

**UNIVERSIDADE DE CAIXAS DO SUL
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

MATEUS GRIZA

**ESTUDO DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS SUBMETIDO A
BAIXAS TEMPERATURAS DE CURA**

**BENTO GONÇALVES
2023**

MATEUS GRIZA

**ESTUDO DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS SUBMETIDO A
BAIXAS TEMPERATURAS DE CURA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caixas do Sul como requisito
para obtenção do grau de Bacharelado em
Engenharia Civil.
Orientador: Prof. Me. Mauricio Schäfer

BENTO GONÇALVES

2023

RESUMO

GRIZA, M. **Estudo de concreto com agregados reciclados submetido a baixas temperaturas de cura.** Trabalho de Conclusão de curso II (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Caixas do Sul, Área de conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias, Bento Gonçalves, 2023.

O concreto, como sendo o material de construção civil mais utilizado no mundo, devido a suas diversas características favoráveis e suas possibilidades de aplicação. Em suas propriedades é possível destacar o desempenho em situações em que é submetido a baixas temperaturas considerando a substituição de agregados naturais por material reciclado, garantindo a adequação de suas características conforme a necessidade de uso e o ambiente a qual está sendo submetido. Com a utilização do concreto em baixas temperaturas e locais onde há uma grande presença de água, características como porosidade podem ser extremamente importantes para evitar e analisar a formação de gelo em seu interior. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo estudar a possibilidade de uso de agregados reutilizáveis de construção civil, agregados estes formados com a trituração de corpos de provas utilizados em ensaios laboratoriais. Para isso, foram realizados corpos de provas com a utilização de traços utilizando 0, 20 e 40% de teor de agregados reciclados em substituição ao agregado natural, agregados estes que são oriundos do processamento de corpos de prova descartados com resistências à compressão próximos a 30 MPa, submetendo estes corpos de provas a diferentes temperaturas de cura inicial (25, 15, 5 e -5°C) e avaliando suas propriedades no estado endurecido. Durante a pesquisa, obtivemos resultados melhores com a substituição dos materiais reciclados, resultados estes oriundos de ensaios de compressão, massa específica e tração, quando submetidos a temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: Concreto, baixas temperaturas, cura, câmaras frias, Agregados reciclados.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPAS EXPERIMENTAIS INICIAIS	34
FIGURA 2 - ETAPAS EXPERIMENTAIS NO ESTADO ENDURECIDO	35
FIGURA 3 – DOSAGEM E TRAÇOS	36
FIGURA 5 - TRABALHABILIDADE	46
FIGURA 6 - COMPRESSÃO DE CORPO DE PROVA	48
FIGURA 7 - COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	49
FIGURA 8 – TRABALHABILIDADE POR TRAÇOS.....	52
FIGURA 9 - MASSA ESPECÍFICA POR TRAÇO.....	54
FIGURA 10 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS	55
FIGURA 11 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS.....	57
FIGURA 12 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7 E 28 DIAS.....	58
FIGURA 13 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS	59
FIGURA 14 - ABSORÇÃO DE ÁGUA TOTAL.....	61
FIGURA 15 - ÍNDICE DE VAZIOS	62
FIGURA 16 - MASSA ESPECÍFICA	63

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CLASSE DE CONSISTÊNCIA	21
TABELA 2 - NOMENCLATURA DOS TRAÇOS.....	36
TABELA 3 - QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO POR TEMPERATURA DE CURA.	37
TABELA 4 - TOTAIS DE CORPOS DE PROVA E TEMPERATURAS	38
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO.....	40
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO.....	40
TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	40
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO NATURAL	41
TABELA 9 - CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO NATURAL	41
TABELA 10 - CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO REUTILIZADO	42
TABELA 11 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO REUTILIZADO.....	42
TABELA 12 - QUANTITATIVO DE MATERIAL.....	44
TABELA 13 - COMPENSAÇÃO DE ÁGUA	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
°C	Graus Célsius
CP	Corpo de Prova
Cm	Centímetro
mm	Milímetro
kg	Quilograma
m	Metro
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
MPa	Mega pascal
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
cm ³	Centímetro cúbico
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.2.1	OBJETIVO PRINCIPAL	10
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.3	DELIMITAÇÃO	11
1.4	DELINEAMENTO	12
2.1	AGREGADOS CONVENCIONAIS	13
2.1.1	Distribuição granulométrica em agregados convencionais	15
2.1.2	Porosidade	16
2.2	AGREGADOS NÃO CONVENCIONAIS	17
2.2.1	Distribuição granulométrica de agregados não convencionais	18
2.2.2	Textura superficial dos grãos, aderência	19
2.3	CONCRETO	20
2.3.1	Propriedades no estado fresco	22
2.3.2	Propriedades no estado endurecido	24
2.2.2.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE	26
2.2.2.2	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	27
2.2.2.3	POROSIDADE	28
2.4	CONCRETOS SUBMETIDOS A BAIXAS TEMPERATURAS	29
2.4.1	Agregados submetidos a baixas temperaturas	32
3	MATERIAIS E METODOS	34
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1.1	Fatores fixos	38
3.1.2	Fatores variáveis	39
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	39
3.2.1	Aglomerante	39
3.2.2	Agregado miúdo natural	40
3.2.3	Agregado graúdo natural	41
3.2.4	Agregado graúdo reutilizado	42
3.3	DOSAGEM	43

3.3.1	Pré-molhagem	44
3.3.2	Variações de temperaturas de cura.....	45
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	45
3.4.1	Trabalhabilidade.....	46
3.4.2	Determinação da massa específica	46
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	47
3.5.1	Resistência à compressão	47
3.5.2	Resistência à compressão diametral	48
3.5.3	Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios ..	49
3.6	ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS.....	51
4	RESULTADOS E ANÁLISES	52
4.1	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO	52
4.1.1	Trabalhabilidade.....	52
4.1.2	Massa específica	53
4.2	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	54
4.2.1	Resistência à compressão	55
4.2.2	Resistência à compressão diametral	59
4.2.3	Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios ..	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
5.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um material fundamental para a construção civil. Sua utilização vem inovando os métodos construtivos, trazendo assim diversas transformações na paisagem urbana. A utilização deste material é destacada pelas suas próprias características que o tornam bastante peculiar, sendo elas, disponibilidade do material, facilidade de produção, transporte e manuseio em variadas formas e tamanhos, baixo custo em comparação a alternativas similares e resistência a água (PETRUCCI, 2005; ISAIA, 2010; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Durante a vida útil, estes concretos sofrem degradações, dentre estas degradações as principais são, o ataque por ácidos, ataques por sulfatos, ciclos de gelo-degelo, bioterioração, corrosão negra, hidrólise dos componentes da pasta, além da ação do fogo (RIBEIRO, 2016). Zeng *et al* (2014), citam que o maior problema para a durabilidade do concreto é causado pelo congelamento da matriz cimentícia, durante o seu período de cura inicial, quando submetidos a baixas temperaturas, o congelamento causa o ciclo térmico de gelo-degelo que causa fragmentação da superfície e fissuras internas, favorecendo a entrada de agentes agressivos que levam a corrosão das armaduras.

Conforme citado por Soriano *et al* (2013), nas idades iniciais, a velocidade de hidratação dos grãos de cimento é influenciada pelo tipo de cimento, adições pozolânicos, relação água cimento, dimensão das partículas e principalmente pela temperatura de cura. Segundo Castro (2011), o processo de cura pode ser acelerado quando submetido a elevadas temperaturas, o que permite uma melhoria das propriedades mecânicas em curto período. Porém, Kraai (1985), alerta que se submetidas a altas temperaturas a taxa de evaporação de água na pasta cimentícia torna-se elevada, causando assim uma redução na efetividade de hidratação dos grãos. Já quando submetido a baixas temperaturas, não há preocupação com perdas de umidade da pasta, no entanto, a preocupação passa a ser o congelamento da água no interior da mistura, o que pode provocar atraso de pega, fissuração por expansão e vazios de concretagem.

Powers e Helmuth (1953), desenvolveram uma série de experimento para o entendimento da ação do congelamento em concretos, elencando assim dois

fenômenos como sendo causadores da deterioração, a geração de pressão hidráulica, e a difusão da água gel e água capilar. Conforme Neville (2013), a presença de grandes poros presentes no concreto, contribuem para a resistência ao congelamento do concreto. Sendo assim, podem beneficiar a resistência do concreto quando exposto a baixas temperaturas de cura inicial.

De maneira geral, esta pesquisa visa o emprego de agregados reciclados de concreto, como o intuito de investigar a possibilidade de mitigar ou anular os aspectos negativos da exposição do concreto em baixas temperaturas, análise está que foi desenvolvida em laboratório com o auxílio de um congelador para a armazenagem dos corpos de prova, corpos que posteriormente foram utilizados para ensaios e assim obtivemos resultados sobre suas características.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

O emprego de agregados reciclados em concreto convencional auxiliar na evolução da resistência quando curado a baixas temperaturas?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo principal

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar a influência do uso de diferentes teores de agregados reciclados graúdos substituindo o agregado graúdo natural em um concreto, a fim de identificar o comportamento desses concretos em quatro diferentes temperaturas de cura inicial.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são os seguintes:

- a) Avaliar a utilização de diferentes teores de agregados reciclados graúdos em substituição do agregado natural no desempenho do concreto no estado fresco quando submetido a baixas temperaturas;
- b) Avaliar a utilização de diferentes teores de agregados reciclados graúdos em substituição do agregado natural no desempenho do concreto no estado endurecido quando submetido a baixas temperaturas.

1.3 DELIMITAÇÃO

Este trabalho se delimita na produção de um concreto convencional, tendo como propósito a utilização de resíduos de corpos de prova moldados em laboratório para experimento, corpos de provas estes que estavam armazenados no Laboratório do Campus 8 da Universidade de Caxias do Sul (UCS). Para realização do trabalho o traço do concreto de referência será 1:1,93:2,49, formando um concreto padrão de resistência característica de 30 MPa, a relação água cimento utilizada será de acordo com o abatimento de 120 ± 20 mm, partindo destes dados foram produzidos um concreto de referência e dois concretos com substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reutilizado (20 e 40%), sendo que os agregados reciclados receberam uma pré-molhagem de 80% da sua absorção de água total, 24 horas antes da elaboração do concreto, posterior à elaboração do concreto, serão submetidos a temperaturas variadas, onde deverá ocorrer a avaliação da cura na idade inicial de 7 dias, na sequência, haverá o armazenamento e cura conforme determinado pela norma e em 7 e 28 dias, ocorrerão ensaios laboratoriais para avaliar o comportamento das amostras.

1.4 DELINEAMENTO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, iniciando no primeiro capítulo pela introdução do tema proposto, descrevendo os objetivos principais e específicos, delimitando o assunto que será abordado. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, onde a pesquisa desenvolvida, este trabalho tem como temas centrais, a elaboração de um concreto com a substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados, avaliando suas resistências quando submetido a variações de temperaturas. No terceiro capítulo, apresenta a metodologia de pesquisa e os materiais utilizados, indicando procedimentos para a elaboração das amostras e ensaios a serem realizados. Já no quarto capítulo, foram realizadas análises referentes aos ensaios executados e resultados obtidos, detalhando as informações geradas e descrevendo possíveis origens para o comportamento apresentado. Por fim, o quinto capítulo onde está apresentada as considerações finais, com uma avaliação global e com a percepção do autor, avaliando de forma geral, cada ensaio realizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são abordados temas referentes ao concreto convencional, frente as propriedades no estado fresco e endurecido. Além disso, é abordado o emprego dos agregados convencionais e alternativos, tendo em vista os concretos submetidos a baixas temperaturas.

2.1 AGREGADOS CONVENCIONAIS

Segundo Neville (2013), sendo responsável por $\frac{3}{4}$ do volume do concreto utilizado por agregados, é de se esperar que sua qualidade seja de grande importância. A resistência do concreto é limitada pelos agregados, bem como suas propriedades afetam significativamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto.

No início os agregados eram tidos como materiais inertes, dispersos na pasta cimentícia com intuito de produzir um grande volume de concreto a baixo custo. No entanto, eles não são realmente inertes, já que suas características têm a capacidade de definir a usabilidade do concreto e suas propriedades, como por exemplo, resistência do concreto, durabilidade e desempenho estrutural do concreto (NEVILLE, 2013).

A influência do agregado nas propriedades do concreto, é responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Propriedades estas que dependem principalmente da densidade e resistência do agregado. Ou seja, a composição química e mineralógica das fases solidas, tem menor importância que as suas características físicas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Pimentel (2007), afirma que a qualidade dos agregados vai ser importantes na resistência mecânica do produto acabado, na sua durabilidade e no desempenho estrutural, visto que o agregado compõe 70% do volume total do concreto

Mehta e Monteiro (2014), comentam que apenas se o agregado for muito quebradiço, afetará na resistência do concreto convencional, ainda assim a resistência não é influenciada diretamente dimensão e forma do agregado. No entanto, o agregado maior produz maior quantidade de água de exsudação interna acumulada, assim enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado, gerando assim

uma ruptura por cisalhamento na superfície da partícula do agregado. Ou seja, o ponto mais fraco será a pasta cimentícia e não o agregado graúdo. Segundo estudos anteriores realizados por HUANG *et al* (2009), o concreto poroso tem sua porosidade, permeabilidade e resistência à compressão, afetada diretamente pela graduação, tamanho das partículas e a relação massa do agregado por massa de cimento.

Em diferentes áreas da engenharia houve um aumento pelo interesse no empacotamento das partículas. Segundo Pandolfelli (2009), este aumento pode ser explicado pelo fato de que uma grande parte dos agregados, sejam naturais ou industriais, possuem variações de formas e tamanhos. Quanto considerado o empacotamento, as “partículas” são consideradas como sendo os grãos de agregados, minerais, metais ou pós químicos, solos, moléculas, poros ou rochas. Assim, tais materiais tem seu comportamento dependendo principalmente das propriedades das partes que o compõem e das interações entre elas.

Também de acordo com citações de Pandolfelli (2009), o estudo do empacotamento das partículas pode ser definido como o problema da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, com intuito de que todos os vazios do concreto sejam preenchidos. A porosidade interna das partículas, altera a densidade do material. As partículas possuem propriedades variáveis podendo elas serem totalmente densas, com porosidade fechada ou com porosidade aberta. Para obter a máxima densidade no empacotamento de partículas, partículas não porosas deverão ser utilizadas. Partículas cuja porosidade é fechada, resultam em misturas com densidade superior. Já partículas com porosidade aberta, perturbam o empacotamento devido seu formato irregular e resultam em misturas com menores densidades.

Conforme citado na NBR 7211 (ABNT, 2022), os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros, compactos, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento do concreto, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo do concreto. Tenório (2007), relata que agregados reciclados possuem propriedades físicas diferentes dos agregados naturais, por apresentarem uma maior porosidade, devido na sua

composição conter resíduos de diferentes materiais. Esta alta porosidade, resulta num aumento da permeabilidade do concreto e na diminuição da resistência.

Para definição do agregado utilização na produção de concretos e argamassas, Sbrighi Neto (2000), enfatiza que é de suma importância o conhecimento das propriedades e aplicação de conceitos tecnológicos na seleção, buscado uma melhor relação de custo x benefício. Diante do exposto, o autor ressalta que o conhecimento das influências das características dos agregados nas propriedades do concreto, visto que os agregados tendem a definir a resistência mecânica, retração, módulo de elasticidade, resistência a derrapagem e economia, isto partindo da análise de suas características como, textura superficial, limpeza, forma dos grãos, dimensão máxima, granulométrica e resistência mecânica.

2.1.1 Distribuição granulométrica em agregados convencionais

Composição granulométrica pode ser definida como sendo a distribuição do tamanho de partículas de determinado agregado, sendo usualmente expressa em termos de porcentagens acumuladas das frações retidas ou passantes em uma dada série de aberturas de peneiras, ou ainda, de porcentagens entre certos intervalos de aberturas. Assim, a composição granulométrica de um agregado é determinada por meio de peneiramento de uma amostra representativa em uma sequência de peneiras dispostas da maior abertura em cima para a menor abertura em baixo (WEIDMANN, 2008).

A composição granulométrica, incluindo material pulverulento e dimensão máxima característica, pode ser considerada uma das principais características dos agregados, principalmente quando se trata de agregados miúdos. Esta propriedade tem efeito na trabalhabilidade do concreto que por consequência afeta seu custo final (HUDSON, 1999; GUIMARÃES, 2005; SBRIGHI NETO, 2005; ERDOGAN & FOWLER, 2005; MEHTA & MONTEIRO, 2014). Quiroga & Fowler (2004), destacam que a trabalhabilidade do concreto é influenciada principalmente pelo agregado miúdo.

Segundo Neville (2013), como a trabalhabilidade tem influência sobre a demanda de água, segregação, exsudação, facilidade de lançamento e acabamento do concreto, a composição granulométrica se torna indiretamente responsável por

todos estes fatores. Por sua vez, estes fatores que representam importantes características do concreto no estado fresco, influenciam também suas propriedades no estado endurecido tais como resistência, retração e durabilidade.

2.1.2 Porosidade

Segundo Carrijo (2005), a porosidade influencia a massa específica aparente dos agregados e, conseqüentemente, o volume de concreto para uma dada massa de agregado. Agregados naturais obtidos a partir de britagem de rochas possuem uma porosidade muito baixa ou até mesmo nula, implicando assim em uma redução na absorção de água (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Maiores porosidade tendem a resultar em menores resistências mecânicas, maior absorção de água e consumo de cimento, o que pode elevar os custos e comprometer a ecoeficiência dos agregados (GOMEZ-SEBERON, 2002; POON, SHUI *et al.*, 2004).

Em estudos feitos por Neville (2013), a massa específica ou porosidade, normalmente é a grandeza necessária em tecnologia do concreto e pode ser obtida pela relação entre a massa do agregado seco em estufa e a massa de água que ocupa um volume igual ao volume de sólidos, incluindo os poros impermeáveis. O método que é proposto pelas normas para determinação da porosidade de agregados naturais são, o método moroso, que leva em média 48 horas por ensaio, dificuldade de saturação dos poros, desagregação do material e, principalmente, imprecisão na determinação da condição de superfície saturada seca (CARRIJO, 2005).

A massa específica aparente é um parâmetro utilizado para a determinação da porosidade dos agregados, juntamente com a massa específica real, facilmente determinada por picnometria por intrusão de gás hélio. Sendo assim, a determinação da porosidade enfrenta algumas imprecisões e dificuldades referentes a medidas de sua massa na condição de superfície saturada seca. Estas dificuldades, quando somadas as imprecisões de medidas e dificuldade de obtenção de resultados repetitivos, levou pesquisadores a desenvolver alguns métodos alternativos para a medida de absorção de água (LEITE, 2001; DIAS e AGOPYAN, 2005; KROPP, 2005; DAMINELLI, 2007b; TAM, GAO *et al.*, 2008). Destacasse o procedimento que foi elaborado por Daminelli (2007), que permite uma agilidade maior no ensaio e

repetitividade nos resultados, uma vez que a secagem das amostras ocorre em micro-ondas.

2.2 AGREGADOS NÃO CONVENCIONAIS

Produzido com descartes de resíduos de construção civil ou alvenarias, os agregados reciclados podem ser utilizados no concreto com substituição total ou parcial. Os agregados convencionais possuem uma menor porosidade quando comparado com agregados de reutilizado, valendo destacar que a resistência ou a durabilidade do concreto, é controlada exclusivamente pela porosidade (ÂNGULO, 2003).

Várias são as fontes de geração de resíduos na construção civil. Por exemplo, a falta de qualidade dos bens e serviços que podem gerar perdas de materiais que saem das obras em forma de entulho e contribuem no volume de resíduos gerados (LEITE, 2001), e, o volume de recursos naturais, tais como madeira e ferro, muitos deles não renováveis, utilizados pela indústria da construção, corresponde a pelo menos um terço do total consumido por toda a sociedade (SILVA, 2000). Daí a importância de se buscar novos materiais de fabricação do concreto a partir de diferentes agregados, principalmente os recicláveis.

Segundo Silva (2000), houve uma maior necessidade de reciclagem e reutilização do resíduo de construção e demolição, e estudos voltados ao reaproveitamento destes materiais começaram a receber maiores impulsos. A preocupação com o desenvolvimento de construções sustentáveis torna-se mais evidente, pois a sociedade contemporânea busca voltar suas atividades comerciais para fatores ambientais, assim sendo, o marketing 3.0 (KOTLER, 2010), voltado as pessoas e a preocupação com o meio ambiente, a indústria civil torna-se obrigada a se adaptar a essas mudanças, para assim obter vantagens competitivas.

Leite (2001) estudou o uso de resíduo de construção e destruição reutilizado na produção do concreto e relatou, que a partir dos resultados, foram estabelecidas relações entre a resistência a tração e modulo de deformação em função da resistência à compressão dos concretos.

Segundo John e Ângulo (2003), os especialistas das diferentes áreas devem evitar submeter os resíduos aos requisitos técnicos normativos ou tradicionais. A normalização tradicional pode servir de ponto de partida, mas, na prática, revela-se restritiva e limitante. As normas limitam-se à análise de matéria-prima específica, dentro de um processo industrial específico. No caso de agregados para concreto e pavimentação, a normalização está integralmente voltada para análise de agregados derivados de rochas naturais. Schouenborg *et al.* (2004) afirmam que os métodos e normalizações tradicionais precisam ser modificados e substituídos para que sejam mais bem verificadas as propriedades dos materiais alternativos.

No Brasil a NBR 15116 (ABNT, 2004), permite que sejam utilizados agregados reciclados em concretos cuja sua função não seja estrutura. Apesar de diversas normas regulamentarem apenas a substituição parcial dos agregados reciclados em concretos, a principal aplicação deste é em atividades de nivelamento (POON e CHAN, 2007; LI, 2009), no entanto, seguindo o estudo ÂNGULO (2005), verificou que o mercado poderia consumir no máximo 50% do total de agregado reutilizado produzido, tendo assim a necessidade de utilização em outras aplicações, especialmente aplicações mais nobres, como argamassas e concretos.

2.2.1 Distribuição granulométrica de agregados não convencionais

As características obtidas pelos agregados reciclados, dependem da composição do resíduo de origem, o equipamento usado na preparação do resíduo e do objeto de origem, sendo assim suas características serão variáveis (ÂNGULO, 2000; LIMA, 1999). Quando é produzido concretos e argamassas, caracterizar a morfologia e a distribuição granulométrica de partículas é uma demanda de extrema importância. Isso porque as características físicas influenciam diretamente no comportamento no estado fluido e no estado endurecido desses materiais, sendo assim, fundamentais para a formulação de composições (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000).

É de extrema importância a distribuição granulométrica para os agregados, visto que influenciam no desempenho de argamassas e concretos (OLIVEIRA, STUART *et al.*, 2000). Agregados reciclados a granulometria irão influenciar também a composição química e mineralógica (ÂNGULO, ULSEN *et al.* 2009), o teor de pasta

cimentícia aderida, a absorção de água e a distribuição dos produtos de densidade (ULSEN, 2006).

A granulometria do agregado utilizado na composição da pasta cimentícia tem efeito na demanda de água, na trabalhabilidade, exsudação, facilidade de lançamento, segregação e acabamento de um concreto (NEVILLE, 2013). Agregados com excessiva quantidade de finos requerem maior quantidade de cimento visto que há necessidade de envolver uma superfície maior. Conforme citação de Neville (2013), do ponto de vista econômico, como o agregado tem um valor menor que a pasta, um concreto deve manter o máximo de agregado possível, ou os agregados, deveriam apresentar o menor número de vazios. Isso vale também para o agregado graúdo, ao diminuir a dimensão máxima característica para preencher o mesmo volume aumenta-se a área superficial, portanto requer mais pasta de cimento para envolver o agregado, ou caso contrário, o agregado fica mais seco (OSPINA e ERAZO, 2007).

2.2.2 Textura superficial dos grãos, aderência

Também como conhecida como aspereza, a textura superficial dos grãos de agregados depende da dureza, estrutura dos poros da rocha matriz e granulação, além do desgaste sofrido pelos grãos, desgaste este causado por atrito. Assim, as rochas cuja textura superficial é mais lisa, são as obtidas a partir de rochas duras, densas e com granulação fina (QUIROGA, 2003; NEVILLE, 2013; MEHTA & MONTEIRO, 2014).

A textura superficial dos grãos e aderência, é avaliada visualmente, definindo empiricamente o quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, sendo preconizada no Brasil pela NBR 7389 (ABNT, 2009). Os autores Quiroga (2003) *apud* Massad (2002), sugerem que sejam utilizadas ferramentas de análise de imagem para quantificar esta propriedade. Nesta técnica, a textura seria representada pela variação local dos valores de intensidade de cinza dos pixels. Com a utilização de ferramentas, Quiroga (2003) conclui como insatisfatórios os resultados obtidos com a técnica e a avaliação visual. Este e alguns outros autores, sugeriram ainda a utilização do parâmetro de empacotamento de grãos, como método de avaliação da forma e textura.

Os agregados provenientes de material reutilizado em geral, possuem características mais irregulares, angulares e texturas mais ásperas e rugosas do que os agregados naturais (ANGULO, 2000; CARNEIRO et al., 2001; LEITE, 2001), características estas que podem variar, pois dependerão das características do resíduo de origem e do equipamento utilizado para o seu processamento (LEITE, 2001).

As partículas finas e achatadas do agregado reciclável, pode reduzir a resistência do concreto em situações em que é aplicada uma carga em sua lateral mais achatada, devido ao fato de que o agregado reutilizado pode apresentar uma característica mais lamelar que o agregado natural (TAM, 2007). O formato angular e lamelar dos grãos, tendem a prejudicar a consistência do concreto, pois existem mais água ou teor de pasta para que os concretos reciclados alcancem a consistência adequada (LIMA, 1999; LEITE, 2001; TAM, 2007).

Quanto à aderência, Neville (2013) afirma que tanto a forma quanto a textura influenciam consideravelmente na resistência do concreto, um agregado com textura mais áspera resulta em melhor aderência entre as partículas e a matriz de cimento. A determinação da qualidade da aderência ainda é difícil e não existem ensaios confiáveis. Em geral, quando a aderência é boa, um corpo de prova quando rompido deve conter algumas partículas de agregado partido. Segundo Mehta & Monteiro (2013) a textura superficial dos grãos afeta principalmente a flexão, favorecendo a aderência nas primeiras idades. Porém em idades mais avançadas, ambos autores sugerem que, o desenvolvimento da aderência química entre pasta e agregado, não tem um efeito tão importante.

2.3 CONCRETO

Na construção civil o concreto é um material de suma importância para o desenvolvimento da sociedade e da qualidade de vida da população, sendo utilizado em diferentes tipos de construções. É o material mais usado na construção civil e o segundo material mais consumido pelo ser humano, perdendo apenas para água (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

Segundo as definições da NBR 12655 (ABNT, 2022), o concreto é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com

ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento. Também citado na NBR 12655 (ABNT, 2022), a composição do traço a ser adotada para a composição da pasta cimentícia e os agregados que serão utilizados, devem atender as exigências estabelecidas pela norma, tanto para caracterização do concreto fresco, quanto para o endurecido, deve ser observada sua consistência, massa específica, resistência, durabilidade, proteção das barras de aço de agentes corrosivos e o método construtivo a ser utilizado. A dosagem do concreto deve ser feita com o intuito de minimizar a segregação do material no estado fresco, considerando as operações de mistura, transporte, lançamento e adensamento.

A classificação de concretos frescos, é feito por meio do ensaio de abatimento citado pela NBR 16889 (ABNT, 2020), de acordo com a Tabela 1, e, no caso de concreto autoadensável, pelo previsto na NBR 15 823-1 (ABNT, 2017).

Tabela 1 – Classe de consistência.

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A \leq 50$	Concreto extrusado, vibro prensado e centrifugado
S50	$50 \leq A \leq 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A \leq 160$	Elementos estruturais com lançamento convencional do concreto
S160	$160 \leq A \leq 220$	Elementos estruturais com lançamento bobeadado do concreto
S220	≥ 220	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras
NOTA 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento.		
NOTA 2 Os elementos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações		

Fonte – Replicada da tabela fornecida na NBR 8953 (ABNT, 2015)

Como sendo um material empregado mundialmente em diversas técnicas construtivas, o concreto tem finalidade de suportar, predominantemente, os esforços de compressão atuantes nas estruturas de concreto armado, e proteção das armaduras frente a agentes agressivos do ambiente (ZIEGLER, 2020), como principal desvantagem do concreto, temos a sua baixa resistência a tração, o que o torna suscetível a progressão e a coalescência em microfissuras, resultando em baixa

resistência e durabilidade. Tensões de tração essas, que podem ser devidas ao carregamento de tração, retração plástica e reações químicas expansivas. Esta suscetibilidade à fissuração não so resulta na redução da resistência do concreto, mas também torna o concreto vulnerável a ambiente deletérios. A entrada de produtos químicos nocivos através dessas rachaduras pode resultar na deterioração do concreto por meio de ataque químico e pode causar corrosão de armaduras de aço. Esta corrosão leva ao aumento dos danos por fissuras resultando na perda de resistência e rigidez das estruturas de concreto. Essa deterioração do concreto armado, tanto para concreto quanto para armadura, resulta em alto custo de manutenção (KHALIQ e EHSAN, 2016; REVITHEJA et al., 2019).

A análise do concreto pode ser feita em ambos os seus estados, uma vez que, a resistência e outras propriedades tem seus valores determinados pela composição da matriz cimentícia, particularmente pelo teor de cimento. Sendo essa composição expressa pela relação de vazios/cimento ou pelo seu inverso, considerando o como vazios os volumes de ar e água existentes na matriz. Em maior parte dos casos, os vazios são ocupados por água, tornando possível estabelecer a composição da matriz em termos de relação água/cimento. Entretanto, essa regra é discutível, quando a mistura possui ar artificialmente incorporado (SOBRAL, 2000). Também podemos citar que no caso do concreto fresco, muito mais importante que a relação água/cimento é o teor de água/mistura seca, ou seja, a percentagem da massa de água em relação à massa da mistura seca (cimento + agregado), parâmetro de grande importância na sua dosagem (SOBRAL, 2000).

2.3.1 Propriedades no estado fresco

A elaboração do concreto é definida por duas fases, sendo em seu estado fresco e endurecido, a primeira das fases denominada estado fresco, compreende a um período curto, em geral na ordem de 1 a 5 horas. Esta fase refere-se ao intervalo de tempo para que o concreto possa ser misturado, transportado, lançado e adensado (ISAIAS, 2010).

Pelas definições da NBR 12655 (ABNT, 2022), o concreto no estado fresco é caracterizado como um material recém-misturado, onde ele apresenta capacidade de ser moldado, pela aplicação de cargas, permanecendo moldado após a aplicação do

ensaio neste estado. As principais características presentes no concreto durante esta fase, são a trabalhabilidade, coesão, segregação e exsudação, devido a sua trabalhabilidade, podem ser adequadamente compactados e envolver totalmente as armaduras (SOBRAL, 2000).

A definição da trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto, como por exemplo, a sua relação água e agregados secos, tipo e consumo de cimento, traço, teor de argamassa, tamanho, textura e forma dos agregados. Segundo Neville (2014), é definido com a quantidade de trabalho interno útil necessário para obtenção do adensamento total. Em outras palavras, maior ou menor facilidade de adensar o concreto, retirando o maior número de vazios possíveis. Os principais fatores responsáveis pela trabalhabilidade são a água, o uso de aditivos, granulometria dos agregados e finura do cimento.

Segundo Sengel e Topçu (2004), a trabalhabilidade do concreto com agregados reciclados para uma substituição de até 50%, apresenta uma proporção de água/cimento maior. Os autores ressaltam para melhorar a trabalhabilidade é necessária realiza uma pré-molhagem dos agregados reciclados antes da mistura como forma de reduzir está absorção de água.

Também relacionado ao estado fresco do concreto, a massa específica é a massa da mistura por unidade de volume incluindo poros, sendo ela influenciada pela substituição dos agregados graúdos reciclados, e apresentam uma menor massa específica em relação aos agregados naturais (POON, C.S; CHAN, D, 2006).

Em um estudo realizado por Brito (2015) com agregados graúdos reciclados foi possível verificar a massa específica dos concretos, caracterizando com um concreto leve, isso com a substituição de 100% dos agregados. O autor comenta que a densidade dos concretos feita com agregados graúdos reciclados em comparação do concreto com agregado graúdo natural é menor, tornando-se um concreto mais leve.

Para concreto em estado fresco, pode ser realizado o ensaio através do abatimento do tronco de cone, definido pela NBR 16889 (ABNT, 2020). O ensaio de abatimento do tronco de cone tem como objetivo medir a consistência do concreto fresco, com tolerâncias específicas para a trabalhabilidade, dependendo não so do

abatimento, mas também do diâmetro máximo do agregado graúdo, do consumo de cimento e do teor de argamassa.

2.3.2 Propriedades no estado endurecido

O concreto endurecido, desenvolve certas resistências mecânicas, sendo elas, durabilidade, estabilidade, permeabilidade e resistência, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). De fato, o concreto em seu estado endurecido proporciona um material mais denso, favorecendo a resistência à compressão e outras propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2012)

A resistência à compressão é uma das características mais importantes do concreto em projetos estruturais. Além disso, a resistência à compressão está diretamente ligada a durabilidade dos concretos, conforme Neville (2013). Na NBR 6118 (ABNT, 2014) que é aplicada aos concretos compreendidos nas classes de resistência dos grupos I e II, da NBR 8953 (ABNT, 2015), até a classe C90.

Concretos estes que são classificados conforme a resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do ensaio de corpos de prova moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) e rompidos conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), como mostra a Figura 1, sendo permitida a especificação de valores intermediários.

Figura 1 - Classes de resistência de concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão MPa	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão MPa
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte – NBR 8953 (ABNT, 2015)

Também conforme citação da NBR 8953 (ABNT, 2015), os concretos com classe inferior a C20 não são estruturais e, caso sejam utilizados, devem ter seu desempenho atendido conforme NBR 6118 (ABNT, 2014) e NBR 12655 (ABNT, 2022).

A normalização brasileira orienta diversas etapas necessárias para determinar-se corretamente a resistência à compressão dos concretos. A norma NBR NM 33 (ABNT, 2014) determina os procedimentos para a coleta das amostras, definindo volumes de concreto a serem coletados em betoneiras estacionárias ou em caminhões betoneiras, para a realização das moldagens dos corpos-de-prova.

A NBR 5738 (ABNT, 2015) determina os procedimentos para a moldagem e cura dos corpos-de-prova, que podem ser realizados por imersão em água ou em câmara úmida, com condição de temperatura e umidade relativa do ar controlada. Os corpos-de-prova devem ser cilíndricos, sendo mais comumente utilizados no Brasil, os de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e os de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura.

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos deve seguir os procedimentos da NBR 5739 (ABNT, 2018), que define os tratamentos que podem ser empregados no topo dos corpos-de-prova, a velocidade de carregamento, a umidade dos corpos-de-prova, dentre outras condições de ensaio que possam influenciar nos resultados. A qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do grau de hidratação. São esses os dois principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade da água ou dos gases, de migração elétrica de íons, assim como, todas as propriedades mecânicas, tais como: módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras.

A característica mais importante do concreto, é a porosidade sendo ela a responsável pela maioria das propriedades das pastas, argamassas e concretos no estado endurecido, somente os poros com diâmetros entre 10 nm a 100 nm influenciam diretamente na sua durabilidade e resistência mecânica (ODLER & RÖBLER, 1985; BROWN & SHI, 1989).

Com relação a permeabilidade, é a porosidade capilar que determinar a taxa de ingresso e movimentação de agentes agressivos para o interior do concreto, tais como íons cloreto e sulfatos, dióxido de carbono, fazendo com que a vida útil seja influenciada e até mesmo comprometida.

Materiais à base de cimento estão estritamente correlacionados com a estrutura porosa. A porosidade capilar e conseqüentemente, a permeabilidade desses materiais determinará o ingresso dos agentes agressivos que poderão comprometer a integridade química e física (PEREIRA, 2011).

2.2.2.1 Módulo de elasticidade

Para Montija (2007), o termo elasticidade revela a capacidade dos materiais de retornarem à sua forma e volume originais após serem removidas as solicitações atuantes. Essa propriedade do concreto é dependente da composição estrutural dos materiais ao nível atômico, porque a recuperação física apenas se dá quando o material busca retornar ao seu estado original de equilíbrio elétrico e menor dissipação de energia.

A relação entre tensão aplicada e deformação instantânea dentro de um limite proporcional, podemos assim definir o módulo de elasticidade (MEHTA, 2014). Sendo ele dado pela declividade da curva de tensão-deformação sob um carregamento uniaxial, segundo o que prescreve a NBR 8522 (ABNT, 2021). Dependendo da porosidade de suas fases, muitos comportamentos observados na resistência à compressão repetem-se no módulo de elasticidade. No caso do agregado, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica também podem influir no módulo de elasticidade por influenciar a microfissuração da zona de transição. Todavia, a porosidade é mais importante em virtude de estar ligada à sua rigidez, resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Assim como é para a resistência à compressão, Khatib (2005) observou que os concretos produzidos tanto com agregado miúdo de concreto, quanto com o agregado miúdo de tijolos apresentaram módulo de elasticidade menor que o concreto convencional. Quanto maior o percentual de agregados substituídos, menor o módulo de elasticidade. Porém, os concretos produzidos com agregados de tijolos apresentam menores reduções em seus módulos de elasticidade.

2.2.2.2 Resistência à tração

A resistência à tração é definida por vários fatores, sendo o principal a aderência dos grãos dos agregados com a argamassa de cimento. Durante ensaio os valores são muito dispersos, pois as tensões não são totalmente evitáveis, devido à temperatura e à retração. Os conceitos relativos à tração são equivalentes com o de resistência à compressão, logo se tem a resistência média do concreto a tração (f_{ctm}), valor obtido da média dos resultados, e a resistência característica do concreto a tração (f_{ctk}) que tem 5% de probabilidade de não ser alcançada pelos resultados de um lote de concreto (PINHEIRO, 2007).

Conforme citado por Pinheiro (2007), a resistência a tração pode ser melhorada com a utilização adequada de armaduras, formada por barras de aço, constituindo assim o concreto armado. Também sendo usual a associação do concreto simples com armadura ativa, o que permite assim a formação do concreto protendido.

Segundo Khaloo (1994), há um ganho na resistência à tração e à flexão de concretos produzidos com 100% de agregados de tijolos cerâmicos reciclados de grande dureza à maior aderência entre a matriz e estes proporcionada por sua maior rugosidade. Já Gonçalves (2007), analisou que a resistência à tração por compressão diametral de concretos com substituição de 20% do resíduo de concreto pelo resíduo cerâmico miúdo e constatou que não teve alteração na resistência à compressão. Sendo assim, acredita-se que isso ocorre pela reação pozolânicos do resíduo cerâmico em relação ao hidróxido de cálcio, visto isso, resultou na conservação da resistência.

Araújo *et al.* (2015), substituiu o agregado graúdo natural por agregado graúdo reutilizado de cerâmica vermelha, com teores de 19%, 43%, 75% e 100%. Observando assim uma redução de 4% da massa específica que o concreto sofreu, esta redução não influenciou na substituição dos teores. Bicca (2000), afirma que o ensaio de compressão diametral dos traços de referência e os traços onde ocorreu a substituição de agregados reutilizado cerâmico, de teores de 20%, 25% apresentam comportamentos e resultados muito semelhantes.

2.2.2.3 Porosidade

A Porosidade da matriz cimentícia é um importante parâmetro, a presença de ar nos poros pode recolher a água jogada para fora dos capilares devido à presença de cristais de gelo, permitindo assim a redução da pressão (BERTOLINI, 2010). Também cita Bertolini (2010), “um concreto com elevada porosidade capilar facilita o movimento da água e pode prover mais espaço para o acréscimo de cristais de gelo. Por outro lado, fica rapidamente saturado de água e é, portanto, sensível a ação do gelo.”.

Em uma análise da prática, para Bertolini (2010), concretos com baixa porosidade capilar, são resistentes ao gelo. Antes de exposta às ações do gelo, prolongar a cura do lançamento do concreto é benéfico, pois tende a melhorar a resistência mecânica do concreto e reduzir a água livre no interior da pasta cimentícia. Para que uma amostra seja considerada porosa, o volume ocupado por vazios deve ser entre 15 e 35% (ACI 522, 2010).

A porosidade do concreto é influenciada diretamente pela granulometria, quantidade de cimento, relação água/cimento e quantidade de vazios (AZAÑEDO, HELARD e MUÑOZ, 2007). Um dos fatores que interferem nas propriedades do concreto poroso é a graduação do agregado, pois influencia a resistência e a permeabilidade, que são propriedades importantes para o desempenho do concreto poroso.

Conforme Ospina e Erazo (2007) o concreto poroso deve ter granulometria adequada para garantir que a abertura dos poros permita a passagem de água pelo material, preferencialmente agregado graúdo com ausência parcial de finos. Deve apresentar porosidade elevada de 15 a 20%, que é alcançada limitando-se o conteúdo da argamassa entre 20 e 30% e resistência à compressão de 7 MPa há 28 dias.

Não sendo possível preencher totalmente os vazios do agregado com pasta de cimento, o concreto convencional, é necessariamente um material poroso (MEHTA, MONTEIRO, 2014). Segundo citações de Mehta (2014), Yaman et al (2002), comprovam que o tipo de poros e sua distribuição afeta a resistência mecânica. Com a utilização de agregados naturais no concreto, e o concreto em seu estado

endurecido, é verificado como mais poroso e essa porosidade influencia nas propriedades mecânicas, conforme Neville (2014).

A utilização de agregados reciclados apresenta uma diferença nas propriedades que adquiridas pelo concreto, conforme Tenório (2007), relata que esses agregados reciclados possuem propriedades físicas diferentes dos agregados naturais, por apresentarem uma maior porosidade, esta diferença ocorre devido na sua composição conter resíduos de diferentes materiais. Esta alta porosidade, resulta num aumento da permeabilidade do concreto e na diminuição da resistência.

De fato, a absorção de água está diretamente relacionada com a porosidade dos agregados, visto que os agregados retem uma quantidade significativa de água nos poros, em relação à massa seca do material (Daminelli, 2007). Visto isso, os concretos que são produzidos com agregados reciclados, apresentam uma característica de maior absorção de água, pois eles têm uma elevada porosidade e devido a isso, necessitam de mais água (Reis, 2013). A variação dos valores de absorção de água ocorre em função da composição natural de cada resíduo, em pesquisas os autores afirmam que composições com maiores quantidades de cerâmica apresentam uma elevada porosidade, enquanto aqueles com composições de concreto tendem a ser menos porosos, portanto, mais resistentes (Reis, 2013).

2.4 CONCRETOS SUBMETIDOS A BAIXAS TEMPERATURAS

Considerando que o concreto é um material poroso e, portanto, possui uma grande capacidade de armazenar água em seus poros, o congelamento provoca aumento de volume dentro dos capilares, causando forte pressão em suas paredes. Quando a temperatura aumenta, a água contida nos capilares descongela diminuindo a pressão e novamente volta a congelar quando ocorre uma queda de temperatura. Este fenômeno denominado como ciclo de gelo e degelo são prejudiciais ao concreto. Powers (1945) e Helmuth (1953) *apud* Lima (2006), desenvolveram uma série de experimentos para o estudo. Com a elaboração do estudo, houve a possibilidade de determinar dois fenômenos importantes causadores da deterioração deste material quando submetido a temperaturas muito baixas, são eles: geração de pressão hidráulica; difusão de água-gel e água capilar.

Com a contenção de água nos capilares do concreto, se submetida a baixas temperaturas, solidifica-se. Este causando um aumento no volume da água e a quantidade excedente movimenta-se para os capilares mais próximos que passarão pelo mesmo processo e irão se deformar caso a pressão seja maior que a resistência do material.

Mehta e Monteiro (2014) constatou que a água quando começar congelar em um vazio capilar, requer uma dilatação de 9% do volume de água congelada ou força a saída da água dos poros, ou podem ocorrer os dois fenômenos de forma combinada. Assim é gerado uma pressão hidráulica, esta pressão varia de acordo com a distância da fronteira de escape, da permeabilidade do material e da taxa de formação de gelo. Conforme experimentos feitos por Powers (1958) foi constatado que a pressão de ruptura se dá em uma amostra saturada da pasta. Em concretos onde há uma maior quantidade de ar incorporado, a tendência é diminuir essa pressão, pois se criam fronteiras de escape. Estas bolhas deixam espaços para a formação do gelo.

Powers (1945), utilizou amostras a uma temperatura de -24°C e em uma amostra sem ar incorporado observou que a matriz dilatou 1.600 milionésimos no congelamento, enquanto no degelo ocorreu uma dilatação de 500 milionésimos até a temperatura inicial. Com a incorporação de 10% de ar, não ocorreu dilatação na amostra. Foi proposto que além da pressão hidráulica causada pelo congelamento da água nas grandes cavidades pode também ocorrer uma pressão osmótica resultante do congelamento de parte dos capilares, que pode também ser prejudicial a pasta de cimento. A água que está contida nos capilares não é pura, contendo substâncias solúveis tais como álcalis, cloreto e hidróxido de cálcio. Essas substâncias também congelam, mas com temperaturas abaixo do congelamento da água.

Segundo Neville (2013), a extensão dos danos causados por repetidos ciclos de gelo-degelo varia desde escamação superficial até a desintegração completa conforme as camadas de gelo se formam, começando na superfície exposta do concreto e avançando por sua espessura. Meios-fios de rodovias que permanecem úmidos por longos períodos são mais vulneráveis ao congelamento que qualquer outro concreto. Pavimentos rodoviários também são vulneráveis, especialmente quando não são utilizados sais para o degelo, já que são absorvidos pela camada

superior do pavimento, resultando em uma pressão osmótica, mais elevada que impele a água em direção as regiões mais frias, onde ocorre o congelamento.

Conforme analisado por Neville (2013) os sais de degelo normalmente utilizados são cloretos de sódio e cálcio e menos frequentemente ureia. Sais de amônia, mesmo em pequenas concentrações, são muito prejudiciais e nunca devem ser utilizados, sais esses que são utilizados em limpezas de ambientes industriais ou até mesmo descongelamento de vias públicas.

Para elaboração da pasta cimentícia, segundo a NBR 14931 (ABNT, 2004), a temperatura da massa de concreto, não deve ser inferior a 5 °C, no momento do lançamento. A norma também recomenda que a concretagem seja suspensa sempre que estiver prevista queda na temperatura ambiente para abaixo de 0 °C nas 48 h seguintes. Concretos com relação água-cimento abaixo de 0,6 quando expostos a baixas temperaturas nas primeiras 24 horas após a misturados materiais apresentam significativa redução na resistência à compressão (KOSMATKA et al., 2003).

Reginato, Foiato e Piovesan (2013) destacam que a baixa temperatura durante o processo de cura do concreto pode impedir o desenvolvimento de reações que garantem sua resistência. Nessas condições, as reações de hidratação podem ocorrer lentamente, retardando a pega e o endurecimento do concreto, ou nem mesmo ocorrer, devido à falta de água.

Segundo NRMCA (National Ready Mixed Concrete Association), quando estiver no estado fresco, o concreto tende a congelar em temperaturas inferiores a 4°C, comprometendo a vida útil e durabilidade, reduzindo também a resistência em mais de 50%, até atingir a resistência à compressão de 3,5 MPa, a temperatura do concreto deverá ser controlada. Em citações de Anka et al (2009), o processo de hidratação no concreto, é um fenômeno complexo e influenciado por muitos fatores, fatores estes que devem ser levados em consideração pois podem influenciar o desenvolvimento de calor e tensões térmicas nas primeiras idades. O processo de hidratação do cimento em condições laboratoriais, é uma previsão para o comportamento do concreto em estruturas, o desenvolvimento do processo pode ser acompanhado pelo monitoramento do calor de hidratação por métodos diretos ou indiretos. Medições de calor adiabático seriam as mais precisas para a produção de

calor contínuo de curvas de hidratação, replicando condições de cura próximas ou quase idênticas à cura em massa.

O concreto, quando se encontra em período de pega ou inicia o endurecimento, e sofre interferência de baixas temperaturas, a ação tende a ser desacelerada ou em alguns casos, podem até mesmo ser anuladas, pois ocorre a redução na velocidade de hidratação dos compostos ativos do cimento (CÁNOVAS, 1988).

Graça, Bittencourt e Santos (2005) destacam que na região Sul do Brasil a maior parte dos problemas em concretos, em virtude do clima frio, referem-se às geadas com ocorrência de neve ou gelo sendo estes potencializados pela ação do vento. Os efeitos do clima frio são mais prejudiciais quando ocorrem de forma rápida no concreto, principalmente nas primeiras idades em que ocorre o resfriamento deste em decorrência das reações de hidratação do cimento que inicialmente tendem a liberar calor. Esse choque térmico pode causar fissurações generalizadas, inicialmente superficiais e podendo posteriormente se estender por toda a massa, principalmente em estruturas esbeltas.

Para desenvolver algumas características específicas que se apliquem ao local de utilização do concreto, podem ser adicionados alguns aditivos, que é definido pela NBR 11768-1 (ABNT, 2019) como produto adicionado e misturado no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

2.4.1 Agregados submetidos a baixas temperaturas

Os efeitos causados pela baixa temperatura não afetam apenas concretos, segundo Mehta e Monteiro (2014), o mecanismo de gelo e degelo não atinge apenas a pasta de cimento, alguns agregados porosos como certos tipos de *cherts* (tipo de rocha formada principalmente de sílica), arenitos, calcários e folhelhos também podem danificar a pasta de cimento com a ação de congelamento. Não serão todos os materiais porosos que sofrem pressão interna no congelamento, dependendo principalmente da distribuição e tamanho dos poros, independentemente da matriz cimentícia possuir ou não ar incorporado.

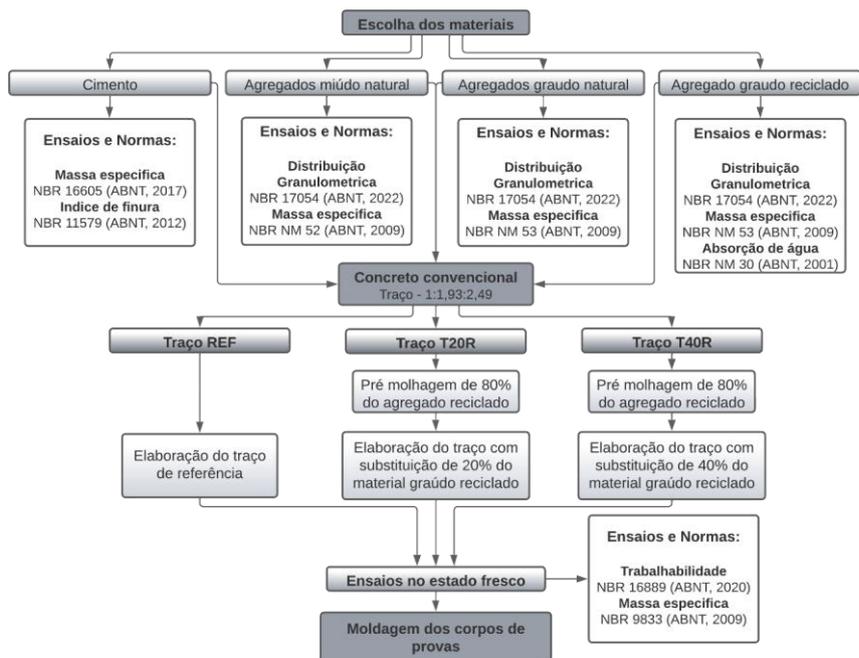
Os agregados se distribuem em três classes, sendo eles:

- a) Baixa permeabilidade e alta resistência: o congelamento da água nos poros a deformação elástica na partícula se acomoda sem causar danos.
- b) Permeabilidade intermediária: as forças capilares fazem com que os pequenos poros sejam facilmente saturados retendo água.
- c) Agregado de alta porosidade: embora permitam facilmente a entrada e saída de água, também são capazes de provocar danos a matriz pois a água sob pressão expelida e nesse processo pode causar danos a zona de transição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

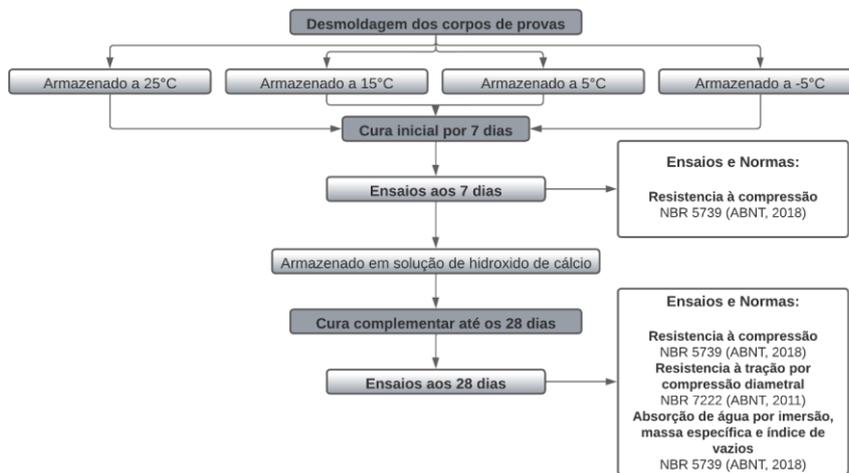
Neste capítulo está apresentada a metodologia de elaboração experimental deste trabalho, o experimento foi elaborado com o intuito de analisar a influência de agregados reciclados em concretos, quando submetidos a temperaturas baixas, durante o experimento estão sendo utilizados agregado reutilizado oriundo de processos de britagem de estruturas. Os procedimentos aqui descritos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade de Caxias do Sul, no campus da Região dos vinhedos (CARVI), em Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. A Figura 1 e 2 apresentam um fluxograma com as etapas que serão desenvolvidas no experimento desta pesquisa.

Figura 1 - Etapas experimentais iniciais



Fonte: Autor (2023).

Figura 2 - Etapas experimentais no estado endurecido

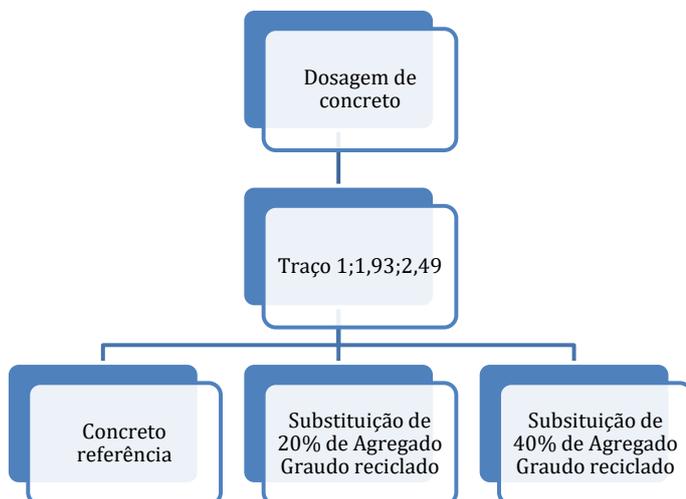


Fonte: Autor (2023).

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa tem como intuito avaliar o comportamento do concreto com a substituição de agregados naturais graúdos por agregados reciclados quando submetido a baixas temperaturas, as avaliações executadas possuem variações no teor dos agregados que estão sendo combinados. Durante o preparo da pasta cimentícia no estado fresco, ocorreu o ensaio de trabalhabilidade e a determinação da massa específica, moldou-se 8 corpos de prova com diferentes teores de agregados graúdo reciclados e suas curas foram submetidas a quatro temperaturas diferentes, que foram utilizados para ensaios de resistência à compressão, resistência à compressão diametral e determinação da massa específica do concreto em seu estado endurecido, o rompimento dos corpos de prova, com o ensaio de compressão, permite a análise da evolução da resistência à compressão quando submetido a diferentes temperaturas de cura em seus primeiros dias e diferentes teores de agregados graúdos reciclados, os corpos de provas foram rompidos em 7 e 28 dias. Na Figura 3, é apresentado um fluxograma com os teores utilizados nesta pesquisa.

Figura 3 – Dosagem e traços



Fonte: Autor (2023).

Com o intuito de padronizar cada um dos traços utilizados, definiu-se a nomenclatura, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Nomenclatura dos traços

Abreviaturas	Nomenclaturas
REF	Concreto de Referência com 0% de substituição de agregados reciclados
T20R	Traço com 20% de substituição em volume de agregados graúdo reciclados pelo agregado graúdo natural
T40R	Traço com 40% de substituição em volume de agregados graúdo reciclados pelo agregado graúdo natural

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

Foi feita a pré-molhagem dos agregados reciclados, 24 horas antes da concretagem e os demais agregados foram secos em uma estufa. Para execução da pesquisa foram moldados corpos de prova de formato 100 x 200 mm, corpos de provas estes, moldados conforme normativa, ocorreu a moldagem de 32 corpos de prova para cada nível de controle, conforme exibido na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova para ensaio por temperatura de cura.

Amostra	Ensaio			Total
	Resistência à compressão	Resistência à compressão diametral	Absorção de água, Índice de vazios e Massa específica	
Referência	4	2	2	8
T20R	4	2	2	8
T40R	4	2	2	8
Total				32

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

Posterior a moldagem, foram executados os seguintes procedimentos:

- Foram armazenados 24 horas em ambiente de laboratório, com temperaturas próximas à 20°C;
- Após o ciclo de 24 horas, foi realizada a desforma das amostras;
- As amostras foram armazenadas durante 6 dias a temperaturas de 25, 15, 5 e -5°C.

Para a cura inicial, onde utilizou-se temperaturas de 25, 15, 5 e -5°C, as amostras foram armazenadas em dois refrigeradores adaptados, para temperaturas de 5 e -5°C, um ambiente de laboratório com a temperatura controlada em 15°C e um estufa, para o controle de 25°C.

Cabe salientar que o único ensaio que foi realizado aos 7 dias foi o de resistência à compressão. Os demais ensaios no estado endurecido foram realizados aos 28 dias, sendo que dos 7 aos 28 dias, a cura dos corpos de prova desta pesquisa foi de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015), nomeada como procedimento de moldagem e cura de corpos de prova, que trata da armazenagem dos corpos de prova submersos em solução saturada de hidróxido de cálcio e umidade relativa do ar superior a 95%, sendo assim, foi utilizado um tanque para que as amostras fiquem submersa à solução de hidróxido de cálcio. Para a realização desta pesquisa, foi produzido um total de 96 corpos de prova e armazenados em diferentes situações, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Totais de corpos de prova e temperaturas

Amostra	Cura inicial até os 7 dias				Número de corpos de prova
	25°C	15°C	5 °C	-5 °C	
Referência	8	8	8	8	32
T20R	8	8	8	8	32
T40R	8	8	8	8	32
Total					96

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

3.1.1 Fatores fixos

Os fatores fixos definidos aos ensaios prezam por uma maior confiabilidade dos dados coletados, tendo como objetivo simular situações de uma maneira mais realista possível no concreto e expondo o a temperaturas baixas. O experimento desenvolvido no laboratório de materiais de construção da Universidade de Caxias do Sul, as variáveis fixas adotadas foram:

- a) O traço utilizado será o mesmo 1:1,93:2,49, formando um concreto padrão de resistência característica de 30 MPa, de acordo com uma concreteira local;
- b) Os agregados reciclados e naturais a serem utilizados foram do mesmo lote;
- c) O modelo de corpo de prova foi o mesmo para todos;
- d) Moldagem e cura dos corpos de provas com o mesmo tempo e método;
- e) A variação de temperatura de cura até 7 dias seguirá o mesmo padrão para ambos os traços;
- f) A cura de 7 a 28 dias, foi feita com a armazenagem dos corpos de prova em cura submersa

3.1.2 Fatores variáveis

Os fatores variáveis que não podem ser controlados durante o ensaio, englobam alguns fatores que ocorrem em função do uso e do ambiente. Estes fatores podem ser destacados com os seguintes parâmetros:

- a) Umidade relativa do ar durante a concretagem;
- b) Variação de temperatura durante as primeiras 24 horas após a concretagem.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados para a produção do concreto utilizando materiais reciclados, foram determinados conforme a disponibilidade dos insumos no laboratório da Universidade de Caxias do Sul, e outros foram obtidos com terceiros. Os constituintes irão ser apresentados com maiores detalhes abaixo.

3.2.1 Aglomerante

Como aglomerante, para a utilização do concreto, foi utilizado cimento Portland do tipo CP II F-40 do fabricante Itambé. Este tipo de cimento é livre de materiais pozolânicos que podem afetar os resultados com os aditivos cristalizantes e tem adição de 11 a 25% de filer calcário. Foram realizados ensaios de caracterização de acordo com as normativas vigentes, e ainda as características físicas serão de acordo com o fabricante. Para caracterização do cimento, realizou-se os ensaios de massa específica, com base no método proposto pela NBR 16605 (ABNT, 2017) e Índice de finura, com base no método proposto pela NBR 11579 (ABNT, 2012), as características físicas e químicas do aglomerante estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, fornecidas pelo fabricante do cimento.

Tabela 5 - Características físicas do cimento

Físico	Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistência à compressão			
		Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
	mm	min	min	%	cm ² /g	%	%	MPa	MPa	MPa	MPa
Média	0,09	174	224	28,50	4,472	0,03	0,25	25,00	37,40	42,90	50,80
Sd	0,20	10	11	0,50	53,07	0,03	0,18	0,80	0,80	1,00	0,80
Mín.	0,00	160	210	27,80	4,380	0,01	0,10	23,60	36,00	41,60	50,10
Máx.	0,50	190	240	29,00	4,530	0,09	0,60	26,80	38,70	44,60	52,20

Fonte - Itambé, (2023)

Tabela 6 - Características químicas do cimento

Químico	Al ₂ O ₃	SiO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda Fogo	CaO Livre	Resid. Insol.	Equiv. Alcal.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Média	4,51	17,87	2,80	60,55	3,43	2,94	5,96	1,80	1,31	0,65
Sd	0,11	0,20	0,06	0,57	0,22	0,07	0,08	0,17	0,18	0,02
Mín.	4,36	17,63	2,69	59,34	3,00	2,79	5,81	1,37	1,09	0,63
Máx.	4,69	18,16	2,92	61,55	3,74	3,02	6,03	1,99	1,65	0,68

Fonte - Itambé, (2023)

3.2.2 Agregado miúdo natural

O agregado miúdo utilizado para desenvolvimento desta pesquisa, foi fornecido pela empresa Coneresul de Bento Gonçalves. A distribuição granulométrica e os índices de qualidade do agregado foram avaliados de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). Na Tabela 7, é apresentado os ensaios para caracterização do agregado miúdo e as normas utilizadas para a realização deles, na Tabela 8, estão apresentados os resultados obtidos da caracterização do agregado miúdo natural utilizado no ensaio.

Tabela 7 - Caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Métodos
Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa específica (Massa específica aparente)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

Tabela 8 - Características físicas do agregado miúdo natural

Abertura da Peneira	Retida Simples	Retida acumulada
mm	%	%
4,8	-	-
2,4	5	5
1,2	11	16
0,6	16	32
0,3	29	61
0,15	27	88
Fundo	12	100
Módulo de Finura		
	2,42	
Dimensão Máxima Característica (mm)	2,4	
Massa Específica (kg/m³)	2,63	

Fonte - Elaborada pelo autor (2023)

3.2.3 Agregado graúdo natural

O agregado graúdo natural utilizado para a elaboração do traço de concreto, que foi fornecido por uma empresa localizada na cidade Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, para classificação do agregado, foi realizado o ensaio de granulometria, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), e os ensaios de absorção e massa específica do agregado, conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009). Com a realização do ensaio de determinação granulométrica, obtivemos os resultados dispostos na Tabela 9

Tabela 9 - Características do agregado graúdo natural

Granulometria	Percentual retido	Percentual Acumulado
mm	%	%
12,5	37	37
9,5	32	69
6,3	29	98
4,75	2	100
Massa específica (kg/m³)	2,70	
Dimensão Máxima Característica (mm)	19,0	
Absorção (%)	3,3	

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

3.2.4 Agregado graúdo reutilizado

O agregado graúdo reutilizado utilizado para a confecção do concreto, foi oriundo de materiais de corpos de provas com resistência de 30 ± 5 MPa. Material este obtido no laboratório da Universidade de Caxias do Sul e posteriormente triturado pela empresa Scariot, em um moinho de mandíbulas e na sequência o resíduo foi caracterizado.

Na Tabela 10, é apresentado os ensaios para determinação das características e normas para caracterização do agregado graúdo reutilizado.

Tabela 10 - Caracterização do agregado graúdo reutilizado

Ensaio	Métodos
Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Absorção de água	NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

Para caracterização do agregado graúdo reutilizado, foi utilizado o método disposto na NBR 17054 (ABNT, 2022), onde o agregado será peneirado e analisado o percentual retido em cada uma das malhas, também foram executados os ensaios de massa específica e absorção de água, conforme NBR 16917 (ABNT, 2021). Na Tabela 11, é exibido o peso e percentual do material retido em cada uma das malhas estipuladas na norma.

Tabela 11 - Características físicas do agregado graúdo reutilizado

Granulometria	Percentual Retido	Percentual Acumulado
mm	%	%
12,5	1	1
9,5	12	13
6,3	50	63
4,75	31	94
2,4	6	100
Massa total	100	100
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	
Massa específica (kg/m³)	2,20	
Absorção (%)	7,73	

Fonte – Elaborado pelo autor (2023)

3.2.5 Água de amassamento

A água utilizada para a elaboração da pasta cimentícia foi proveniente da rede pública de abastamento da CORSAN, que é prestadora de serviços no município de Bento Gonçalves. Sendo a água de amassamento calculada para o traço padrão e posteriormente, ocorre o cálculo da água para compensação, devido a diferença de capacidade absorção do agregado graúdo natural e reutilizado. Durante os ensaios, a água encontrava-se em temperatura de cerca de 20°C.

3.3 DOSAGEM

A dosagem do concreto utilizou um traço de uma concreteira local, onde é o mesmo traço fornecido para utilização de concretos para pisos em câmaras frias. Assim o referencial para o traço foi definido em 1:1,93:2,49 em massa, com substituição de 20 e 40% do agregado graúdo natural pelo agregado reutilizado.

Para substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reutilizado, determinou-se a massa específica dos agregados e foi calculada a compensação de material reutilizado para obter a mesma densidade de material que o traço de referência. Para o traço contendo 20 e 40% de agregado graúdo reutilizado, o cálculo foi feito de acordo com a Equação 1.

$$M_{agr} = \frac{M_{agn} \cdot \gamma_{agr}}{\gamma_{agn}} \quad (1)$$

Onde:

- M_{agr} = massa do agregado graúdo reutilizado a ser utilizado (kg);
- M_{agn} = massa do agregado graúdo natural a ser substituído (kg);
- γ_{agr} = massa específica do agregado graúdo reutilizado (kg/m³);
- γ_{agn} = massa específica do agregado graúdo natural (kg/m³).

Posterior ao cálculo da compensação, obtivemos o peso do material que foi utilizado. A Tabela 12 mostra o quantitativo de material para a confecção do traço.

Tabela 12 - Quantitativo de Material

Traço	Cimento (kg)	Agregado Miúdo (kg)	Agregado Graúdo (kg)	Agregado Graúdo Reutilizado (kg)	Água (kg)
REF	23,03	44,44	57,33	0	13,44
T20R	23,03	44,44	45,87	9,34	13,21
T40R	23,03	44,44	34,40	18,69	12,98

Fonte – Elaborado pelo autor (2023)

3.3.1 Pré-molhagem

Para realizar uma equivalência de absorção, em função da substituição de agregados graúdos, para os traços com agregados graúdos reciclados foi determinada a quantidade de água total a ser absorvida pelo agregado reciclado, para posterior para fazer a pré-molhagem de cada amostra com os valores do ensaio de absorção de água do agregado graúdo reutilizado. A pré-molhagem foi de 80% do valor da absorção do agregado, a 24 hrs antes da mistura ocorrer, a partir destes valores foi possível determinar as quantidades de água de cada pré-molhagem, conforme a Equação 2.

$$A_p = MR * \frac{Abs_{24h}}{100} \quad (2)$$

Onde:

- A_p = água de pré-molhagem (kg);
- MR = Massa do agregado graúdo reciclado (kg);
- Abs_{24h} = percentual de água absorvida pelo agregado em 24 horas (%).

Além da pré-molhagem dos agregados realizou-se uma compensação da água, é importante analisar as taxas de absorção dos agregados reciclados, com o intuito de minimizar os impactos da absorção de água a mistura, com o concreto no estado fresco, segundo estudo realizado por Padovan (2013).

O cálculo para compensação de água na mistura é feito por meio da Equação 3, e os resultados se encontram na Tabela 13.

$$A_c = A_{sat24} - A_{AGN} - A_{pré} \quad (3)$$

Onde:

- A_c = água de compensação (kg);

- A_{sat24} = Absorção de água do agregado graúdo reciclado utilizado em 24 horas (kg);
- A_{AGN} = Absorção de água do agregado natural substituído (kg).
- $A_{pré}$ = água utilizada na pré-molhagem

Para a pré-molhagem dos agregados reciclados, os agregados foram pesados em uma balança de precisão para cada um dos traços a ser desenvolvido, da mesma forma foi feita a pesagem de 80% do valor total da água de compensação para a pré-molhagem. Após, foi inserido o agregado reciclado em um recipiente com tampa e aos poucos a água foi borrifada sobre ele, para que se espalhasse por todo o agregado reciclado, a tampa do recipiente foi inserida e vedada para que não haja a perda por meio da evaporação ou possíveis derramamentos e mantido por 24 horas.

Tabela 13 - Compensação de água

Amostra	Água de pré-molhagem	Água de compensação	Relação Água/Cimento
	kg	kg	%
REF	0,00	0,00	0,5837
T20R	0,58	0,23	0,5639
T40R	1,15	0,46	0,5553

Fonte - Elaborada pelo Autor (2023).

3.3.2 Variações de temperaturas de cura

As temperaturas determinadas para realizar esta pesquisa, foram definidas com base nos equipamentos disponíveis para execução dos ensaios. Foram elaborados 96 corpos de prova, as variações de temperatura, sendo: uma estufa a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, a segunda condição de armazenamento foi $15 \pm 2^\circ\text{C}$, a terceira foi um refrigerador com temperatura controlada a $5 \pm 2^\circ\text{C}$, e como quarta condição, é a armazenagem a $-5 \pm 2^\circ\text{C}$. Os corpos de prova foram elaborados, durante o primeiro dia da cura, permaneceram em laboratório, a temperatura ambiente que estava a cerca de 20°C e posteriormente foi armazenada em seus respectivos ambientes por 6 dias em temperaturas controladas, conforme citado anteriormente, após a primeira etapa dos ensaios, que ocorreu no sétimo dia, os corpos de prova foram mantidos em temperatura de cerca de 18°C .

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Os métodos que foram empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados no estado fresco estão apresentados na sequência, sendo que todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade de Caxias do Sul, no Campus da Região dos Vinhedos (CARVI), nesta etapa se propicia a moldagem dos corpos de prova, conforme norma regente.

3.4.1 Trabalhabilidade

Para elaboração da pesquisa com a finalidade de controlar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi definido um abatimento de 120 ± 20 mm. O ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme Figura 5, seguindo a NBR 16889 (ABNT, 2020), sendo realizado uma amostra para cada traço utilizado nesta pesquisa.

Figura 4 - Trabalhabilidade



Fonte - Do autor (2023)

3.4.2 Determinação da massa específica

Foram realizados três ensaios de determinação da massa específica para o traço a ser utilizado, seguindo a metodologia da norma NBR 9833 (ABNT, 2009). Para determinar a massa específica, deve se calcular a massa do concreto, subtraindo a massa do recipiente vazio onde se realizou o adensamento do concreto, após isso com o auxílio da Equação 4, calcular a massa específica.

$$P = \frac{m}{V} * 1000 \quad (4)$$

Onde:

- P = massa específica (kg/m³);
- m = massa do concreto (kg);
- V = volume do recipiente (m³).

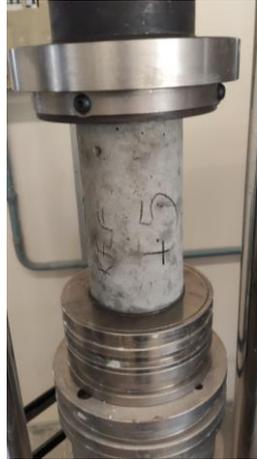
3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os métodos que foram empregados para o estudo das propriedades mecânicas dos concretos confeccionados no estado fresco estão apresentados na sequência, sendo que todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil, da Universidade de Caxias do Sul, no Campus da Região dos Vinhedos (CARVI), os ensaios realizados no estado endurecido do concreto, ocorreram aos 7 e 28 dias de cura.

3.5.1 Resistência à compressão

Os ensaios a resistência à compressão foram realizados, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), os corpos de prova foram mantidos em cura, armazenados em um ambiente de baixa temperatura até a realização dos ensaios a 7 e 28 dias. Para cada idade foram ensaiados dois corpos de prova à cada temperatura que foram submetidos, conforme Figura 6.

Figura 5 - Compressão de corpo de prova



Fonte - Do autor (2023)

Com a superfície do corpo de prova limpa e seca, posiciona-se o mesmo na prensa a fim de realizar a ruptura. A prensa é iniciada com uma velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, sendo essa velocidade mantida constante até a ruptura do corpo de prova. Os resultados do ensaio são calculados pela Equação 5.

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Onde:

- F_c = resistência à compressão (MPa)
- F = força (N)
- A = área da base (mm^2)

3.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral têm sua execução de acordo com a NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado em 8 corpos de prova com cada um dos traços elaborados, sendo eles pares de amostras retiradas da cura em cada um dos estados de armazenamento em 28 dias. Para realizar o ensaio, o corpo de prova é posicionado horizontalmente sobre a base da prensa, conforme Figura 7.

Figura 6 - Compressão diametral



Fonte - Do autor (2023)

Após o ajuste do corpo de prova, a compressão foi aplicada após garantir que não houvesse movimentação do corpo de prova. a velocidade aplicada é de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s, sendo aplicada até a ruptura do corpo de prova. Para os cálculos de resistência à tração por compressão diametral deve ser utilizada a Equação 6.

$$F_{ct, sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (6)$$

Onde:

- $F_{ct, sp}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa)
- F = força máxima (kN)
- d = diâmetro do corpo de prova (mm)
- l = comprimento do corpo de prova (mm)

Este ensaio tem como intuito obter o conhecimento da resistência a tração de compressão diametral a fim de permitir e estimar a carga para a qual ocorre a fissuração e, desse modo, estimar a durabilidade do concreto a longo prazo.

3.5.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

Usando as massas determinadas de acordo a NBR 9778 (ABNT, 2019), o ensaio foi realizado após os 28 dias de cura, foram colocadas as amostras em estufa

com a temperatura de aproximadamente 105 ± 5 °C e mantidas por 72 horas, este ensaio utilizou-se 8 corpos de prova de cada traço, sendo eles pares que haviam sido armazenados em temperaturas diferentes, depois desse processo foi determinada a massa das amostras secas. Depois de resfriados foi realizado o processo de secagem e pesagem das amostras, elas foram saturadas novamente por 72 horas em um tanque de água, em seguida dessa saturação se dá início ao um novo processo de saturação onde as amostras foram fervidas por 5 horas. Após realizada a fervura as amostras permanecem dentro do recipiente da fervura esfriando até chegar na temperatura ambiente.

Por fim foi realizada a pesagem das amostras saturadas, com auxílio de uma balança hidrostática de precisão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2019). Para fins de cálculo foi realizado a média dos 3 corpos de prova ensaiados por traço, conforme as Equações 7, 8 e 9.

$$Abs = \frac{(Msat - Mseca)}{Mseca} * 100 \quad (7)$$

Onde:

- Abs = absorção de água por imersão (%);
- $Msat$ = massa do corpo de prova saturado (kg);
- $Mseca$ = massa do corpo de prova seco (kg).

$$Iv = \frac{(Msat - Mseca)}{(Msat - Mi)} * 100 \quad (8)$$

Onde:

- Iv = índice de vazios (%);
- $Msat$ = massa saturada (kg);
- $Mseca$ = massa seca (kg);
- Mi = massa do corpo de prova saturado, imerso em água (kg).

$$Ms = \frac{Mseca}{(Msat - Mi)} \quad (9)$$

Onde:

- M_s = massa do corpo de prova seco (kg);
- M_{seca} = massa seca (kg);
- M_{sat} = massa saturada (kg);
- M_i = massa do corpo de prova saturado, imerso em água (kg).

3.6 ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Serão realizadas análises e o tratamento dos dados obtidos com os ensaios do estado endurecido considerando todos os elementos desta pesquisa. Para a obtenção e apresentação dos dados para esta pesquisa será utilizado o software editor de planilhas Excel.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, apresentamos os resultados dos ensaios realizados nos estados fresco e endurecido, juntamente com as comparações entre eles. A análise dos dados foi conduzida utilizando tabelas e gráficos, com o objetivo de tornar os resultados mais compreensíveis e visualmente acessíveis.

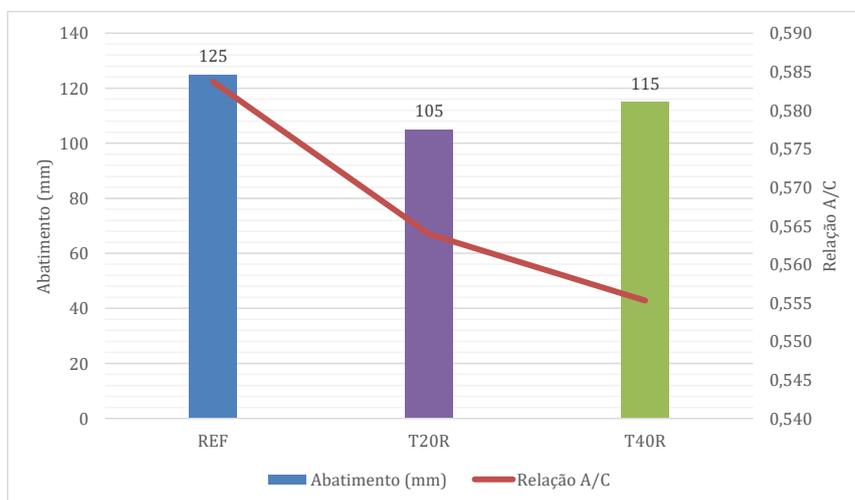
4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Ao analisar os resultados desses ensaios, foi possível obter informações sobre as características do concreto no estado fresco, como a sua trabalhabilidade e a densidade aparente. Essas informações são fundamentais para o controle de qualidade e o dimensionamento adequado de estruturas de concreto.

4.1.1 Trabalhabilidade

Como se pode ver na Figura 8, utilizando a compensação de água de acordo com o necessário para atender ao agregado utilizado, foi possível desenvolver o traço da forma esperada, mantendo-o com o abatimento de 120 mm \pm 20 mm, abatimento este que foi obtido sem a utilização de nenhum aditivo superplastificante ou similares.

Figura 7 – Trabalhabilidade por traços



Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

Com o ensaio de trabalhabilidade, foi possível analisar que a substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reutilizado, obtivemos uma trabalhabilidade similar, mesmo com a redução da relação água/cimento de até 4,31%, quando substituído 40% de agregado graúdo natural por agregado reutilizado, podendo ter ocorrido devido a maior presença de agregados de diferentes granulometrias.

Conforme citações feitas por Reis (2013), o abatimento é influenciado diretamente pela taxa de pré-molhagem, durante sua pesquisa ele utilizou pré-molhagem de 60%, 80% e 100%, o aumento do percentual de pré-molhagem permite maiores valores de abatimento. Com isso, o autor verificou que a mistura com 60% de pré-molhagem, absorveu mais água em seu estado fresco e conseqüentemente resultando em uma perda de trabalhabilidade, com base nestas informações, nesta pesquisa foi utilizado um teor de 80% de pré-molhagem, buscando uma melhor trabalhabilidade para o concreto.

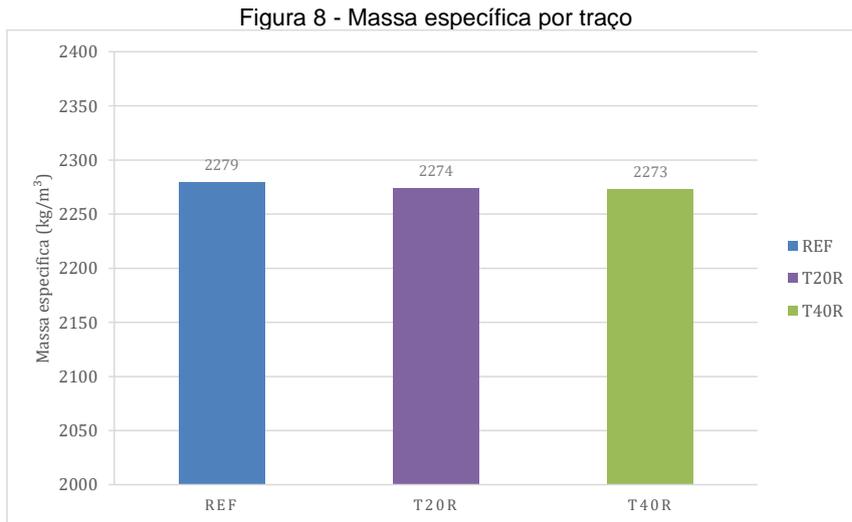
De acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), que estabelece os procedimentos para o ensaio de abatimento do tronco de cone, a geometria dos agregados pode afetar a fluidez e a coesão do concreto. Agregados com formato mais alongado, como os agregados britados, tendem a aumentar a viscosidade do concreto, resultando em menor abatimento. Conforme NBR 8953 (ABNT, 2015), o resultado desse ensaio de trabalhabilidade, classifica o concreto como S100, aplicado em elementos estruturais, com lançamento convencional do concreto.

Outra pesquisa realizada por Silva *et al.* (2018) analisou o efeito da granulometria dos agregados no abatimento do concreto. Os resultados indicaram que o tamanho e a distribuição dos agregados também podem influenciar o abatimento. Em geral, a presença de agregados de diferentes tamanhos, com uma distribuição granulométrica adequada, pode contribuir para um abatimento mais homogêneo e controlado.

4.1.2 Massa específica

Como análise da massa específica, obtivemos os resultados ilustrados na Figura 8, onde o traço de concreto nomeado como REF foi o traço que apresentou a maior massa específica. Permitindo assim verificar, que quanto maior o teor de

substituição do agregado graúdo reutilizado, menor o valor de massa específica, os valores de massa específica encontrados, estão na Figura 9.



Fonte - Elaborada pelo Autor (2023)

A massa específica para os traços com utilização de agregados graúdos reciclados, o traço T20R apresentou uma redução em sua massa específica de 0,22% e o traço T40R apresentou 0,26%, quando comparados com o traço REF, quando comparado com a utilização de agregados graúdos naturais, isso acontece pois o agregado graúdo reutilizado apresenta uma menor massa específica, de acordo com a caracterização do material.

Em estudos realizados por Fonseca (2006), a utilização de agregados graúdos reciclados faz com que o concreto tenha uma massa específica menor, quando comparado com concretos compostos por agregados graúdos naturais. Conforme NBR 8953 (ABNT, 2015), o concreto desenvolvido caracteriza-se como concreto normal, com massa específica seca, compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

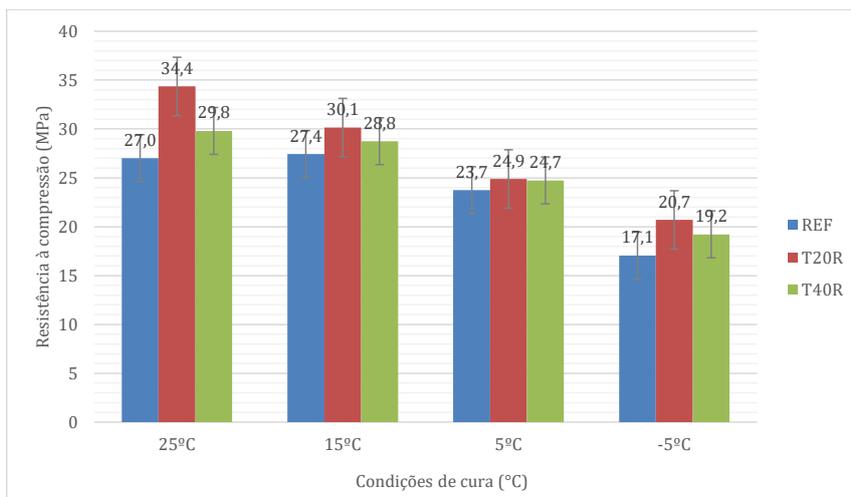
Nesta etapa, foram analisados os resultados obtidos no concreto em seu estado endurecido, após mantê-lo armazenado nas condições de ensaio pré-determinadas para análise durante 7 e 28 dias, foram realizados os seguintes ensaios:

resistência à compressão, resistência à compressão diametral, absorção de água total, índice de vazios e absorção por capilaridade.

4.2.1 Resistência à compressão

A análise dos dados de compressão aos 7 dias de cura nos permite observar a variação da resistência das amostras quando submetidas a variações de temperatura, onde obtivemos um aumento de 9,97 MPa no traço REF, quando comparadas as temperaturas de 25 e -5°C, respectivamente. Realizando a mesma comparação no traço T20R, tivemos um aumento de 13,66 MPa e no traço T40R um aumento de 10,58 MPa. Na Figura 10, podemos observar os valores de resistência obtidos durante o ensaio das amostras nas temperaturas de 25, 15, 5 e -5°C, onde foram mantidos durante os 7 primeiros dias de cura, com a utilização dos traços REF, T20R e T40R.

Figura 9 - Resistência à compressão aos 7 dias



Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

Com os resultados da resistência à compressão aos 7 dias de cura, é possível visualizar que durante todo período, o T20R foi o traço que apresentou maior evolução em sua resistência, independente da temperatura a qual estava sendo submetido, os resultados aos 7 dias de cura permitiram também observar que quando submetidos a temperaturas de 15 e 25°C, todos os traços obtiveram a resistência de 30 ± 5 MPa ainda em suas idades iniciais.

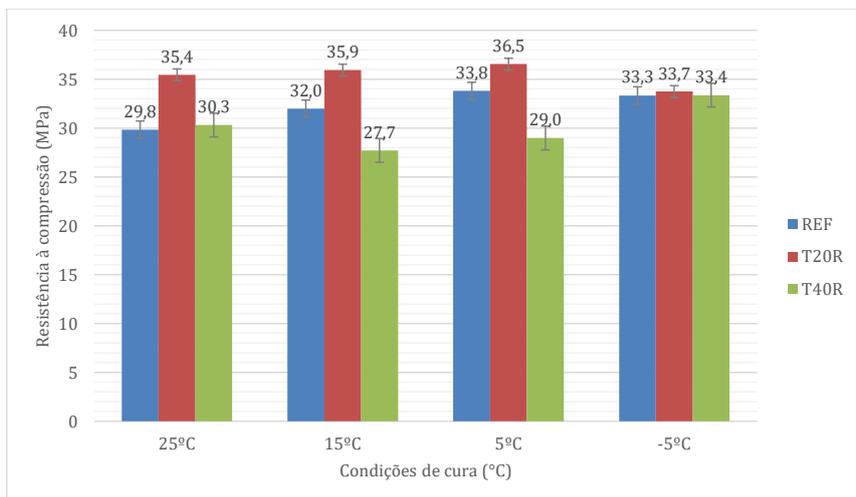
Podemos observar que os valores obtidos no traço REF, quando submetidos a 25 e 15°C, tiveram um aumento de 0,42 MPa, no entanto, quando submetidos a temperaturas de 5 e -5°C, tiveram uma redução, respectivamente, de 3,28 e 9,97 MPa quando comparados com a resistência obtida a 25°C para o mesmo traço. Os traços T20R e T40R, apresentaram reduções gradativas, conforme expostos a temperaturas mais baixas. Os valores obtidos no traço T20R, quando expostos a temperaturas de 15, 5 e -5°C, reduziram respectivamente, 4,21, 9,47 e 13,66 MPa, quando comparados ao traço REF, já os valores obtidos no traço T40R, apresentaram uma redução de 1,05, 5,06 e 10,58 MPa. É possível identificar também, que os traços contendo agregados graúdos reciclados obtiveram um melhor desempenho que o traço REF em todas as condições.

Mehta e Monteiro (2018), afirmam que o concreto, durante as idades iniciais, para o ensaio de resistência a compressão deve ser considerado a interação da pasta de cimento com os agregados reciclados. Sendo está a ligação mais eficaz em agregado com superfícies rugoso, como no caso dos agregados graúdos reciclados. Assim, a tenência de evolução da resistência até os 28 dias é crescente, este fato também foi observado por outros autores como Leite (2001) e Rangel (2015).

Conforme citado por Paya *et al* (1999), as moléculas de água, quando submetidas as temperaturas mais baixas, tendem a se aglomerar, impossibilitando a movimentação dentro da pasta de cimento, perdendo o estado de fluidez e resultando na dificuldade de chegar aos grãos de cimento. Situação está que interfere o enrijecimento do concreto em suas idades iniciais submetido a baixas temperaturas, caso esse podendo relacionar ao resultado principalmente da cura de 5°C e principalmente de -5°C desta pesquisa.

Aos 28 dias de cura do concreto, os resultados obtidos estão expressos na Figura 11, ressaltando que após o ensaio ocorrido aos 7 dias, as amostras foram armazenadas em um tanque com solução saturada de hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, permitindo assim que a cura complementar final, ocorra conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 10 - Resistência à compressão aos 28 dias

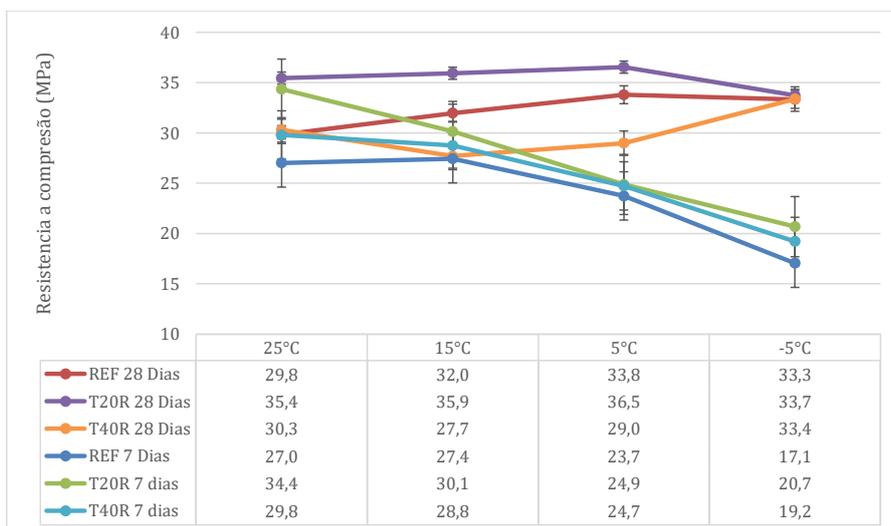


Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

Através dos resultados, é possível identificar que o traço de referência atingiu os 30 MPa, proposto. O traço T20R apresentou maior resistência em todas as temperaturas de cura e manteve uma variação de 2,84 MPa quando analisada sua menor resistência, obtida a -5°C e sua maior resistência, obtida a 5°C. Aos 28 dias de cura, o traço T40R, apresentou menor resistência que o traço REF, quando submetido a 15 e 5°C, com diminuições de 4,26 e 4,82 MPa, respectivamente. Em uma análise do traço REF, as amostras mantidas a 5 e -5°C, apresentaram um aumento de 3,97 e 3,5 MPa em comparação a amostra mantida a 25°C.

Na Figura 12, pode ser visto o comparativo da resistência à compressão aos 7 e 28 dias para cada um dos traços utilizados e as temperaturas a quais foram submetidos.

Figura 11 - Resistência à compressão 7 e 28 dias



Comentado [MG1]: Ajustar grafico para linha com pontos

Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

Através dos resultados foi possível identificar uma maior evolução dos traços submetidos a temperaturas de 5 e -5°C, variação essa que apresentou um aumento médio de 56%, atingindo a resistência de 30 ± 5 MPa, já o traço curado a 25°C durante a cura inicial apresentou uma variação média de 5,10%. A evolução ocorrida quando submetidos a temperaturas de 5 e -5°C, ocorre devido ao efeito de cura tardia.

Chakraborty *et al* (2001) verificaram que o processo de pega do concreto, início e fim do endurecimento da pasta, quando submetido a baixas temperaturas é desacelerado, causando assim a cura tardia do concreto, pois a taxa de hidratação do silicato tricálcico é fortemente influenciado, diminuindo sua produção e limitando a resistência nos primeiros dias principalmente se a temperatura permanecer baixa durante a cura inicial. O silicato tricálcico é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até os 28 primeiros dias de cura.

Em um estudo feito por Ceconello e Tutikian (2012), concretos que foram curados em suas idades iniciais a baixas temperaturas, apresentaram uma evolução da resistência maior da resistência em suas idades posteriores, indicando assim que o processo de hidratação lenta é uma vantagem ao longo do tempo para a estrutura do concreto.

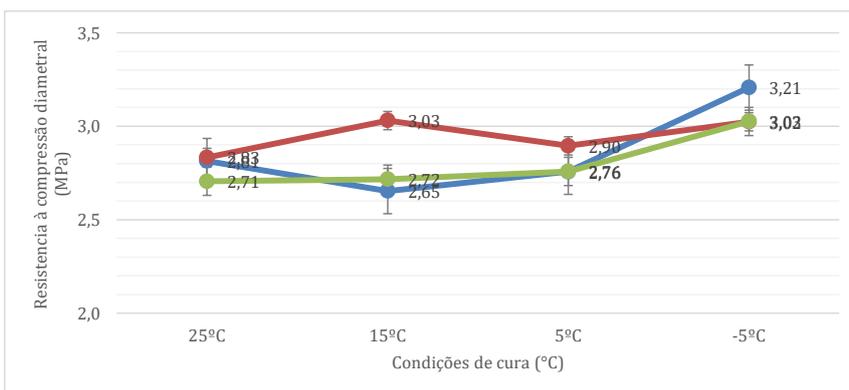
O traço T40R submetido a temperatura de 15°C, em seu período de cura inicial de até 7 dias, apresentou resistência superior à obtida com o rompimento do corpo de prova após 28 dias de cura, fato este incomum para o experimento, uma vez que o intuito é que a resistência aumente com maiores períodos de cura, situação que pode ter ocorrido devido a qualidade do agregado graúdo reutilizado presente nos corpos de prova rompidos aos 28 dias com o traço T40R, também podendo ter ocorrido, devido a formação de cristais de hidratação dentro do grão em função da porosidade do agregado.

Segundo Vieira (2008), nas primeiras idades, apesar do baixo grau de hidratação, alguns cimentos já possuem uma estrutura interna razoavelmente formada, com capacidade de formar uma grande quantidade de compostos favoráveis para a evolução da resistência do concreto. Além disso, ocorre a formação de cristais, que tem seu tamanho diretamente proporcional à porosidade do concreto, com o preenchimento dos poros pelos cristais formados, o concreto apresenta um aumento em sua densidade e conseqüentemente, resistência do material.

4.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral realizado aos 28 dias de cura do concreto, um aumento de 0,40 MPa no traço REF, quando comparado sua resistência 25°C com a temperatura de -5°C, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 13.

Figura 12 - Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias



Comentado [MG2]: Alterar para tendencia

Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

Com os resultados obtidos, podemos observar que o traço REF e o T40R, apresentaram maiores resistências aos 28 dias, quando submetidos a menores temperaturas de cura inicial, o traço REF demonstrou uma redução de 0,16 MPa em relação à temperatura de 25°C, quando submetido a 15°C. O traço T20R, apresentou condições melhores que o traço REF e T40R nas condições de 25, 15 e 5°C, mantendo com valores similares ao T40R quando curado a -5 °C e 0,19 MPa a menos quando comparado ao traço REF na mesma temperatura.

De forma geral, o traço REF, T20R e T40R, apresentaram uma variação de 0,56, 0,20 e 0,32 MPa, respectivamente, representando grandes diferenças e permitindo visualizar que quando submetido a temperatura de -5°C, ambos os traços apresentaram melhores valores.

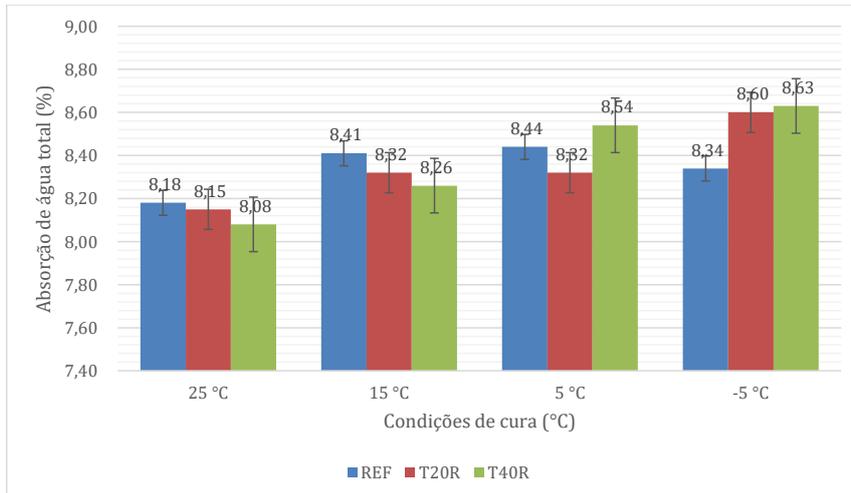
Afirmações feitas por Werle (2010) em sua pesquisa, citam que os resultados obtidos pelo ensaio de resistência à tração por compressão diametral não apresentaram o mesmo comportamento do que o ensaio de resistência à compressão. Ela afirma que no ensaio de compressão diametral os resultados são próximos ou similares ao traço de REF, visto isso, mostra que o agregado reciclado ou a pré-molhagem não interferem na resistência à compressão diametral.

Segundo Bauer (2001), entende-se por cura de concreto um conjunto de medidas que tem por objetivo evitar a evaporação de água utilizada na mistura do concreto. Processo este que favorece a resistência mecânica à ruptura e ao desgaste, impermeabilidade e resistência a ataques de agentes agressivos. Outro fator importante é que a cura em água reduz a retração na fase em que o concreto tem pouca resistência, por evitar a formação de fissuras de retração. Com relação ao tempo de cura, Bauer (2001) cita que, quanto mais perfeita e mais demorada for a cura, melhores serão as características obtidas no concreto.

4.2.3 Absorção de água por imersão, massa específica e índice de vazios

A Figura 14, contém os resultados do ensaio de absorção de água por imersão, realizado aos 28 dias.

Figura 13 - Absorção de água total



Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

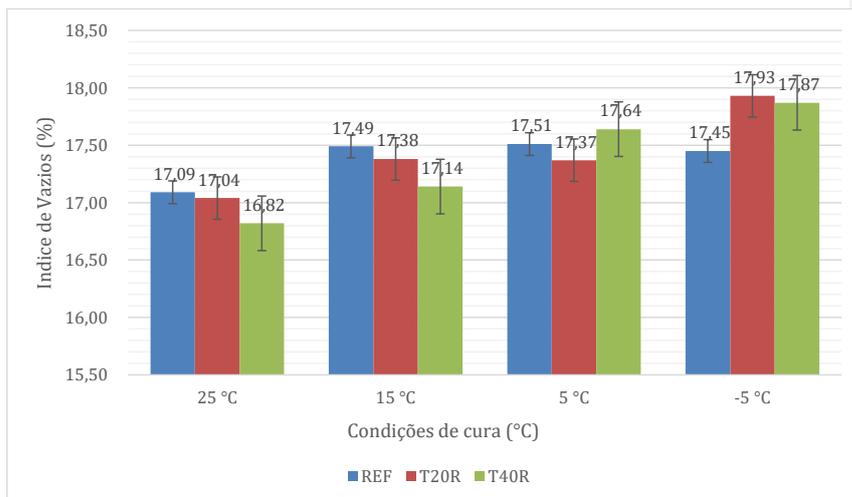
As amostras contendo agregados graúdos reciclados, quando curadas nas idades iniciais em baixas temperaturas, apresentaram um maior valor de absorção de água, como por exemplo, a amostra T20R que apresentou um aumento de 0,45%, quando comparado os valores obtidos a 25 e -5°C, já o traço REF, quando submetido a -5°C, teve um aumento de 0,16% quando comparado à temperatura de 25°C. O traço T20R e T40R, apresentaram uma constante evolução em sua absorção de água conforme expostos a temperaturas mais baixas, a maior evolução apresentada, foi no traço T40R, com um aumento de 0,55% em sua absorção de água, comparando a temperatura de 25 e -5°C.

Conforme Reis (2013), concretos que possuem em sua composição agregados reciclados tem como característica uma maior absorção de água, pois os agregados reciclados tendem a ter uma porosidade mais elevada e conseqüentemente uma melhor absorção. Segundo o autor, a absorção de água aumenta de acordo com a quantidade de agregado graúdo que é substituído.

Segundo Ulsen (2011), a porosidade influencia no aumento da taxa de absorção de água dos agregados reciclados, influencia essa que interfere nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.

Na Figura 15, estão apresentados os índices de vazios dos traços REF, T20R e T40R.

Figura 14 - Índice de Vazios



Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

O estudo do índice de vazios, nos permitiu analisar que quanto maior teor de agregados graúdos reciclados, o índice de vazios tende a aumentar quando submetido a temperaturas maiores. Com os resultados obtidos no traço T40R, houve um aumento de 1,05% no índice de vazios, em comparação dos resultados obtidos com as amostras de 25 e -5°C. O traço T20R, também apresentou um aumento no índice de vazios, em condições de cura de 25 e -5°C, representando um aumento de 0,84%. Já o traço REF, obteve seu melhor resultado quando submetido a cura na temperatura de 5°C, com um valor de 0,42% em comparação ao valor de 25°C.

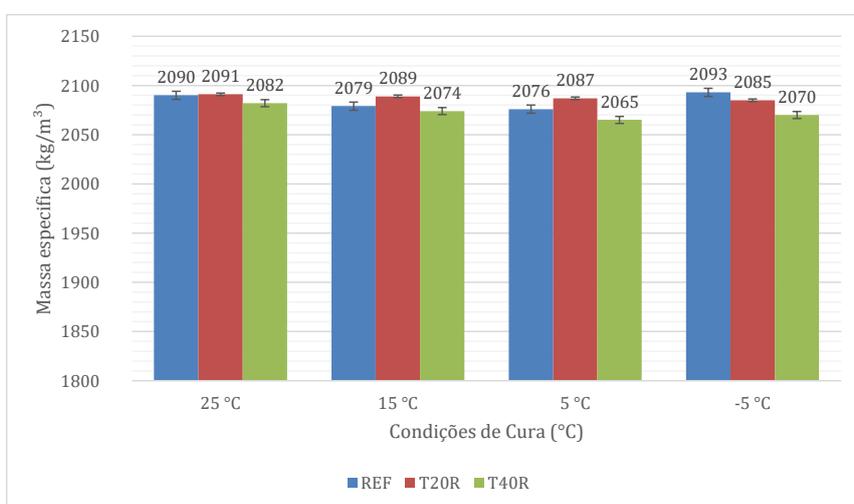
Levy (2001), observou que o índice de vazios para concretos com agregado reciclado tende a ser maior que concretos compostos por agregados naturais, isso acontece devido a forma do agregado e por ter características mais porosas que o agregado natural.

Conforme pesquisado por Fonseca (2006), o índice de vazios dos concretos produzidos com agregado reciclado obteve maiores valores em comparação com

concreto de referência, podendo ocorrer devido à massa específica menor e maior porosidade do agregado reciclado.

Analisando a Figura 16, está sendo exibido os resultados obtidos para o ensaio de massa específica das amostras, quando submetidas a diferentes condições de cura.

Figura 15 - Massa específica



Fonte - Elaborado pelo Autor (2023)

Pode ser observado na Figura 15, que em todas as condições de cura, o traço T40R apresentou menores valores que os demais, também representando o menor valor, quando submetido a 5°C com uma redução de 17 kg/m³ em comparação ao valor obtido com temperatura de 25°C. O traço T20R, apresentou uma redução gradativa conforme a temperatura de cura inicial, no entanto, sua variação foi de 6 kg/m³, quando comparadas as temperaturas de 25 e -5°C. De forma geral os resultados para essa característica em ambas as temperaturas e traços estão muito próximos, pois o maior valor encontrado para o menor temos somente uma diferença de 1,3%.

Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2020), a classificação do concreto varia de acordo com a sua massa específica, ou seja, ele pode ser classificado como concreto normal, concreto leve e concreto pesado ou denso. O concreto em estudo nesta

pesquisa foi classificado como concreto normal, permanecendo dentro da faixa de 2000 a 2800 kg/m³.

Em uma tese publicada por Gonçalves (2001), o autor utilizou agregados reciclados e observou que os traços com agregado graúdo reciclado têm uma menor massa específica, permitindo a ele concluir que estes resultados já eram esperados, devido ao aumento da substituição do material ser acompanhado pela diminuição da densidade do concreto. Esta diminuição ocorre devido a densidade do agregado graúdo reciclado ser menor que o agregado graúdo natural, mas isso não pode ser constatado nesta pesquisa.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio deste estudo, foi possível analisar e avaliar a substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados em diferentes temperaturas de cura inicial, demonstrando que o concreto frente a evolução de resistência à compressão, quando utilizado teores de substituição de 20% do agregado graúdo natural, apresentou melhores desempenhos, ressaltando que a substituição de 20% do agregado graúdo natural, equivale a cerca de 10% da massa total da mistura. Substituição esta que atende a NBR 15116 (ABNT, 2021), que permite a substituição de 20% da massa total da mistura por agregados reciclados, bem como a utilização deste concreto em uso estrutural. De uma forma mais detalhada, se conclui que:

- Com relação ao comportamento do concreto no estado fresco:

Analisando a utilização de agregados graúdos reciclados, notamos que com o aumento do teor de agregados graúdos reciclados com uma pré-molhagem, houve uma redução na relação água/cimento, ou seja, não houve necessidade de utilizar toda a água do traço de REF para chegar no abatimento esperado.

Diante da análise da massa específica do concreto no estado fresco, foi possível notar que a substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados, os resultados mantiveram-se iguais em todas as amostras.

- Com relação ao comportamento do concreto no estado endurecido:

Considerando os ensaios de resistência à compressão, foi possível notar que os traços contendo uma substituição de 20% de agregado graúdo reutilizado apresentou um melhor desempenho nos ensaios de 7 e 28 dias. Quanto a temperatura de cura, os concretos curados a 25 e 15°C apresentaram uma evolução na resistência, permitindo que alcancem uma resistência próxima de 30 MPa em seus primeiros 7 dias de cura, quando submetidos a temperatura de 5 e -5°C essa resistência foi atingida apenas aos 28 dias de cura.

Observando os resultados do ensaio de resistência à compressão diametral, o traço T20R na maioria das temperaturas apresentou uma maior resistência, apenas

quando curado à -5°C, apresentou uma resistência inferior ao traço REF, o traço T40R, manteve valores similares ao traço REF.

Para o ensaio de absorção de água total, índice de vazios e massa específica verifica-se que a absorção de água foi maior quando substituído agregado graúdo natural por agregado graúdo reutilizado. Também é possível observar que o índice de vazios e a massa específica apresentaram uma pequena variação em seus valores, sendo maiores que o traço REF quando substituído 20% do agregado graúdo natural e valores inferiores ao traço REF, quando substituído 40% do agregado graúdo. Fato este que pode ter ocorrido devido as formas irregulares dos agregados gerados durante o processo de trituração do material de origem.

Através dos ensaios realizados e seus resultados, o traço T20R apresentou os melhores resultados no decorrer da pesquisa, cujo traço, pode também ser utilizado para elaborações de concreto para uso estrutural, devido ao teor de substituição ser inferior a 20% do total da massa total. O comportamento do concreto quando T20R, demonstrou melhor desempenho quando submetido a diferentes temperaturas, incluindo sua considerável evolução aos 28 dias a condição de cura em temperaturas de 5 e -5°C. O desenvolvimento deste concreto permite o aproveitamento de outros concretos gerados por processos de desconstrução, após a trituração do material, o que causa uma redução no impacto ambiental, pois não haverá a necessidade de descarte deste material e sim o seu reaproveitamento.

5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer da pesquisa identificou-se alguns assuntos que poderiam ser mais bem aprofundados, com o intuito de entender o comportamento do agregado graúdo reutilizado. Sendo assim, seguem algumas sugestões que podem ser aplicadas em projetos de pesquisa de trabalhos futuros:

- a) Efeitos da cura tardia em concretos com agregados reciclados;
- b) Analisar os efeitos de hidratação lenta em concretos com agregados miúdos reciclados;
- c) Utilização de agregados com Fck menores que o traço de referência.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 23: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 30: **Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 46: **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: **Agregados para concreto-especificação.** ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais-Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados**, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos, determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9833: **Concreto fresco, determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655: **Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2022.

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**. ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-1: **Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. 2017.

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

ALMEIDA, F. A., et al. (2016). **Influência da forma dos agregados no abatimento do concreto**. Revista Materiais e Estruturas, 1(1), 21-26.

ANGULO, S. C. **Desenvolvimento de novos mercados para a reciclagem massiva de RCD**. In: **Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 2002a**. São Paulo. Proceedings. São Paulo: IBRACON/IPEN, 2002a. p. 293-307.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento dos concretos**. 2005. 149 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANKA ILC; GORAN TURK; FRANCI KAVCIC; GREGOR TRTNIK. **New numerical procedure for the prediction of temperature development in early age concrete structures**. USAL: Elsevier, 2009.

ARAÚJO, R.C.L.; RODRIGUES, L.H.V.; FREITAS, E.G.A. **Materiais de construção**. Rio de Janeiro, 2000. Apostila.

AZAÑEDO, W.H.M., HELARD, C.H., MUÑOZ, R.G.V., **Diseño de mezcla de concreto poroso con agregados de la cantera La Victoria, cemento pórtland tipo i con adición de tiras de plástico, y su aplicación en pavimentos rígidos**, en la Ciudad de Cajamarca, Universidade Nacional de Cajamarca, 2007

BICCA, Ismael da Silva. **Estudo da viabilidade do rejeito cerâmico, como agregado graúdo, na produção de concreto com características estruturais**. 2000. 86 p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BRIGHI NETO, C. **A importância dos conceitos tecnológicos na seleção de agregados para argamassas e concretos**. ANEPAC – Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil. Revista Areia e Brita N° 12. Out, nov, dez 2000.

CASTRO, A.L., PANDOLFELLI, V.C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Cerâmica 55 (2009) 18-32.

CASTRO, A. L., **“A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional”**, Cerâmica, v. 57, n. 341, 2011.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: PINI, 1988. 522 p;

CECCONELLO, V.; TUTIKIAN, B. A influência das Baixas Temperaturas na Evolução das Resistências do Concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 68-83, 2012.

CHAKRABORTY, A. K., DUTTA, S. C., “**Study on silica fume modified mortar with various Indian cements cured at different temperatures**”, *Building Environment*, v. 36, pp. 375–82, 2001.

CUCHIERATO, G.; SBRIGHI NETO, C. QUITETE, E.B. **A revisão das normas ABNT de agregados: NBR 7211 e NBR 9935 – quais as alterações nas terminologias e especificações para os finos de pedreiras**. In: II SUFFIB – Seminário: O Uso da Fração Fina da Britagem, São Paulo, 2005. Anais. Eds. Cuchierato et al.

DE JUAN, M. S.; GUTIERREZ, P. A. **Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate**. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 2, p. 872-877, 2009.

DE MELO SILVA, Guilherme Tavares et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 46883-46896, 2020

DE CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, Victor Carlos. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. *Cerâmica*, v. 55, p. 18-32, 2009.

ERDOĞAN, SİNAN T.; FOWLER, DAVID W. ADDING MICROFINES TO THE VIRTUAL CEMENT AND CONCRETE TESTING LABORATORY.

Feng, D.; Yi, J.; Wang, D.; Chen, L. **Impacto dos ciclos de sal e congelamento-descongelamento no desempenho de misturas asfálticas na região costeira congelada da China**. *Frio Reg. ciência Tecnol.* 2010, 62, 34–41

GRAÇA, Newton Goulart; BITTENCOURT, Rubens Machado; SANTOS, Sergio Botassi dos. **Efeitos da temperatura sobre o concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2005

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho. Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap**, v. 36, 2011.

KHALIQ, W.; EHSAN, M. B. **Crack healing in concrete using various bio influenced selfhealing techniques. Construction and Building Materials**, v. 102, n. January 2016, p. 349–357, 2016.

KHALOO, Ali R. **Properties of concrete using crushed clinker brick as coarse aggregate. ACI Materials Journal**, [S.l.], v. 91, n. 2, p. 401-409, 1994.

KRAAI, P. P., “**A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete**”, **Concrete Construction**, v. 30, n. 9, pp. 775-778, 1985.

LINTZ, R. C. C. et al. **Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 5, p. 166-181, 2012.

LI, Gengying et al. **Properties of rubberized concrete modified by using silane coupling agent and carboxylated SBR. Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 797-807, 2016.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. **Concrete: structure, properties, and methods. 2ª Ed.** Prentice Hall, New Jersey, 1992.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. **Concreto: microestrutura propriedades e materiais. 3ª Ed.** Ibracon, São Paulo, 2008.

MOURA, Washington Almeida. **Utilização de escória de cobre como adição e como agregado miúdo para concreto.** Porto Alegre, 2000.

MONTIJA, Fernando Celotto. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto. Dissertação de mestrado em engenharia de construção civil e urbana**, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto.** Bookman Editora, 2013.

NEVILLE, Adam Mathew. **Propriedades do Concreto. Tradução: Salvador E. Giamusso**, 2 ed. rev. Atual, São Paulo: Ed. PINI, 1997.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas - princípios básicos e aplicações em processamento cerâmico**. Fazenda Arte Editorial, 2000.

OSPINA, C. M. M, ERAZO, C. H. B. **Resistência mecánica y condiciones de obra del concreto poroso en los pavimentos según El tipo de granulometría**. Medellín, 2007

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V. Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R): An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 11, p. 1773-1779, 1999.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do Concreto e Projeto de Edifícios: Apostila de Aula. (Graduação) - Curso de Engenharia Civil**, Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

POWERS, Treval C.; HELMUTH, R. A. **Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing**. In: **Highway research board proceedings**. 1953.

PEREIRA, Valdir Moraes. **Permeabilidade ao Ar do Concreto**, UNICAMP, Campinas, 2011

POON, C.S.; Chan, D. (2006) **Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base**. **Construction and Building Materials**, v.20, p. 578–585.

POWERS, T. C., HELMUTH, R. A., “**Theory of volume changes in hardened Portlandcement past during freezing**”, **Proceedings Highway Research Board**, v. 32, p. 285-297, 1953.

REIS, N.; BRITO, J.; CORREIA, J. R.; ARRUDA, M. R. **Punching behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates**. **Engineering Structures**, v. 100, p. 238-248, 2015.

REGINATO, L. A., FOIATO, M., PIOVESAN A. Z. **Avaliação da resistência à compressão do concreto curado em baixa temperatura.** UNOESC & Ciência ACET. V.4, n.2 (2013).

RODRÍGUEZ, Exequiel et al. **Characterization of composites based on natural and glass fibers obtained by vacuum infusion.** *Journal of composite materials*, v. 39, n. 3, p. 265-282, 2005. MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo JM. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** McGraw-Hill Education, 2014.

SILVA, J. C., et al. (2018). **Estudo da influência da granulometria dos agregados no abatimento do concreto.** In: Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, São Paulo.

SOBRAL, Hernani Sávio. **Propriedades do concreto fresco. 5.ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2000. 32p. (ET-15)**

SOUZA, Karen Nunes de et al. **Um método de medição do grau de saturação em estruturas de concreto.** 2005.

SORIANO, L., MONZÓ, J., BONILLA, M., et al., **“Effect of pozzolans on the hydration process of Portland cement cured at low temperatures”**, *Cement & Concrete Composites*, No. 42, pp. 41–48, 2013.

TOPÇU, B.I.; SENDEL S. **Properties of concretes produced with waste concrete aggregate.** *Cement and Concrete Research*, v.34, p. 1307-1312, 2004

ULSEN, C.; KAHN, H.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição (RCD).** *Brasil Mineral*, n. 242, p. 154-162, 2005.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKEK, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C. **Separability studies of construction and demolition waste recycled sand.** *Waste Management*, n. 0,

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKEK, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. **Production of recycled sand from construction and demolition waste.** *Construction and Building Materials*, v. 40, n. 0, p. 1168-1173, 2012.

Weidmann, Denis Fernandes. **Contribuição Ao Estudo Da Influência Da Forma E Da Composição Granulométrica De Agregados Miúdos De Britagem Nas Propriedades Do Concreto De Cimento Portland**, Florianópolis, 2008.