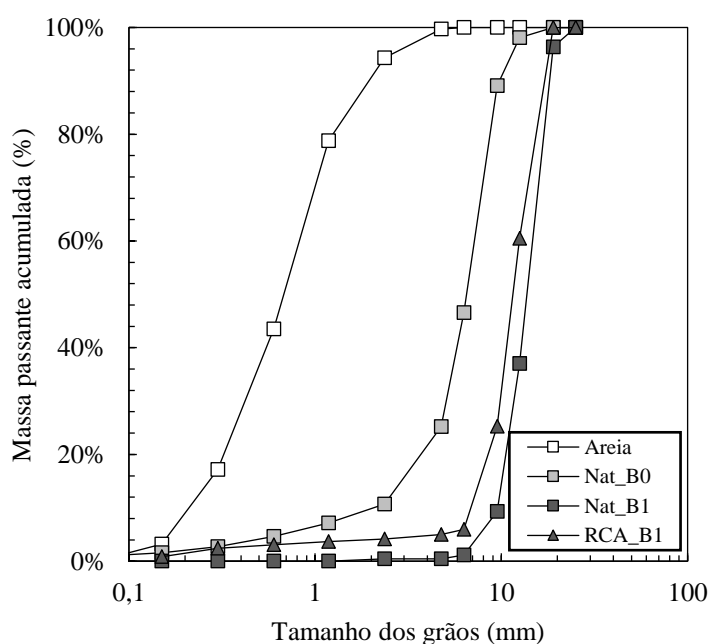


Figura 3.2: Curva granulométrica dos agregados

A Tabela 3.1 apresenta as propriedades analisadas dos agregados que foram utilizados.

Tabela 3.1: Propriedades analisadas dos agregados

Agregado	Massa específica (kg/m ³)	Absorção total (%)	Teor de argamassa aderida (%)	Índice de forma	Abrasão (%)
AREIA	2574	0,4	-	-	-
Nat_B0	2618	1,7	-	3,1	39,5
Nat_B1	2645	1,1	-	2,7	36,1
RCA_B1	2287	5,8	35,1	2,3	46,3

A massa específica e a absorção total de água dos agregados graúdos foram obtidas com base na norma da ABNT NBR NM 53 (2009) e o agregado miúdo pela NBR NM 52 (2009) e NBR NM 30 (2001). Conforme esperado pelos resultados da literatura, o RCA_B1 obteve massa específica menor que o Nat_B1. Já em relação à absorção total de água, foi observado o oposto: o RCA_B1 apresentou maior valor em comparação ao agregado natural. De fato, esse comportamento foi causado devido a presença de uma argamassa porosa aderida aos grãos do agregado reciclado.

Diante o levantamento da revisão bibliográfica, foi constatado que a principal diferença entre ao AN e os ARC é a presença de argamassa aderida na superfície dos agregados reciclados. Assim, com base no método do choque térmico, baseado nos métodos propostos por Pepe *et al.* (2014) e Pandurangan *et al.* (2016), analisou-se o teor de argamassa aderida do agregado reciclado. O resultado obtido permite observar que a brita RCA_B1 possui uma grande quantidade de argamassa aderida, de 35,1%.

Com o intuito de analisar o desgaste superficial dos grãos do agregado reciclado quando o mesmo sofre determinado atrito, foi realizado o ensaio de Abrasão “Los Angeles”. O mesmo foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 51 (2001). Os resultados obtidos para esta propriedade mostram que o AGRC apresentou valores de perda por abrasão maior que os agregados naturais, que por sua vez, apresentaram valores considerados altos para esta propriedade, considerando que os materiais naturais não possuem argamassa aderida aos grãos.

Outra propriedade avaliada foi a absorção de água do agregado reciclado no tempo. O ensaio foi realizado por Amario *et al.* (2017), com adaptações da norma ABNT NBR NM 53 (2009), para determinar a absorção de água em diferentes intervalos de tempo,

tornando possível definir uma curva de absorção do AGRC em função do tempo. Os autores observaram que o AGRC apresentou uma grande capacidade de absorção que pode ser definida como taxa que a água ingressa nos grãos, cerca de 50% do valor de sua absorção total.

Com o auxílio da norma da ABNT NBR 7809 (2006), analisou-se o índice de forma dos agregados e ele foi apresentado na Tabela 3.1. O índice de forma é dado pela média da relação comprimento/espessura do total de 200 grãos de cada agregado.

A angularidade, a textura e a esfericidade dos agregados reciclados foram analisadas seguindo um método de Processamento Digital de Imagens (PDI), proposto por Castelo Branco *et al.* (2006) com o apoio do equipamento AIMS – *Aggregate Image Measurement System*, para complementação do estudo da forma dos agregados graúdos. Diante a análise realizada para tais características, o agregado reciclado se enquadrou como “moderado” para as três análises, apresentando valores entre 2100-3975, 200-500 e entre 0,5-0,6, respectivamente.

3.2.2. Cimento e Metacaulim

Nesta pesquisa, foi utilizado o cimento Portland CPV – ARI, produzido pelo grupo Lafarge Holcim, em conformidade com a NBR 5733 (1991) e metacaulim fornecido pela Metacaulim do Brasil. A composição granulométrica dos materiais, apresentada na Figura 3.3, foi obtida por análise a laser feita com o equipamento Mastersize 2000. E, a partir da figura apresentada, pode-se observar que o metacaulim possui uma quantidade de grãos maiores quando comparado com o cimento, uma vez que 90% do metacaulim possui até 50,97 μ m de diâmetro e 90% do cimento possui diâmetro de até 35,50 μ m.

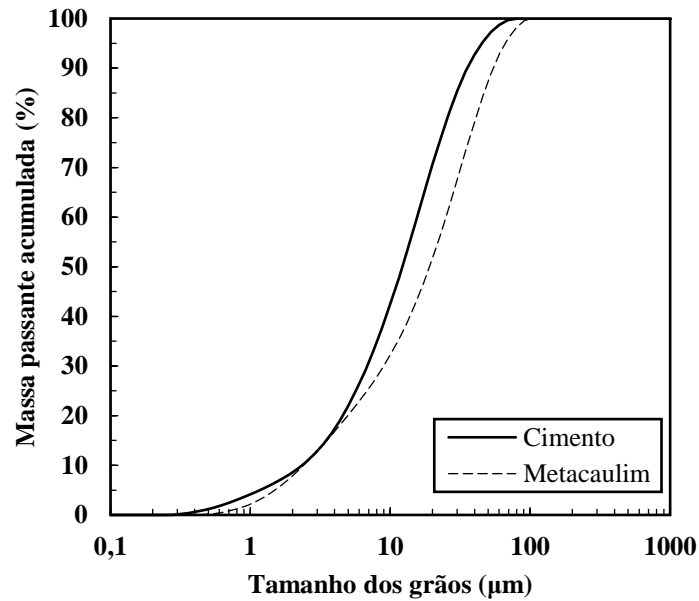


Figura 3.3: Composição granulométrica do cimento CPV – ARI e do metacaulim

Já para determinar a massa específica, foi utilizado um picnômetro à gás (hélio) *Accupyc* da *Micromeritics*, na qual indicou uma massa específica igual a 3067 kg/m³ para o cimento e 2655 kg/m³ para o metacaulim. Foi utilizada uma análise de fluorescência de Raios X para realizar a composição química dos materiais e está apresentada na Tabela 3.2. O ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR NM 18 (2012), enquanto o ensaio de resistência à compressão do cimento foi realizado em prensa Shimadzu, de acordo com a norma ABNT NBR 7215 (2019), apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.2: Composição química do cimento e do metacaulim

Composição química (%)		
Componente	Cimento	Metacaulim
CaO	66,30%	-
SiO ₂	14,00%	48,40%
Fe ₂ O ₃	4,20%	4,30%
SO ₃	3,90%	1,20%
Al ₂ O ₃	3,70%	39,30%
K ₂ O	0,50%	1,30%
TiO ₂	0,30%	2,00%
SrO	0,30%	-
MnO	0,10%	-
Perda ao fogo	6,74%	2,79%

Tabela 3.3: Resistência à compressão do cimento (MPa)

Resistência à compressão (MPa)	
1 dia	14,7
3 dias	23,6
7 dias	30,6
28 dias	32,3

3.2.3. Superplastificante

Neste estudo, foi utilizado o aditivo superplastificante Glenium 51, produzido pela BASF. Este superplastificante tem como base uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, com o intuito de obter uma redução de água, uma melhor trabalhabilidade, sem causar alteração no tempo de pega.

O superplastificante foi caracterizado em relação a sua densidade, teor de sólidos e dosagem de saturação. Esta última foi realizada para avaliar a compatibilidade entre o superplastificante, o cimento Portland CPV – ARI e o metacaulim. A dosagem de saturação corresponde ao grau máximo de dispersão das partículas de cimento e metacaulim provocado pelo superplastificante. De Larrard (1999) explica que, a partir desse ponto, qualquer adição de superplastificante não influenciará significativamente sobre a dispersão das partículas. O mesmo foi avaliado através do escoamento de pasta de finos pelo funil de Marsh. Os resultados da caracterização do superplastificante estão apresentadas na Tabela 3.4 e a Figura 3.4 e 3.5 apresentam as curvas de compatibilidade entre o superplastificante e cimento e entre o superplastificante e o cimento com adição de metacaulim.

Tabela 3.4: Caracterização do superplastificante

Propriedades do Superplastificante	
Densidade (g/cm ³)	1,087
Teor de sólidos (%)	30
Dosagem de saturação (% sólidos do sp/ massa de cimento)	0,5
Dosagem de saturação (% sólidos de sp / massa de finos)	1,0

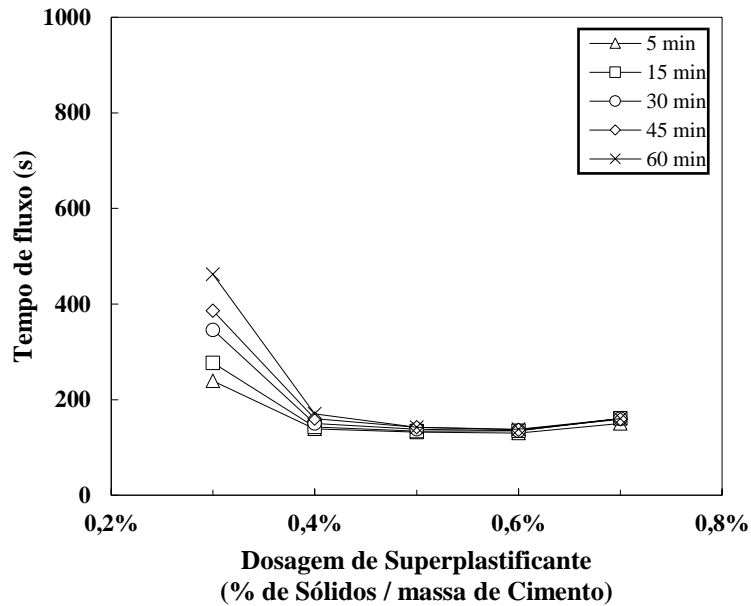


Figura 3.4: Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI

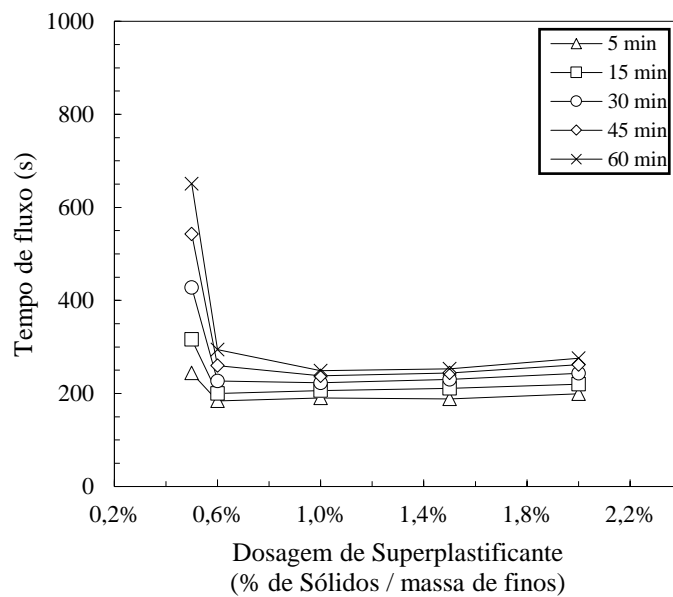


Figura 3.5: Curva de compatibilidade do aditivo superplastificante Glenium 51 com o cimento CPV-ARI e adição de metacaulim

Diante a curva de compatibilidade apresentada nas Figuras 3.4 e 3.5, observou-se que o superplastificante, o cimento CPV-ARI e o metacaulim são compatíveis entre si, uma vez que diante o aumento do teor de aditivo, ambas as curvas dos tempos de leitura se aproximaram. Portanto, constatou-se que o ponto de saturação para o cimento é de 0,5%, e de 1,0% quando se adiciona metacaulim.

3.3. Dosagem e composição das misturas

Conforme apresentado na revisão de literatura, Amario (2019) afirma que um dos grandes desafios enfrentados para realizar a dosagens de concretos reciclados é a falta de um método específico que leve em consideração todas as propriedades dos agregados reciclados. Em geral, para realizar este tipo de dosagem, é utilizado um método convencional para dosagem de concretos com agregados naturais e assim, é feita uma substituição do agregado natural pelo agregado reciclado, em massa. Porém, acredita-se que este método de substituição pode resultar negativamente nas propriedades do concreto reciclado, uma vez que o mesmo leva em consideração somente a absorção de água dos agregados e sua massa específica.

Assim, com o intuito de se obter uma melhor dosagem para produção dos concretos reciclados, levando em consideração todas as características possíveis de todos os materiais que serão utilizados, neste estudo foram utilizadas dosagens desenvolvidas com o auxílio dos conceitos do *Compressible Packing Model (CPM)*. O CPM é um método de dosagem científica desenvolvido por De Larrard (1999) na qual a sua principal vantagem é possibilitar a consideração individual das diferentes propriedades dos materiais constituintes, determinando as propriedades que se quer alcançar para o concreto. Este método já foi utilizado por Amario (2019) e Amario *et al.* (2017), Rangel (2019) e Rangel *et al.* (2017), no qual foi considerado muito adequado para a dosagem de concretos reciclados, uma vez que foi possível manter a resistência à compressão desses concretos, quando comparados com os concretos convencionais.

3.3.1. Parâmetros necessários para a aplicação do Método de Empacotamento Compressível (MEC)

Para a aplicação do método, é necessário realizar alguns procedimentos experimentais que foram desenvolvidos por De Larrard (1999). Um deles foi realizado para a obtenção da compacidade experimental dos materiais utilizados e o outro é necessário para realizar uma calibração de parâmetros de resistência à compressão relacionados aos agregados.

3.3.1.1. Compacidade experimental – ensaio de compactação mecânica e vibração

A compactação mecânica foi utilizada para determinar a compacidade experimental de partículas maiores que 100 μm . Para a execução do mesmo, utilizou-se um volume padrão

de material em um cilindro metálico (160 x 320) mm, preso a uma mesa vibratória. Neste cilindro foi aplicado uma pressão de 10 KPa, através de um pistão de peso equivalente a 200N. Após a colocação do pistão, registrou-se a altura do mesmo com a utilização de um equipamento conhecido como catetômetro. Logo após, aciona-se a mesa vibratória com uma frequência de 68 Hz, por um período de 2 minutos. Feito a vibração, a altura do material compactado é determinada, anotando-se a altura final do pistão. Para os agregados graúdos foram utilizados 6,5 kg de material e para os miúdos 3,0 kg. As etapas deste ensaio estão ilustradas na Figura 3.6 a seguir.

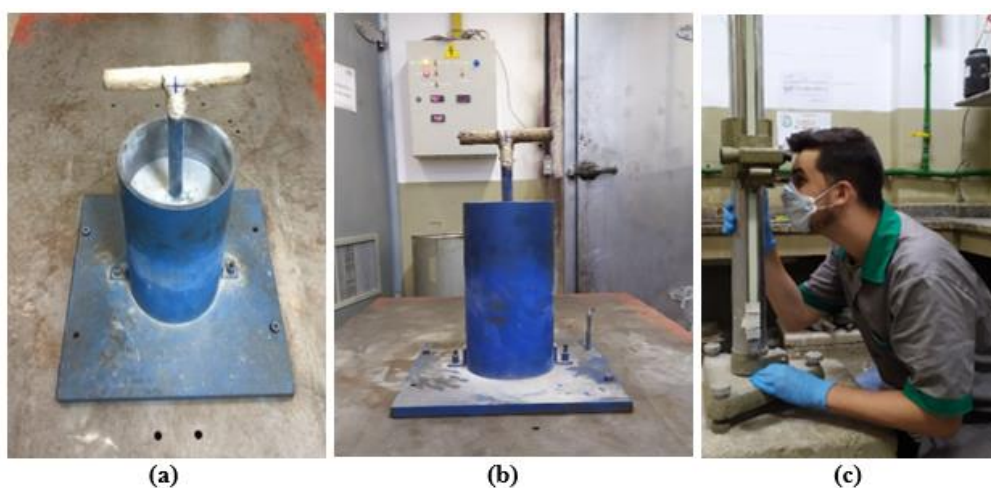


Figura 3.6: Etapas do ensaio de compactação mecânica e vibração: (a) posicionamento do pistão antes da vibração; (b) posição do pistão após vibração; (c) leitura da posição do pistão, através do catetômetro

Para melhor obtenção dos resultados, os agregados foram separados em 3 classes de tamanho. Essas classes foram definidas para cada agregado, diante da curva granulométrica de cada um e a compacidade foi determinada através de 3 repetições para cada classe. A Tabela 3.5 apresenta as classes e a compacidade obtida para cada agregado, na qual foi calculada a partir da Fórmula 3.1 a seguir.

$$C = \frac{m}{A \times h \times \rho} \quad (3.1)$$

Onde

m é a massa da amostra, em Kg

A é a área do cilindro, m^2

h é a altura da camada de material compactado, m

ρ é a massa específica do material, kg/m³

Tabela 3.5: Tamanho dos grãos e compacidade experimental de cada classe de cada material

Classe	Agregado	Faixa granulométrica	Compacidade
I	Nat_B1	9,50 - 12,50	0,603
	RCA_B1	1,25 - 10,00	0,582
	Nat_B0	0,15 - 4,75	0,684
	Areia	0,15 - 0,40	0,699
II	Nat_B1	12,50 - 16,00	0,557
	RCA_B1	10,00 - 12,50	0,545
	Nat_B0	4,75 - 8,00	0,556
	Areia	0,40 - 0,80	0,520
III	Nat_B1	16,00 - 19,00	0,539
	RCA_B1	12,50 - 19,00	0,587
	Nat_B0	8,00 - 12,50	0,570
	Areia	0,80 - 4,75	0,683

3.3.1.2. *Compacidade experimental - ensaio de demanda d'água e agulha de Vicat*

O ensaio de demanda d'água (DE LARRAD, 1999) foi realizado para determinar a compacidade experimental do cimento. O mesmo consiste em adicionar progressivamente uma quantidade de água ao material até que seja observado 4 fases diferentes: estado seco, pendular, funicular e o estado capilar. Para este ensaio, é necessário um misturador planetário com capacidade de 2l. Inicialmente, adicionou-se uma pequena quantidade de água à 350g de material, com o misturador na velocidade baixa por 1 minuto. Posteriormente, novas adições sucessivas de água foram feitas e mantidas por 1 minuto em velocidade alta, até que se observe o estado capilar, caracterizado por uma pasta homogênea e sem umidade na parede do misturador. O tempo médio de ensaio foi de 14 minutos e foram realizadas quatro determinações para o cálculo da média de água necessária para o ponto de demanda d'água. A Figura 3.7 apresenta os 4 estados citados anteriormente.

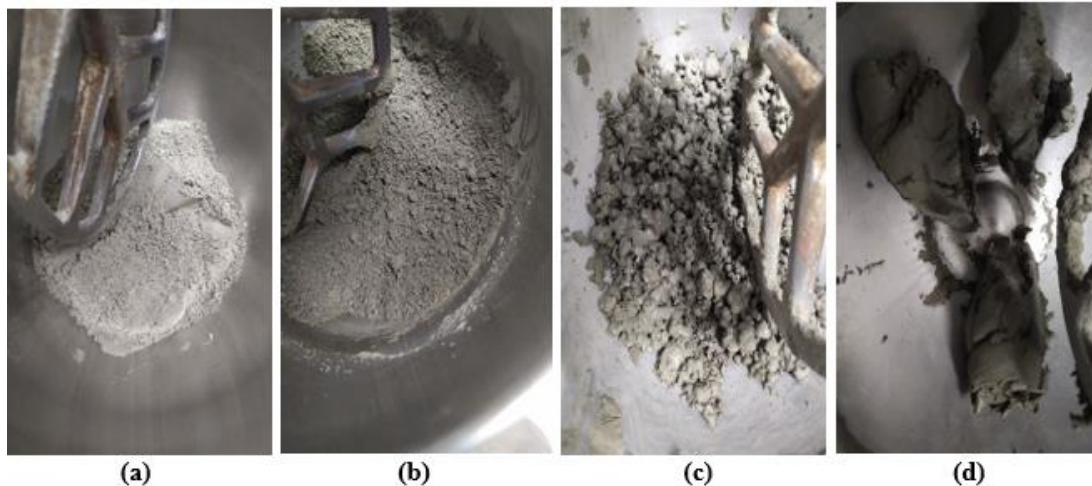


Figura 3.7: Etapas do ensaio de demanda d'água: (a) estado seco; (b) estado pendular; (c) estado funicular; (d) estado capilar

Esta última fase é o momento em que a pasta de cimento apresenta o máximo empacotamento de partículas. A partir deste ponto, qualquer adição de água a mistura, provocará um afastamento das partículas, reduzindo a compacidade e aumentando a fluidez. Conhecendo-se a quantidade de água adicionada (demanda d'água), é possível calcular a compacidade experimental através da Equação (3.2). O cimento obteve compacidade experimental igual a 0,634.

$$C = \frac{1}{1 + \delta \times \frac{m_a}{m}} \quad (3.2)$$

Onde:

C é a compacidade experimental;

δ é a massa específica do material, (g/cm^3);

m_a é a massa de água, (g);

m é a massa de material, (g).

Foi realizada, também, a compacidade experimental do metacaulim. Durante a execução do ensaio de demanda d'água com o metacaulim, observou-se a não formação dos estágios capilares obtidas durante a execução do mesmo. Portanto, para este material, optou-se por realizar a compacidade experimental, através do método da Agulha de Vicat, executado com adaptações da NBR 16606 (2018). Para obter a compacidade experimental do metacaulim é recomendado que o ensaio seja realizado com dois tipos de pastas: um contendo 90% de metacaulim juntamente com 10% de cimento, e uma segunda pasta

contendo 80% de metacaulim juntamente com 20% de cimento. Isso é recomendado, pois, podem existir interações complexas entre os MSC na presença de superplastificante, o que pode ocasionar em uma menor densidade de empacotamento virtual equivalente de um MCS na presença de cimento do que no valor medido em pastas contendo apenas MCS.

Para realização deste ensaio, foram produzidas duas pastas de 500g cada de materiais cimentícios (cimento e metacaulim). Para a produção da pasta, foi utilizado um misturador mecânico. Inicialmente, verteu-se a cuba com a quantidade de água necessária para atingir a consistência normal da pasta e adicionou-se os materiais cimentícios e deixou em repouso por 30 s. Em seguida, acionou-se o misturador por 30 s, em velocidade baixa e logo em seguida ele foi desligado por 60 s. Após o desligamento do misturador, nos primeiros 30 s, raspou-se as laterais internas da cuba com uma espátula, com o intuito de que toda a pasta agarrada na mesma, fica-se concentrada no fundo. Em seguida, o misturador foi acionado por mais 60 s.

Após a preparação da pasta, retirou-se a cuba do misturador e preencheu-se o molde, apoiado em uma base, com a mesma. Assim, centralizou-se o molde com a pasta no aparelho de Vicat e fixou a agulha até que a haste ficasse em contato com a superfície da pasta. Após 75 s (este tempo inclui o tempo necessário para preenchimento do molde com a pasta) do término da mistura da pasta, soltou-se a haste. A pasta é considerada com consistência normal quando a sonda atinge 6 ± 1 mm da placa base, após 30 s do instante em que a haste foi solta. A quantidade necessária de água para a obtenção da consistência normal da pasta foi calculada através da Equação (3.3).

$$A = \frac{m_a}{m_c} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

A é a quantidade de água, (%);

m_a é a quantidade de água utilizada para obtenção da consistência da pasta, (g);

m_c é a massa de materiais cimentícios utilizada no ensaio, (g).

A Figura 3.8 apresenta parte da execução do ensaio, no qual obteve-se compactidade igual a 0,435.



Figura 3.8: Misturador mecânico utilizado e aparelho de Vicat

Por fim, a partir da definição da quantidade de água necessária para a obtenção da consistência normal da pasta, a quantidade da mesma é informada ao *BetonLab*, juntamente com a quantidade de cimento e pozolana utilizada, e, portanto, o software calcula e fornece o valor da compactidade, que foi de 0,435.

3.3.1.3. Calibração dos parâmetros “ p ”, “ q ” e “ $kp(t)$ ”

Para a aplicação do *CPM*, além da compactidade, é necessário realizar a calibração de três parâmetros de resistência à compressão que estão ligados diretamente aos agregados. O parâmetro “ p ” está ligado à interface pasta-agregado. Já o parâmetro “ q ” refere-se à resistência intrínseca do agregado. E, o terceiro parâmetro necessário, denominado “ $kp(t)$ ”, é um parâmetro que descreve a atividade pozolânica na resistência à compressão ao longo do tempo.

A calibração leva em consideração os grãos de maior dimensão da mistura que está sendo avaliada. Portanto, para que pudesse ser calibrado os parâmetros para todos os agregados a serem utilizados, produziu-se argamassas para calibração dos parâmetros da areia natural e concretos para a calibração dos agregados graúdos, Brita 1 e Brita 0. Para realizar a calibração de cada agregado, é necessário realizar a avaliação da resistência à compressão de duas misturas para cada, uma de alta resistência, com um grande consumo

de cimento, denominada traço rico, e outra de baixa resistência, com pouco consumo de cimento, denominado traço pobre. Isso também é válido para a calibração da atividade pozolânica “ $k_p(t)$ ”, um com grande e um com pouco consumo de metacaulim. Essas composições ricas e pobres estão relacionadas a quantidade de materiais cimentícios (cimento e metacaulim) utilizados em cada mistura. Vale ressaltar que a composição dos traços ricos e pobres em cimento e metacaulim são diferentes para cada um dos agregados, portanto é incoerente a comparação entre os valores de resistência à compressão para estes materiais.

Portanto, foram moldados corpos de prova de 7,5 x 15 cm para os concretos. Já para as argamassas, foram moldados corpos de prova de 5 x 10 cm. Todas as misturas foram ensaiadas em prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN, de acordo com a NBR 5739 (2018), com velocidade de carregamento de 0,3 mm/min. As idades adotadas para o ensaio foram de 7 e 28 dias. E, com base nos traços adotados e nas resistências encontradas, o próprio *Betonlab Pro 3* obtém os valores de calibração de “ p ”, “ q ” e “ $k_p(t)$ ”, que estão apresentados na Tabela 3.6. E, observou-se que os agregados naturais apresentaram maiores valores de “ p ”.

Tabela 3.6: Valores encontrados da calibração de “ p ”, “ q ” e “ $k_p(t)$ ”

Material	Pozolana	p	q	Kp (7)	Kp (28)
Areia	Sem pozolana	1,4418	0,00698	-	-
	Metacaulim	1,4291	0,00627	1,0741	1,7692
B0_NAT	Sem pozolana	0,6997	0	-	-
	Metacaulim	0,7886	0,00218	2,6839	6,0042
B1_NAT	Sem pozolana	0,9630	0	-	-
	Metacaulim	1,0063	0	1,7482	2,312
RCA_B1	Sem pozolana	0,4502	0	-	-
	Metacaulim	0,4604	0	1,6997	1,9242

Amario (2015) avaliou a influência dos parâmetros “ p ” e “ q ” na resistência à compressão e observou que quanto maior o valor obtido para o parâmetro “ p ”, para um mesmo valor de “ q ”, maior é a resistência à compressão esperada aos 28 dias. Assim, conclui-se que o parâmetro “ p ” exerce uma grande influência na resistência dos concretos que se quer obter. Já o parâmetro “ q ”, possui relação inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o valor de “ q ”, menor será a resistência. Portanto, acredita-se que a resistência à compressão seja mais influenciada pela interface agregado-pasta do que a resistência intrínseca do agregado.

3.3.2. Composição das misturas

Para este trabalho, foram definidas duas classes de resistência: uma de resistência normal (30 MPa) e outra de alta resistência (60 MPa), com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade das duas classes diante 28 e 90 dias de cura. Os concretos reciclados produzidos foram dosados para serem compostos em 100% de AGRC da classe Brita 1 e 100% de agregado graúdo natural da classe Brita 0. A proporção de agregado adotado para cada dosagem foi de 46% de agregado graúdo (Brita 1 e Brita 0) e 54% de agregado miúdo (areia). A partir da revisão bibliográfica feita no item 2.3.3, observou-se que, com a substituição do cimento Portland por metacaulim, alcançou-se um melhor empacotamento da mistura de concreto reciclado e, assim, conseqüentemente, uma melhoria em algumas propriedades de durabilidade do mesmo. Portanto, misturas adicionais foram produzidas nos concretos reciclados, realizando a substituição parcial do cimento Portland CPV-ARI por metacaulim em 15%. As dosagens dos concretos foram obtidas com o auxílio do programa *Betonlab Pro 3*.

A nomenclatura determinada para as misturas, inicia-se com a indicação da classe de resistência, C"XX", onde XX pode ser 30MPa ou 60MPa. Em seguida, é indicada se na mistura possui substituição de AGN por AGRC ou não. Caso tenha essa substituição, é indicado pela expressão "RAC" (*Recycled Aggregate Concrete*, do inglês, Concreto de Agregado Reciclado), e caso não tenha é indicado por "NAC" (*Natural Aggregates Concrete*, do inglês, Concreto de Agregados Naturais). Em seguida, as misturas que além da substituição de agregados possuem também substituição de cimento por metacaulim, são indicadas pela sigla "MK". A Tabela 3.7 apresenta a composição das misturas produzidas.

Ao iniciar o processo de dosagem das misturas no *BetonLab Pro 3*, foram definidas misturas utilizando o teor de superplastificante nos valores observados para o ponto de saturação que foram de 0,5% para as misturas que continham apenas cimento e 1,0% para as misturas que continham cimento e metacaulim. Porém, ao realizar testes experimentais em laboratório para as dosagens produzidas, as misturas não apresentaram resultados satisfatórios de coesão e abatimento. Portanto, os teores de superplastificante foram ajustados da seguinte forma: 0,30% e 0,35% para as misturas que continham somente cimento, para a classe C30 e C60, respectivamente; e 0,35% e 0,60% para as misturas que continham cimento e metacaulim, para a classe C30 e C60, respectivamente. Essa

variação entre a quantidade de superplastificante utilizado e o ponto de saturação obtido, ocorreu diante da observação de segregação do material ao utilizar maiores dosagens de superplastificante. Portanto, foi utilizado a maior quantidade de superplastificante que mantinha a coesividade de cada mistura.

Tabela 3.7: Composição das misturas de concreto

Mistura	Brita 1 (kg/m ³)		Brita 0 (kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Cimento (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	SP (Kg/m ³)	Metacaulim (Kg/m ³)
	NAT	RCA						
C30-NAC	417,5	0	421,6	909,9	350,4	193,8	3,5	-
C30-RAC	0	356,3	420,6	907,6	366,3	205,0	3,7	-
C30-NAC-MK	417,8	0	421,9	910,6	265,5	202,1	3,1	46,6
C30-RAC-MK	0	355,7	419,9	906,3	286,5	210,2	3,3	50,5
C60-NAC	411,5	0	415,6	896,9	471,4	152,2	5,5	-
C60-RAC	0	349,8	413	891,3	496,8	161,9	5,8	-
C60-NAC-MK	410,2	0	414,3	894,1	365,5	161,0	7,3	64,5
C60-RAC-MK	0	350	413,2	891,9	391,9	166,8	7,8	69,2

E, já para o teor de pasta efetiva (volumes de cimento, metacaulim, superplastificante e água efetiva), ficou definida em $30,0 \pm 1,0\%$. Todos os ajustes realizados para a dosagem dos concretos foram necessários para que pudesse ser mantida a trabalhabilidade de (180 ± 30) mm de todos os concretos produzidos. Como o presente trabalho possui uma adição mineral (metacaulim), foi necessário adaptar uma terminologia utilizada “fator água/cimento (a/c)” para fator “água/materiais cimentícios (a/mc)”, na qual o termo materiais cimentícios, refere-se o conjunto de cimento e metacaulim.

A partir destes dados, pode-se observar que houve um aumento de até 5% na quantidade de materiais cimentícios, o que não é significativo, quando foi adicionado agregado reciclado nas misturas. A mesma já era esperada diante uma estrutura mais porosa ocasionada pela argamassa envelhecida aderida aos grãos do agregado reciclado, já mencionada no item 2.3.2, que conseqüentemente ocasiona em uma estrutura de concreto mais fraca, obtendo uma menor resistência à compressão. Diante este fato, é feito uma compensação pelo cimento, para que esta propriedade possa ser mantida ao inserir agregado reciclado na composição dos concretos. Outro fator observado foi a redução da quantidade de materiais cimentícios em todas as misturas, quando o metacaulim foi adicionado às misturas de referência. Para a classe mais baixa, C30, observou-se uma redução de 10% e 8% para NAC e RAC, respectivamente. Já para a classe mais alta, C60,

essa redução foi de 8% para a mistura que possuía somente agregados naturais e 7% para a que possuía inserção de agregado reciclado. Porém, apesar desta diferença, foi constatado que essas reduções diante a substituição de agregados naturais e cimento, não ocasionaram redução na resistência à compressão axial esperada aos 28 dias de cura dos concretos, mantendo-se todas as misturas dentro de suas respectivas classes de resistência.

Com o intuito de auxiliar fins de comparação entre as propriedades dos concretos, a Tabela 3.8 apresenta alguns dados adicionais a composição das misturas. A quantidade de água apresentada na Tabela 3.8 é referente a água total que foi adicionada na mistura. Essa água representa a soma entre a quantidade de água de absorção para que os agregados absorvessem durante o processo de mistura e a água livre necessária para alcançar a trabalhabilidade desejada. E a água de absorção considerada para este estudo para o agregado reciclado foi equivalente a 50% da absorção total de água após 24 horas. Essa aproximação foi baseada em um estudo realizado por Amario *et al.* (2017) no qual observou-se que o agregado reciclado foi capaz de absorver, durante o processo de mistura, uma quantidade de água equivalente a cerca de 50% da sua absorção total.

Vale ressaltar que o fator a/mc efetivo é a relação entre a água livre e a quantidade total de materiais cimentícios. Já a água livre é aquela referente a água disponível durante o processo de mistura, garantindo uma trabalhabilidade apta. O teor de pasta efetiva indica a porcentagem equivalente aos volumes de materiais cimentícios, superplastificante e da água livre de cada mistura. Por fim, o volume total de argamassa representa a soma do volume de argamassa envelhecida aderida aos grãos de agregados reciclados e do volume de argamassa. E para os concretos que contém apenas agregados naturais, o volume total de argamassa equivale ao volume de argamassa da mistura (volume total menos o volume representado pelos agregados graúdos).

Tabela 3.8: Dados adicionais da composição das misturas

Mistura	Água livre (l/m³)	Água Efetiva/Materiais cimentícios	Teor de pasta efetiva (%)	Volume Total de argamassa (%)
C30-NAC	180	0,51	29,7	64,77
C30-RAC	186	0,51	30,9	72,64
C30-NAC-MK	188	0,60	29,5	65,99
C30-RAC-MK	191	0,57	30,6	74,28
C60-NAC	140	0,30	29,9	65,21
C60 RAC	145	0,29	31,0	72,64
C60-NAC-MK	150	0,33	30,0	65,51
C60-RAC-MK	151	0,35	31,0	73,86

3.3.3. Produção, moldagem e cura dos concretos reciclados

Os concretos reciclados foram produzidos em um misturador do tipo betoneira com capacidade para 120 litros, do fabricante GMEG – MOTOMIL, apresentado na Figura 3.9. Inicialmente, o misturador foi umedecido com água e o excesso de água foi retirado com um pano úmido. Em seguida, o processo de mistura iniciou-se com a inserção dos agregados, na ordem, brita 1, brita 0 e depois a areia, evitando a aderência da areia nas paredes da betoneira. Os materiais foram misturados durante um minuto para se obter uma homogeneização adequada. Em seguida, foi adicionada aos agregados 50% da água total da mistura e assim a betoneira foi acionada por mais um minuto. Logo após a mistura, foi adicionado o cimento, homogeneizado com o metacaulim, quando necessário, e acionou-se o misturado por mais um minuto. E, por último, adicionou-se o restante da água juntamente com o superplastificante Glenium 51. Por fim, o misturador foi acionado por mais oito minutos. O tempo total de mistura, a partir do momento que a água foi adicionada, foi, em média, dez minutos. A Figura 3.10 apresenta as etapas de mistura do concreto, citadas anteriormente.



Figura 3.9: Betoneira do fabricante GMEG – MOTOMIL com capacidade de 120l

Ao final do procedimento de mistura, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova. Para isso, o concreto foi adensado mecanicamente em mesa vibratória (68 Hz), na qual foi colocado em duas camadas nos moldes com um tempo de vibração aproximado de quinze segundos para cada camada. O procedimento descrito está apresentado na Figura 3.11. Em seguida, os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas, protegidos da umidade. Durante este procedimento, a temperatura da sala foi mantida em $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e uma temperatura de $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde ficaram até as idades necessárias para a realização dos ensaios.

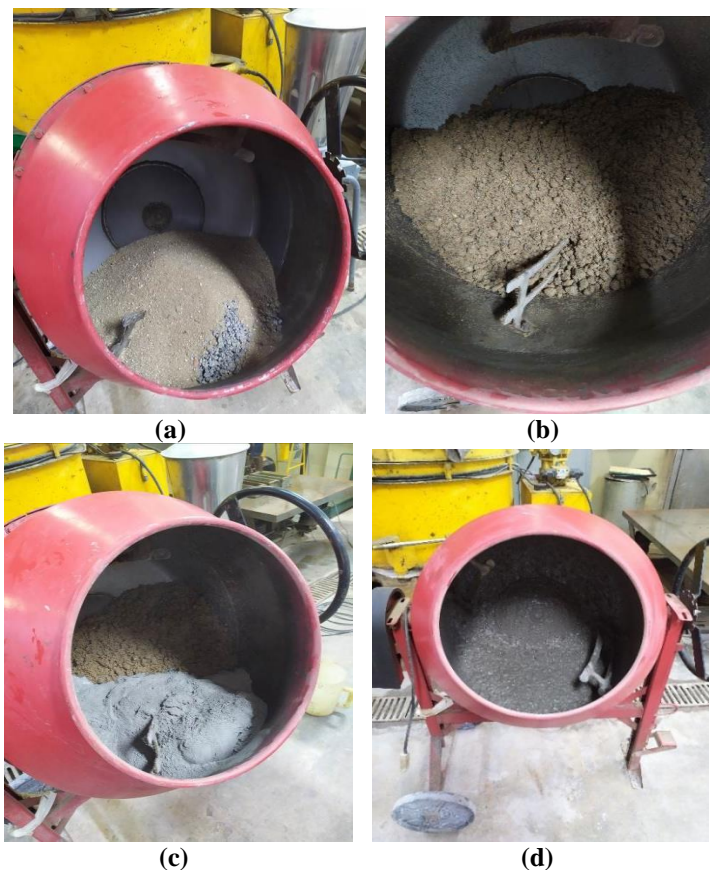


Figura 3.10: (a) inserção dos agregados; (b) mistura após inserção de 50% da água; (c) adição do cimento; (d) mistura pronta



Figura 3.11: (a) preparação dos moldes diretamente na mesa vibratória; (b) preenchimento das camadas de concreto

3.4. Métodos de ensaios

Neste tópico, serão apresentadas as formas em que os métodos de ensaios foram executados. Todos os métodos foram executados seguindo normas vigentes da ABNT –

Associação Brasileira de Normas Técnicas ou por alguma ASTM - American Society for Testing and Materials. Todos os ensaios foram realizados no laboratório NUMATS/COPPE/UFRJ.

3.4.1. Abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 16889 (2020). Esse ensaio consiste em compactar três camadas com 25 golpes em cada, distribuídos uniformemente, utilizando uma haste de socamento. O molde foi retirado cuidadosamente na direção vertical e em seguida foi medido o abatimento do concreto. A Figura 3.12 apresenta o procedimento realizado.



Figura 3.12: Procedimento realizado para obtenção do abatimento do tronco de cone

3.4.2. Resistência à compressão axial

O processo de obtenção da resistência a compressão dos concretos reciclados foi baseado na norma ABNT NBR 5739 (2018). Foram rompidos quatro corpos de prova de dimensões (7,5 x 15) cm, de cada mistura, na qual foram rompidos em uma prensa servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN. O ensaio foi realizado após o processamento de 28 e 90 dias de cura do concreto.

Para a realização da ruptura, os corpos de prova foram faceados em suas extremidades por um torno mecânico para garantir a planicidade e regularização da superfície. Além da

carga de ruptura, foi obtido o comportamento tensão *versus* deformação com o emprego de transdutores elétricos (LVDT) para a medição dos deslocamentos longitudinais, conectados a região central dos corpos de prova. E, através da curva tensão *versus* deformação, foi possível calcular o módulo de elasticidade pela Equação (3.4), baseado na norma da ABNT NBR 8522 (2021). A Figura 3.13 apresenta o ensaio de resistência à compressão.

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

Onde,

E é o módulo de elasticidade, (GPa);

σ_2 é a tensão de compressão correspondente a 30% da carga última, (MPa);

σ_1 é a tensão de compressão correspondente à deformação axial, ε_1 , de 5.10^{-5} , (MPa);

ε_2 é a deformação axial produzida pela σ_2 , ($\mu\varepsilon$);

ε_1 é a deformação axial igual a 5.10^{-5} , ($\mu\varepsilon$).



Figura 3.13: Resistência à compressão axial

3.4.3. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio foi realizado com base na norma da ABNT NBR 7222 (2011). O mesmo consiste na aplicação de um carregamento compressivo ao longo de duas geratrizes situadas em um mesmo plano diametral de um corpo-de-prova cilíndrico, com dimensões de (7,5 x 15) cm, na qual foram rompidos, quatro corpos de prova de cada mistura, em uma prensa

servo-controlada *Shimadzu*, modelo UH-F1000kN. O mesmo foi realizado após 28 e 90 dias de cura do concreto. A Figura 3.14 apresenta a execução do ensaio.



Figura 3.14: Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada através da Equação (3.5).

$$\sigma_t = \frac{2.F_r}{D.L.\pi} \quad (3.5)$$

Onde,

σ_t é a resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_r é a carga de ruptura (KN);

D é o diâmetro do corpo-de-prova (m);

L é a espessura do corpo-de-prova (m).

3.4.4. Absorção total, índice de vazios e massa específica

Este ensaio foi baseado na norma da ABNT NBR 9778 (2009). Após o procedimento de cura de 90 dias dos concretos, três corpos de prova, com dimensões de (10 x 20) cm, de cada mistura, foram submetidos à secagem em estufa, com temperatura constante de 60°C ± 1°C até atingirem a constância de massa e, em seguida, anotou-se a massa seca (m_s). Na

sequência, os corpos de prova foram submersos em água durante um período de 72 horas e logo depois, foram submetidos a um processo de ebulição durante 5 horas e sucessivamente anotou-se a massa da amostra saturada imersa em água após fervura (m_i). Por fim, a amostra foi retirada da água e enxugada com o auxílio de um pano úmido e logo em seguida registrou-se a massa saturada (m_{sat}) em água após fervura e imersão. A Figura 3.15 apresenta as etapas descritas anteriormente.

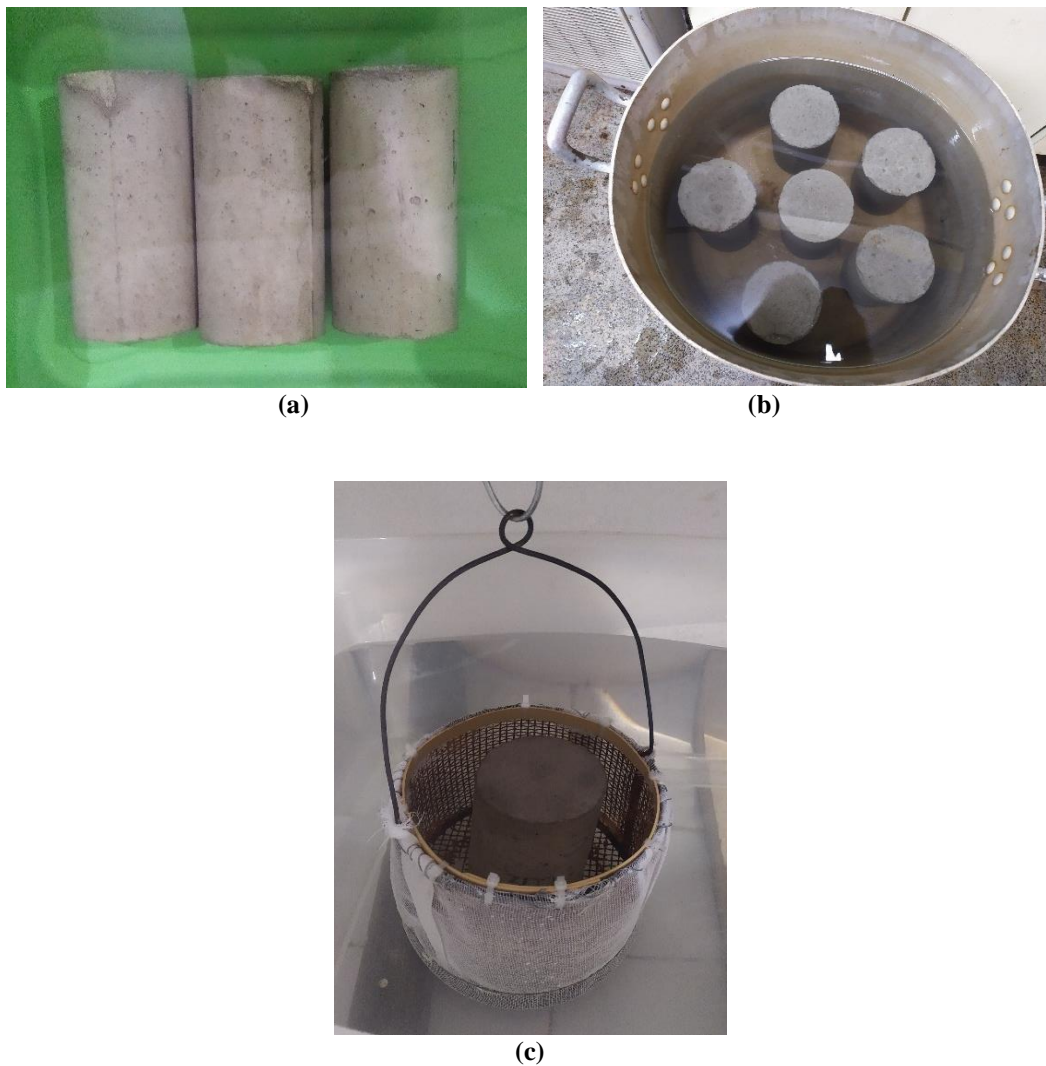


Figura 3.15: Ensaio de absorção total, índice de vazios e massa específica: (a) corpos de prova imersos em água; (b) ebulição; (c) pesagem dos corpos de prova imersos em água

A absorção total, o índice de vazios e a massa específica, foram calculados pelas seguintes Equações (3.6), (3.7) e (3.8) respectivamente.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m} \times 100 \quad (3.6)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.7)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (3.8)$$

Onde,

A é a absorção total de água (%);

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água com superfície seca (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

I_v é o índice de vazios (%);

m_i é a massa do corpo de prova saturado e imerso em água após fervura (g);

ρ_s é a massa específica seca (g/cm^3);

3.4.5. Absorção de água por capilaridade

A absorção capilar dos concretos reciclados foi baseada na norma da ABNT NBR 9779 (2012). O ensaio iniciou-se após os corpos de prova alcançarem 90 dias de cura em uma câmara úmida, com umidade relativa do ar de 100% e uma temperatura de $21^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Para isso, foram produzidos três corpos de prova de cada mistura, com dimensões de (7,5 x 15) cm.

Em seguida, os corpos de prova foram levados a uma estufa à temperatura de $60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ até atingir a constância de massa e, após o resfriamento a temperatura ambiente, os corpos de prova tiveram a face lateral selada com filme plástico (Figura 3.16) e fita impermeável de alumínio com o intuito de evitar a evaporação de água pela face e garantir o fluxo unidirecional. Em seguida, determinou-se os valores da massa seca de cada um dos corpos de prova. Assim, os corpos de prova foram posicionados em um recipiente, com tampa, de modo que os mesmos fiquem em contato com uma lâmina d'água de 5 ± 1 mm acima da sua face inferior. A espessura da lâmina d'água foi mantida constante.

Aas massas dos corpos-de-prova foram determinadas após decorridas 3, 6, 24, 48, 72 horas até 28 dias do início do ensaio contados a partir do contato dos corpos de prova com a lâmina d'água. A absorção capilar foi obtida através da Equação (3.9).

$$A_c = \frac{M - M_s}{S} \quad (3.9)$$

Onde,

A_c é a absorção de água por capilaridade, (g/cm²);

M é massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, (g);

M_s é a massa do corpo de prova seco em estufa, (g);

S é a área da seção transversal, (cm²).

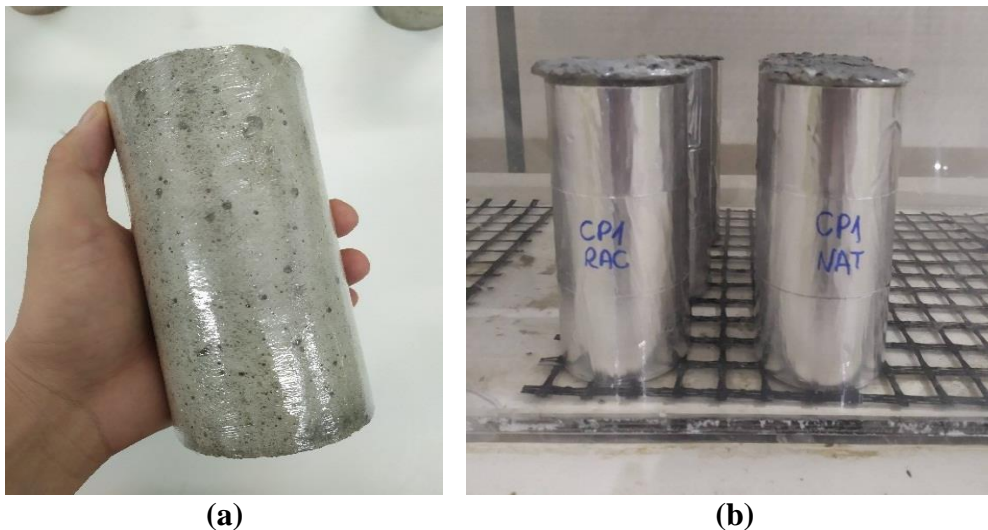


Figura 3.16: Ensaio de absorção capilar: (a) selagem do corpo de prova com plástico filme; (b) corpo de prova imerso em lâmina d'água

A absorvidade do concreto ocorre em dois estágios. O primeiro é conhecido como estágio de absorção, S1. Nesse estágio, o ganho de massa no tempo ocorre de forma linear nos poros capilares maiores. Já no segundo, denominado S2 ou período de saturação, o ganho de massa ocorre nos poros capilares menores. O ponto de mudança entre os dois estágios é chamado de *Ponto de transição* (P_T). A absorvidade é representada pela inclinação de duas retas, apresentadas na Figura 3.17.

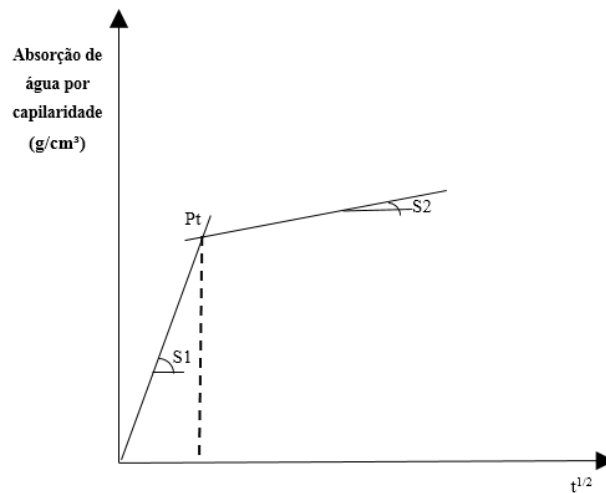


Figura 3.17: Curva típica de absorção total de água por capilaridade x raiz quadrada do tempo

3.4.6. Penetração acelerada de íons cloreto

A penetração acelerada de íons cloreto foi realizada com base na norma ASTM C1.202 (2010). Para a execução deste ensaio, foram produzidos corpos de prova de dimensões (10 x 5) cm que foram obtidos através do corte de corpos de prova de dimensões (10 x 20) cm, com idade 90 dias de cura. O objetivo do equipamento é determinar a carga elétrica passante em cada amostra, e assim, calcular a corrente elétrica, através da Lei de Ohm, pela Equação (3.10).

$$Q = k_c(I_0 + 2.I_{30} + 2.I_{160} + \dots + 2.I_{300} + 2.I_{330} + 2.I_{360}) \quad (3.10)$$

Onde:

Q: carga elétrica, (C);

kc: constante igual a 900 C/A;

In: corrente elétrica em n min após a aplicação da tensão, (A).

Após os 28 e 90 dias de cura, as amostras foram seladas com resina epóxi (*SikaDur 32®*), Figura 3.20-a, e em seguida, foram secas e colocadas em um dessecador para que fosse realizado vácuo sob pressão de 50 mmHg durante 3 horas. Em seguida, abriu-se a torneira do dessecador para que as amostras ficassem totalmente imersas em água. Logo após, foi realizado vácuo novamente por um período de 1 hora, e com o intuito de garantir a

saturação completa dos poros, as amostras ficaram dentro do dessecador por mais cerca de 18 horas (Figura 3.18).

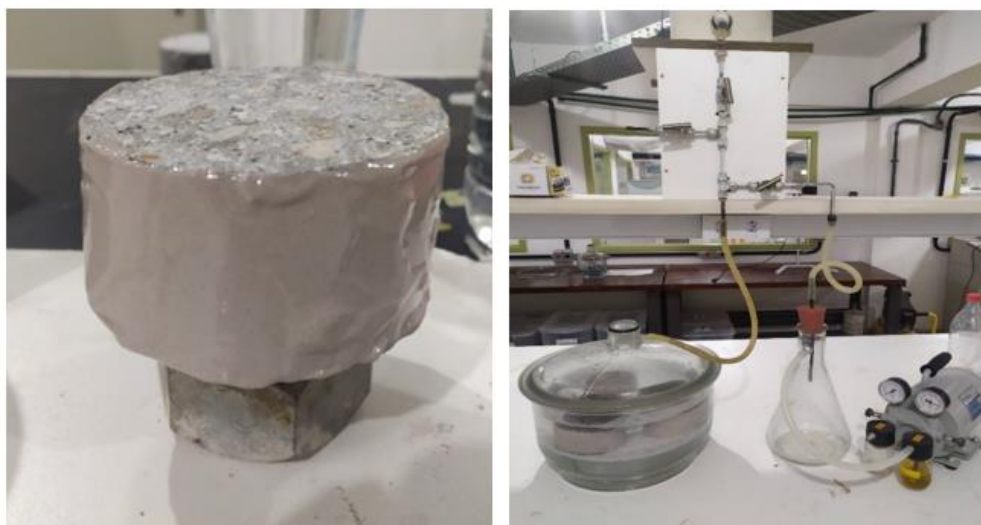


Figura 3.18: (a) amostra selada com SikaDur 32®; (b) preparação das amostras para o ensaio de migração de íons cloreto

Logo após a retirada da amostra do dessecador, ela foi posicionada entre duas células de acrílico, nas quais foram preenchidas com soluções distintas. Assim, uma face da amostra fica em contato com cloreto de sódio (3% da massa) e a outra face em contato com hidróxido de sódio (0,3N). Os terminais de cada célula foram ligados a um circuito elétrico, de forma que a face imersa em cloreto de sódio fique ligada ao terminal negativo e a face em contato com hidróxido de sódio fique ligada ao terminal positivo. As amostras ficaram submetidas a uma diferença de potencial de 60 V por um período de 6 horas, ao longo da qual mediu-se a corrente elétrica passante em intervalos regulares de 30 minutos (Figura 3.19)

A carga elétrica passante em cada amostra foi calculada pela Equação (3.9), mostrada anteriormente. Um índice qualitativo de penetrabilidade dos íons cloreto pode ser observado na Tabela 3.9.

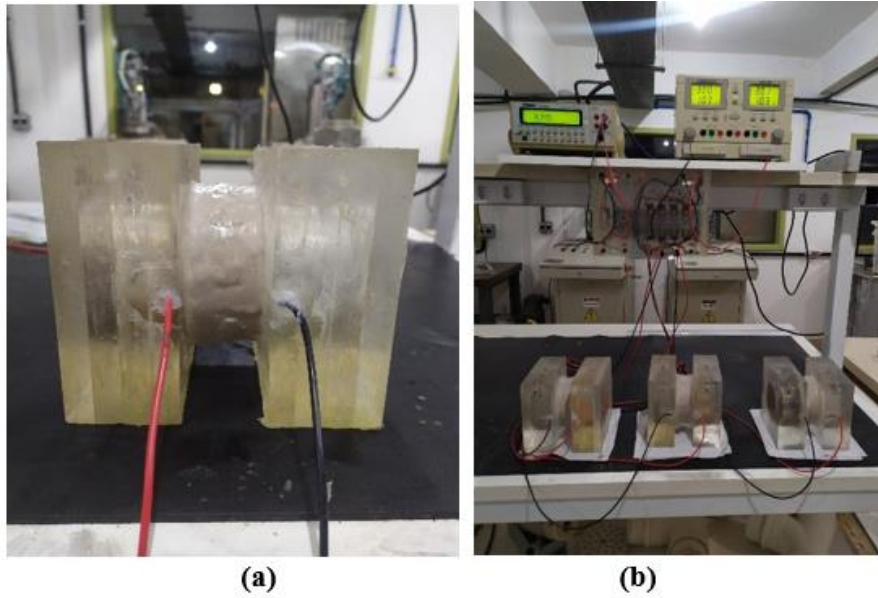


Figura 3.19: (a) posicionamento da amostra na célula de acrílico; (b) equipamento utilizado no ensaio de migração de íons cloretos

Tabela 3.9: Índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloreto

Carga Passante (Coulomb)	Penetrabilidade de íons cloreto
> 4000	Alta
2.000 - 4.000	Moderada
1.000 - 2.000	Baixa
100 - 1.000	Muito baixa
< 100	Negligenciável

Capítulo 4

Apresentação e análise dos resultados

4.1 Abatimento do tronco de cone

A Tabela 4.1 apresenta os resultados para o ensaio do abatimento do tronco de cone, juntamente com algumas informações adicionais.

Tabela 4.1: Resultado de abatimento do tronco de cone obtidos para os concretos produzidos

Mistura	Água livre (l/m³)	Água Efetiva/Materiais cimentícios	Teor de pasta efetiva (%)	Abatimento do tronco de cone (mm)
C30-NAC	180	0,51	29,7	190
C30-RAC	186	0,51	30,9	200
C30-NAC-MK	188	0,60	29,5	180
C30-RAC-MK	191	0,57	30,6	180
C60-NAC	140	0,30	29,9	200
C60-RAC	145	0,29	31,0	190
C60-NAC-MK	150	0,33	30,0	200
C60-RAC-MK	151	0,35	31,0	190

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que, para todos os concretos produzidos, os mesmos obtiveram abatimentos dentro do desejável (180 ± 30) mm, não sendo observado um maior valor de abatimento para as misturas que possuem maiores valores de água livre.

Em relação a C30-RAC, foi possível manter a trabalhabilidade da mesma, quando comparada com a C30-NAC, diante um aumento proporcional da quantidade de materiais cimentícios, água livre e um aumento no teor de pasta efetiva. Já quando se adicionou

metacaulim nestas misturas, as mesmas apresentaram uma pasta mais seca, porém, diante o pequeno aumento no teor de pasta efetiva, conseguiu-se manter a trabalhabilidade das misturas dentro do desejado.

Já para a classe C60, a C60-RAC obteve um maior teor de materiais cimentícios e pasta efetiva, quando comparada com a C60-NAC, mantendo-se dentro da trabalhabilidade desejada. Para esta mistura, pode-se observar que a rugosidade do agregado ocasionou em uma leve diminuição do abatimento, mas que não teve influência negativa para esta propriedade. Ao adicionar metacaulim nestas misturas, observou-se que houve um aumento proporcional entre a quantidade de materiais cimentícios, água livre e teor de pasta efetiva. Portanto, conseguiu-se manter a trabalhabilidade das mesmas dentro da faixa de abatimento desejada. Para a C60-RAC-MK, também pode-se observar que a rugosidade influenciou no abatimento da mistura, mas sem causar influência negativa.

Em geral, só foi possível manter a trabalhabilidade de todas as misturas diante testes realizados em laboratório, para que pudesse ajustar, quando necessário, parâmetros como a quantidade de a/mc efetivo, água livre, teor de superplastificante a ser utilizado e, conseqüentemente, teor de pasta efetiva adequado e fixado na mesma faixa para todas as misturas, para se obter uma mesma trabalhabilidade de todas as misturas de concreto.

Em relação a inserção de agregado reciclado, os valores encontrados estão de acordo com os obtidos por Amario (2019) e Rangel (2019). Já quando foi inserido metacaulim nas misturas de concreto, um estudo apresentado por Muduli e Mukharjee (2019) indicou diminuição no abatimento encontrado para os concretos com adição de metacaulim, quando comparados com os concretos de referência. Os autores acreditam que esta diminuição está ligada à maior área superficial de grãos do metacaulim que levam a uma porção de água sendo absorvida na superfície, o que diminui a trabalhabilidade. Porém, com a dosagem científica utilizada, sendo possível realizar os ajustes nas dosagens de concreto, os resultados obtidos indicam que, com a utilização deste método de dosagem e da compensação de água, é possível manter a trabalhabilidade de todos os concretos produzidos. Vale ressaltar que as misturas que contêm inserção de metacaulim possuem um maior valor de a/mc quando comparadas com suas referências (misturas que não possuem inserção de MK), portanto, assim foi possível que as mesmas apresentassem a mesma trabalhabilidade quando comparadas com as demais misturas.

Por fim, o valor obtido experimentalmente não foi correspondente ao previsto pelo *Betonlab Pro 3*. Essa diferença também foi observada por Amario *et al.* (2017), Andrade (2018), Amario (2019) e Rangel (2019). Este fato pode estar atrelado pela falta de entrada de parâmetros relacionados ao superplastificante e sua capacidade de incrementar a trabalhabilidade dos concretos. Polisseni *et al.* (2017) acrescenta que este acontecimento também pode ser justificado diante a ferramenta não apresentar formas de inserir dados para o ajuste da reologia. Portanto, não é possível fazer uma comparação entre o abatimento previsto e o obtido experimentalmente.

4.2 Comportamento mecânico

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as curvas de tensão *versus* deformação axial para os concretos de classe C30 e C60, respectivamente, para as duas idades avaliadas.

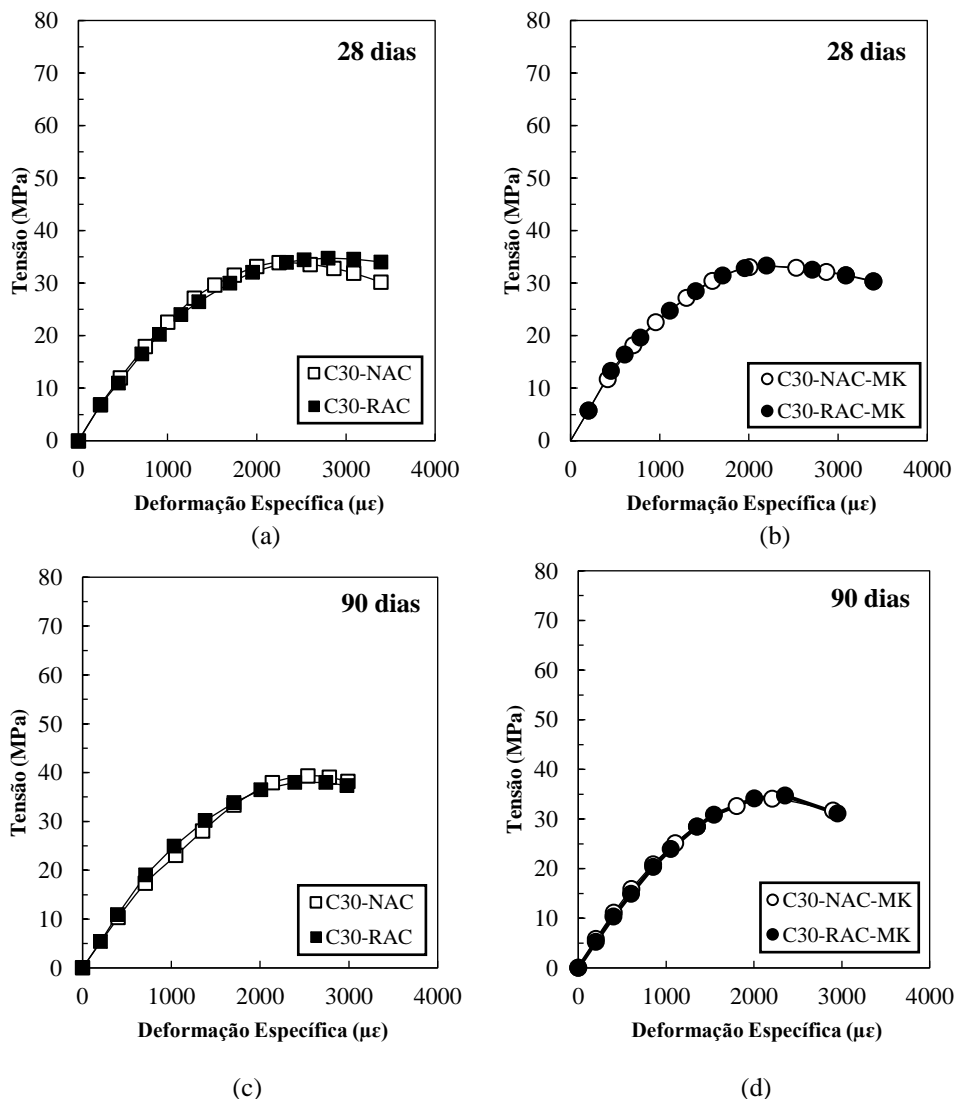


Figura 4.1: Curvas típicas de tensão *versus* deformação axial para os concretos de classe C30

Para a classe C30, pode-se observar que aos 28 dias, independentemente da inserção de agregado reciclado e metacaulim, as curvas de tensão *versus* deformação tiveram a mesma tendência de inclinação, o que nos permite observar uma constância nos valores dos módulos de elasticidade e deformação de pico. Já para os 90 dias de cura, foi observado uma mesma tendência quando se adicionou agregado reciclado. Porém, ao adicionar metacaulim, observou-se que, para esta idade, a mistura C30-NAC-MK, quando comparada com a C30-NAC, apresentou uma menor capacidade de suportar a carga aplicada após atingir a tensão de pico.

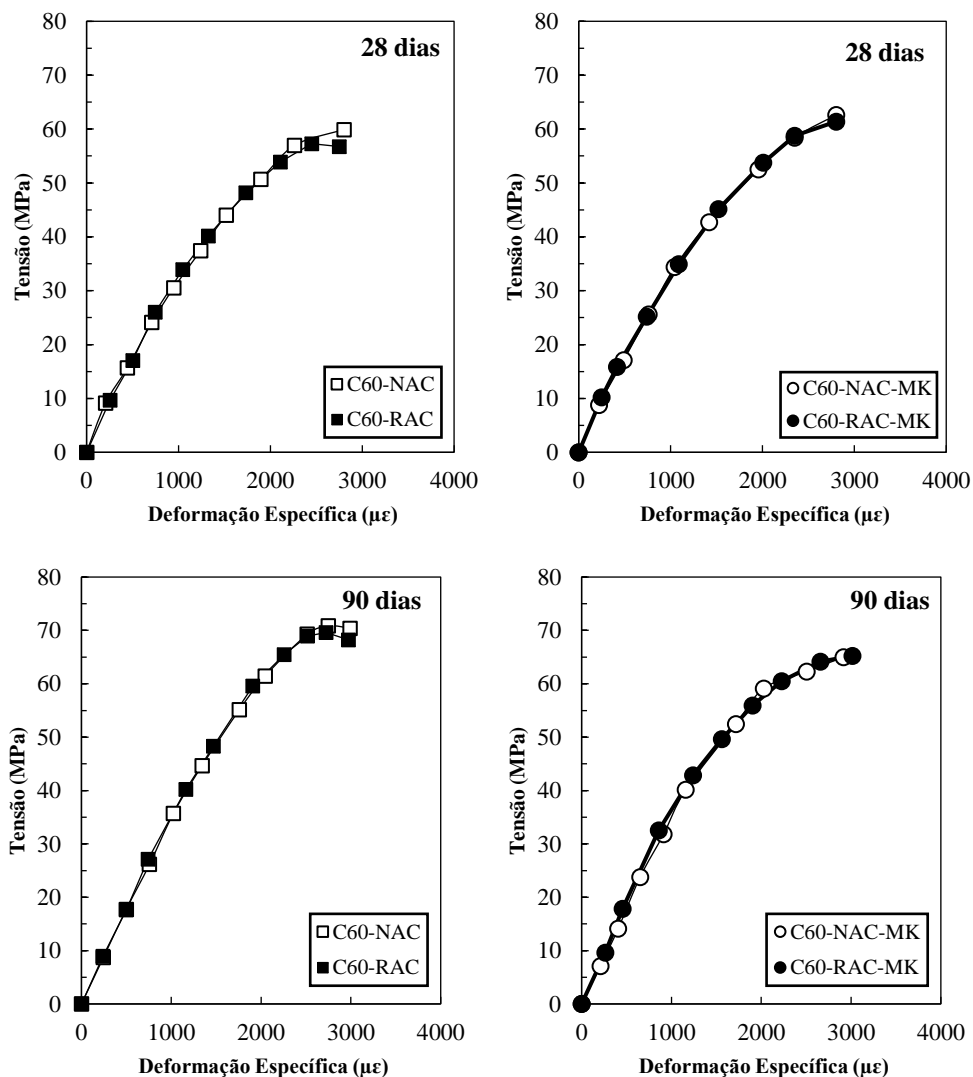


Figura 4.2: Curvas típicas de tensão versus deformação axial para os concretos de classe C60

Em relação a classe de resistência mais alta, C60, a inserção de agregado reciclado e/ou metacaulim não ocasionaram influências significativas nas inclinações das retas obtidas,

o que nos mostra uma mesma tendência de módulo de elasticidade para essas misturas na idade de 28 dias de cura. Porém, em relação a deformação de pico, dentre as quatro misturas (C60-NAC, C60-RAC, C60-NAC-MK e C60-RAC-MK), a C60-RAC foi a que apresentou levemente uma menor capacidade de suportar a carga aplicada, após atingir a tensão de pico. Já aos 90 dias de cura, foi observado uma mesma tendência na inclinação das retas, obtendo uma mesma faixa dos valores de módulo de elasticidade e uma mesma faixa de deformação de pico. Vale ressaltar que, diferentemente das misturas de concretos da classe mais baixa C30, todas as misturas da classe C60 não apresentaram uma resistência residual após a tensão de pico, sendo caracterizadas como uma ruptura frágil.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados de resistência à compressão, deformação axial correspondente a tensão de pico (deformação de pico) e módulo de elasticidade para cada tipo de concreto produzido, aos 28 e 90 dias de cura, com seus respectivos coeficientes de variação.

A partir dos resultados obtidos pode-se observar que o método de dosagem utilizado é considerado eficaz, uma vez que todas as misturas produzidas alcançaram a resistência estabelecida na dosagem para os 28 dias de cura. Observou-se também que, apesar de se ter reduzido a quantidade de materiais cimentícios ao inserir metacaulim nas misturas, manteve-se a resistência à compressão esperada para os 28 dias de cura dos concretos. Portanto, apesar de não ter sido realizada uma Análise de Ciclo de Vida (ACV), constata-se o ganho ambiental ocasionado. Caldas *et al.* (2021) explicam que o metacaulim possui uma menor emissão de gases poluentes por kg de material produzido, quando comparado com o cimento Portland. Portanto, como houve uma redução de até 40 kg de materiais cimentícios entre as misturas, têm-se ganho ambiental.

Aos 28 dias de cura, a mistura C30-RAC obteve um desempenho maior que a C30-NAC, 35,7 MPa e 34,7 MPa, respectivamente. Já quando se adicionou MK em ambas as misturas (C30-NAC-MK e C30-RAC-MK), apesar de terem atingido a resistência à compressão prevista para os 28 dias de cura, essas misturas apresentaram uma menor resistência à compressão quando comparadas com suas referências (C30-NAC e C30-RAC). Esta diferença pode ser explicada diante as misturas com MK apresentarem uma menor quantidade de materiais cimentícios e uma maior relação a/mc em relação as demais.

Tabela 4.2: Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão aos 28 e 90 dias dos concretos produzidos, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Idade de cura (dias)	Mistura	Resistência à compressão (MPa)	Deformação de pico ($\mu\epsilon$)	Módulo de elasticidade (GPa)
28	C30-NAC	34,7 ($\pm 1,2\%$)	2246 ($\pm 8,1\%$)	22,5 ($\pm 3,8\%$)
	C30-RAC	35,7 ($\pm 2,1\%$)	2352 ($\pm 4,3\%$)	23,4 ($\pm 5,6\%$)
	C30-NAC-MK	33,0 ($\pm 3,2\%$)	2248 ($\pm 0,5\%$)	22,0 ($\pm 2,2\%$)
	C30-RAC-MK	33,8 ($\pm 3,5\%$)	2232 ($\pm 5,0\%$)	21,6 ($\pm 1,9\%$)
	C60-NAC	62,2 ($\pm 3,4\%$)	2595 ($\pm 0,1\%$)	30,6 ($\pm 4,9\%$)
	C60-RAC	58,2 ($\pm 4,0\%$)	2316 ($\pm 2,9\%$)	30,0 ($\pm 2,1\%$)
	C60-NAC-MK	63,6 ($\pm 2,2\%$)	2585 ($\pm 2,8\%$)	31,8 ($\pm 4,5\%$)
	C60-RAC-MK	62,8 ($\pm 1,5\%$)	2540 ($\pm 5,4\%$)	31,2 ($\pm 6,8\%$)
90	C30-NAC	40,4 ($\pm 2,3\%$)	2557 ($\pm 2,7\%$)	26,9 ($\pm 3,0\%$)
	C30-RAC	38,6 ($\pm 1,6\%$)	2365 ($\pm 4,1\%$)	26,1 ($\pm 2,0\%$)
	C30-NAC-MK	35,0 ($\pm 2,5\%$)	2268 ($\pm 1,0\%$)	26,0 ($\pm 5,6\%$)
	C30-RAC-MK	35,1 ($\pm 1,2\%$)	2352 ($\pm 4,4\%$)	26,0 ($\pm 4,8\%$)
	C60-NAC	68,9 ($\pm 2,2\%$)	2779 ($\pm 3,9\%$)	34,1 ($\pm 5,0\%$)
	C60-RAC	68,3 ($\pm 5,2\%$)	2761 ($\pm 8,1\%$)	34,6 ($\pm 2,9\%$)
	C60-NAC-MK	65,0 ($\pm 3,2\%$)	2796 ($\pm 7,7\%$)	34,2 ($\pm 3,3\%$)
	C60-RAC-MK	64,0 ($\pm 1,2\%$)	2825 ($\pm 9,6\%$)	33,6 ($\pm 7,3\%$)

Em relação aos 90 dias de cura para esta classe, observou-se que a mistura C30-NAC obteve um maior desempenho na resistência à compressão quando comparada com a C30-RAC, alcançando uma maior resistência de aproximadamente 16% e 8%, respectivamente, de 28 para 90 dias de cura.. O menor desempenho da mistura C30-RAC, pode estar relacionado com uma estrutura mais porosa e mais frágil que o mesmo possui, diante argamassa envelhecida aderida que o agregado reciclado possui. Já ao adicionar MK, as misturas C30-NAC-MK e C30-RAC-MK obtiveram um desempenho menor quando comparadas com as misturas C30-NAC e C30-RAC, respectivamente. Este fato pode estar atrelado diante a um menor valor da quantidade de materiais cimentícios, apresentado na Tabela 3.7 e Tabela 3.8.

Já aos 28 dias de cura para a classe C60, a C60-NAC obteve uma maior resistência quando comparada com a C60-RAC, porém, as duas atingiram a resistência esperada para esta idade de cura. Já quando adicionado MK às misturas (C60-NAC-MK e C60-RAC-MK), ambas alcançaram uma maior resistência quando comparadas com suas referências, porém sem diferenças significativas. Todas as misturas obtiveram módulo de elasticidade e deformação de pico semelhantes entre si.

E, aos 90 dias de cura, pode-se observar que a mistura C60-RAC obteve um maior desempenho que a mistura C60-NAC, na resistência à compressão, de aproximadamente, 17% e 10%, respectivamente, quando comparadas de 28 para 90 dias de cura. Para as misturas que continham metacaulim (C60-NAC-MK e C60-RAC-MK), observou-se que essas misturas não obtiveram o mesmo desempenho de resistência à compressão quando comparadas com as misturas C60-NAC e C60-RAC. Este fato pode ser explicado diante um menor valor da quantidade de materiais cimentícios, apresentado na Tabela 3.7 e Tabela 3.8, que essas misturas possuem quando comparadas com suas respectivas referências.

Outro fator relevante observado por Menegatti (2021) é que misturas que são compostas por metacaulim tendem a alcançar um desempenho maior em resistência, quando observado o seu desempenho em menores idades (de 7 para 14 e 28 dias de cura). Este fato está atrelado à atividade pozolânica proporcionada pelo uso de metacaulim, que apresenta altos teores de sílica e alumina. Raheem *et al.* (2021) explicam que, na presença de água, os óxidos presentes na reação pozolânica apresentam uma tendência de reagir com a portlandita produzida durante a hidratação do cimento, formando assim produtos cimentícios como silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. Outros autores explicam que o rápido consumo de hidróxido de cálcio e o aumento da formação de C-S-H, C-A-S-H e C₂ASH₈ (gelenita hidratada) são responsáveis pelo refinamento de poros, considerado o principal mecanismo de melhoria das propriedades de concretos dosados com metacaulim. Essas reações ocorrem predominantemente em idades baixas.

Em relação aos valores de deformação de pico encontrados, as misturas da classe C60 atingiram maiores deformações na região imediatamente anterior à ruptura do que as misturas da classe C30, para as duas idades de cura analisadas. Já para os valores de módulo de elasticidade obtidos, observou-se que esta propriedade está diretamente ligada

à resistência à compressão. Pois observou-se que maiores valores de resistência à compressão, tendem a obter maiores valores de módulo de elasticidade.

A Figura 4.3 apresenta uma comparação entre a resistência à compressão prevista pelo *Betonlab* e a resistência obtida aos 28 dias de cura. Portanto, pode-se observar que a mesma apresenta um comportamento linear, tanto para as misturas compostas somente por agregados naturais e cimento, quanto nas que continham inserção de agregado reciclado e metacaulim, constatando que o programa utilizado estima, com precisão, a resistência à compressão dos concretos dosados utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

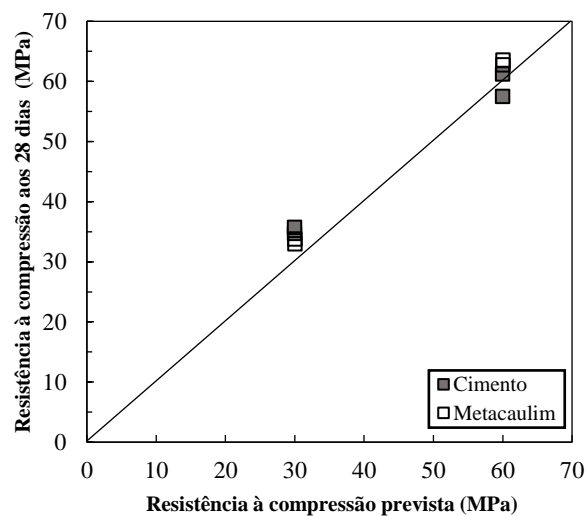


Figura 4.3: Comparação entre as resistências à compressão obtidas experimentalmente e as resistências teóricas previstas pelo programa *Betonlab*

Outro ponto que pode ser observado é a correlação entre a resistência à compressão obtida experimentalmente aos 28 e 90 dias de cura com a relação a/mc efetiva. Através da Figura 4.4, pode-se concluir que, diante um aumento da relação a/mc , a resistência à compressão tende a diminuir. Amario *et al.* (2017) explicam que o aumento deste fator provoca um enfraquecimento da matriz de concreto, devido ao aumento da porosidade, ocasionando uma redução da resistência. Leite (2001) acrescenta que não é possível obter uma relação direta entre a resistência à compressão e a relação água/cimento, pois existem outros fatores que influenciam na resistência dos concretos, como o consumo de cimento, adensamento e granulometria dos tipos de agregados utilizados. Outro ponto que pode ser

observado é a forte correlação entre as misturas, maior tendência diante uma estrutura mais desenvolvida (hidratação mais avançada) com o passar do tempo, de 28 para 90 dias.

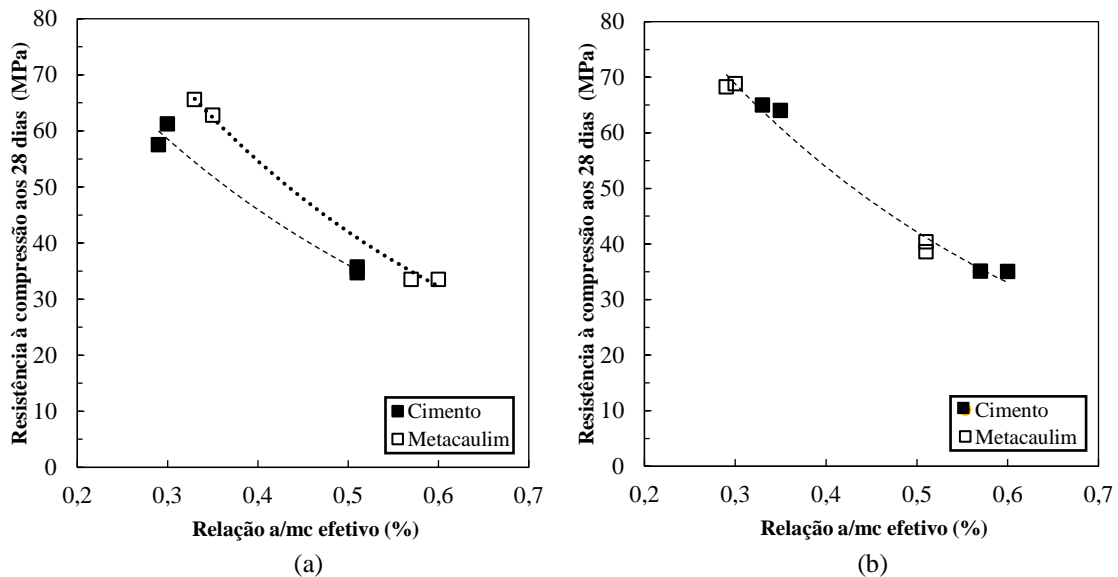


Figura 4.4: Resistência à compressão em função do fator a/mc efetivo (a) 28 dias; (b) 90 dias

Por fim, os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 4.5. A resistência à tração é uma propriedade que está ligada a resistência à compressão, ou seja, quanto maior for o valor da resistência à compressão, maior será o valor da resistência à tração. Porém, apesar desta relação, não existe uma proporção direta entre as mesmas. Pois, diante o aumento ocorrido na resistência à compressão, existe também um crescimento da resistência à tração do concreto, porém em uma taxa decrescente.

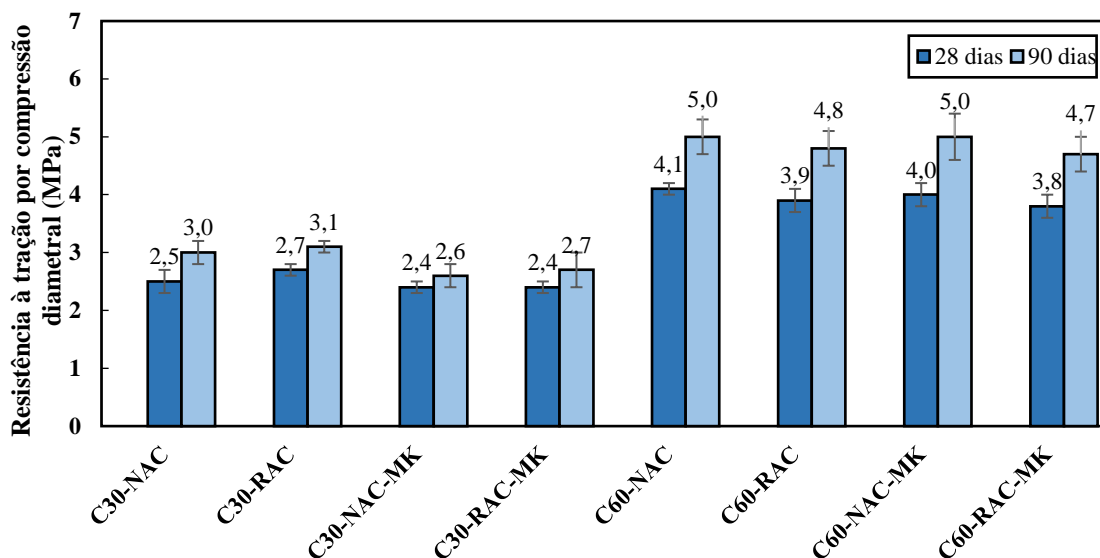


Figura 4.5: Valores médios de resistência à tração por compressão diametral

Para a classe de concreto C30, pode-se observar que aos 28 dias de cura, a mistura C30-RAC apresentou maior resistência à tração quando comparada com a C30-NAC, 2,7MPa e 2,5MPa, respectivamente. Este fato pode ser explicado diante uma maior resistência à compressão que a mesma apresentou aos 28 dias. Já as quando comparada as misturas C30-NAC e C30-NAC-MK, as mesmas não apresentaram diferenças significativas (2,5 MPa e 2,4 MPa). Em relação a inserção de metacaulim na mistura que contém agregado reciclado (C30-RAC-MK), foi observada uma redução de 11% na resistência à tração. Aos 90 dias de cura da mesma classe, foi constatado um crescimento da resistência à tração para todas as quatro misturas de concreto. Para esta idade, a C30-RAC foi a que obteve maior resistência à tração. Já para as misturas C30-NAC-MK e C30-RAC-MK, diante a mesma resistência à compressão encontrada aos 90 dias, ambas alcançaram valores semelhantes de resistência à tração. Porém, quando comparado o ganho das mesmas em relação às misturas de referência (C30-NAC e C30-RAC), observou-se que o ganho da resistência à tração aos 90 dias, das misturas que possuem inserção de metacaulim, foram menores. Este fato também pode estar atrelado ao ganho de resistência inicial que o metacaulim apresenta, diante à atividade pozolânica, que apresenta reações somente nas idades iniciais.

Já para a classe C60, aos 28 dias de cura, a C60-NAC foi a que obteve uma maior resistência à tração. Observou-se também que as misturas C60-NAC-MK e C60-RAC-MK alcançaram resistências à tração semelhantes às encontradas por suas respectivas

referências (C60-NAC e C60-RAC). E, aos 90 dias, todas as misturas obtiveram um ganho na resistência à tração quando comparadas com suas respectivas resistências aos 28 dias de cura. Porém, observou-se que todas as misturas ficaram dentro da mesma faixa de resistência à tração quando comparadas entre si. Portanto, pode-se constatar que a inserção de agregado reciclado de concreto e metacaulim não ocasionaram influência significativa nesta propriedade.

As relações entre a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à compressão aos 28 e 90 dias dos concretos produzidos estão apresentadas na Figura 4.6.

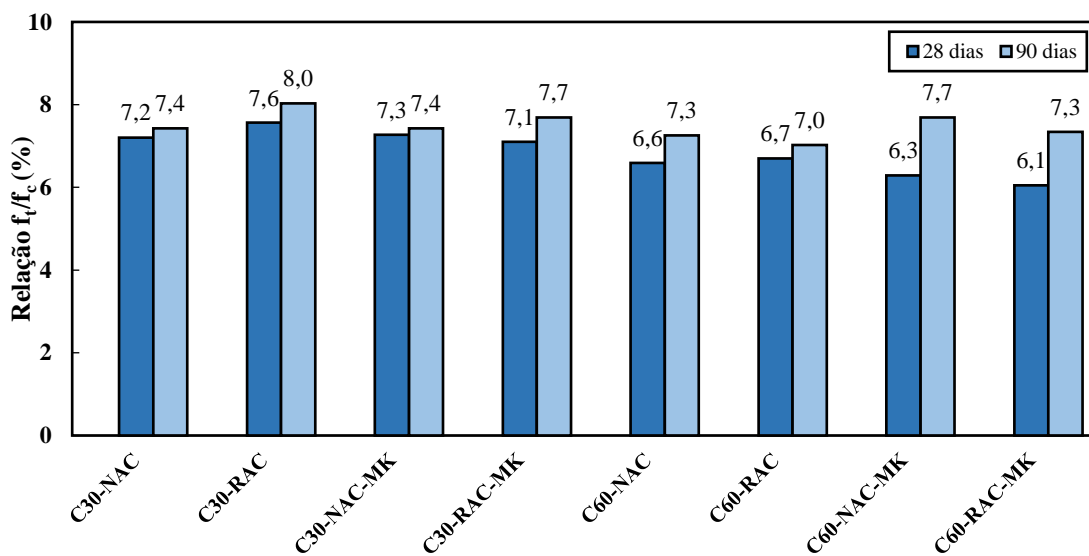


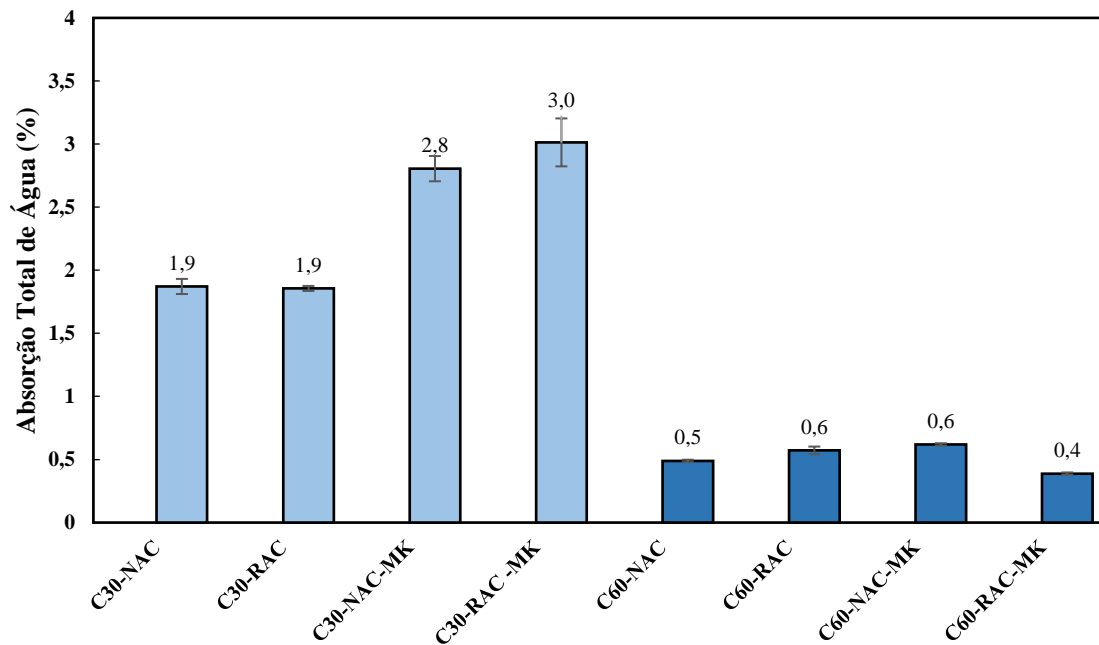
Figura 4.6: Relação entre os resultados médios de tração por compressão diametral e de compressão uniaxial

A partir da relação obtida, pode-se observar que os concretos de classe C30 obtiveram resistência à tração por compressão diametral por volta de 7,3% e 7,6% de suas resistências à compressão aos 28 e 90 dias de cura respectivamente. E os concretos de classe C60MPa obtiveram em torno de 6,4% e 7,3%. A partir desta relação pode-se constatar que os concretos avaliados neste trabalho tendem a apresentar uma menor relação f_t/f_c quando sua classe de resistência é aumentada. Amario (2019) explica que este comportamento é esperado diante o fato da não existência de uma proporcionalidade entre a resistência à compressão e a tração de concretos. Pois, diante um acréscimo na resistência à compressão dos concretos, ocorre um acréscimo na resistência à tração dos mesmos, porém em uma taxa decrescente.

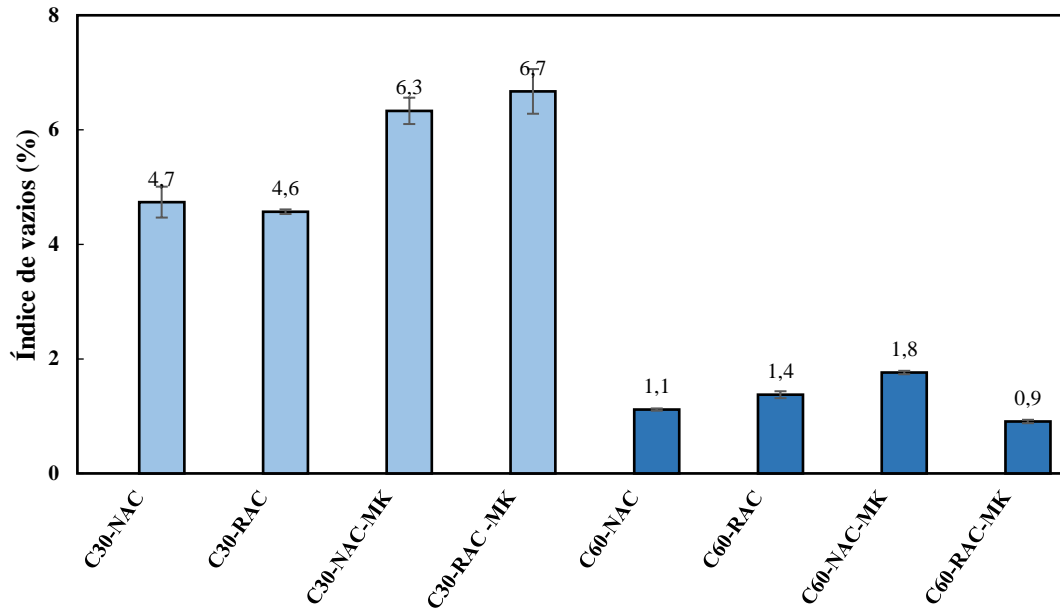
4.3 Absorção total de água, índice de vazios e massa específica

A Figura 4.7 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de absorção total de água e índice de vazios para todos os concretos produzidos.

Em geral, pode-se observar que as misturas da classe de resistência mais alta, C60, apresentaram menores valores de absorção total de água e índice de vazios em relação a C30. Isso está relacionado com os menores valores de relação a/mc efetiva que deixam as pastas de cimento menos porosas e, conseqüentemente, com um menor índice de vazios e uma menor absorção. Assim, as misturas da classe de alta resistência apresentaram maiores valores de massa específica, apresentadas Figura 4.8, do que as misturas de baixa resistência, o que também pode estar relacionado com o maior consumo de materiais cimentícios das misturas de classe C60 em relação as misturas da classe C30.



(a)



(b)

Figura 4.7: (a) absorção total de água (%); (b) índice de vazios (%) para todas as misturas produzidas para as classes C30 e C60 aos 90 dias de cura

Em relação a classe C30, pode-se observar que aos 90 dias de cura, a absorção total variou de 1,9% a 3,0%. As misturas C30-NAC e C30-RAC obtiveram valores iguais para absorção total de água e índice de vazios. Este fato pode estar atrelado a metodologia de dosagem utilizada que permitiu realizar ajustes, como uma maior quantidade de materiais cimentícios, maior água livre, maior teor de pasta efetiva e volume total de argamassa, o que pode ter acondicionado em um melhor empacotamento da mistura reciclada. Já quando foi adicionado metacaulim às misturas de referência (C30-NAC-MK e C30-RAC-MK), observou-se um aumento de até 57%. Este fato pode estar relacionado ao desbalanço ocasionado na mistura. Os efeitos benéficos devido ao refinamento dos poros podem não ter sido suficientes para superar o efeito prejudicial causado pela maior água livre que essas misturas possuem quando comparadas com suas referências (C30-NAC e C30-RAC).

Já em relação a classe C60, as quatro misturas produzidas para esta classe, apresentaram valores próximos de absorção de água e índice de vazios. Vale ressaltar que misturas de alta resistência possuem um menor valor de relação a/mc efetivo e um maior consumo de cimento, o que também pode ter contribuído para uma melhor densificação da pasta e um melhor empacotamento da mistura. Para as misturas que continham MK (C60-NAC-MK e C60-RAC-MK), Muduli & Mukharjee (2019) acreditam que isso pode ser explicado

devido à presença de produtos de hidratação insolúveis resultantes da reação pozolânica, que podem ocasionar no bloqueio de poros do concreto, impedindo a passagem de água ao longo do tempo. Além disso, as misturas que continham somente agregados naturais (C30-NAC e C60-NAC) foram as que obtiveram os maiores valores de massa específica, quando comparadas com as demais misturas de suas respectivas classes. Isto diante a maior massa específica do agregado natural de Brita 1, quando comparado com o agregado reciclado de concreto de Brita 1, e que estão de acordo com diversos estudos apresentados na literatura. Os valores de massa específica obtidos estão apresentados na Figura 4.8.

Essa comparação em relação as misturas que continham substituição de agregados naturais por agregados reciclados (C30-RAC e C60-RAC), a diminuição da massa específica pode ser explicada diante uma maior porosidade da argamassa envelhecida aderida aos grãos dos agregados reciclados que permitem que esses poros sejam preenchidos por ar, ocasionando uma redução dos valores de massa específica dos concretos. Já em comparação com as misturas que possuem substituição parcial do cimento por metacaulim (C30-NAC-MK, C30-RAC-MK, C60-NAC-MK e C60-RAC-MK), essa diminuição na massa específica pode ser explicada diante menor massa específica do material quando comparada ao cimento, o que torna esses concretos mais leves.

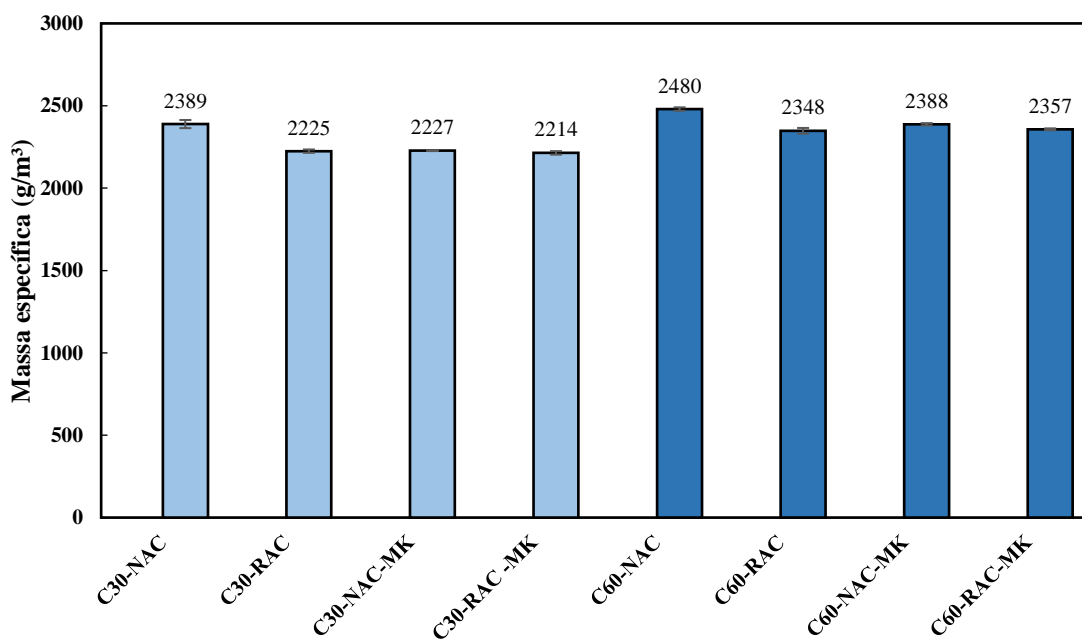


Figura 4.8: Massa específica (kg/m^3) para todas as misturas produzidas para as classes C30 e C60 aos 90 dias de cura

4.4 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios obtidos de absorção de água por capilaridade, durante as 72 horas e 672 horas de ensaio. A Figura 4.9 apresenta o comportamento de absorção de água por capilaridade de cada mistura ao decorrer do tempo.

Em geral, pode-se observar que a absorção por capilaridade é maior nos concretos de menor resistência (classe C30). Este fato também foi observado quando os concretos foram avaliados a absorção total de água por imersão, onde os concretos que possuem uma menor resistência apresentaram os maiores valores de absorção. Isso também pode ser explicado diante um menor consumo de materiais cimentícios e uma maior relação a/mc efetivo que essas misturas possuem, o que ocasiona em uma estrutura mais porosa e mais fraca, permitindo assim uma maior passagem de água entre os poros da matriz cimentícia.

Tabela 4.3: Valores médios de absorção de água por capilaridade após 72 horas e 672 horas de ensaio, com os respectivos coeficientes de variação (em %, entre parênteses)

Mistura	Absorção capilar (g/cm³)	
	72 horas	672 horas
C30-NAC	0,37 (± 0,44)	0,79 (± 1,64)
C30-RAC	0,34 (± 3,37)	0,77 (± 2,75)
C30-NAC-MK	0,55 (± 0,39)	0,92 (± 1,34)
C30-RAC-MK	0,46 (± 4,47)	0,76 (± 3,26)
C60-NAC	0,20 (± 2,62)	0,39 (± 2,94)
C60-RAC	0,17 (± 4,16)	0,35 (± 7,39)
C60-NAC-MK	0,23 (± 4,52)	0,35 (± 2,95)
C60-RAC-MK	0,19 (± 1,58)	0,33 (± 1,29)

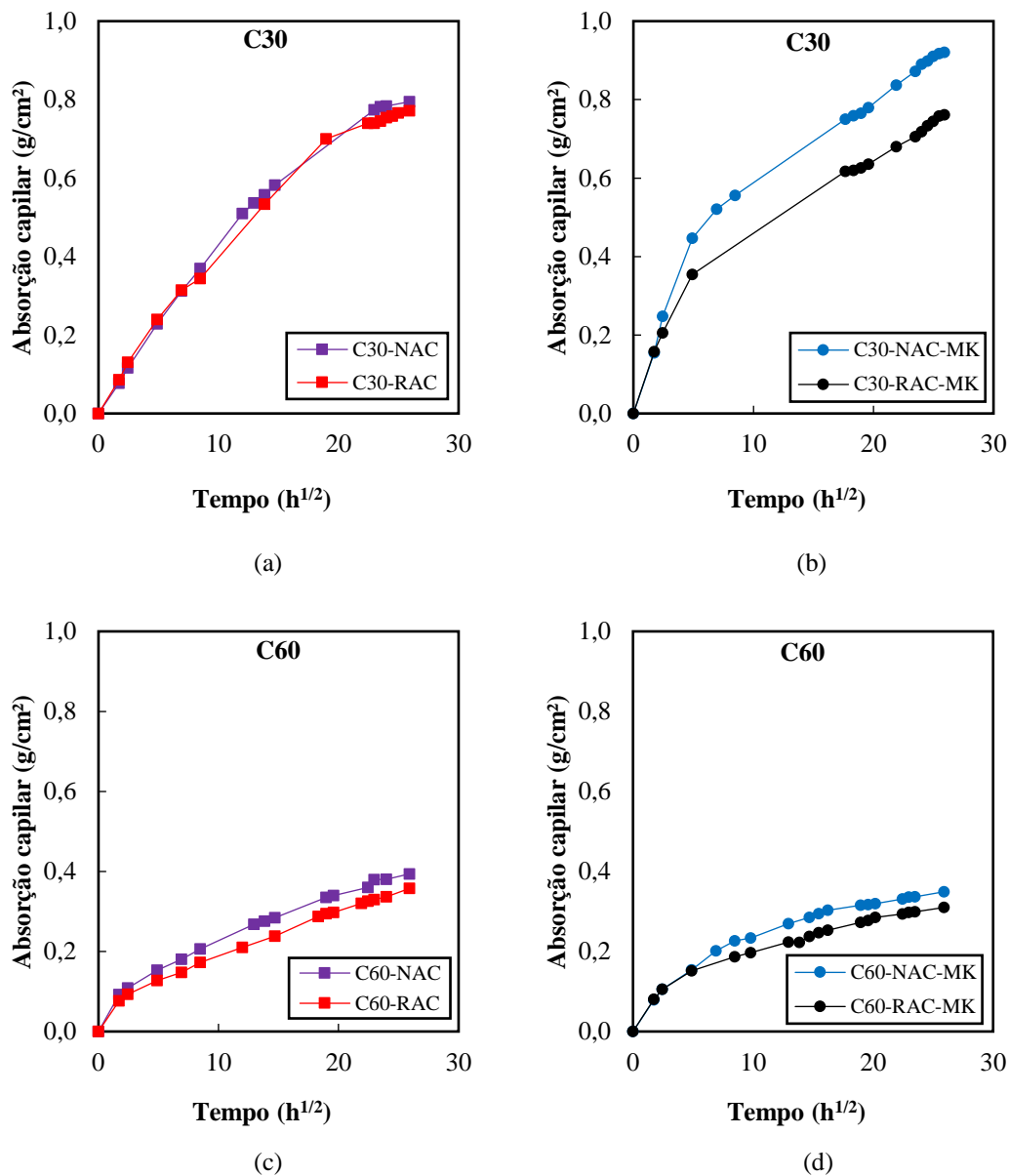


Figura 4.9: Comportamento de absorção de água por capilaridade aos 90 dias de cura - (a) e (c): cimento; (b) e (d): cimento + metacaulim

Para a classe C30, diante análise estatística realizada (ANOVA), pode-se observar que as misturas C30-NAC e C30-RAC, são estatisticamente iguais durante as 672 horas de ensaios realizadas. Já com a inserção de metacaulim, observou-se que a mistura C30-RAC-MK obteve uma absorção por capilaridade menor do que a C30-NAC-MK. MUDULI E MUKHARJEE (2019) acreditam que a inserção de metacaulim pode ser mais eficaz quando realizada na presença de agregado reciclado, pelo fato do mesmo apresentar uma maior porosidade diante argamassa envelhecida aderida aos grãos do agregado reciclado juntamente com géis adicionais extras, que se hidratam e melhoram a ITZ e a ligação na interface.

E, ao comparar as misturas que continham metacaulim com as que continham apenas cimento, observou-se que a inserção de metacaulim ocasionou um aumento na absorção de água por capilaridade nesta classe de concreto, após 672 horas de ensaio. Isso pode ser explicado diante uma maior relação a/mc que essas misturas possuem. Neville (2016) explica que as pastas de materiais cimentícios que possuem uma maior relação a/mc , acarretam em poros capilares mais segmentados, o que contribui para uma maior permeabilidade do concreto. Vale ressaltar que todas as misturas seguiram a mesma tendência dos valores obtidos para as mesmas quando foram submetidas à absorção de água por imersão total.

Já em relação a classe C60, observou-se que a mistura C60-RAC obteve uma menor absorção quando comparada com a C60-NAC, porém estes valores (0,17% e 0,20%, respectivamente) foram considerados iguais diante análise estatística realizada (ANOVA). E, ao adicionar metacaulim as misturas, observou-se que durante as primeiras 72h de ensaio, as misturas C60-NAC-MK e C60-RAC-MK absorveram uma maior quantidade de água, em uma maior velocidade quando comparadas com suas referências (C60-NAC e C60-RAC). Porém, ao final das 672 horas, constatou-se que, quando comparada a C60-NAC-MK e a C60-RAC-MK com a C60-NAC e a C60-RAC, as misturas com metacaulim alcançaram menores valores de absorção por capilaridade. Vale ressaltar que a diferença de absorção entre as misturas não são significativas, uma vez que as mesmas possuem valores próximos de água livre e teor de pasta efetiva.

Foram calculadas as absorptividades de cada mistura a partir do coeficiente angular das curvas de ajuste linear. As absorptividades determinadas no estágio de absorção (S1) e no estágio de saturação (S2), juntamente com os seus pontos de transição (Pt), de todos os concretos produzidos, estão apresentadas na Tabela 4.4. Os ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadrada do tempo para os concretos das classes C30 e C60 são apresentadas nas Figura 4.10.

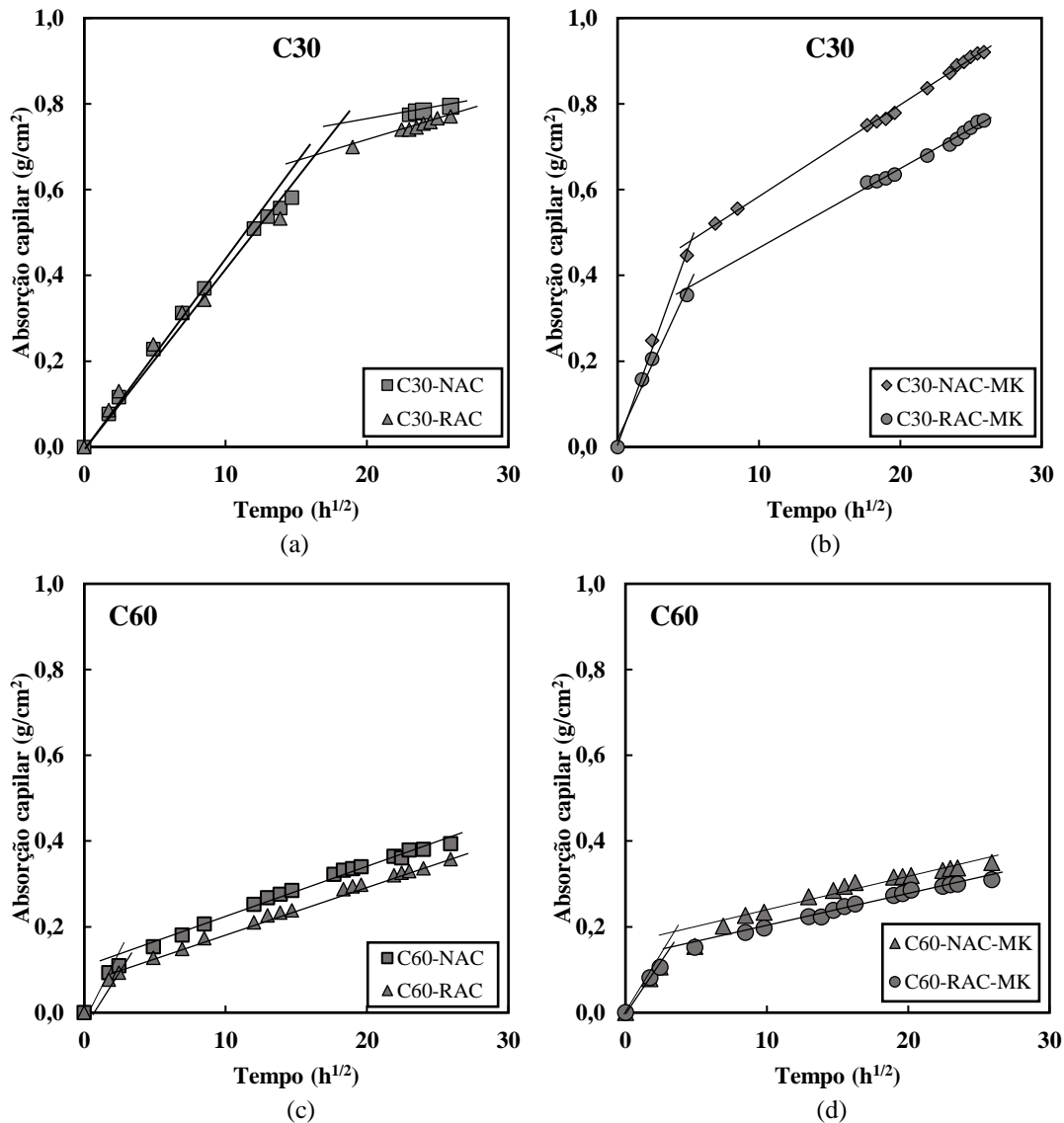


Figura 4.10: Ajustes lineares das curvas de absorção de água por capilaridade em função da raiz quadra – (a) e (b): C30; (c) e (d): C60

Para a classe C30, é possível observar dois caminhos distintos: misturas que possuem somente cimento como material cimentício e misturas que possuem cimento e metacaulim. Pode-se observar que as misturas C30-NAC e C30-RAC alcançam os estágios de absorção igualmente, porém no estágio S2 (saturação), o NAC absorve água com uma menor velocidade e o RAC continua absorvendo água com uma velocidade maior.

Já para as misturas que contêm MK, quando comparadas com as demais, observa-se que a inserção de metacaulim ocasionou em uma maior e mais rápida absorção no estágio S1 (absorção), porém, com o passar do tempo, essa velocidade diminui. Isso pode ser explicado diante o refinamento de poros causados pela atividade pozolânica que o

metacaulim possui. Ela aumenta a sucção capilar durante as primeiras horas de absorção, porém, logo no estágio de saturação, ocorre uma absorção de água em uma menor velocidade.

Tabela 4.4: Valores dos pontos de transição e absortividade dos concretos produzidos

Idade	Misturas	Ponto de transição		Absortividade ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$)	
		g/cm^2	$\text{h}^{1/2}$	S1	S2
90	C30-NAC	0,757	22,98	0,033	0,001
	C30-RAC	0,680	18,97	0,036	0,001
	C30-NAC-MK	0,461	4,90	0,094	0,006
	C30-RAC-MK	0,416	4,90	0,085	0,004
	C60-NAC	0,100	2,45	0,041	0,010
	C60-RAC	0,077	1,73	0,044	0,010
	C60-NAC-MK	0,153	4,89	0,031	0,005
	C60-RAC-MK	0,106	2,45	0,043	0,006

Já para a classe C60, não foi observada uma diferença muito significativa na taxa de absorção inicial (absorção) entre as misturas. Porém, observou-se que, no estágio de saturação, as misturas que possuem metacaulim atingiram uma absorção menor quando comparadas com as demais misturas. Vale ressaltar que, para as duas classes C30 e C60, a inserção de agregado reciclado não ocasionou mudanças significativas nos concretos produzidos.

Para esta propriedade, foi realizada uma correlação entre a absorção de água por capilaridade e o índice de vazios. E, para uma melhor comparação dos resultados, foram adicionados os resultados obtidos para estas propriedades para um concreto produzido com os mesmos parâmetros e materiais dos que foram produzidos para este trabalho, para uma classe C45, por Da Silva Filho (2022). Assim, foi observado a forte correlação existentes entre as propriedades uma vez que os concretos produzidos somente com cimento obtiveram tendências entre as três classes de concretos avaliados, assim como aqueles produzidos com cimento e metacaulim. A Figura 4.11 apresenta a correlação realizada.

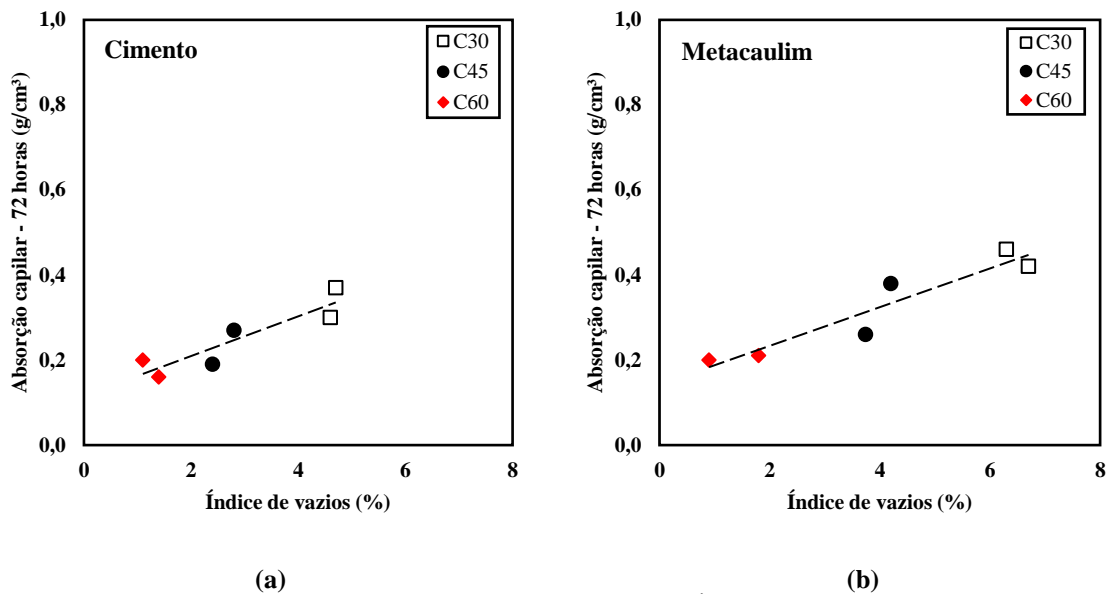


Figura 4.11: Correlação entre Absorção capilar (g/cm^3) x Índice de vazios (%) - (a): misturas contendo apenas cimento; (b) misturas contendo cimento + metacaulim

4.5 Penetração acelerada por íons cloretos

A Figura 4.11 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de penetração acelerada por íons cloretos. A ASTM C1.202 (2010) ressalta que, quando os valores de carga elétrica encontrados são superiores a 4.000 C, a penetrabilidade é considerada alta. Para valores entre 2.000 e 4.000 C é considerada moderada, entre 1.000 e 2.000 C, baixa, entre 100 e 1.000 C, muito baixa e para valores de carga elétrica inferiores a 100 C, a penetrabilidade é considerada negligenciável. Vale ressaltar que esta norma estabelece somente uma relação qualitativa entre a resistência à penetração de cloretos e a corrente elétrica que passa por um corpo de prova de concreto (Pontes *et al.* 2021).

Em geral, podemos observar que as misturas de classe mais alta, C60 possuem uma tendência a terem uma carga elétrica passante menor do que as misturas de classe mais baixa, C30. Este fato pode ser explicado diante a menor relação a/mc efetivo que a classe mais alta possui, apresentado na Tabela 3.8, assim, conseqüentemente, acarreta em um menor índice de vazios, dificultando a migração de íons.

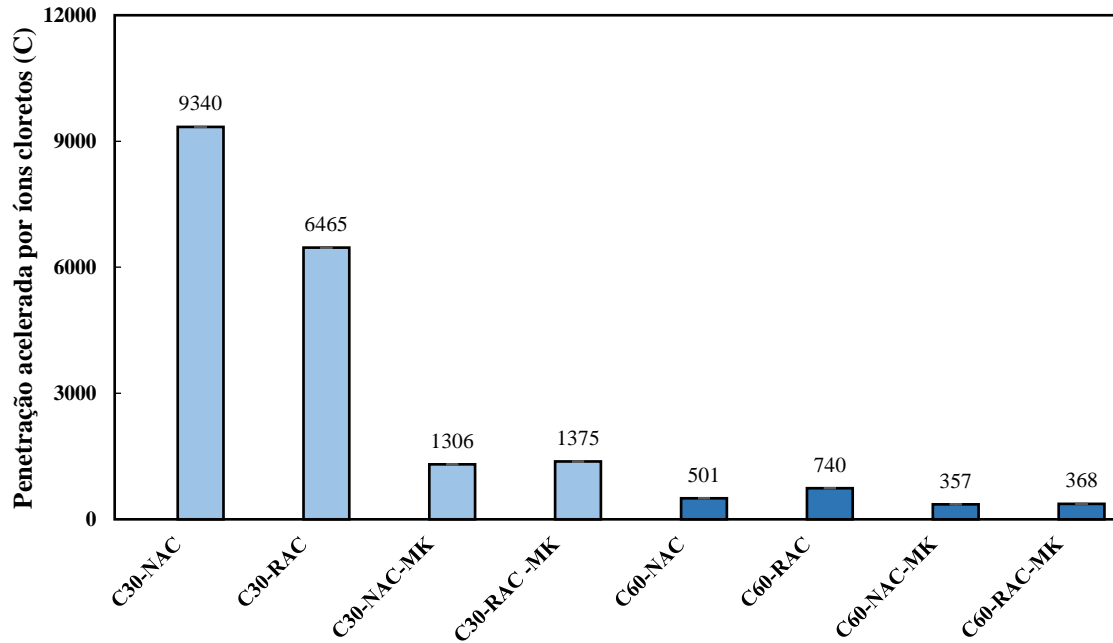


Figura 4.12: Carga elétrica passante das misturas submetidas ao ensaio de penetração acelerada de íons cloretos

Em relação a classe C30, aos 90 dias, a mistura que apresentou uma maior carga elétrica passante foi a C30-NAC (9.430 C). O que permite observar que a argamassa envelhecida aderida aos grãos do agregado reciclado, na mistura C30-RAC, não ocasionaram influência na carga elétrica passante, podendo-se concluir que a migração de cloretos é uma propriedade predominantemente governada pela matriz cimentícia. O mesmo comportamento foi observado por Menegatti (2021).

Já quando adicionado metacaulim, houve uma redução considerável de 85% da C30-NAC para a C30-NAC-MK e de 78% da C30-RAC para a C30-RAC-MK. Essa redução pode ser explicada diante refinamento dos poros devido ao efeito pozolânico e pela possível formação de sal de Friedel que passa a ocupar parte dos poros existentes. E, a redução de íons cloretos livres podem ser ocasionada diante o alto teor de alumina que o metacaulim possui que ocasiona na formação de novos produtos, como o sal de Friedel (MENEGATTI, 2021; MARDANI-AGHABAGLOU *et al.*, 2014).

Já para a classe C60, aos 90 dias, a mistura que apresentou maior carga elétrica passante foi a C60-RAC (740 C). Este fato pode estar relacionado diante um maior índice de vazios e uma maior absorção de água que a mistura apresentou em relação as demais. E, ao adicionar metacaulim, as duas misturas (C60-NAC-MK e C60-RAC-MK) alcançaram

uma redução na carga elétrica passante de até 50% quando comparadas com as misturas de referência (C60-NAC e C60-RAC).

Em geral, observou-se que para as duas classes de resistência (C30 e C60) houve melhora na resistência à migração de íons cloretos quando se adicionou metacaulim as misturas que possuíam somente agregados naturais e nas que continham substituição do mesmo por agregado reciclado de concreto. Este fato pode ser explicado diante a capacidade que o metacaulim possui em melhorar a resistência ao ataque químico (BARBHUIYA *et al.*, 2015).

A Tabela 4.5 apresenta uma classificação das misturas diante o índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloretos.

Tabela 4.5: Classificação diante o índice qualitativo de penetrabilidade de íons cloretos

Misturas	90 dias
C30-NAC	Alta
C30-RAC	Alta
C30-NAC-MK	Baixa
C30-RAC-MK	Baixa
C60-NAC	Muito baixa
C60 RAC	Muito baixa
C60-NAC-MK	Muito Baixa
C60-RAC-MK	Muito Baixa

Como podemos observar, para a classe mais baixa, C30, as misturas C30-NAC e C30-RAC, obtiveram uma alta carga elétrica passante não sendo indicado o uso para locais que possuem uma alta penetração destes íons. Já quando adicionado metacaulim (C30-NAC-MK e C30-RAC-MK), as duas misturas apresentaram uma baixa carga elétrica passante. Já para classe C60, todas as misturas tiveram suas respectivas cargas elétricas passantes classificadas como “muito baixa”.

Para a migração acelerada à íons cloreto também foi observado uma forte correlação desta propriedade com o índice de vazios. Observou-se uma mesma tendência entre as classes na qual foi observado que a inserção de metacaulim ocasionou um refinamento de todas as misturas de concreto, confirmando-se assim, uma maior resistência à migração de íons cloretos.

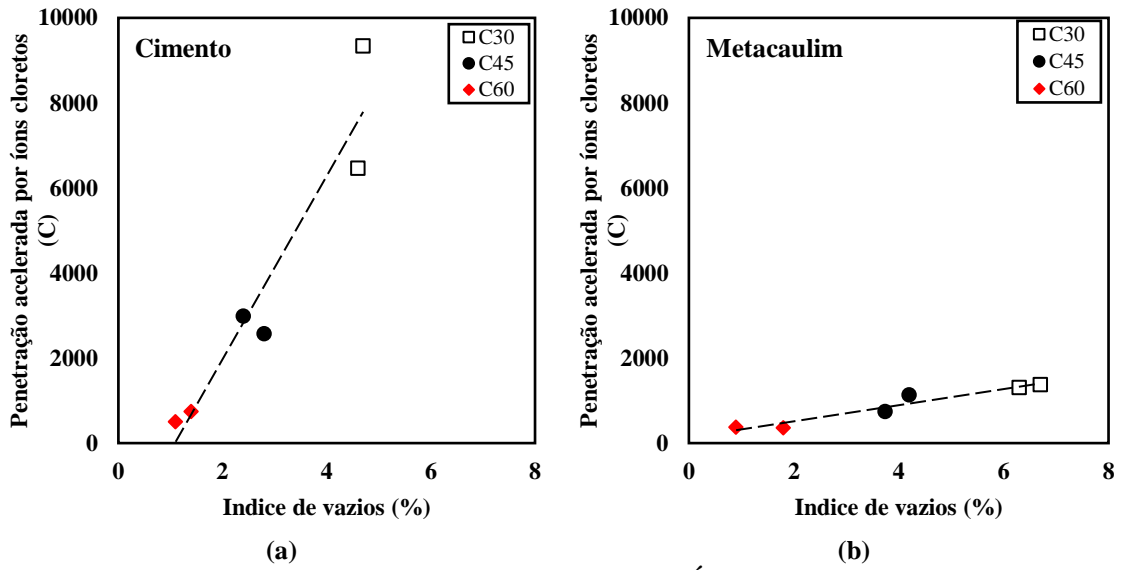


Figura 4.13: Penetração acelerada por íons cloretos (C) x Índice de vazios (%) – (a): misturas contendo apenas cimento; (b) misturas contendo cimento + metacaulim

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

Para este trabalho, foram dosados concretos naturais e concretos com a inserção de agregado graúdo reciclado e metacaulim, com base no Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), para que pudessem ser avaliados diante o comportamento tensão *versus* deformação e determinação da durabilidade. Portanto, a partir dos resultados obtidos no programa experimental, foi possível concluir que:

- Diante a utilização da dosagem científica baseada no MEC, comprovou-se a eficiência da metodologia em relação a resistência à compressão para os 28 dias de cura, já apresentada por diversos autores, para as misturas da classe C30 e C60 desenvolvidas com a utilização de agregados reciclados de concreto.
- Diante a dosagem realizada considerando a eficiência do metacaulim, obteve-se misturas com uma menor quantidade de materiais cimentícios, alcançando uma mesma resistência à compressão aos 28 dias de cura. Essa redução ocasiona um ganho ambiental uma vez que o metacaulim emite menos gases poluentes por kg de material, quando comparado ao cimento Portland.
- A utilização de agregado reciclado de concreto não afetou o desempenho das propriedades mecânicas diante os 90 dias de cura avaliados, apresentando evolução semelhante aos concretos que eram compostos somente por materiais naturais. Já a inserção de metacaulim como MCS mostrou que os concretos apresentaram um menor desempenho para a resistência à compressão, ao longo do tempo, em comparação as misturas compostas somente por agregados naturais e/ou agregados reciclados de concreto.
- Em relação a absorção de água por capilaridade, o metacaulim se mostrou mais eficiente juntamente com o agregado reciclado do que com o agregado natural. Para a classe C30, as misturas C30-NAC e C30-RAC foram consideradas estatisticamente iguais diante as 672 horas de avaliadas. Para a classe C60, todas

as misturas foram consideradas estatisticamente iguais até as primeiras 72 horas de absorção. Para as 672 horas, somente a mistura C60-NAC apresentou um aumento de 11% quando comparada com a mistura C60-RAC.

- A inserção de metacaulim foi considerada eficaz para todas as misturas de ambas as classes (C30 e C60), melhorando a resistência à migração por íons cloretos.
- Em relação aos ensaios físicos, observou-se que as misturas que continham apenas cimento, C30-NAC e C30-RAC, obtiveram valores estatisticamente iguais. Já ao adicionar metacaulim, a mistura C30-RAC-MK apresentou um acréscimo nesta propriedade quando comparada com a mistura C30-NAC-MK. Para as misturas da classe C60, todas as misturas (C60-NAC, C60-RAC, C60-NAC-MK e C60-RAC-MK) foram consideradas estatisticamente iguais.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar análises complementares de durabilidade, como carbonatação acelerada, permeabilidade a água e a gás nitrogênio.
- Realizar análises de porosimetria dos concretos, como intrusão de mercúrio.
- Realizar inserção de agregado reciclado de concretos com diferentes origens.
- Realizar a substituição do cimento por outro tipo de material pozolânico, como cinza volante.
- Realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV).

Referências Bibliográficas

ABRELPE (Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies), 2017. Panorama of Solid Waste in Brazil 2016 (in Portuguese). **Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies Press**, São Paulo. Acessado em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm Acessado dia: 04 de fevereiro de 2020.

AKHTAR, A; SARMAH, A. K., Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALBERTE, E. P. V., HANDRO, J. B. Estado do conhecimento acerca de especificações técnicas e normativas para agregados reciclados de RCD. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 305-320. 2021.

AMARIO, M. **Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC)**. 2015. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AMARIO, M. **Propriedades do estado fresco e de longa duração de concretos de resistência normal e alto desempenho contendo agregados de resíduo de concreto de diferentes origens**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

AMARIO, M; RANGEL, C. S; PEPE, M; FILHO, R. D. T. **Processo de produção de agregados reciclados de concreto: estudo de caso em escala industrial**. 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais Sustentáveis de Construção Sustentável. Coimbra. Fev. 2018.

AMARIO, Mayara et al. Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 83-92, 2017.

APRIANTI, Evi et al. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes—A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176-187, 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas **NBR ISO 14044:2009**, Gestão ambiental - Avaliação de ciclo de vida - Requisitos e orientações. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregado graúdo – Determinação da massa específica aparente e absorção de água. **NBR NM 53**, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Agregados – Determinação da composição granulométrica. **NBR NM 248**, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. **NBR NM 18**, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. **NBR 7215**, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 10004**, “Resíduos sólidos: classificação”, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15116**, “Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos”, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5739**, “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7222**, “Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7809**, “Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio”, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 8522**, “Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão”, Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9778**, “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 9779**, “Argamassa e concreto endurecido–Determinação da absorção de água por capilaridade”, **Rio de Janeiro**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 30**, “Determinação da absorção de água em agregados miúdos”, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 52**, “Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 67**, “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16606**: Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

BAO, Jiuwen et al. Influence of the incorporation of recycled coarse aggregate on water absorption and chloride penetration into concrete. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117845, 2020.

BRAVO, M., BRITO, J., PONTES, J., EVANGELISTA, L., 2015, “Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants”, **Construction and Building Materials**, v. 77, pp. 357-369.

CALDAS, L. R.; DA GLORIA, Y. R.; PITTAU, F.; ANDREOLA, V. M.; HABERT, G.; TOLEDO FILHO, R. D. Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**. v. 268, pp. 121146. 2021.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307**: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, 2002.

CONTRERAS, M. *et al.* Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study), **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 594–600, 2016.

DA SILVA FILHO, D. **Avaliação do comportamento de durabilidade de concretos reciclados com adição de metacaulim dosados cientificamente para aplicação estrutural**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Em andamento.

DE BELIE, Nele; SOUTSOS, Marios; GRUYAERT, Elke. **Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials**. Cham, Switzerland: Springer, 2018.

DE BRITO, Jorge; SAIKIA, Nabajyoti. Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. **Springer Science & Business Media**, 2012.

DE LARRARD, F., FERRARIS, C.F., SEDRAN, T., 1998, “Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material”, **Materials and Structures**, 31, n. 7, pp. 494-498.

DE LARRARD, Francois. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. CRC Press, 2014.

DE PAULA, Raphael R. *et al.* Avaliação do ciclo de vida de argamassas com resíduos de cerâmica vermelha considerando um indicador de desempenho mecânico-durabilidade. In: **CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA**. 2018. p. 979-985.

DESHPANDE, Neela; LONDHE, Shreenivas; KULKARNI, Sushma. Modeling compressive strength of recycled aggregate concrete by Artificial Neural Network, Model Tree and Non-linear Regression. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 2, p. 187-198, 2014.

DI MARIA, Andrea; EYCKMANS, Johan; VAN ACKER, Karel. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste management**, v. 75, p. 3-21, 2018.

DING, Y., WU, J., XU, P., ZHANG, X., FAN, Y., 2021, "Treatment Methods for the Quality Improvement of Recycled Concrete Aggregate (RCA) - A Review", **Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science** Edition, v. 36, pp. 77-92.

DUAN, Huabo; WANG, Jiayuan; HUANG, Qifei. Encouraging the environmentally sound management of C&D waste in China: an integrative review and research agenda. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 611-620, 2015.

EPA (United States Environmental Protection Agency), 2016. Advancing Sustainable.

ETXEBERRIA, M; VEGAS, I. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. **Magazine of Concrete Research**. v. 67, n. 12, p. 645–655, 2015.

Eurostat, 2017. **Eurostat** – Statistics Explained. Waste statistics related to year 2014. Acessado em <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics> acessado dia: 04 de devereiro de 2019.

FAN, Chao; MILLER, Sabbie A. Reducing greenhouse gas emissions for prescribed concrete compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 918-928, 2018.

FATHI, Hamoon; LAMEIE, Tina. Effect of aggregate type on heated self-compacting concrete. **Computers and Concrete**, v. 19, n. 1, p. 33-39, 2017.

FATHIFAZL, Gholamreza et al. New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. **Journal of materials in civil engineering**, v. 21, n. 10, p. 601-611, 2009.

FAVARETTO, P., HIDALGO, G. E. N., SAMPAIO, C. H., SILVA, R., LERMEN, R. T., 2017, "Characterization and Use of Construction and Demolition Waste from South of Brazil in the Production of Foamed Concrete Blocks", **Applied Sciences**, v. 7.

González-Taboada, I. González-Fonteboa, B. Martínez-Abella, F. Carro-López, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. **Materiales de Construcción**, v. 66, n. 323, p. 089, 2016.

GRDIC, Zoran Jure et al. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1129-1133, 2010.

GUO, H., SHI, C., GUAN, X., ZHU, J., DING, Y., LING, T. C., ZHANG, H., WANG, Y., 2018, “Durability of recycled aggregate concrete – a review”, **Cement and Concrete Composites**, v. 89, pp. 251-259.

GUO, Hui et al. Durability of recycled aggregate concrete—a review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, 2018.

HENSCHEN, Jacob; TERAMOTO, Atsushi; LANGE, David A. Shrinkage and creep performance of recycled aggregate concrete. In: **7th RILEM international conference on cracking in pavements**. Springer, Dordrecht, 2012. p. 1333-1340.

ISLAM, Rashidul et al. An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling. **Waste Management**, v. 95, p. 10-21, 2019.

ISO, E. N. 14044: 2006. Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. **European Committee for Standardization**, 2006.

KAPOOR, Kanish; SINGH, S. P.; SINGH, B. Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 67-76, 2016.

KISKU, N. et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721-740, 2017.

KOPER, A.; KOPER, W; KOPER, M. Influence of Raw Concrete Material Quality on Selected Properties of Recycled Concrete Aggregates. **Procedia Engineering**. v. 172, p. 536–543, 2017.

KOU, Shi-cong; POON, Chi-sun. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 501-508, 2015.

KOU, Shi-Cong; POON, Chi-sun. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 12-19, 2013.

KURAD, Rawaz et al. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485-502, 2017.

KURAD, Rawaz et al. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485-502, 2017.

KURDA, Rawaz et al. Optimizing recycled concrete containing high volume of fly ash in terms of the embodied energy and chloride ion resistance. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 735-750, 2018.

KURDA, Rawaz; DE BRITO, Jorge; SILVESTRE, José D. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 554-572, 2017.

KURDA, Rawaz; DE BRITO, Jorge; SILVESTRE, José D. CONCRET_{op} method: Optimization of concrete with various incorporation ratios of fly ash and recycled aggregates in terms of quality performance and life-cycle cost and environmental impacts. **Journal of cleaner production**, v. 226, p. 642-657, 2019.

KURDA, Rawaz; DE BRITO, Jorge; SILVESTRE, José D. Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 4, p. 204-216, 2018.

KURDA, Rawaz; DE BRITO, Jorge; SILVESTRE, José D. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 198-213, 2017a.

LE, Ha Thanh; LUDWIG, Horst-Michael. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, v. 89, p. 156-166, 2016.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

LEITE, M. B.; MONTEIRO, P. J. M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 38-48, 2016.

MARINKOVIĆ, Snežana et al. Environmental assessment of green concretes for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 633-649, 2017.

MEYER, Christian. The greening of the concrete industry. **Cement and concrete composites**, v. 31, n. 8, p. 601-605, 2009.

MUDULI, R., MUKHARJEE, B. B., 2020, "Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach", **Construction and Building Materials**, v. 233.

MUDULI, Rakesh; MUKHARJEE, Bibhuti Bhusan. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Journal of cleaner production**, v. 209, p. 398-414, 2019.

MUDULI, Rakesh; MUKHARJEE, Bibhuti Bhusan. Influence of Recycled Coarse Aggregate and Metakaolin on Properties of Concrete. **International Journal of Engineering Technology Science and Research** v 5, p. 649-655, 2018.

N.K. Bairagi, H.S. Vidyadhara, K. Ravande, Mix design procedure for recycled aggregate concrete, **Construction Building Mater.** 4 (4) (1990) 188 e 193.

NAWAZ, Muhammad Asad et al. Mechanical, durability and economic performance of concrete incorporating fly ash and recycled aggregates. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 162, 2020.

NOBRE, José et al. Durability performance of dry-mix shotcrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 29, p. 101135, 2020.

NOGUCHI, Takafumi; PARK, Won-Jun; KITAGAKI, Ryoma. Risk evaluation for recycled aggregate according to deleterious impurity content considering deconstruction scenarios and production methods. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 405-416, 2015.

PAIXÃO, S. O. **Estudo do uso de resíduo cerâmico de obras como agregado miúdo para fabricação de argamassas para revestimento de alvenarias.** p. 56, 2013.

PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P.V., Forecasting of construction and demolition waste in Brazil, **Waste Management and Research**, v. 34, n. 8, p. 708–716, 2016.

PEPE, Marco. **A conceptual model for designing recycled aggregate concrete for structural applications.** Springer, 2015.

POLISSENI, C. G.; ANDRADE, G. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Dosagem científica de concreto com agregado de resíduo de concreto. **V Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção (ENARC)**, 2017, 606-620, Fortaleza, Brasil.

RAHEEM, A. A. ABDULWAHAB, R., KAREEM, M. A., 2021, “Incorporation of metakaolin and nanosilica in blended cement mortar and concrete- A review”, **Journal of Cleaner Production**, v. 290

RANGEL, C. S. **Desempenho Mecânico, Estrutural e Durabilidade de Concretos de Resistência Normal e Alta Resistência Produzidos com Agregados Reciclados de Diferentes Origens.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

RODRÍGUEZ-ROBLES, Desirée; VAN DEN HEEDE, Philip; DE BELIE, Nele. Life cycle assessment applied to recycled aggregate concrete. In: **New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete.** Woodhead Publishing, 2019. p. 207-256.

SALESA, A., PÉREZ-BENEDICTO, J. A., COLORADO-ARANGUREN, D., LÓPEZJULIÁN, P. L., ESTEBAN, L. M., SANZ-BALDÚZ, L. J., SÁEZ-HOSTALED, J. L., RAMIS, J., OLIVARES, D., 2017, “Physico – mechanical properties of multi – recycled concrete from precast concrete industry”, **Journal of Cleaner Production**, v. 141, pp. 248-255.

SARAVANAKUMAR, Palaniraj; DHINAKARAN, Govindasamy. Durability characteristics of recycled aggregate concrete. **Structural Engineering and Mechanics**, v. 47, n. 5, p. 701-711, 2013.

SHI, Caijun et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 466-472, 2016.

SILVA, L. C. **Avaliação de ciclo de vida de concretos com substituição parcial de cimento por cinzas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, R. V., BRITO, J., DHIR, R.K., 2019, “Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications”, **Journal of Cleaner Production**, v. 236.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 108-118, 2015.

SILVA, R; DE BRITO, J. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production of structural concrete. **Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources. Instituto Superior Tecnico, Lisboa, Portugal**, 2015.

SILVA, Rui Vasco et al. Prediction of chloride ion penetration of recycled aggregate concrete. **Materials Research**, v. 18, n. 2, p. 427-440, 2015.

SNYDER, M. B. Concrete pavement recycling and the use of recycled concrete aggregate in concrete paving mixtures. **CP Road MAP Brief March**, 2016.

SORMUNEN, P., KÄRKI, T., 2019, “Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing”, **Journal of Building Engineering**, v. 24.

SURYAWANSHI, S. R.; SINGH, Bhupinder; BHARGAVA, Pradeep. Characterization of recycled aggregate concrete. In: **Advances in Structural Engineering**. Springer, New Delhi, 2015. p. 1813-1822.

THOMAS, Job; THAICKAVIL, Nassif Nazeer; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 349-365, 2018.

TURK, Janez et al. Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. **Waste management**, v. 45, p. 194-205, 2015.

ULUBEYLI, Serdar; KAZAZ, Aynur; ARSLAN, Volkan. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 1190-1197, 2017.

VERIAN, Kho Pin; ASHRAF, Warda; CAO, Yizheng. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 30-49, 2018.

WANG, Hailong et al. Permeability of concrete with recycled concrete aggregate and pozzolanic materials under stress. **Materials**, v. 9, n. 4, p. 252, 2016.

WIJAYASUNDARA, Mayuri; MENDIS, Priyan; CRAWFORD, Robert H. Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete. **Journal of cleaner production**, v. 166, p. 321-334, 2017.

XIE, Tianyu et al. A unified model for predicting the compressive strength of recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119752, 2020.

YANG, Keun-Hyeok et al. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 774-783, 2015.

Yazdanbakhsh, A. A bi-level environmental impact assessment framework for comparing construction and demolition waste management strategies. **Waste Management**. 77, 401–412.2018.

YAZDANBAKHSH, Ardavan; LAGOUIN, Méryl. The effect of geographic boundaries on the results of a regional life cycle assessment of using recycled aggregate in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 143, p. 201-209, 2019.

ZHANG, Hongru; ZHAO, Yuxi. Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 861-877, 2015.

ZHANG, Yurong et al. Effect of compressive strength and chloride diffusion on life cycle CO₂ assessment of concrete containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 450-458, 2019.

ZHAO, Hui et al. The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 95, p. 66-74, 2015.