

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUIS HENRIQUE NASCIMENTO CAVALCANTE

Estudo sobre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado

Maceió
2022

LUIS HENRIQUE NASCIMENTO CAVALCANTE

Estudo sobre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Karoline Alves de Melo
Moraes

Maceió

2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

C376e Cavalcante, Luis Henrique Nascimento.
Estudo sobre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado / Luis Henrique Nascimento Cavalcante. – Maceió, 2022.
75 f. : il., grafs. e tabs. color.

Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 70-75.

1. Agregados (Materiais de construção) - Reciclados. 2. Concreto. 3.
Resistência à compressão. I. Título.

CDU: 693.54/.56:620.178.32(813.5)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as graças concedidas até aqui, principalmente pela saúde e força, pois assim pude ter condições para seguir em frente e alcançar meus objetivos.

Agradeço a toda minha família, que esteve sempre presente, com apoio, incentivo e conselhos enriquecedores perante às minhas escolhas. Em especial à minha mãe Renadi e ao Pedro, que compartilharam comigo o cotidiano dessa jornada chamada “UFAL”. Desde as idas e vindas, até os longos meses sem encontrar o restante dos familiares.

Agradeço a Ariany França, que esteve comigo em praticamente toda a minha graduação e dessa forma pude dividir com ela inúmeras etapas da minha vida. Obrigado por todos os conselhos, apoio, auxílios, risadas, ideias, eventos, festas e por todos os momentos compartilhados dentro e fora da universidade.

Agradeço a todos os meus amigos que estiveram comigo durante esses anos de graduação, dividindo as apreensões, medos e, especialmente, às alegrias, que foram muitas. Um agradecimento em especial ao Arthur, Diana, Diogo, Luca, Mateus, Milton e Rayanne, com os quais pude dividir todas as expectativas e cargas, desde o início, até a reta final do curso. The Best Group em inúmeros aspectos e disciplinas.

Agradeço ao PET Civil e a todos os egressos e atuais participantes do grupo pelo companheirismo. Obrigado às gerações que me acolheram, assim como às que eu pude acolher, aprendi e continuo aprendendo muito com cada um de vocês, é esta pluralidade que deixa o grupo ainda mais alegre e vivo. Destaco o agradecimento ao Christian, Gabi, Freitas, Mari e Zé, os beibes. Em especial, agradeço a Diana, Mateus e Rayanne, que juntos a mim, constituímos a melhor geração que esse grupo já teve, indiscutivelmente.

Agradeço a Prof^ª. Karoline Melo por todos os conselhos, pelo apoio, paciência, incentivo, confiança, parceria e por todo o amor e dedicação que a Sra. coloca em tudo que faz, isso é essencial. Professora, tutora, orientadora, amiga, enfim, agradeço por compartilharmos tantos momentos. Um obrigado ao Joaquim, pela parceria e compreensão para conosco do PET.

Agradeço a Prof^ª. Cássia Vanessa e ao Everton Luiz por aceitarem compor a banca, assim como ao Jorge Luis, que esteve junto a mim em todos os experimentos e pesquisas. Vocês contribuíram da melhor forma para o meu crescimento pessoal e profissional.

Por fim, agradeço a todos os professores, demais funcionários do Centro de Tecnologia (CTEC) e do LEMA pelo empenho e por toda a contribuição para com a nossa formação. Todos foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

CAVALCANTE, L. H. N. Estudo sobre a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado. Plano do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2022.

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo, e no Brasil tal cenário não é diferente, uma vez que a maioria das construções corrobora para tal fato. Vale ressaltar, quanto à sua composição, a utilização dos materiais granulares naturais (agregados graúdo e miúdo) que representam uma parcela de cerca de 75% do volume de concreto produzido. Sob essa ótica, frente à demanda extrativista mineral crescente, soluções alternativas para o reuso dos materiais foram propostas com o objetivo de minimizar os impactos ambientais provenientes da extração, beneficiamento e transporte dos agregados naturais, assim como dos resíduos gerados pela construção civil (RCC). Destarte, o presente trabalho teve como objetivo analisar os agregados reciclados, assim como, estudar sua influência na resistência à compressão de concretos convencionais, a partir dos resultados dos ensaios que envolveram desde a caracterização dos agregados, até análises dos estados fresco e endurecido do concreto com agregados reciclados de concreto (ARCO). As dimensões máximas características dos agregados miúdo e graúdo foram, respectivamente, 4,75 mm e 12,5 mm, obtidas a partir da passagem pelos britadores de mandíbulas e de martelos. Os agregados reciclados apresentaram massa específica menor e absorção de água maior que os agregados naturais. Foram produzidas 3 misturas com diferentes percentuais de substituição do agregado natural. A mistura controle foi produzida com 100% de agregados miúdo e graúdo naturais, as demais, substituindo 50% e 100% de ambos pelo ARCO. No que concerne à produção das misturas, foi utilizado o método proposto pela ABCP com resistência alvo de 20MPa. Os agregados reciclados passaram por pré-molhagem durante 15 minutos, como forma de atenuar a sua elevada absorção de água. Foram moldados 15 corpos de prova destinados ao ensaio de resistência à compressão para as idades de 7, 14 e 28 dias. Dos resultados do ensaio de consistência, índice de vazios e absorção de água, todas as misturas obtiveram valores elevados. Ademais, dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias, a mistura com 100% de agregado natural atingiu 27,55 MPa, não obstante, a mistura produzida com 50% de agregados reciclados apresentou resultado de 24,38 MPa, acima do valor alvo. Apenas a mistura com 100% de ARCO não atingiu o valor alvo, obtendo 18,31 MPa. Os resultados demonstraram o potencial da utilização do ARCO no que concerne à utilização para fins estruturais, embora a norma regulamentadora vigente limite a substituição do agregado natural em apenas 20%.

Palavra-Chave: Agregado Reciclado. Concreto. Resistência à Compressão.

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in the world, and in Brazil, this scenario is no different, since most constructions corroborate this fact. It is worth noting, as regards its composition, the use of natural granular materials (coarse and fine aggregates) which represent a portion of approximately 75% of the volume of concrete produced. From this perspective, because of the growing mineral extractive demand, alternative solutions for the reuse of materials have been proposed to minimize the environmental impacts arising from the extraction, processing, and transport of natural aggregates, as well as waste generated by civil construction (RCC). Thus, the present work aimed to analyze the recycled aggregates, as well as to study their influence on the compressive strength of conventional concrete, from the results of the tests that involved the characterization of the aggregates to the analysis of the fresh and hardened states of the concrete. with recycled concrete aggregates (ARC). The maximum characteristic dimensions of the fine and coarse aggregates were, respectively, 4.75 mm and 12.5 mm, obtained from the passage through the jaw and hammer crushers. Recycled aggregates had lower specific mass and higher water absorption than natural aggregates. 3 mixtures were produced with different percentages of replacement of the natural aggregate. The control mixture was produced with 100% fine and coarse natural aggregates, the others replacing 50% and 100% of both with ARCO. Concerning the production of mixtures, the method proposed by ABCP was used with a target strength of 20MPa. The recycled aggregates underwent pre-wetting for 15 minutes, as a way of mitigating their high water absorption. Fifteen specimens were molded for the compressive strength test for the ages of 7, 14, and 28 days. From the results of the consistency test, voids index, and water absorption, all mixtures obtained high values. Furthermore, from the compressive strength tests at 28 days, the mixture with 100% natural aggregate reached 27.55 MPa, however, the mixture produced with 50% recycled aggregates showed a result of 24.38 MPa, above the target value. Only the mixture with 100% ARC did not reach the target value, obtaining 18.31 MPa. The results demonstrated the potential of using ARCO in terms of use for structural purposes, although the current regulatory standard limits the replacement of natural aggregate to just 20%.

Keyword: Recycled Aggregate. Concrete. Compressive Strength.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elementos constituintes da mistura do concreto.....	17
Figura 2 - Trajetória dos esforços incidentes nas estruturas.....	18
Figura 3 – Gráfico da determinação do fator água/cimento em detrimento da resistência desejada aos 28 dias.....	22
Figura 4 - Diagrama de dosagens do concreto.	23
Figura 5 - Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à compressão uniaxial	24
Figura 6 - Testemunhos extraídos de elementos de concreto	25
Figura 7 – Curva granulométrica de uma amostra de agregado reciclado	28
Figura 8 - Agregados reciclados de concreto, cerâmico e misto	30
Figura 9 - Aderência da argamassa no agregado natural.....	31
Figura 10 - Delimitação da zona de transição formada no agregado reciclado.....	36
Figura 11 - Principais ensaios realizados nos agregados.....	39
Figura 12 - Corpos de prova moldados	42
Figura 13 - Corpos de prova imersos no tanque contendo água e cal	42
Figura 14 - Betoneira de eixo inclinado	49
Figura 15 - Etapa de pré-molhagem dos agregados	49
Figura 16 - Ensaio de massa específica do concreto	51
Figura 17 - Abatimento do tronco de cone	51
Figura 18 - Corpos de prova moldados	53
Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão	53
Figura 20 - Corpos de prova após seu rompimento.....	54
Figura 21 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural	55
Figura 22 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural.....	57
Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)	58
Figura 24 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)	59
Figura 25 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>).....	62
Figura 26 - Linhas de tendência da resistência à compressão em relação a idade das amostras	63
Figura 27 - Gráfico relacionando a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Químicas do Cimento CP II - F	40
Tabela 2 - Características Físicas do Cimento CP II - F	41
Tabela 3 - Determinação da estimativa do consumo de água da mistura.....	45
Tabela 4 - Volume compactado seco de agregado graúdo para cada metro cúbico de concreto	46
Tabela 5 - Quantitativo de materiais utilizados nas misturas	48
Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo natural	56
Tabela 7 - Características físicas do Agregado Graúdo Natural	57
Tabela 8 - Características físicas dos agregados reciclados	60
Tabela 9 – Propriedades do concreto no estado fresco.....	61
Tabela 10 - <i>Slump test</i> e resistência à compressão	65
Tabela 11 - Propriedades do concreto no estado endurecido	66
Tabela 12 - Índice de vazios e resistência à compressão.....	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação entre classe de agressividade, classe e fator água cimento do concreto... 19	19
Quadro 2 - Tipificação do ambiente de projeto e deterioração da estrutura..... 20	20
Quadro 3 - Estudos relacionando o percentual de agregado natural substituído por agregados reciclados 37	37
Quadro 4 - Condições de preparo da mistura em função do desvio padrão (Sd) 44	44

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c – Fator Água/Cimento
AGN – Agregado Graúdo Natural
 Al_2O_3 – Óxido de Alumínio
AMN – Agregado Miúdo Natural
ARCO – Agregado Reciclado de Concreto
ARCI – Agregado Reciclado de Material Cimentício
ARM – Agregado Reciclado Misto
Ca – Consumo de Água
Cag – Consumo de Agregado graúdo
Cam – Consumo de Agregado Miúdo
CaO – Óxido de Cálcio
Cc – Consumo de Cimento
CP - Corpo de Prova
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CO₂ – Dióxido de Carbono
Fck – Resistência Característica à Compressão do Concreto
Fcm – Resistência Média do Concreto
Fe₂O₃ – Óxido de Ferro (III)
g – Grama
g/cm³ - Grama por Centímetro Cúbico
kg – Quilo
LEMA - Laboratório de Estruturas e Materiais
MgO – Óxido de Magnésio
mm – Milímetro
MPa – MegaPascal
m – Metro
m³ - Metro Cúbico
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
RCC – Resíduos da Construção Civil

RDC – Resíduos de Demolição e Construção

SiO₃ – Silicato

SO₃ – Trióxido De Enxofre

Sd – Desvio Padrão das Resistências de Ensaio

% - Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Comentários iniciais	13
1.2 Objetivo	14
1.3 Justificativa	15
1.4 Estrutura do Trabalho	16
2 CONCRETO CONVENCIONAL	17
3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO	21
4 AGREGADO RECICLADO	27
5 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO	33
6 METODOLOGIA	38
6.1 Origem, caracterização e beneficiamento dos materiais	38
6.1.1 Agregados reciclados	38
6.1.2 Agregados Naturais	40
6.1.2.1 Agregado graúdo natural	40
6.1.2.2 Agregado miúdo natural	40
6.1.3 Cimento	40
6.1.4 Água	41
6.2 Ensaaios	41
6.3 Produção do concreto	42
6.3.1 Método Melo	42
6.3.2 Método ABCP	43
6.4 Procedimento de mistura	48
6.5 Ensaaios realizados para a determinação das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido	50
6.5.1 Massa Específica no estado fresco	50
6.5.2 Ensaio de consistência ou Abatimento do Tronco de Cone (<i>Slump Test</i>)	51
6.5.3 Resistência à compressão	52
7 RESULTADOS	55
7.1 Caracterização dos agregados	55
7.1.1 Agregado Miúdo Natural (AMN)	55
7.1.2 Agregado Graúdo Natural (AGN)	56
7.1.3 Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC)	58

7.1.4 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC)	59
7.2 Análises dos concretos produzidos	61
7.2.1 Resistência à Compressão	62
8 CONCLUSÃO	68
8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 Comentários iniciais

Presente nos mais diversos canteiros de obra, o concreto pode ser discretizado como sendo uma mistura de aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Por sua simplicidade, tal mistura ganhou espaço no mercado devido ao seu desempenho quanto à resistência à compressão, sendo amplamente empregado em elementos estruturais, principalmente quando associado ao aço, o que garante características que promovem um melhor desempenho frente aos mais variados esforços.

Sob essa ótica, a resistência à compressão se trata de uma propriedade inerente à qualidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994) e indica o quão resistente ante às tensões ele é, principalmente no âmbito das peças estruturais destinadas a essa função, seja ela um pilar, viga, laje, elementos da fundação etc. Sobretudo, a resistência à compressão do concreto é um parâmetro fundamental para a construção civil, uma vez que possibilita corroborar com aspectos como a funcionalidade, durabilidade e segurança (VIEIRA FILHO, 2007). Ademais, cabe ao entendimento que sua dosagem, assim como a qualidade dos materiais constituintes da mistura, são fatores preponderantes para a qualidade do concreto, como afirmam Kouli e Ftikos (1998, *apud* ISAIA, 2005).

Ainda no âmbito dos materiais constituintes, pode-se citar os agregados miúdos e graúdos, que correspondem a cerca de 75% do traço e se destacam por sua relevância para a mistura. A princípio, esses eram adicionados à pasta cimentícia a fim de reduzir o consumo de cimento, conseqüentemente o custo, e também para tornar a mistura mais estável. Com o avanço das pesquisas sobre o tema, novas características dos agregados garantiram um papel fundamental (CARLETE, 2017) na composição do concreto. Hodiernamente, sabe-se que a presença dos agregados influencia diretamente no auxílio à transmissão das tensões aplicadas ao concreto, reduz o efeito da retração, corrobora para um menor índice de vazios, um maior travamento das partículas, assim como afeta a resistência à compressão (ANGULO *et al.*, 2004).

No entanto, ao passo que o concreto é protagonista como uma das misturas mais utilizadas no mundo, é preocupante ver sua demanda manter-se estável (ANEPAC, 2022), quando não, crescente, visto que em sua composição apresentam-se matérias-primas que

tornam-se cada vez mais escassas devido ao extrativismo desenfreado, o que pode ser maléfico diante das políticas de sustentabilidade atuais.

Uma das alternativas adotadas para solucionar essa problemática é a substituição parcial do agregado natural pelo agregado reciclado provindo de resíduos de demolição de construções. Isso, além de sanar o problema da destinação dos resíduos da construção civil, também oferece uma opção de solução ambientalmente sustentável para as novas construções. Muitos estudos mostram que os resíduos de demolição e construção (RDC) representam 30% a 50% do total de resíduos gerados no planeta, e esta quantidade está aumentando a cada ano, como citam (QIANZHAN, 2019; KIM, 2021; YANG, 2017).

Contudo, há de se atentar ao fato de que algumas características dos agregados reciclados diferem das presentes nos agregados naturais, o que influi diretamente no comportamento do concreto (BAUER, 2008; ISAIA, 2007). Percebe-se, em relação aos agregados naturais, que os agregados reciclados possuem uma maior porosidade e absorção de água, menor densidade, maior variabilidade da sua composição e irregularidade do formato, assim como a diminuição significativa na resistência a esforços e à abrasão. Por sua vez, conforme citam Mehta e Monteiro (2014), o produto final também é afetado pela utilização dos agregados reciclados, indicado, por exemplo, pelo decréscimo da consistência e da resistência à compressão, quando submetido aos respectivos ensaios.

Sob esse viés, estudar a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado torna-se relevante para que este seja usado de forma mais ampla e confiável, em conformidade com as normas vigentes. Nesse contexto, o presente trabalho visa contribuir para a ampliação do conhecimento sobre o tema e fornecer dados que auxiliem na geração de modelos de previsibilidade nos resultados no que concerne o uso do concreto com agregado reciclado.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado oriundo da cominuição de corpos de prova de concreto.

Ademais, tem-se como objetivo específico:

- Obter parâmetros de dosagem de concretos com uso de agregados reciclados para fins de produções futuras.

1.3 Justificativa

Nas últimas décadas, pesquisas teóricas e experimentais, como as realizadas por Fonseca (2006), Angulo (2000), Miranda (2000), Leite (2001), Frotte *et al.* (2017) etc., evidenciaram a necessidade e contribuíram com a ampliação da compreensão acerca da utilização dos agregados reciclados em argamassas e concretos. Tais pesquisas têm a finalidade de analisar a viabilidade da sua utilização, assim como a sua interação com os demais materiais, possibilitando ampliar os limites quanto à resistência à compressão, segurança, durabilidade e, por conseguinte, o espectro de utilização do concreto com tais agregados.

Vale ressaltar que, devido à baixa resistência apresentada pelos concretos com agregados reciclados, seu campo de aplicação, por vezes, se reduz a elementos não estruturais (VIEIRA, 2015), porventura, podendo ser utilizado como camada de regularização, blocos de vedação etc. Portanto, faz-se necessário que pesquisas relacionadas ao tema sejam ampliadas para que novas técnicas sejam desenvolvidas, aprimorando os resultados obtidos e alcançando requisitos normativos.

Ademais, atrelada à enorme demanda dos recursos não-renováveis (BITTENCOURT, 2016), a construção civil apresenta-se como uma das maiores fontes geradoras de resíduos, contribuindo com milhares de toneladas descartadas anualmente. Entretanto, no Brasil, sua destinação em grande parte não é realizada de forma correta, ocasionando em problemas ao meio ambiente e gerando transtornos futuros para a população em geral.

Ainda sob esse viés, é importante frisar que, com a crescente demanda de agregados naturais, chegando a 660 milhões de toneladas em 2021 (ANEPAC, 2022), sua obtenção torna-se cada vez mais difícil, e com maiores custos de exploração e transporte, pois há a necessidade de se obter novas jazidas devido ao esgotamento das mais próximas. Dessa forma, vê-se na utilização dos agregados reciclados uma solução para tais problemáticas que se elegem recorrentes e duradouras.

Outro ponto relevante foi a atualização da NBR 15116 (ABNT, 2021a), que passou a considerar a utilização dos agregados reciclados em concretos para fins estruturais, ao passo que definiu requisitos mínimos quanto à origem, qualidade e proporção de substituição desse material em contrapartida aos agregados naturais utilizados convencionalmente. Diante do exposto, vê-se na atualização da norma supracitada uma medida de fomento à redução da

carência, ainda latente, de pesquisas nacionais no que tange a utilização dos agregados em misturas de concreto.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se organizado em oito capítulos, além das referências bibliográficas. O capítulo 1 compreende uma introdução e nele foram abordadas as considerações iniciais, justificativas, o objetivo geral, a delimitação do trabalho e a disposição dos tópicos abordados.

Os capítulos 2, 3, 4 e 5 discorrem sobre o referencial teórico do presente trabalho, contribuindo para o melhor entendimento da pesquisa a ser desenvolvida. No capítulo 2 trata-se os principais aspectos do concreto convencional, definições, propriedades, utilizações e características. Já no capítulo 3 são apresentados os conceitos referentes à resistência à compressão do concreto, normas regulamentadoras, cálculos de estimativa, fatores contribuintes etc. No capítulo 4 é abordado o agregado reciclado, sua origem, classificação, processos de obtenção e utilização. Por fim, no capítulo 5 é pautado o concreto com agregado reciclado, definições, propriedades, utilizações e características.

No capítulo 6 a metodologia aborda as práticas e conceitos que regem os processos realizados para a obtenção dos agregados e os procedimentos realizados nas misturas dos concretos em estudo. Ocorre, também, a definição dos agregados utilizados, os ensaios realizados, os procedimentos de mistura, e métodos utilizados para a análise dos resultados.

O capítulo 7 descreve os resultados e discussões, a interpretação dos resultados e gráficos obtidos através dos ensaios realizados.

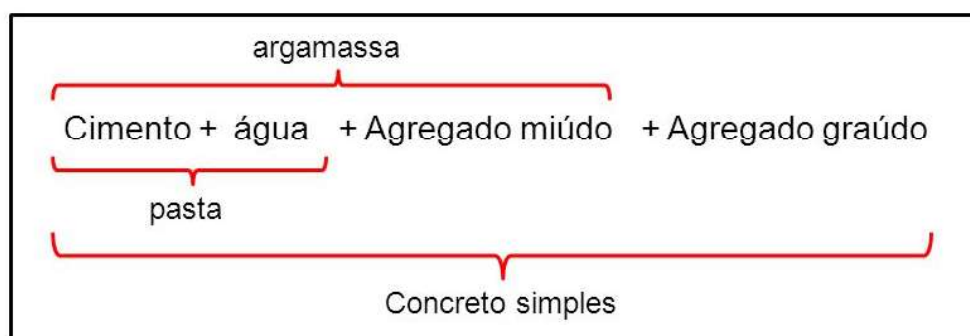
Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões do trabalho, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto convencional trata-se de um material compósito constituído por aglomerante, agregado miúdo, agregado graúdo e água (SAMANIEGO, 2014), como exposto na Figura 1. Ademais, com o fito de promover determinadas propriedades ao concreto, pode se fazer uso de adições minerais ou aditivos químicos, inseridos na mistura em proporção adequada a partir do processo de dosagem.

No Brasil, ainda há predominância de técnicas construtivas que utilizam o concreto como carro chefe, sendo o material encontrado em toda a extensão territorial do país e tendo seu uso variando desde edificações simples, até obras com alto grau de complexidade, como tece (PEDROSO, 2009). Outrossim, é válido ressaltar a notável confiabilidade do concreto, uma vez que projetos são modelados para que sua vida útil seja de, no mínimo, 50 anos, segundo a NBR 15575 (ABNT, 2021e).

Figura 1 - Elementos constituintes da mistura do concreto



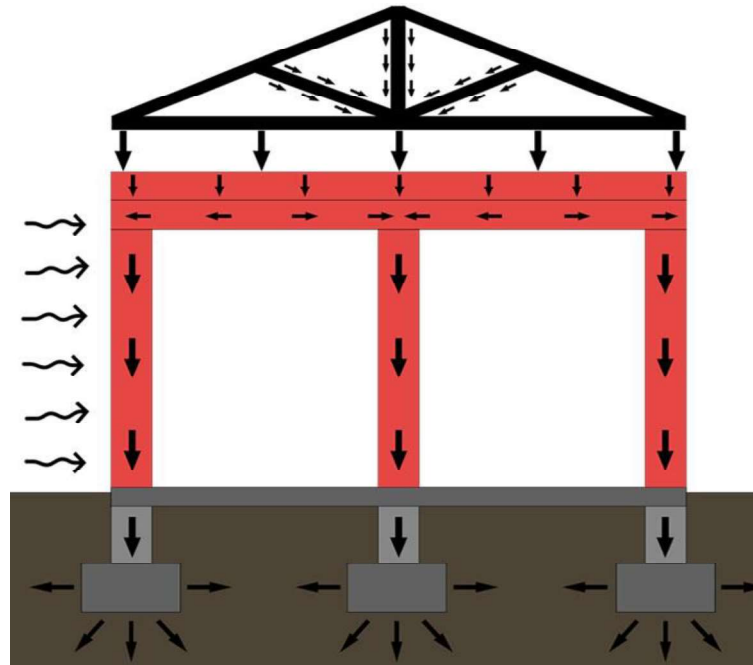
Fonte: Ribas (2015)

Apresentando-se como um material amplamente utilizado, também possui versatilidade sendo empregado desde a camada de regularização em alguns substratos, até elementos estruturais de extrema importância nas edificações. Portanto, é imprescindível que se tenha total confiabilidade quanto ao seu uso a fim de se garantir conforto e segurança aos usuários. Este material, além de ser conhecido como pedra artificial, é parte fundamental dos mais variados projetos de engenharia e um dos elementos estruturais mais utilizados no mundo (SILVA FILHO *et al.*, 2011; VIEIRA FILHO, 2007).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) se refere ao concreto estrutural como aquele que compreende a vasta gama de aplicações do concreto como material estrutural. Ou seja, empregados em elementos que possuem função de absorver os esforços solicitantes da estrutura

e são projetados para resistir e transmitir tais esforços aos demais elementos, criando assim elementos interligados que descrevem uma rota direcionada, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Trajetória dos esforços incidentes nas estruturas



Fonte: Retondo (2021)

Outrossim, é válido relacionar a qualidade do concreto frente aos requisitos destacados em norma, uma vez que, para garantir durabilidade, economia e segurança, todos os elementos necessitam atender estados limites tanto solicitantes, quanto últimos. O primeiro se refere ao uso cotidiano da edificação e o segundo, à condição de ruína dos elementos estruturais. Diante do exposto, podemos citar as seguintes condições: fissuras, deformações, flechas acentuadas, recalques, entre outros. Dessa forma, é possível obter segurança na execução e aplicação desse componente estrutural (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Sob esse viés, é visualizada de forma mais ampla a relevância que o concreto detém como uma das técnicas construtivas. Outrossim, aliado ao fato de que na grande maioria das construções ainda há a prevalência da utilização do concreto, em especial o concreto armado, são notórios seus impactos frente à construção civil, uma das indústrias que fomentam e impulsionam o crescimento do país em aspectos econômicos e sociais.

Diante dos diversos cenários, as propriedades do concreto são definidas de acordo com sua finalidade. Para o concreto estrutural são estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) os requisitos listados a seguir:

- Resistência à Compressão;
- Diagrama tensão-deformação do concreto comprimido;
- Resistência à Tração;
- Diagrama tensão-deformação do concreto tracionado;
- Módulo de Elasticidade.

Sobretudo, a NBR 6118 (ABNT, 2014) define requisitos mínimos para a utilização dos concretos, como por exemplo, o fator água cimento e as classes de resistência do concreto, que se relacionam com sua utilização, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Relação entre classe de agressividade, classe e fator água cimento do concreto

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655. ^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado. ^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: ABNT (2014)

Da mesma forma a mesma norma, traz delimitações quanto à exposição às intempéries de acordo com a região, levando em conta o macro e microclima aos quais o concreto estará exposto, como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Tipificação do ambiente de projeto e deterioração da estrutura

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: ABNT (2014)

Ainda segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), dois requisitos básicos da qualidade do concreto são: desempenho em serviço e capacidade resistente, ou seja, frente aos requisitos supracitados, as estruturas de concreto armado necessitam estar dispostas de forma a atender os requisitos de projeto, estando diretamente relacionadas com a segurança e bem-estar dos usuários.

Destarte, a criação de preceitos avaliativos que confrontem os ditos por norma e garanta sua conformidade é uma alternativa positiva e contribuinte para o arcabouço técnico da engenharia. Nesse contexto, a resistência mecânica é utilizada como o principal ou mais objetivo parâmetro isolado para avaliar a qualidade do concreto na estrutura, em específico a resistência à compressão, como cita Vieira Filho (2007). A avaliação desta resistência é realizada através de moldagem de corpos de prova, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016) ou extração de testemunhos, de acordo com a NBR 7680-1 (ABNT, 2015), seguida de ruptura sob pressão das faces paralelas, orientada pela NBR 5739 (ABNT, 2018a).

3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Atualmente como um dos materiais mais consumidos na construção civil, o concreto ganhou notoriedade e amplitude de utilização devido à sua versatilidade, facilidade de obtenção e, principalmente, por apresentar excelentes resultados frente aos esforços de compressão. Tal característica confere ao concreto confiabilidade, ao passo que se revela como um indicador para possíveis desvios quanto à homogeneidade do elemento estrutural, a natureza dos materiais constituintes da mistura, incoerências de dosagem etc., como cita Palacios (2012).

No que concerne a todas as etapas do procedimento de preparo do concreto, assim como à integridade dos materiais constituintes da mistura e o seu resultado final, todas as etapas e fatores envolvidos necessitam ser analisados. Em especial, o tipo de cimento, a quantidade de água, assim como a escolha dos agregados, representam etapas de suma importância para a análise e obtenção da resistência desejada. Neville e Brooks (2013) dissertam sobre a influência do fator água/cimento como um dos principais contribuintes, da mesma forma que o relaciona com outros aspectos como a porosidade, formato dos agregados, interação com a pasta de cimento e, por fim, a aplicação prática da Lei de Abrams (ABRAMS, 1918).

A Lei de Abrams foi publicada em 1918 por Duff A. Abrams, do qual estima-se que foram realizados mais de 50.000 ensaios em ambiente laboratorial para se chegar ao resultado final, que é a relação do fator água/cimento com a resistência do concreto aos 28 dias, levando-se em conta, também, a natureza dos materiais utilizados na mistura. Uma das conclusões obtidas é a forma como a resistência física do concreto apresenta variações na razão inversamente proporcional da relação água-cimento. Tal relação pode ser descrita a partir equação (1).

$$F_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (1)$$

Onde:

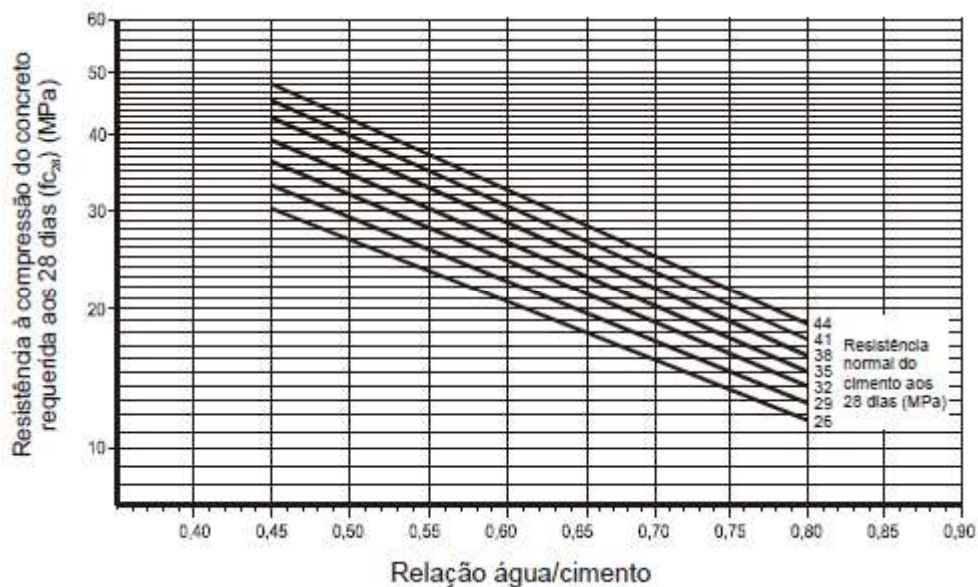
F_{cj} : resistência característica do concreto aos 28 dias;

k_1 e k_2 são constantes empíricas que dependem das características dos materiais;

a/c : fator água cimento.

Em 1983, a ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland, fazendo uso dos dados obtidos por Abrams, publicou uma demonstração gráfica das relações já mencionadas, correlacionando com as resistências normais dos cimentos comercializados, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Gráfico da determinação do fator água/cimento em detrimento da resistência desejada aos 28 dias



Fonte: Rodrigues (1998)

Outras relações ao longo do tempo também foram sendo estudadas, dentre as mais utilizadas encontra-se a Lei de Lyse, proposta por Inge Lyse, que estabelece a relação entre a quantidade de massa seca no concreto, ou seja, agregados e cimento, e o fator água cimento, como descreve a equação (2).

$$m = k_1 + k_2 \times a/c \quad (2)$$

Onde:

m : é a massa dos materiais secos (agregados miúdo e graúdo e cimento);

k_1 e k_2 são constantes empíricas determinadas em laboratório e intrínsecas aos materiais utilizados;

a/c : fator água/cimento.

Ademais, pode se citar, também, a Lei de Molinari, que correlaciona a quantidade de agregado, com a estimativa do valor da consistência definido para o concreto e o consumo de cimento da mistura, como descreve a seguinte equação (3):

$$C = \frac{1000}{k_1 + k_2 \times m} \quad (3)$$

Onde

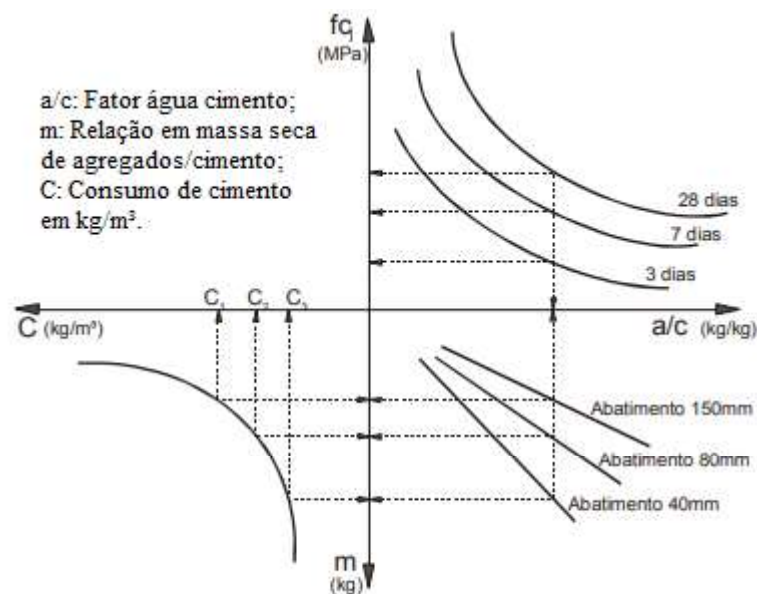
C: é o consumo de cimento da mistura;

m: é a massa dos materiais secos (agregados miúdo e graúdo e cimento);

k1 e k2 são constantes empíricas determinadas em laboratório e intrínsecas aos materiais utilizados.

Uma maneira de condensar as informações propostas pelas três leis e facilitar a obtenção de parâmetros de dosagem é o ábaco ou diagrama de dosagem de concretos de cimento Portland, mostrado na Figura 4, que tem por função facilitar a visualização e obtenção de parâmetros iniciais do processo de dosagem visando a garantia de resultados satisfatórios à qualidade das misturas e o alcance dos requisitos predispostos.

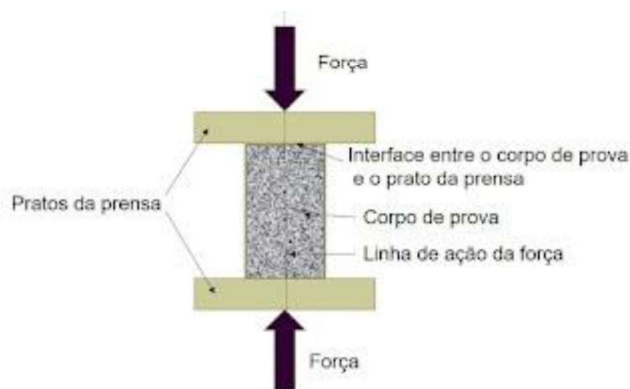
Figura 4 - Diagrama de dosagens do concreto.



Fonte: HELENE; TERZIAN, 1992, adaptado.

Destarte, saindo do campo teórico das estimativas, um dos métodos utilizados para avaliar a resistência à compressão do concreto, é através do ensaio uniaxial, regido pela NBR 5739 (ABNT, 2018a), o qual consiste na aplicação de uma carga compressiva progressiva e controlada nas amostras do concreto (corpos de prova e/ou testemunhos), na extensão do seu eixo longitudinal, como mostra a Figura 5. Tal ensaio pode ser realizado para diversos outros materiais e é amplamente utilizado no âmbito da construção civil.

Figura 5 - Esquema ilustrativo do ensaio de resistência à compressão uniaxial



Fonte: Alcantara (2018)

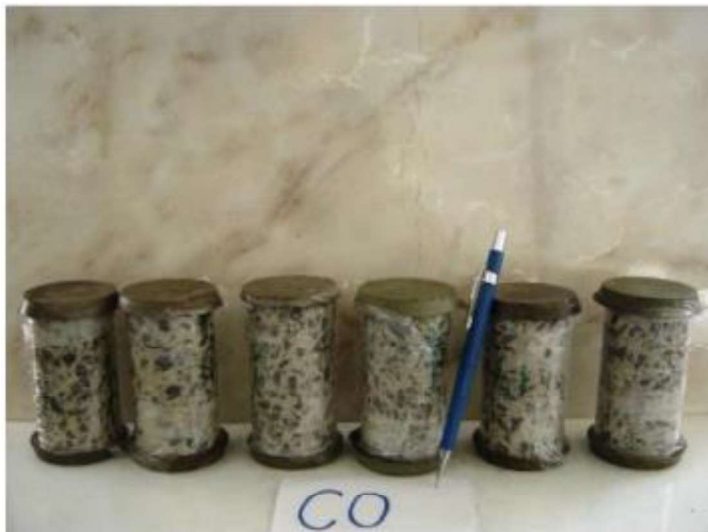
O valor da resistência à compressão qualifica o concreto em relação à resistência mecânica, mas se revela um fator imprescindível desde o projeto até a concepção do empreendimento, uma vez que, quase que indiretamente, garante outros aspectos importantes no âmbito da construção civil, dos quais pode se citar: segurança estrutural, impermeabilidade, estética, durabilidade etc. Outrossim, por sua resistência estar intimamente relacionada com a qualidade da pasta de cimento, que envolve os agregados e preenche o molde, uma boa resistência à compressão confere qualidade e permite inferir uma ótima avaliação do canteiro de obras e da construção civil como um todo (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Atualmente, a forma mais comumente utilizada para se avaliar a resistência à compressão dos concretos produzidos é por meio da moldagem, cura e rompimento de corpos de prova (ESCOBAR; ANDREOTTI; FABRO, 2011). Estes são moldados no ato da entrega do concreto, quando usinado nas concreteiras, ou imediatamente após o procedimento de mistura, quando feito *in loco*, e se torna etapa de alta relevância para o controle tecnológico, de qualidade e gerenciamento da obra.

O método tradicional apresenta procedimentos de moldagem e cura padronizados, já que normalmente são realizados e/ou armazenados em ambientes laboratoriais, por órgãos competentes. Os ensaios comumente realizados para a determinação e comprovação da resistência característica do concreto utilizado, necessitam de corpos de prova moldados a partir de amostras retiradas da mistura, logo em seguida ao recebimento do concreto, que pode ser usinado, assim como produzido *in loco*. Tais procedimentos prévios aos ensaios cumprem os requisitos descritos nas normas NBR 5738 (ABNT, 2016) e NBR 5739 (ABNT, 2018a). Tais ensaios visam atestar a qualidade e confiabilidade do concreto frente às condições de solicitações, sendo mais frequentemente utilizados quando comparados aos ensaios destrutivos.

Além dos ensaios tratados em primeiro plano, podem ser realizados os chamados ensaios destrutivos, os quais necessitam da retirada de testemunhos dos elementos já concretados (Figura 6), expressando resultados mais precisos, no entanto apresentando custo elevado e riscos ao elemento exposto ao processo (NEVILLE, 1993, MEHTA; MONTEIRO 2006).

Figura 6 - Testemunhos extraídos de elementos de concreto



Fonte: Castro (2019)

Sob esse viés, vale ressaltar as relações que podem ser inferidas a partir dos valores de resistência à compressão obtidos, pois tais resultados são atrelados a características íntimas ao concreto, como por exemplo, a porosidade e índice de vazios, como cita Ahmad (1994). Desta forma, abre-se um leque de interpretações que evidenciam desde a maneira como os processos da produção do concreto foram conduzidos, à fatores inerentes às reações químicas oriundas do

processo de hidratação, até possíveis causas para manifestações patológicas que venham a surgir.

Ainda se tratando do assunto, fica clara a vasta gama de aspectos que apresentam potencial de afetar diretamente a variabilidade da qualidade do concreto. Todo o seu controle tecnológico, partindo do projeto e execução, até o fim do seu ciclo de vida, deve ser criterioso, obedecendo os padrões normativos e medidas de segurança.

Para tal, a NBR 12655 (ABNT, 2022) define os requisitos mínimos quanto à produção do concreto, recebimento, aceitação, visando garantir o padrão de qualidade necessário à mistura, assim como às peças a serem moldadas. Ademais, a NBR 6118 (ABNT, 2014) sugere delimitações no que tange aos valores de resistência à compressão mínimos para os respectivos usos, outrossim na inserção de coeficientes de minoração que agem de forma a suprimir quaisquer desvios, visto que as condições *in loco* elevam a probabilidade de intercorrências.

Evidencia-se, portanto, que o valor da resistência à compressão do concreto obtido através dos ensaios se traduz como um valor referência ante ao disposto no dimensionamento e conferido aos elementos estruturais, como tece Helene (1980).

4 AGREGADO RECICLADO

Em sua definição geral, os agregados são conceituados como materiais particulados ou granulares com característica de serem inertes quimicamente e não coesivos e podem ser classificados de acordo com sua origem (natural ou artificial), sua dimensão (miúdo e graúdo) e por sua densidade (BAUER, 2008; ABNT, 2011). No caso dos agregados reciclados, a NBR 15116 (ABNT, 2021a) delimita alguns aspectos quanto à sua origem e classificação. Respectivamente, estes podem ser obtidos a partir do beneficiamento de resíduos da construção civil (RCC), e distribuídos, segundo o CONAMA, em quatro classes de agregados: A, B, C e D. Ademais, no caso da utilização para fins estruturais, a norma recomenda apenas o uso de agregados pertencentes à classe A.

De maneira detalhada, os RCC podem ser originados das várias etapas constituintes da execução de um empreendimento, das quais se pode citar: preparação e escavação de terrenos, construções, reformas, reparos e demolições de obras da construção civil (BRASIL, 2011). No tocante aos agregados reciclados, o órgão define como sendo derivados dos resíduos Classe A ao passo que deixa claro e fomenta a possibilidade da sua reciclagem e reutilização. Em se tratando da classificação destes resíduos, o CONAMA em sua resolução nº 431 de 2011 (BRASIL, 2011), prevê quatro classes de classificação, como dispostas a seguir.

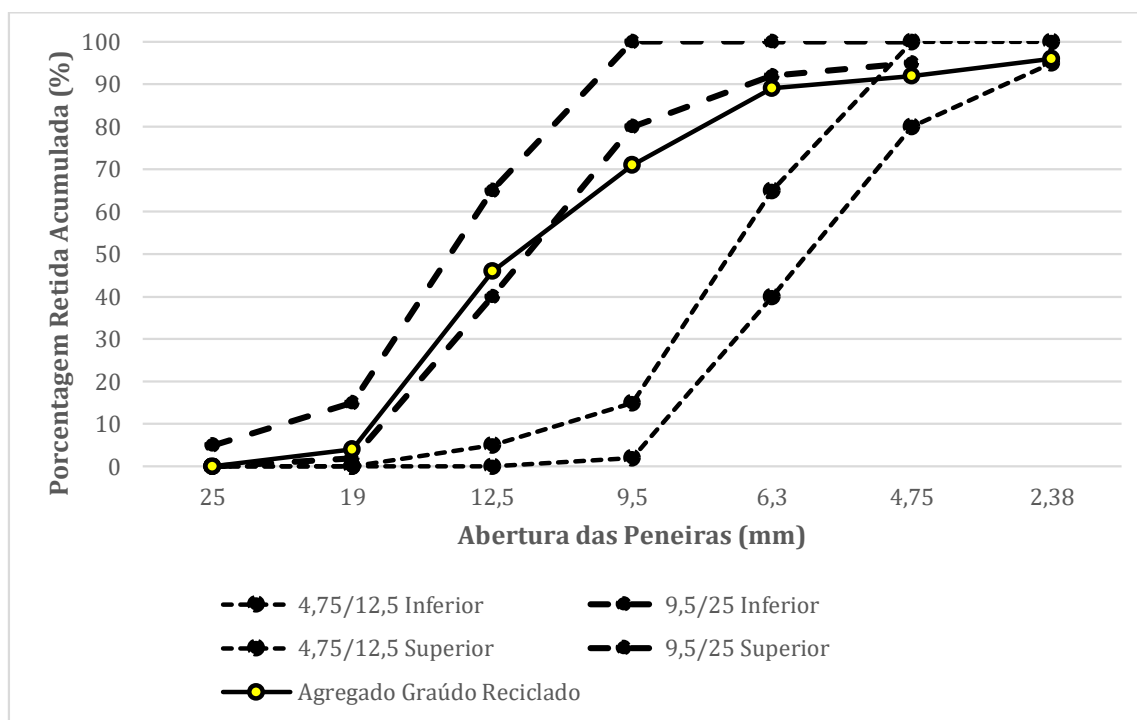
- Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:
 - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.
- Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

- Classe "D": são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

Nesse contexto, é importante citar que para a utilização de resíduos de construção e demolição, deve ser realizada uma investigação das frações de tamanho dos resíduos de RCC gerados durante o processo de reciclagem, a fim de promover uma classificação do material a partir do tamanho e dos possíveis usos.

No que tange à classificação quanto às dimensões, é levada em consideração a composição granulométrica do material, sendo ele separado em grãos em diferentes peneiras, cujas aberturas definem as faixas granulométricas. Ademais, é válido definir zonas de utilização das frações gráudas e/ou miúdas, a fim de manter a regularidade dimensional dos agregados, estas são propostas a partir das séries normal e intermediária das peneiras utilizadas. A Figura 7 demonstra a curva granulométrica de um agregado graúdo reciclado e a sua comparação com as zonas granulométricas estabelecidas pela NBR 7211 para os agregados graúdos (ABNT, 2009). (ABNT, 2011; ABNT, 2003b).

Figura 7 – Curva granulométrica de uma amostra de agregado reciclado



Fonte: SILVA, FELIX e SANTOS (2014), adaptado

Em relação à classificação granulométrica, as normas NBR 9935 (ABNT, 2011), NBR NM 248 (ABNT, 2003b) e NBR 7211 (ABNT, 2009) caracterizam o agregado como:

- Material pulverulento: material passante na peneira de nº200 (#0,075 mm);
- Agregado miúdo: material passante na peneira nº4 (#4,8 mm) e retido na peneira nº 100 (# 0,150 mm);
- Agregado graúdo: material retido na peneira nº4 (#4,8 mm).

Os agregados reciclados são classificados considerando a sua granulometria e composição, levando em conta, por exemplo, a porcentagem da fração graúda de material à base de cimento e rochas. A partir dos ensaios e classificações, algumas características e padrões podem ser obtidos, como por exemplo, segundo Padovan (2013), a limitação dos fatores como a granulometria e a dimensão máxima dos agregados é ratificada pela interferência direta desses na trabalhabilidade do concreto e, conseqüentemente, no consumo de cimento, volume de pasta, fatores que elevam os custos envolvidos. Alguns aspectos evidenciam esses detalhes, como a lamelaridade dos agregados, argamassa aderida, heterogeneidade, rugosidade, entre outros.

Dessa forma, faz-se necessária a análise minuciosa desses materiais visando otimizar sua utilização. No que concerne à sua composição, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021a), os agregados reciclados apresentam-se divididos em subclasses, como descrito a seguir e ilustrados na Figura 8:

- Agregado reciclado de concreto (ARCO): é composto na sua fração graúda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de Cimento Portland e rochas;
- Agregado reciclado misto (ARM): inclui parcelas de materiais cerâmicos, são compostos na sua fração graúda de menos de 90% em massa de materiais cimentícios e rochas;
- Agregado reciclado cimentício (ARCI): deriva de elementos que possuem argamassa em sua composição, porém com menor teor de rochas.

Figura 8 - Agregados reciclados de concreto, cerâmico e misto



Fonte: Bai *et al.* (2020)

Em concomitância à NBR 6118 (ABNT, 2014), a NBR 15116 (ABNT, 2021a) limita a utilização dos agregados reciclados, classificando os ARM e ARCI como não aplicáveis à concretos com fins estruturais. No tocante ao ARCO, a norma possibilita seu uso em concretos com fins estruturais, no entanto limita seu percentual de substituição em 20% de agregado reciclado frente ao valor de dosagem estimado do agregado natural convencional, isto para concretos com classe de agressividade I e II, como classificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Dessa forma, devido ao controle de qualidade exigido, outros aspectos relevantes quanto à utilização dos agregados reciclados são suas propriedades e interações com outros materiais, uma vez que os próprios materiais originários, a exemplo de elementos estruturais, podem ter sofrido possíveis erros durante sua a execução, assim como desgaste provocado pelas intempéries, fatores que afetam sua eficiência durante sua vida útil e se tornam um dos motivos para que os agregados apresentem características distintas dos agregados naturais.

Ademais, durante o processo de reaproveitamento dos materiais, especificamente na etapa de britagem, a qualidade do material está diretamente ligada à escolha assertiva do método e do equipamento (NOGUEIRA, 2015). Os métodos de britagem podem gerar agregados com dimensões heterogêneas e não aplicáveis, devido a seu aspecto friável, em alguns casos, assim como pode ser necessária a repetição do processo por algumas vezes até se obter a dimensão adequada. Thomas *et al.* (2020) em seus experimentos apontam que o concreto possui um número finito de reciclagens, principalmente por conta da argamassa aderida aos grãos (Figura 9), destacando que a partir da terceira passagem pelo equipamento, o resíduo de concreto torna-se basicamente argamassa, apresentando alto teor de material pulverulento.

Figura 9 - Aderência da argamassa no agregado natural



Fonte: Bai (2020)

Com o aumento da argamassa aderida devido às características do agregado, infere-se, também, que um maior volume de água será absorvido pelos agregados interferindo no fator a/c , o qual deverá ser corrigido, ou então será adotada a utilização de aditivos ao traço para que não haja prejuízos em termos de resistência, como cita (Thomas *et al.*, 2013).

Tal fato explica a presença de uma parcela significativa de material fino durante os manuseios dos RCC. Malta (2012) afirma que a granulometria contínua e a presença massiva de finos nos agregados reciclados miúdos e graúdos tem origem da argamassa aderida ao agregado natural que se desprende nos processos de cominuição. Ademais, para Jimenez (2011), uma quantidade excessiva de finos pode interferir negativamente na mistura, uma vez que é criada a espécie de uma película sobre a superfície dos grãos, reduzindo a aderência da pasta de cimento ou argamassa.

Dentre as características do agregado reciclado, é válido ressaltar que, em geral, possuem densidade menor que a de agregados naturais, considerando uma mesma faixa de granulometria, além disso, estes agregados possuem uma absorção de água maior, do mesmo modo que apresentam uma composição altamente heterogênea nas formas e texturas dos grãos (LEITE, 2001; ANGULO, 2000; TENÓRIO, 2007). Para Angulo (2000), existe, quase sempre, uma relação inversa entre a absorção e densidade do agregado, ou seja, agregados com maior absorção possuem menor massa específica. Cabral (2007) explica que isso se deve ao fato de que o RCC é composto de materiais que apresentam maior porosidade.

Por conseguinte, outras características contundentes dos agregados reciclados são a angularidade e a rugosidade. Silva *et al.* (2018) concluem que essas características impactam diretamente na trabalhabilidade do concreto, e uma das prováveis causas é o maior atrito advindo das interações interpartículas. Por vezes a solução adotada para esse problema é o

ajuste do fator a/c, aumento do teor de argamassa ou a utilização de aditivos, para que a trabalhabilidade seja otimizada.

Como citado, as características dos agregados reciclados dependem do tipo de material a ser processado, mas também dependem do tipo de processamento utilizado neste material (QUEBAU; BUYLE-BONDIN, 1999 *apud* LEITE, 2001). Uma etapa importante do processamento é a fragmentação do material, ou cominuição, que consiste em um conjunto de técnicas que tem por finalidade reduzir grandes fragmentos do RCC em fragmentos de dimensões adequadas (FIGUEIRA; ALMEIDA; LUZ, 2004). Britadores do tipo moinho de martelo e o moinho de mandíbula são usados nesta etapa (VIEIRA, 2015). Este processo está ligado especialmente à fase de classificação granulométrica dos materiais, citada anteriormente. Quanto melhor for o processo de britagem, maior parte do RCC poderá ser aproveitada em uma aplicação do material.

Entretanto, alguns cuidados são necessários durante o processo de cominuição, que vão desde a escolha do equipamento até o número de vezes que o material pode ser submetido às etapas de britagem, uma vez que o agregado resultante pode apresentar maior deterioração quanto mais for processado.

Segundo BAUER (1979), o estudo dos agregados deve ser considerado imprescindível em um estudo de tecnologia do concreto, tendo em vista que de 70% a 80% do volume do concreto é constituído pelos agregados, bem como é o material menos homogêneo com que se lida na fabricação do concreto e das argamassas.

5 CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

O concreto com agregado reciclado difere-se do concreto convencional, pois compreende a mistura na qual há a substituição parcial ou total do esqueleto granular de origem natural por agregado reciclado oriundo de resíduos da construção civil (RCC). O uso desses agregados na mistura vem sendo bastante estudado, o que torna possível ter um maior arcabouço dos parâmetros de dosagem, assim como, acerca das propriedades e características conferidas ao concreto, seja no seu estado fresco ou endurecido.

Como já citada, a NBR 15116 (ABNT, 2021a) classifica os agregados reciclados em quatro classes: A, B, C e D. Em sua revisão mais atual, realizada no ano de 2021 e ainda em vigor, a norma traz a possibilidade da utilização dos RCC em concretos destinados a fins estruturais, da mesma maneira que recomenda e delimita a utilização dos resíduos. Destaca-se, portanto, a limitação do uso apenas de agregados classe A, pertencentes à subclasse ARCO, com percentual de substituição de, no máximo, 20% em relação aos agregados naturais e, seguindo a NBR 6118 (ABNT, 2014), sugere seu uso em concretos aplicados a ambientes de classe de agressividade I e II.

Inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas sobre os concretos com agregados reciclados e estas apontam algumas propriedades inerentes dessas misturas. A exemplo, Vidal (2014) afirma que o concreto apresenta um menor índice de consistência, ao passo que Amario (2013) apresenta resultados pertinentes acerca da massa específica do concreto, que oscila entre os valores referência dos concretos leve e convencional, ambas propriedades resultantes da inserção dos agregados reciclados.

A potencial vantagem da substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados refere-se à maior economia tanto de recursos energéticos, quanto naturais, uma vez que a oferta de RCC, especialmente ao que concerne o uso de concreto no Brasil, tende a se manter estável, conferindo um risco ambiental, seja pela ameaça extrativista, bem como pela elevada emissão de CO₂ na atmosfera. No entanto, é mister compreender os pontos positivos e negativos os quais perpetuam a utilização dos agregados reciclados, uma vez que, devido às suas características assimétricas, efeitos não desejáveis podem vir à tona (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Para o estudo deste tipo de concreto do presente trabalho, é relevante a observação de alguns aspectos do agregado reciclado que afetam diretamente os resultados de resistência à compressão e trabalhabilidade. Um deles é a alta variabilidade do RCC, devido à

heterogeneidade dos materiais contidos nos resíduos. Gomes (2021) afirma que, embora uma parcela significativa de RCC gerado no Brasil seja oriunda de materiais cimentícios, ainda há a presença massiva de diversos outros materiais de origens variadas, que promovem potenciais danos às propriedades do concreto. Essa é, segundo o autor, considerada uma das principais dificuldades de uso de concretos com agregados reciclados, sendo indispensável o processo de triagem dos resíduos. Ademais, como cita a NBR 15116 (ABNT, 2021a), para utilização do concreto com agregado reciclado para fins estruturais, ele deve ser composto na sua fração gráuda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas, o que restringe a porção utilizável, contudo garante uma maior qualidade do material.

Principalmente devido à alta heterogeneidade do material, porosidade e superfície mais irregular, é notória a maior absorção de água pelos RCC, como dissertam Butler (2003) e Cabral (2007) em suas pesquisas publicadas. Desta forma, os RCC quando em contato com a água, possuem uma alta capacidade de absorção inicial, retendo a maior parte do volume de água em seus poros. Em um intervalo maior de tempo essa capacidade diminui até chegar ao ponto de saturação.

Werle (2010) aponta que esse período de alta taxa de absorção de água compreende os primeiros 10 minutos de imersão do agregado, no qual alcançam valor percentual de cerca de 85% de toda a sua capacidade de absorção de água. Limitando o tempo de imersão em 30 minutos, nos 20 minutos finais, o agregado apresenta uma taxa de absorção reduzida. De forma análoga aos valores descritos pelo autor, a NBR 15116 (ABNT, 2021a), em sua versão mais atualizada, introduziu técnicas e referências para o cálculo estimativo da quantidade de água necessária para a realização da etapa de pré-molhagem dos agregados reciclados que antecede o procedimento de mistura.

Desta forma, a etapa de pré-umidificação dos agregados reciclados antes da produção do concreto apresenta-se como um ponto relevante do procedimento da mistura, e revela-se como uma alternativa para mitigação do problema de maior absorção de água dos agregados reciclados, citado na seção anterior. Além disso, o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes também se configura como uma opção viável para este problema (LEITE, 2001). Esses métodos permitem que nem a consistência nem a resistência do concreto sejam prejudicadas pelo fato de que em geral os agregados reciclados possuem uma absorção de água mais elevada que os agregados convencionais.

Ainda se tratando dos agregados e seus formatos, Silva Filho e Helene (2011) afirmam que a demanda de água dos agregados para com a mistura pode ser influenciada e ter variações ligadas à distribuição granulométrica do agregado, à heterogeneidade de formas, porosidade e até das propriedades do cimento e sua interação com as partículas. Diretamente ligado à resistência à compressão, o fator a/c pode sofrer alterações indesejadas, acarretadas pela variação da demanda de água da mistura.

Um conceito que também é válido para os agregados reciclados nas misturas é que quanto menor a porosidade do agregado, maior será a sua resistência aos esforços mecânicos ou de abrasão, dessa forma, em geral, estes agregados apresentam maiores picos de tensões em suas zonas de transição quando comparados aos agregados convencionais. Outro ponto é que, devido a essa alta porosidade, os agregados reciclados são mais friáveis, sofrem maiores desgastes e apresentam maior teor de finos do que os convencionais, aspectos que aumentam a absorção de água e interferem nas propriedades do concreto (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Um maior teor de finos pode ser explicado, principalmente, pela argamassa aderida aos grãos presente nos RCC, a qual ao passar pelas etapas de britagem vão perdendo aderência ao passo que se diminui o tamanho dos grãos, podendo se tornar material pulverulento. Jimenez (2011) aponta que a presença de um alto teor de finos tende a prejudicar a aderência da pasta de cimento ao agregado, por conta da formação de uma película de finos na superfície do agregado, o que tende a afetar significativamente a resistência mecânica do concreto.

Um aspecto notório no concreto com agregado reciclado é a presença de duas zonas de transição, que representa a interface de contato entre o agregado e a pasta de cimento (Figura 10). No caso dos agregados reciclados, surge uma nova zona de transição que ocorre entre a argamassa aderida ao agregado natural e a pasta de cimento da mistura, o que pode culminar na perda de resistência mecânica por parte do agregado, devido ao aumento da fragilidade do concreto e da maior porosidade nessa região (KAZMIERCZAK *et al.*, 2019).

Figura 10 - Delimitação da zona de transição formada no agregado reciclado



Fonte: Jayasuriya *et al.* (2021) adaptado

No entanto, tomadas as devidas precauções que vão desde a recepção do resíduo, até a aptidão para a sua utilização, dispondo de uma distribuição granulométrica que atenda aos requisitos da mistura e tendo um controle tecnológico rigoroso, é possível obter variações mínimas de resistência. Ferreira *et al.* (2011), fazendo uso das técnicas de pré-molhagem e ajuste do fator a/c , e em ambiente propício, como demandam as normas, concluíram que tais técnicas e métodos são importantes para a garantia da consistência e resistência final do concreto.

Por fim, é possível listar alguns autores que trabalham com os agregados reciclados experimentando variadas proporções de substituição em relação aos agregados naturais, como descrito no Quadro 3.

Quadro 3 - Estudos relacionando o percentual de agregado natural substituído por agregados reciclados

Referências	Agregado graúdo reciclado	Agregado miúdo reciclado
(GÓMEZ-SOBERÓN, 2002)	0% e 100%	-
(EVANGELISTA; DE BRITO, 2007)	-	0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100%
(LIU; CHEN, 2008)	0% e 100%	0% e 100%
(LANDOLFO; OLIVEIRA; NOGUEIRA, 2014)	50% e 100%	-
(KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2017)	0% e 100%	0% e 100%
(PEDRO; DE BRITO; EVANGELISTA, 2017)	0%, 50% e 100%	0%, 50% e 100%

Fonte: (VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018), adaptado

6 METODOLOGIA

O trabalho iniciou com a etapa de revisão bibliográfica, que foi pautada em buscar referências em repositórios acadêmicos, tanto nacionais, quanto internacionais, a fim de contribuir para a maior cumulatividade de informações que endossam as expectativas perante os resultados e contribuem com técnicas e dados certificados, a fim de tornar embasado e fidedigno todo o processo realizado.

6.1 Origem, caracterização e beneficiamento dos materiais

A etapa experimental deste trabalho foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) situado na Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Campus A. C. Simões. Os próximos tópicos apresentam os procedimentos e métodos utilizados para os agregados reciclados, agregados naturais, cimento, água, equipamentos e ensaios.

6.1.1 Agregados reciclados

Devido à vasta gama e tipos de materiais contidos nos resíduos, fez-se necessário um processo de triagem com a finalidade de diminuir a variabilidade dos materiais, garantindo um padrão de qualidade.

O procedimento de beneficiamento dos agregados foi adotado a partir da análise e disponibilidade dos equipamentos no laboratório, objetivando a obtenção dos agregados reciclados graúdo e miúdo, sendo analisados separadamente a sua distribuição granulométrica, a fim de se obter agregados respeitando as dimensões dentro dos intervalos propostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), apresentando uniformidade quanto às proporções de graúdos e miúdos, e que sejam adequados para a utilização.

Os agregados reciclados graúdos foram oriundos do processo de beneficiamento de corpos de prova armazenados no próprio laboratório advindo de ensaios realizados por construtoras contratantes dos serviços do LEMA. O processo de seleção e rompimento foi iniciado por Silva *et al.* (2019), que definiu o tamanho máximo do agregado compatível com o britador disponível e, a partir disso, deu início à fragmentação manual desses corpos de prova com o auxílio de uma marreta.

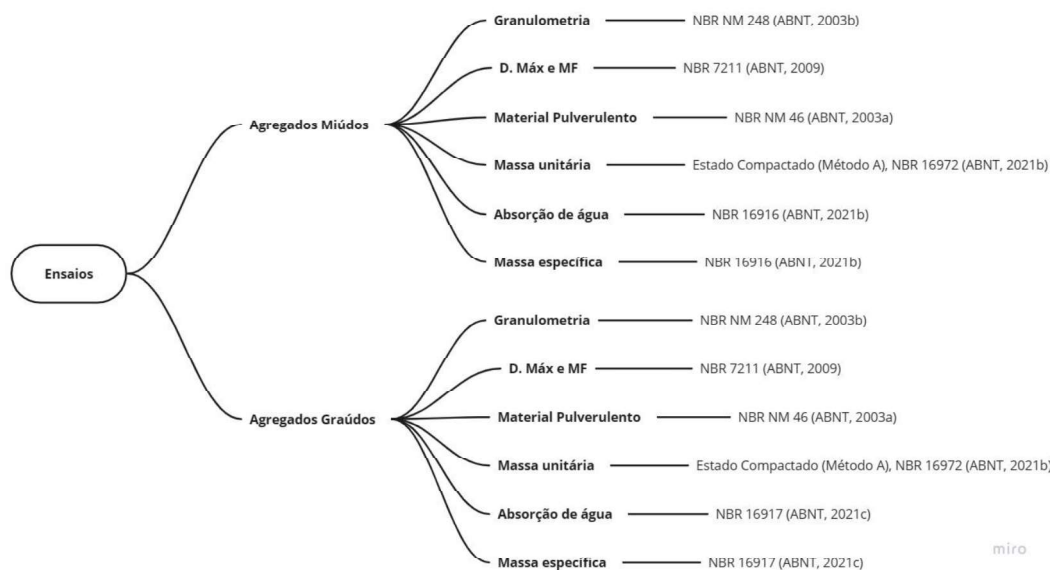
Outrossim, dando continuidade, os fragmentos passaram por um processo de triagem, diminuindo assim sua heterogeneidade e posteriormente o material foi passado por dois tipos

de britadores, o de mandíbula e o de martelos. O britador de mandíbulas foi regulado para prover agregados com dimensão máxima de 25 mm, sendo necessária a repetição do processo de passagem do material por três vezes até se obter resultados satisfatórios. Com a amostra dentro do padrão, a próxima etapa foi levar essa amostra ao britador de martelos para que se pudesse diminuir ainda mais o tamanho máximo dos agregados. Nessa etapa, com apenas uma passagem, já foi possível obter os agregados dentro dos parâmetros estabelecidos para as dimensões.

Novamente o agregado passou por um processo de triagem buscando deixar a amostra mais homogênea, posteriormente dando início ao processo de separação por tamanho utilizando as peneiras estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Como parâmetros para a presente pesquisa, foram definidas as dimensões máximas e mínimas para cada agregado, sendo classificado o material retido entre as peneiras 4,75 mm e a peneira 12,5 mm como agregado graúdo, e o material retido entre as peneiras 0,075 mm e 4,75 mm como agregado miúdo. O material passante na peneira 0,075 mm foi considerado como material pulverulento.

Em seguida, deu-se início ao processo de caracterização dos agregados por meio dos ensaios, a exemplo da determinação da massa específica, massa unitária, granulometria, porosidade etc., em sua totalidade prescritos pela ABNT, com o fito de se determinar as características específicas dos agregados disponíveis, excluindo ou intitulado-os como aptos ao processo de dosagem.

Figura 11 - Principais ensaios realizados nos agregados



Fonte: Autor (2022)

Ademais, com as informações e valores representativos acerca das características dos materiais utilizados, fez-se possível prever determinadas condições que venham a afetar negativamente o resultado final, tais como o percentual de absorção de água e índice de vazios. Outrossim, os dados obtidos permitiram dar início ao processo de estimativa de resistência, dosagem e compatibilização com os materiais disponíveis. O uso de aditivos não foi considerado nas etapas realizadas no trabalho.

6.1.2 Agregados Naturais

6.1.2.1 Agregado graúdo natural

Para o agregado graúdo natural foi utilizada pedra britada de origem granítica, com dimensão máxima característica de 12,5 mm, oriunda do estado de Alagoas. Após o recebimento, o agregado foi lavado para retirada de impurezas e do material pulverulento impregnado na superfície, sendo levado posteriormente à estufa para secagem a uma temperatura de 100 °C durante, no mínimo, 24 horas.

6.1.2.2 Agregado miúdo natural

Para o agregado miúdo natural, foi utilizada uma areia natural média oriunda de jazidas situadas no estado de Alagoas.

6.1.3 Cimento

O cimento definido para uso no presente trabalho foi o CP II-F 32. Segundo o fabricante, o cimento atende as exigências estabelecidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018b) acerca das às características físicas e químicas do material, como seguem descritas nas Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Características Químicas do Cimento CP II - F

Composição Química	Unidade	Resultados
Al_2O_3	%	4,12
SiO_2	%	18,32
FE_2O_3	%	2,79
CaO	%	61,36
MgO	%	2,68
SO_3	%	2,56

Fonte: Fabricante (2021)

Tabela 2 - Características Físicas do Cimento CP II - F

Características Avaliadas	Unidade	Resultados
Espalhamento a quente	mm	0,28
Tempo de início de pega	min	194
Tempo de fim de pega	min	256
Finura #200	%	2,49
Finura #325	%	10,51
Blaine	cm ² /g	3380
Água de consistência	%	25,9
Resistência à compressão 1 dia	MPa	14,7
Resistência à compressão 3 dias	MPa	28,1
Resistência à compressão 7 dias	MPa	33,2
Resistência à compressão 28 dias	MPa	41

Fonte: Fabricante (2021)

6.1.4 Água

Durante as produções dos concretos foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal de Alagoas.

6.2 Ensaios

Para obtenção dos dados de avaliação do concreto nos estados fresco e endurecido, referentes à massa específica, resistência à compressão, consistência, segregação etc., foram realizados ensaios normatizados, cujos resultados foram tabulados, analisados e posteriormente discutidos em capítulo próprio.

Para as misturas produzidas, foram realizadas análises qualitativas, quantitativas, assim como os ensaios de abatimento de tronco de cone NBR 16889 (ABNT, 2020) seguida da moldagem dos corpos de prova (ABNT, 2016). Para cada mistura foram confeccionados 15 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20 cm (Figura 12), como rege a NBR 5738 (ABNT, 2016). As rupturas dos corpos de prova ocorreram conforme os parâmetros da NBR 5739 (ABNT, 2018a) e foram realizadas quando alcançados períodos de 7, 14 e 28 dias após o processo de moldagem. Após 24h da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e

imediatamente submersos no tanque de imersão no qual contém cal diluída em água, como prescrito na norma, evitando assim a perda dos carbonatos presentes no concreto (Figura 13).

Figura 12 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autor (2022)

Figura 13 - Corpos de prova imersos no tanque contendo água e cal



Fonte: Autor (2022)

6.3 Produção do concreto

6.3.1 Método Melo

No que se refere à produção das misturas, a princípio alguns dados utilizados se basearam no estudo realizado por Melo (2019), principalmente pelo fato de a autora fazer uso de agregados reciclados e esses possuírem mesma origem dos agregados utilizados no presente

trabalho. A princípio, Melo (2019) definiu uma dosagem vislumbrando a produção de uma mistura que atendesse ao requisito de resistência à compressão de 20 MPa aos 28 dias. Ademais, a autora fez uso de técnicas como a teoria do empacotamento, que permitiu ajustes quanto à proporção dos agregados naturais e reciclados a serem inseridos na mistura.

É válido ressaltar que, pelo fato de o presente trabalho propor a produção de misturas de concreto convencional, foi necessário o ajuste de alguns parâmetros de dosagem frente aos já definidos por Melo (2019), uma vez que a autora realizou seu estudo baseado na produção do concreto autoadensável. Após análise da literatura, discussões internas, testes experimentais considerando o concreto no estado fresco e visando a redução do consumo de cimento na mistura, foram definidos alguns parâmetros essenciais para o início da produção, tais quais a distribuição dos agregados e o teor de argamassa.

6.3.2 Método ABCP

O presente método foi proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O método propõe algumas relações entre fatores e requisitos, como por exemplo: fixação do fator a/c , estimativa do consumo de agregado, cimento e água de amassamento. Nesse contexto, o método possibilita a concepção de dosagens com a finalidade de se obter diferentes traços de concreto, com diferentes características.

Para o presente trabalho, foram definidos os parâmetros como a resistência à compressão (20 MPa), materiais utilizados e o fator água cimento ($a/c = 0,5$), respeitando os requisitos normativos. Ademais, definiu-se a classe de resistência à compressão como C25 e a classe de agressividade II, conforme dispõe a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para os cálculos da dosagem, a resistência foi calculada a partir da equação (4), a qual delimita uma previsão da resistência adquirida pelo concreto ao final dos 28 dias de cura, conforme a NBR 12655 (ABNT, 2022). Portanto, a resistência de dosagem calculada foi de:

$$F_{cm} = F_{ck_j} + 1,65 \times S_d \quad (4)$$

$$F_{cm} = 20 + 1,65 \times 4 = 26,6 \text{ MPa} \quad (5)$$

Onde:

F_{cm} - resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade j dias, expressa em megaPascal (MPa);

f_{ckj} - resistência característica de concreto à compressão, aos j dias (para o estudo, 28 dias), expressa em megaPascal (MPa);

Sd - desvio padrão de dosagem, que pode variar em três condições distintas (A, B e C), em função do controle de obra, conforme apresentado no Quadro 4.

O desvio padrão é definido em função de como será o processo de controle tecnológico e preparação do concreto, podendo variar entre 3 condições (A, B e C), conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Condições de preparo da mistura em função do desvio padrão (Sd)

Condição A	Sd = 4 MPa	Materiais dosados em massa e água de amassamento é corrigida em função da correção da umidade dos agregados. Classe C10 a C80.
Condição B	Sd = 5,5 MPa	Cimento dosado em massa, agregados dosados em massa combinada com volume, a umidade do agregado graúdo é determinada e o volume do agregado graúdo é corrigido através da curva de inchamento. Classe C10 a C25.
Condição C	Sd = 7 MPa	Cimento medido em massa, agregados e água em volume, umidade dos agregados estimada. Classe C10 a C15.

Fonte: ABNT (2022)

Com o intuito de manter a padronização de todos os traços para fins de controle, o valor da resistência de dosagem de 26,6 MPa foi considerado para todas as misturas produzidas, uma vez que atende, também, à resistência alvo de 20 MPa previamente definida.

Como citado anteriormente, o método da ABCP também define ferramentas para o cálculo dos consumos dos materiais presentes na mistura do concreto. Quanto ao consumo da água (Ca), a priori faz-se necessário a adoção de um valor estimado para o ensaio do abatimento do tronco de cone (*slump test*), este variando em faixas, de acordo com o tamanho máximo do agregado graúdo utilizado na mistura, conforme a Tabela 3. Foi adotado, portanto, um abatimento entre 80 a 100 mm e diâmetro máximo do agregado graúdo de 9,5 mm, já que na tabela não há a dimensão máxima de 12,5 mm. Logo, para os requisitos anteriores, consultando a Tabela 3, pôde-se estimar o consumo de água aproximado de 230 litros.

Tabela 3 - Determinação da estimativa do consumo de água da mistura

Consumo de água aproximado (L/m³)					
Abatimento (mm)	Diâmetro máximo dos agregados graúdos (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Rodrigues (1990)

Sendo definido o fator água cimento (a/c) e o consumo de água (Ca), em 0,5 e 230 L, respectivamente, com a equação (6) tem-se o consumo de cimento (Cc) estimado para a mistura, logo, o consumo de cimento será igual a 460 kg/m³, como descrito abaixo:

$$Cc = \frac{Ca}{a/c} \quad (6)$$

$$Cc = \frac{230}{0,5} = 460 \text{ kg/m}^3 \quad (7)$$

Onde:

Cc : consumo de cimento (kg/m³);

Ca : consumo de água (L/m³);

a/c : fator água cimento.

O consumo de agregado pôde ser obtido a partir dos dados presentes através da Tabela 4, a qual relaciona o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado, com o módulo de finura da areia, ambos os agregados contidos na mistura, e fornece o percentual de volume ocupado pelo agregado seco em relação a 1 metro cúbico de concreto, vale ressaltar que os valores contidos na tabela são disponibilizados pela ABCP.

Tabela 4 - Volume compactado seco de agregado graúdo para cada metro cúbico de concreto

Módulo de Finura da Areia	Dimensão Máxima Característica do Agregado Graúdo (D _{máx})				
	9,5 mm	19 mm	25 mm	32 mm	48 mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1998)

Dessa forma, fazendo uso da equação (8), e cruzando os dados previamente obtidos através dos ensaios do módulo de finura do agregado miúdo, com a dimensão máxima do agregado graúdo, sendo estes valores, respectivamente: 3,17 mm e 9,5mm, o valor do volume compactado seco do agregado graúdo foi de 0,505, e sua estimativa de consumo foi de:

$$C_{ag} = V_b \times M_u \quad (8)$$

$$C_{ag} = 0,505 \times 1460 = 730 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

Onde:

C_{ag} - consumo de agregado graúdo;

V_b - volume de agregado graúdo seco compactado por m³;

M_u - massa unitária do agregado graúdo.

Com os dados dos consumos de água, cimento e agregado graúdo, já obtidos, é possível calcular a estimativa de volume do agregado graúdo na mistura, utilizando os consumos

previamente estimados e as massas específicas de cada material. A equação (10), as variáveis e os cálculos estão descritos a abaixo:

$$V_{am} = 1 - \frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_{ag}}{\gamma_{ag}} + \frac{C_a}{\gamma_a} \quad (10)$$

$$V_{am} = 1 - \frac{460}{2970} + \frac{737,3}{2570} + \frac{230}{1000} \quad (11)$$

$$V_{am} = 0,32 \text{ m}^3 \quad (12)$$

Onde:

V_{am} - volume do agregado miúdo;

C_c - consumo de cimento;

γ_c - massa específica do cimento;

C_{ag} - consumo de agregado graúdo;

γ_{ag} - massa específica do agregado graúdo;

C_a - consumo de água;

γ_a - massa específica da água;

Dado o volume ocupado pelo agregado graúdo de $0,32 \text{ m}^3$, com a equação (13) obtém-se o consumo de agregado miúdo para a determinada mistura.

$$C_{am} = V_{ag} \times \gamma_m \quad (13)$$

$$C_{am} = 0,32 \times 2330 = 745,6 \text{ kg/m}^3 \quad (14)$$

Onde:

C_{am} - consumo de agregado miúdo;

γ_m - massa específica da areia.

Dessa forma, com todos os consumos estimados, pode-se determinar o traço da mistura em relação à massa de cimento utilizada dispondo a seguinte razão (Equação (15)):

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_{am}}{C_c} : \frac{C_{ag}}{C_c} : \frac{C_a}{C_c} \quad (15)$$

$$\frac{460}{460} : \frac{745,6}{460} : \frac{737,3}{460} : \frac{230}{460} \quad (16)$$

Destarte, o traço para essa produção pode ser representado como: 1 : 1,62 : 1,60 : 0,5, e seus consumos e proporções dos materiais, consultados na Tabela 5:

Tabela 5 - Quantitativo de materiais utilizados nas misturas

Composição das misturas de concreto (kg/m³)			
	100% Natural	100% Reciclado	50%/50%
Teor de Argamassa	62%	62%	62%
Cimento	460	460	460
a/c = 0,5	230	230	230
AGN	737,7	-	368,65
AGRC	-	737,7	368,65
AMN	745,6	-	372,8
AMRC	-	745,6	372,8
Água de absorção	-	82,76	41,37

Fonte: Autor (2022)

Legenda: a/c: fator água cimento; AGN: agregado graúdo natural; AGRC: agregado graúdo reciclado; AMN: agregado miúdo natural; AMRC: agregado miúdo reciclado.

6.4 Procedimento de mistura

Para a produção do concreto foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros e frequência de 34 rotações por minuto (Figura 14). Nas misturas utilizando os agregados reciclados, considerando a absorção da água de amassamento por parte do agregado, foi adotada a solução utilizando a técnica da pré-molhagem dos agregados antes da inserção na betoneira (Figura 14). A técnica consiste em colocar os agregados num recipiente que possibilite seu espalhamento, logo após, adicionar um volume específico de água ao agregado e aguardar 15 minutos até inseri-lo na mistura.

Figura 14 - Betoneira de eixo inclinado



Fonte: Autor (2022)

Figura 15 - Etapa de pré-molhagem dos agregados



Fonte: Autor (2022)

Após as etapas iniciais, o procedimento de mistura dos materiais pode ser descrito nas etapas a seguir:

- Etapa de pré-molhagem dos agregados, adicionando-os a recipientes estanques e distribuindo uniformemente sobre a superfície o volume para a água de absorção.
- Etapa de pré-umidificação da face interna do tambor da betoneira utilizando mangueira ou recipiente com volume adequado de água. Após, retira-se o volume excedente de água;
- Ajusta o ângulo da betoneira e insere 100% do agregado graúdo ao misturador parado;
- Adiciona-se 50% do volume de água da mistura, e liga o misturador por 1 minuto;
- Após a parada por completo do misturador, coloca-se a adição mineral;

- Ainda com o misturador inerte, adiciona-se o cimento e inicia a mistura por 2 minutos;
- Após a parada completa do misturador, coloca-se o agregado miúdo;
- Adiciona-se os 50% restante da água de mistura e liga o misturador por 3 minutos;
- Procede-se com a parada do misturador para limpeza por 1 minuto, com uma colher de pedreiro, removendo o material aderido nas paredes do misturador, caso seja necessário;
- Para finalizar, ligar o misturador por mais 1 minuto.

Finalizada a mistura, retira-se o concreto com auxílio de uma colher de pedreiro e o deposita numa superfície pré-umidificada para que sejam realizados os ensaios ainda no estado fresco e a moldagem dos corpos de prova.

6.5 Ensaios realizados para a determinação das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido

6.5.1 Massa Específica no estado fresco

A princípio, após a finalização do processo de mistura, ainda no estado fresco, foram realizados os ensaios de consistência ou abatimento do tronco de cone (*slump test*), e a determinação da massa específica do concreto no estado fresco, regidos pela NBR 16889 (ABNT, 2020) e NBR 9833 (ABNT, 2008), respectivamente.

Para a realização do ensaio de massa específica, foi utilizado um recipiente de formato cilíndrico, normatizado, com volume e dimensões conhecidas, sendo estes 15 dm³, 26 cm de diâmetro e 28,3 cm de altura (Figura 16). Anteriormente ao preenchimento do recipiente com concreto, foi medido seu peso vazio para que fosse possível estimar a massa específica do concreto, definida pela razão da massa da mistura contida no recipiente e seu volume, destacado acima.

Figura 16 - Ensaio de massa específica do concreto



Fonte: Autor (2022)

6.5.2 Ensaio de consistência ou Abatimento do Tronco de Cone (*Slump Test*)

O ensaio de consistência é um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a trabalhabilidade do concreto. O ensaio foi realizado preenchendo-se o recipiente em formato de tronco de cone em três camadas. A cada camada preenchida, é realizado o adensamento com o auxílio de uma haste de aço, aplicando-se 25 golpes distribuídos uniformemente na área da camada de forma que sua profundidade não ultrapasse 50% da altura da camada. Após o preenchimento e adensamento, o recipiente é puxado num movimento vertical e contínuo, posicionado ao lado da amostra de concreto, sucedendo o posicionamento da haste de aço acima do recipiente. A medida da altura do centro geométrico da amostra até a superfície inferior da haste fornece o abatimento do concreto, dado em centímetros (Figura 17).

Figura 17 - Abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor (2022)

6.5.3 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão ocorreram de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018a), que rege os detalhes, cuidados e como deve ser realizado o procedimento. Para cada mistura feita, 15 corpos de prova foram moldados, estes foram divididos em 3 lotes de igual quantidade para a realização do ensaio de resistência à compressão, que corresponderam às idades de 7, 14 e 28 dias, conforme rege a NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Para as misturas analisadas, ao todo foram moldados 45 corpos de prova de formato cilíndrico, com dimensões de diâmetro e altura iguais a 10cm e 20cm, respectivamente, respeitando os limites e proporções definidos pela NBR 5738 (ABNT, 2016). Anteriormente ao preenchimento e adensamento do concreto nos moldes, foi realizada uma inspeção tátil visual em cada exemplar, com posterior limpeza, fechamento e aplicação de óleo vegetal nas paredes e fundo com o fito de promover mais facilidade no processo de desmoldagem.

O processo de moldagem foi realizado com o auxílio de uma colher de pedreiro para a inserção do concreto no molde, sucedido do adensamento que foi realizado utilizando a haste de adensamento. Para os corpos de prova em questão, em consulta à NBR 5738 (ABNT, 2016), foi definido um total de duas camadas de concreto, intercaladas com a aplicação de 12 golpes distribuídos uniformemente na área circular como forma de adensamento.

Logo após, os moldes preenchidos foram identificados e estocados por um período de 24 horas (Figura 18), quando ocorreu a desmoldagem e posterior imersão em um tanque contendo água saturada de cal hidratada (hidróxido de cálcio) como parte do processo de cura úmida. Dados os períodos de tempo mencionados anteriormente (7, 14 e 28 dias), os corpos de prova selecionados passaram pelo processo de retificação da(s) sua(s) face(s) a fim de promover uma maior regularização da(s) superfície(s). Para o rompimento dos CPs, foi utilizada a prensa AMSLER de 200 tf existente no LEMA (Figura 19 e 20).

Figura 18 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autor (2022)

Figura 19 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2022)

Figura 20 - Corpos de prova após seu rompimento



Foto: Autor (2022)

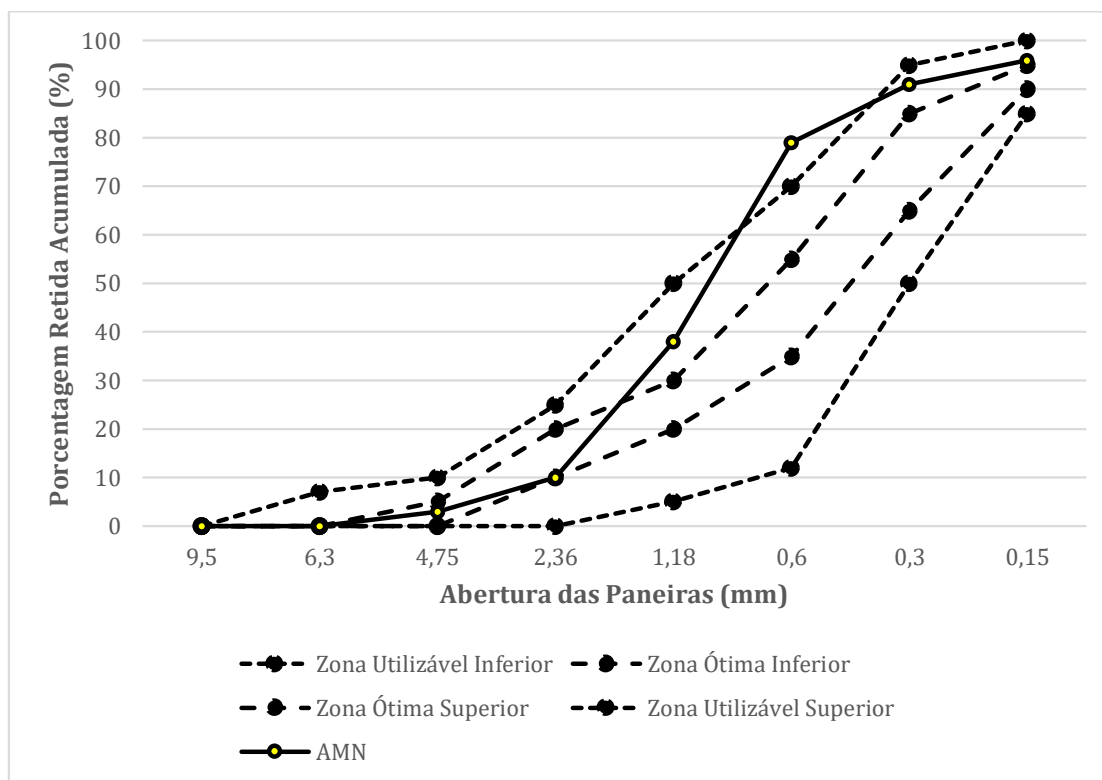
7 RESULTADOS

7.1 Caracterização dos agregados

7.1.1 Agregado Miúdo Natural (AMN)

A partir dos ensaios realizados e dos dados obtidos, foi possível traçar as curvas granulométricas dos agregados miúdos do presente trabalho. A Figura 21 ilustra a distribuição dos grãos do agregado entre as peneiras utilizadas. Foram traçadas as zonas limites das quais citam a NBR 7211 (ABNT, 2009), e estas representam valores desejáveis para os agregados constituintes das misturas, os conferindo a presença de partículas de variados tamanhos e uma granulometria contínua.

Figura 21 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo natural



Fonte: Autor (2022)

Da Figura 21, infere-se que o agregado analisado encontra-se, na sua maior parcela, dentro dos limites utilizáveis estabelecidos, no entanto não situando-se apenas em uma zona, variando da zona utilizável superior à zona ótima inferior, estando apto para uso. A Tabela 6 descreve os resultados das características físicas do agregado analisado.

Tabela 6 - Características físicas do agregado miúdo natural

Características físicas do agregado miúdo	Resultados
Módulo de finura (mm)	3,17
Dimensão máxima característica (mm)	4,75
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,54
Massa específica (g/cm ³)	2,33
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,36
Absorção de água (%)	0,86
Teor de material pulverulento (%)	4,15

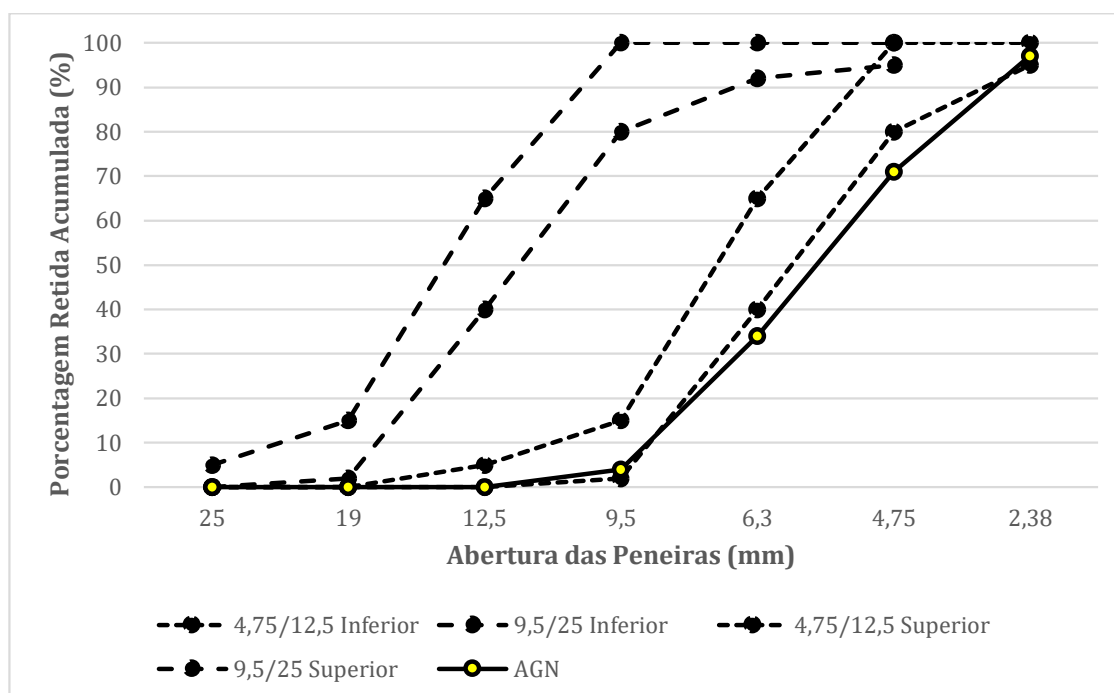
Fonte: Autor (2022)

Quanto aos valores obtidos pelas características físicas, o agregado miúdo apresenta tendência de classificação para uma areia média a grossa, devido ao seu valor do módulo de finura, coerente com a Figura 21, na qual a porcentagem acumulada tende a seguir a zona utilizável superior. Valores como dimensão máxima característica, massa específica e absorção de água estão dentro dos especificados por norma.

7.1.2 Agregado Graúdo Natural (AGN)

A partir dos ensaios realizados e dos dados obtidos, foi possível traçar as curvas granulométricas dos agregados graúdos do presente trabalho. A Figura 22 ilustra a distribuição dos grãos do agregado entre as peneiras utilizadas. Foram traçadas as zonas granulométricas das quais citam a NBR 7211 (ABNT, 2009), e estas representam valores desejáveis para os agregados constituintes das misturas, os conferindo a presença de partículas de variados tamanhos e uma granulometria contínua.

Figura 22 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo natural



Fonte: Autor (2022)

Da Figura 22, infere-se que o agregado está mais próximo da faixa de 4,75/12,5 com indícios do valor percentual, menor ou igual a 5%, retido na peneira de 12,5 mm, desta forma, compreende-se que a dimensão máxima do agregado é de 12,5 mm. Ademais, entre as peneiras 6,30 e 4,75, é notória a presença de partículas menores, evidenciada por seu menor percentual de massa retida nas malhas de menor dimensão. As características físicas do agregado estão descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características físicas do Agregado Graúdo Natural

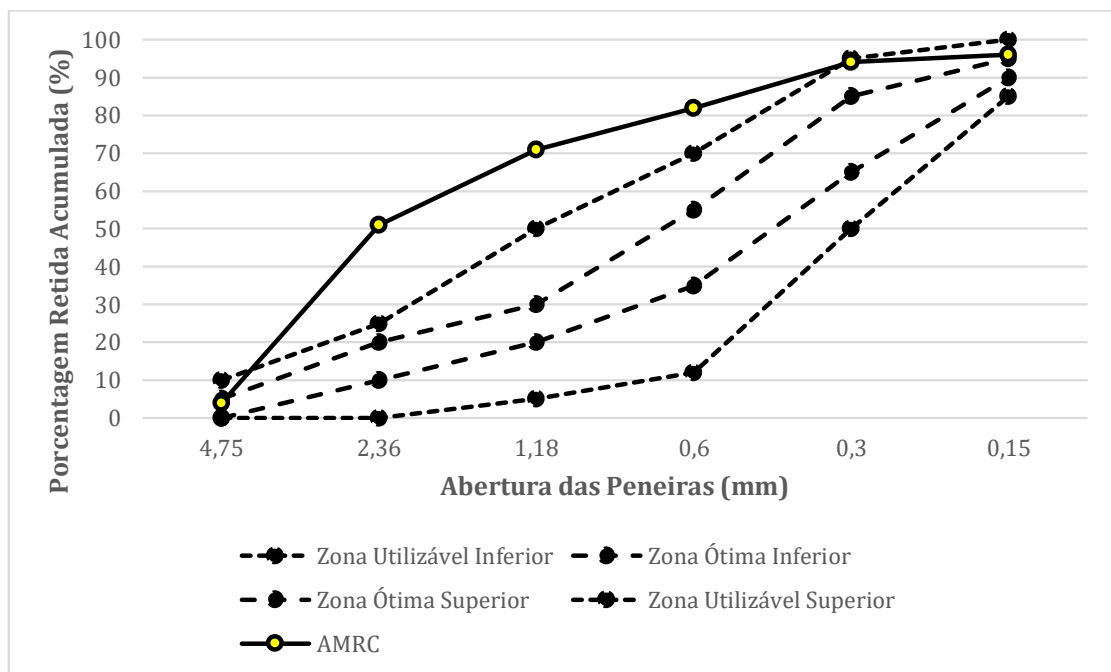
Características Físicas do Agregado Graúdo	Resultados
Dimensão Máxima Característica (mm)	12,5
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,46
Massa específica (g/cm ³)	2,57
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,59
Absorção de água (%)	1,26
Teor de Material pulverulento (%)	-

Fonte: Autor (2022)

7.1.3 Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC)

A partir dos ensaios realizados e dos dados obtidos, foi possível traçar as curvas granulométricas dos agregados miúdos do presente trabalho. A Figura 23 ilustra a distribuição dos grãos do agregado entre as peneiras utilizadas. Foram traçadas as zonas limites citadas na NBR 7211 (ABNT, 2009), e estas representam valores desejáveis para os agregados constituintes das misturas, os conferindo a presença de partículas de variados tamanhos e uma granulometria contínua.

Figura 23 - Distribuição granulométrica do agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC)



Fonte: Autor (2022)

A Figura 23 indica que o agregado está em quase sua totalidade fora das zonas limites especificadas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). O que confere uma total desproporção no tamanho das partículas, não garantindo uma distribuição granulométrica contínua, favorecendo, por exemplo, a um maior índice de vazios nas misturas de concreto produzidas com tal agregado. É notória a quantidade de grãos com maior dimensão que foram gerados, principalmente nas peneiras de 2,36 mm a 0,6 mm, as quais apresentam massa retidas além do previsto. Tal aspecto é aceitável por se tratar de agregado reciclado, e pode ter sido causado durante o processo de cominuição, intensificado pela característica frágil dos agregados devido à própria argamassa contida no corpo de prova, como também aderida aos grãos. Ademais, o

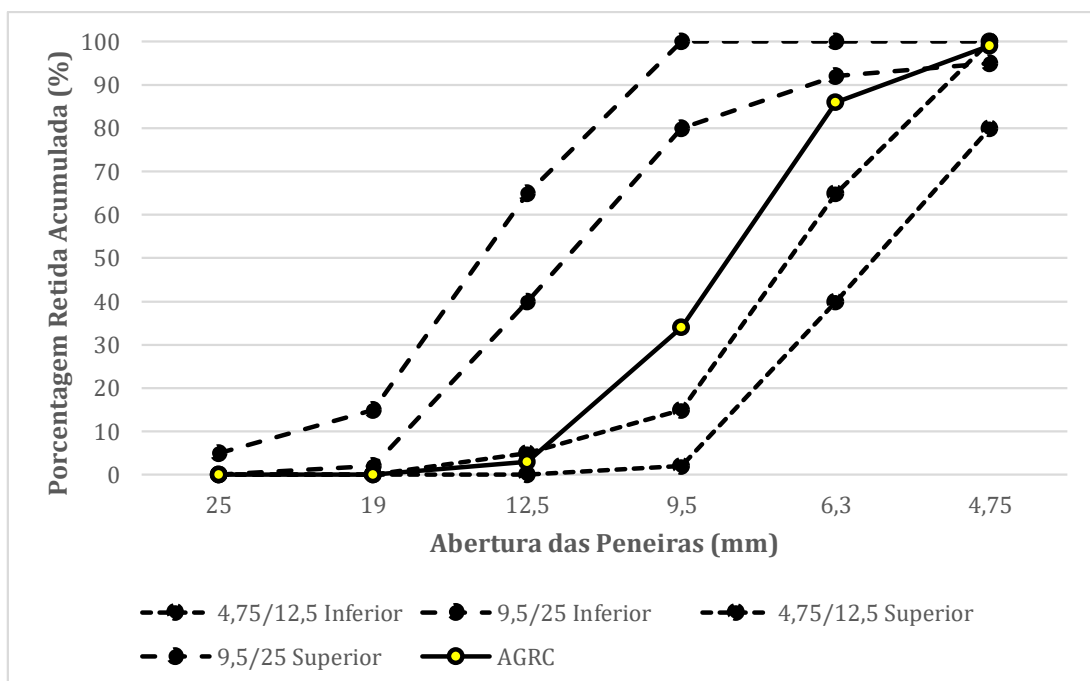
formato dos grãos pode contribuir para uma maior abrasão e desgaste, afetando diretamente a distribuição granulométrica dos agregados.

A dimensão máxima característica do agregado pode ser inferida a partir da análise da porcentagem retida menor ou igual a 5% em alguma das peneiras utilizadas, como cita a NBR 7211 (ABNT, 2009). Para o caso do agregado analisado, é possível perceber que na peneira de abertura 4,75 mm, esse requisito é atendido, logo define-se a dimensão máxima do agregado miúdo reciclado.

7.1.4 Agregado Graúdo Reciclado de Concreto (AGRC)

A partir dos ensaios realizados e dos dados obtidos, foi possível traçar as curvas granulométricas dos agregados graúdos do presente trabalho. A Figura 24 ilustra a distribuição dos grãos do agregado entre as peneiras utilizadas. Foram traçadas as zonas granulométricas as quais são citadas na NBR 7211 (ABNT, 2009), e estas representam valores desejáveis para os agregados constituintes das misturas, os conferindo a presença de partículas de variados tamanhos e uma granulometria contínua.

Figura 24 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC)



Fonte: Autor (2022)

Da análise da Figura 24, vê-se que o agregado analisado encontra-se fora das faixas limites definidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). No que tange à dimensão máxima

característica, o agregado apresenta percentual retido menor ou igual a 5% na peneira de abertura 12,5 mm, determinando, assim, sua dimensão máxima, segundo a norma supracitada.

A distribuição granulométrica descontínua do agregado graúdo reciclado pode ser explicada pelas ações que vão desde o processo de cominuição manual até o processo mecanizado, com o auxílio do britador. Alguns autores limitam em um número finito de repetições para o processo de britagem, uma vez que os agregados sofrem desgastes excessivos, geram mais material fino e promovem a perda de resistência do próprio agregado. Dessa forma, diante do exposto na Figura 24, é notório que a graduação do agregado é composta por parcelas de partículas com dimensões homogêneas, gerando um maior índice de vazios, maior porosidade, maior consumo de pasta etc. Também a forma do agregado é afetada pelo processo de beneficiamento ao qual é submetido. Considerando-se que o agregado em questão é reciclado, esta alteração na granulometria em relação aos parâmetros normativos aplicáveis a agregados de um modo geral, não impede a sua utilização, embora seja interessante pensar em formas de melhorar o material.

Na Tabela 8 vê-se as características físicas dos agregados reciclados.

Tabela 8 - Características físicas dos agregados reciclados

Características Físicas dos Agregados Reciclados	Resultados	
	AMRC	AGRC
Módulo de Finura (mm)	4,02	-
Dimensão máxima característica (mm)	4,75	12,5
Massa unitária no estado compactado (g/cm ³)	1,47	1,34
Massa específica (g/cm ³)	1,99	2,07
Massa específica saturada superfície seca (g/cm ³)	2,13	2,16
Absorção de água (%)	6,84	4,31
Teor de material pulverulento (%)	2,97	-

Fonte: Autor (2022)

A Tabela 8 descreve um panorama geral dos agregados reciclados evidenciando características inerentes ao material e já descritos na literatura (capítulo 4), como por exemplo

os valores da massa específica, que se apresentam cerca de 20% menor para o agregado graúdo e 15% menor para o agregado miúdo, quando comparados aos agregados naturais. No que tange a aspectos como absorção de água e teor de material pulverulento, os agregados apresentam resultados satisfatórios. Como requisito, a NBR 15116 (ABNT, 2021a) define os limites para a utilização dos agregados em 7% e 15%, respectivamente. Dessa forma, nota-se características importantes que conferem ao agregado natural um melhor desempenho frente ao agregado reciclado, no entanto, a partir de ajustes como a inserção de finos, adições e até tratamentos realizados nos agregados, é possível melhorar sua atuação na mistura.

Apesar dos desvios apresentados na Figura 23 e na Figura 24 quanto à distribuição granulométrica, não foi descartada a utilização dos agregados analisados, os quais foram empregados em sua total quantidade nas misturas executadas no presente trabalho.

Em suma, é notória a heterogeneidade do agregado reciclado de concreto quando passado por processos de cominuição repetidas vezes, o que pode influenciar diretamente quando usado na mistura de novos concretos. Por sua vez, a inserção dos agregados reciclados pode requerer alguns ajustes em determinados fatores da mistura, tais quais: relação água/cimento, etapas de preparo da mistura, utilização de aditivos etc., dessa forma, alguns requisitos e características da mistura podem limitar o uso desse tipo de agregado (BARBUDO *et al.*, 2013; REVILLA-CUESTA *et al.*, 2020; VERIAN; ASHRAF; CAO, 2018; XIE; GHOLAMPOUR; OZBAKKALOGLU, 2018).

7.2 Análises dos concretos produzidos

Após o término do procedimento de mistura, uma porção do volume foi retirada com a finalidade da realização dos ensaios de abatimento do tronco de cone (*slump test*) e de massa específica. Na Tabela 9 estão os dados obtidos para a caracterização dos concretos no estado fresco.

Tabela 9 – Propriedades do concreto no estado fresco

Misturas	Slump test (cm)	Massa específica (g/cm ³)
100% Natural	20,0	2,32
100% Reciclado	17,0	2,18
50%/50% Nat/Rec	19,5	2,27

Fonte: Autor (2022)

Os valores do ensaio de abatimento do tronco de cone mostraram-se elevados (Figura 25), o que representa uma maior fluidez e trabalhabilidade ao concreto devido tanto aos ajustes realizados na dosagem quanto ao teor de argamassa do traço, uma vez que o fator a/c não foi alterado. Em relação à massa específica, os valores apresentados são bem similares e próximos aos valores referência para as misturas com 100% de agregado natural e 50% de agregado natural e 50% reciclado. É possível notar um menor valor na mistura com 100% de agregado reciclado, que tende a ter valores menores devido às características dos agregados reciclados, tais como porosidade, argamassa aderida etc.

Figura 25 - Ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*)



Fonte: Autor (2022)

Ademais, é possível relacionar o valor da consistência do concreto com seu tipo de utilização e manuseio. A exemplo, concretos mais fluidos possuem a capacidade de preencher fôrmas de formatos mais simples, até os mais complexos, assim como ocupar todo o espaço mesmo que impostos à elevadas taxas de ferragem. Como ponto negativo, pode-se citar o maior risco de segregação do material, maior consumo de cimento e até mesmo a diminuição da resistência mecânica, devido à maior presença de água na mistura.

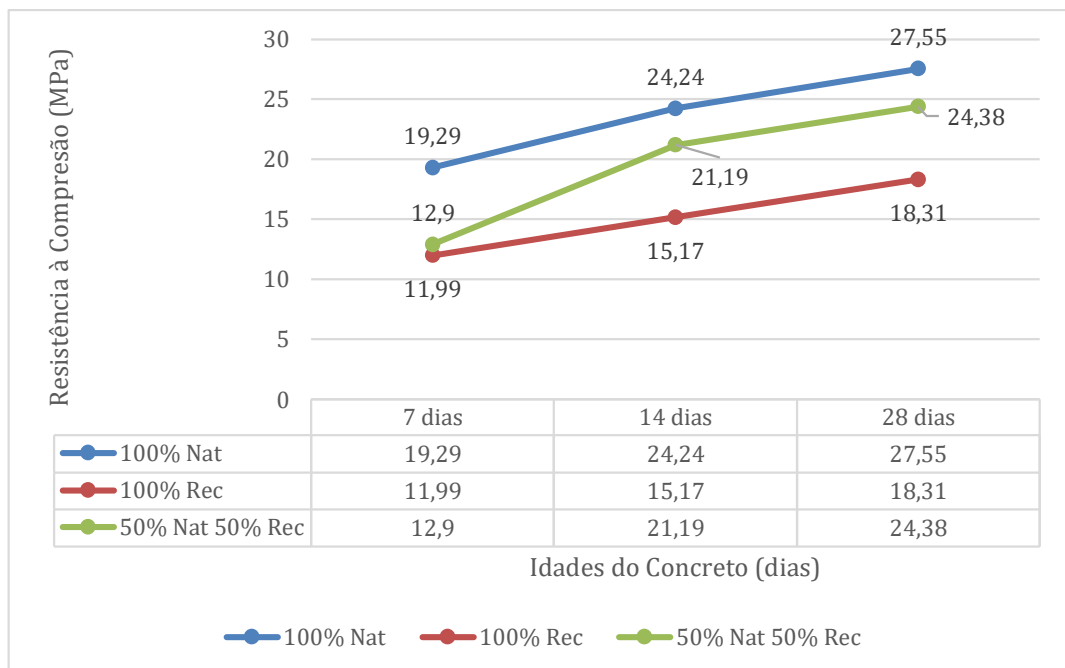
7.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão tem sido um parâmetro bastante utilizado quanto à avaliação do material e dos métodos utilizados na execução de estruturas em concreto, servindo de

ferramenta qualitativa e de aceitação perante os requisitos estabelecidos na fase de projeto. Na presente seção, serão discutidos os resultados dos ensaios obtidos pelas diferentes misturas.

Pelo fato de terem sido realizados ensaios em diferentes idades do concreto (Figura 26), pôde-se acompanhar a evolução da resistência das amostras e analisar possíveis tendências quanto aos incrementos nos valores a cada intervalo de tempo.

Figura 26 - Linhas de tendência da resistência à compressão em relação a idade das amostras

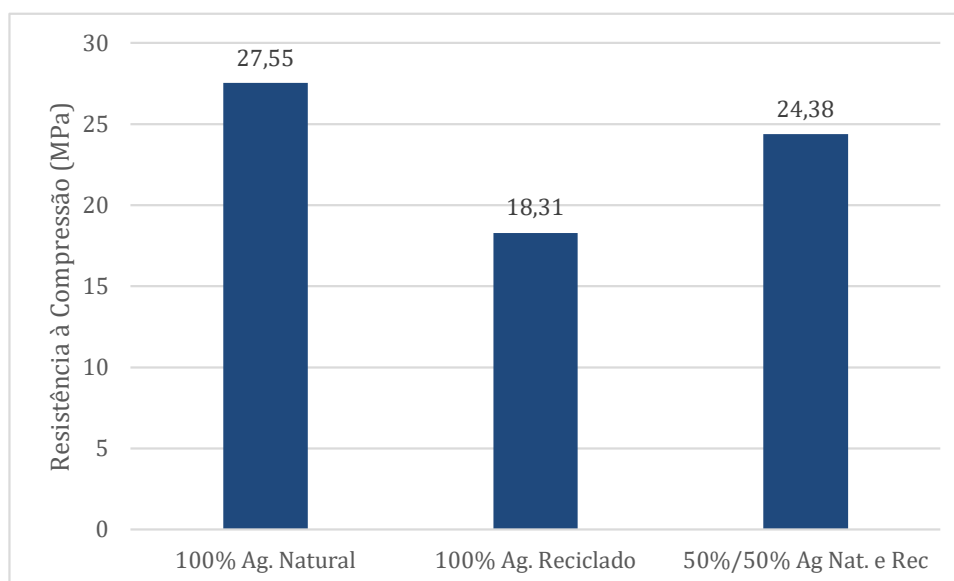


Fonte: Autor (2022)

Embora com o pequeno espaço amostral de dados disposto não seja possível traçar um modelo de previsibilidade, a partir das informações contidas na Figura 26, é possível relacionar com outras produções bibliográficas que apresentam dados similares. Debieb e Kenai (2008), ao substituir os agregados naturais por agregados reciclados nas misturas de concreto produzidas, obtiveram uma redução de cerca de 35% na resistência à compressão.

Na Figura 27 tem-se o gráfico representativo da resistência à compressão dos três tipos de mistura produzidos, relacionando-os com os três intervalos de cura dos corpos de prova, assim como pautado pela NBR 5739 (ABNT, 2018a).

Figura 27 - Gráfico relacionando a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias



Fonte: Autor (2022)

No que tange aos resultados de resistência à compressão, as misturas com 100% do agregado natural e com 50%/50% apresentaram resultados satisfatórios aos 28 dias, acima do patamar dos 20 MPa estabelecidos como valor referência, e dentro da classe definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014) de concretos para fins estruturais. A mistura com 100% de agregado reciclado obteve resultados abaixo do requisito mínimo aos 28 dias, nesse caso 18,31 MPa, uma redução de 8,45% frente ao valor da resistência característica ($f_{ck} = 20\text{MPa}$). Uma das prováveis causas se deve às próprias características físicas dos agregados reciclados, as quais conferem uma diminuição significativa na resistência à compressão do concreto, argamassa aderida, aumento das tensões nas zonas de transição etc.

Quanto aos valores de resistência, pelo fato de que, para o método de dosagem escolhido, o consumo de cimento tenha sido fixado, a variação dos resultados pode descrever a influência da distribuição granulométrica e até as próprias características físicas, bem como da forma dos agregados reciclados no comportamento do concreto no estado endurecido. As misturas com total substituição do agregado natural pelos agregados reciclados apresentaram resultados abaixo dos desejados, não atingindo o valor alvo, no entanto demonstraram variações de resistência entre os intervalos, proporcionais quando comparadas às demais misturas, ou seja, uma possível correção no teor do traço pode conferir à mistura um melhor rendimento.

Sob o viés da variação da parcela de agregado reciclado presente na mistura, é possível propor um contraponto à norma. Essa limita a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado em 20%, no entanto, de acordo com os resultados obtidos pelo presente trabalho, fica

clara a obtenção de bons resultados de resistência à compressão ao passo que se utiliza maiores percentuais de substituição dos agregados, o que permite a ampliação do espectro de utilização dos agregados reciclados nas misturas de concreto empregados em diferentes partes das etapas de concepção da edificação.

Sobretudo, devido ao alto teor de argamassa das misturas, fatores como os valores do *slump test* e da resistência à compressão podem sofrer influência direta, uma vez que essas propriedades tendem a ser afetadas tanto pela maior fluidez da mistura, que gera uma menor consistência da mistura, aspectos que podem ser derivados da alteração no fator água cimento, quanto pela maior quantidade de cimento na mistura, consequentemente o aumento da pasta, que confere resistência ao concreto.

Tabela 10 - *Slump test* e resistência à compressão

Misturas	<i>Slump test</i> (cm)	Resistência à Compressão (MPa)
100% Natural	20,0	27,55
50%/50% Nat/Rec	19,5	24,38
100% Reciclado	17,0	18,31

Fonte: Autor (2022)

Dessa forma, como exposto na Tabela 10, pode-se, também, relacionar o fato de que as características físicas dos agregados reciclados influenciam diretamente na trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto, comportamentos intimamente ligados à porosidade dos agregados reciclados, sua densidade e à irregularidade e rugosidade das partículas. Destarte, devido à alta heterogeneidade dos materiais constituintes dos resíduos que dão origem aos agregados reciclados, associados às limitações de correlações formuladas apenas no campo prático, tem-se uma maior barreira de entrada quanto à maior utilização dos agregados reciclados.

Na Tabela 11 podem ser vistos resultados para as demais propriedades dos concretos no estado endurecido.

Tabela 11 - Propriedades do concreto no estado endurecido

Misturas	Absorção de água (%)	Índice de Vazios (%)	Massa específica real (g/cm³)
100% Natural	8,60	18,11	2,57
100% Reciclado	13,34	25,37	2,55
50%/50%	11,19	22,39	2,56

Fonte: Autor (2022)

Para as misturas contidas no Tabela 11, no tocante à absorção de água, os concretos produzidos com a inserção do agregado reciclado apresentam uma absorção de água, em média, 4% maior quando comparados ao concreto com agregado natural. Tal fato pode ser justificado devido à própria característica dos agregados, que apresentam maior porosidade, superfície irregular e altos percentuais de absorção de água, como também, tais características podem ser afetadas pela distribuição granulométrica deficiente de materiais finos que preencham os vazios do esqueleto granular e favoreçam uma maior compactação e travamento das partículas, dessa forma interferindo no resultado final da mistura.

Não obstante, os valores dos índices de vazios também se mostram elevados, possivelmente devido às causas supracitadas no que concerne à absorção de água. Outrossim, podem conferir ao concreto menor resistência mecânica (Tabela 12), maiores deformações, aparecimento fissuras de maior espessura, assim como promovem uma maior suscetibilidade à problemas relacionados com sua porosidade, que vão desde a infiltração de água, contaminação de agentes agressivos e carbonatação.

Tabela 12 - Índice de vazios e resistência à compressão

Misturas	Índice de Vazios (%)	Resistência à Compressão (MPa)
100% Natural	18,11	27,55
50%/50% Nat/Rec	22,39	24,38
100% Reciclado	25,37	18,31

Fonte: Autor (2022)

No que concerne aos dados da massa específica real dos concretos, essa analisada no estado endurecido, é possível observar que os concretos constituídos com agregado reciclado,

neste caso, apresentaram um valor de massa específica condizente com os valores listados na literatura. Nas pesquisas realizadas por Folino e Xargay (2014), os valores para massa específica da mistura é de 2,57 g/cm³. Ademais, as misturas apresentam variação mínima em comparação ao concreto de referência, tal aspecto pode ser justificado pelo elevado teor de argamassa da mistura, conseqüentemente o acréscimo do consumo de cimento e presença de material cimentício, minimizando os efeitos dos agregados reciclados no que tange à sua natureza.

8 CONCLUSÃO

8.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o panorama geral dos estudos já produzidos, associados aos dados obtidos através dos ensaios do presente trabalho, é possível concluir que a inserção dos agregados reciclados no concreto se mostra bastante promissora, com um potencial enorme para produções em pequena e larga escala. Ademais, vale ressaltar que a maior quantidade de pesquisas relacionadas ao tema permite atestar a usabilidade dos agregados, propondo técnicas a fim de mitigar os pontos negativos da sua utilização.

A partir da análise de parâmetros de avaliação como a resistência mecânica, foi possível inferir alguns aspectos dos agregados que influenciam diretamente no comportamento do concreto, desde seu estado fresco até o endurecido. Os resultados obtidos mostraram-se, em partes, coerentes com os presentes na literatura, mas foi possível abrir um novo leque de opções para o uso dos agregados reciclados.

No que tange à resistência à compressão, para o valor alvo definido o concreto com ARC apresentou valores bem próximos aos valores obtidos pelos concretos com agregados naturais. Há indícios de que seu teor de substituição não necessariamente atue diretamente no decréscimo da resistência, o que indica uma variação não equacionada nesses termos, uma vez que fatores diversos podem contribuir positiva e negativamente no comportamento da mistura.

Os agregados reciclados de concreto, principalmente devido à ausência de correlações matemáticas que relacionam suas características com as propriedades do concreto com ARC, tem sua utilização dificultada. Estudos teóricos e práticos são essenciais para que novos métodos de dosagem também levem em conta a inserção de agregados reciclados nas misturas de concreto, tendo seus devidos cuidados quanto às suas características e influências.

Ademais, vê-se latente a influência dos agregados reciclados para com as misturas de concreto produzidas, principalmente quando em substituição total aos agregados naturais. Dentre elas, vale ressaltar a deficiente distribuição granulométrica, que provoca um menor preenchimento e compactação do esqueleto granular, necessitando de um maior consumo de cimento, por conseguinte de pasta, assim como atenuam, senão prejudicam os efeitos causados na zona de transição, proporcionando maiores tensões, conseqüentemente menor resistência à compressão.

Das misturas analisadas, a substituição de 50% do agregado natural em detrimento do agregado reciclado se mostrou bastante promissora, uma vez que apresentou resultados satisfatórios quanto à resistência à compressão, massa específica no estado endurecido. No que tange os valores do *slump test*, esse se mostrou bastante elevado, o que pode acarretar em problemas durante a concretagem, com relação à possibilidade de ocorrer segregação e provocar o surgimento de manifestações patológicas futuras, contudo pode ser corrigido com alterações no traço, como a inserção de finos. Quanto à absorção de água, os valores elevados podem ser explicados, principalmente, pela distribuição granulométrica dos agregados que permite ao concreto um maior índice de vazios e porosidade. Como alternativa de atenuação, alterações nos processos de cominuição podem ser adotados, da mesma forma que tais resultados devem ser levados em conta no processo de dosagem e definição do teor de argamassa. Outra possibilidade é a inserção de materiais finos ou a combinação entre agregado natural e agregado reciclado de modo a compor uma curva granulométrica mais contínua.

8.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante frisar que a utilização dos agregados reciclados apresenta-se como uma ótima alternativa no que tange a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental causado pela construção civil. No entanto, ao passo que são empregados métodos construtivos diversos, é conferida uma variedade de características aos agregados reciclados gerados, o que pode trazer aspectos indesejáveis nas produções de concreto, caso não haja o adequado controle tecnológico.

Dessa forma, faz-se necessário a ampliação das pesquisas e do arcabouço teórico acerca da temática, para que assim seja possível elencar, de forma mais clara, relações que confirmam qualidade dos agregados reciclados, por conseguinte, às misturas de concreto. Como sugestões para futuras pesquisas, lista-se:

- Ajuste da distribuição granulométrica dos agregados reciclados;
- Análise do índice de forma dos agregados reciclados utilizados;
- Uso de modelagem computacional para propiciar uma análise maior variação nos teores de agregados sem gerar esforço experimental e consumo exacerbado de materiais.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. **ABNT NBR 5739**: Concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.
- _____. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.
- _____. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- _____. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- _____. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland: preparo controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- _____. **ABNT NBR 9935**: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- _____. **ABNT NBR 16889**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **ABNT NBR NM 46**: Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75 μ m, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003a.
- _____. **ABNT NBR NM 248**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003b.
- _____. **ABNT NBR 9833**: Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- _____. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.
- _____. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.
- _____. **ABNT NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.
- _____. **ABNT NBR 16972**: Agregados: determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.
- _____. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021e.

_____. **ABNT NBR 7680-1**: Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALCANTARA, M. A. M. **Ensaio mecânicos do concreto: contingências e preocupações para com as avaliações da resistência à compressão uniaxial e do módulo de elasticidade**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.arsaedificativa.com/2018/06/ensaios-mecanicos-do-concreto.html>. Acesso em: 12 out. 2022.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. *et al.* **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos**. I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. São Paulo, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO – ANEPAC. **Mercado de agregados - Perspectivas para 2022**. Disponível em: <<https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022>>. Acesso: 17 junho 2022.

AHMAD, S. H. **Short term mechanical properties**. In: SHAP, S.P.; AHMAD, S. H., (ed). *High Perfomenace Concrete: Properties and Aplicantions*. 1 ed. Great Britain, Mcgraw - Hill, 1994. p.20-60.

BAI, *et al.* An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction and building materials**, v. 240, p. 117978, 2020.

BARBUDO, A. *et al.* **Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete**. *Journal of Cleaner Production*, v. 59, p. 93–98, 2013.

BITTENCOURT, N. **O futuro do concreto: eficiência e desenvolvimento sustentável em foco**. Suplemento Revista Grandes Construções: Universo concreto. nº 66 - Jan/Fev.2016. Disponível em: < http://www.grandesconstrucoes.com.br/br/pdfs/SUPLEMENTO_GC_66.pdf> Acesso: 18 jun. 2022.

THOMAS, C.; BRITO, J.; CIMENTADA, A.; SAINZ-AJA, J. A. **Macro- and microproperties of multi-recycled aggregate concrete**, *Journal of Cleaner Production* (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118843>

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2002) Resolução CONAMA nº. 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2011) Resolução CONAMA nº. 431, de 24 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do CONAMA,

estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União. Brasília, DF: Imprensa Oficial.

DEBIEB, F.; KENAI, S. **The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete.** Construction and Building Materials, v. 22, n. 5, p. 886–893, 2008.

ESCOBAR, C. J.; ANDREOTTI, D.; FABRO, G. **Avaliação de desempenho do ensaio de esclerometria na determinação da resistência do concreto endurecido.** Ibracon, Salvador, v. 1, n. 1, p.1-16, set. 2011. Anual. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto 2008.

FERREIRA L.; BRITO, J.; BARRA, M. **Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties.** Magazine of Concrete Research, v. 63, n. 8, p. 617-627, 2011.

FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21–31, 2014.

FROTTE, C.; NÚBILA, C. S. A. D.; NAGGALI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L.O.S. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD.** revista Matéria, v.22, n.2, 2017.

HELENE, P. R. **Controle de qualidade do concreto.** São Paulo, 1980. 129p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini; Brasília, DF: SENAI, 1992. p. 350.

ISAIA, G. C, O Concreto da Era Clássica à Contemporânea. In: ISAIA, G. C. (Editor), **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. cap.1, vol.1, p.1-44.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** São Paulo: IBRACON. 2007. V. 2.

KIM, Jeonghyun. **Construction and demolition waste management in Korea: Recycled aggregate and its application.** Clean Technologies and Environmental Policy, v. 23, n. 8, p. 2223-2234, 2021.

KIM, J; GRABIEC, A. M.; UBYSZ, A. **An Experimental Study on Structural Concrete Containing Recycled Aggregates and Powder from Construction and Demolition Waste.** Materials, v. 15, n. 7, p. 2458, 2022.

JAYASURIYA, A. *et al.* Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, n. April 2020, p. 105121, 2021.

KAZMIERCZAK, C. S. et al. **Influence of the moisture content on the dynamic modulus of elasticity of concrete made with recycled aggregate.** *Ambiente Construído*, v. 19, n. 2, p. 79– 89, 2019.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** 1999. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: PINI, 1994, 573p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, C. V. A. **Avaliação e determinação de parâmetros para otimização de esqueleto granular em atendimento à autoadensabilidade de concretos.** 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Materiais) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Materiais, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto.** Porto Alegre, 2016, Bookman, 888 p.

OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. **Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 30, n. 2, 2018.

PALACIOS, M. P. G. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto.** 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Cap. 5.

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties.** *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 294-309, 2017.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland;** 13ª ed. Ed. Globo, São Paulo. 1998. p. 307.

REVILLA-CUESTA, V. *et al.* **Self-compacting concrete manufactured with recycled concrete aggregate: An overview.** *Journal of Cleaner Production*, v. 262, 2020.

RIBAS, R. A. J. **CAPÍTULO 1: Materiais e Características Básicas.** Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/3219090/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. ET-67. São Paulo: ABCP, 1990.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3ª Ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SAMANIEGO, Y. T. M. **Ensaio não destrutivo para avaliação da resistência do concreto: estudo de aplicações em obras**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Cap. 5.

SILVA, N. V. **Obtenção de concreto autoadensável leve com agregado reciclado**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SILVA, D. A.; MELO, C. E. L. Agregado reciclado, uma fonte sustentável de matéria prima: uma revisão. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, jul. 2022. ISSN 2447-9187. Disponível em: <<https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/6033>>. Acesso em: 22 Dez. 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6033>.

SILVA FILHO, L. C. P.; HELENE, P. **Análise de Estruturas de Concreto com problemas de resistência e fissuração**. In: ISAIA, G. C. (Ed). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1ª ed. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1129-1174.

SILVA, L. C.; FELIX, L. P.; SANTOS, T. M. **INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, [S. l.], 2014.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THOMAS, C. *et al.* 2013. Durability of recycled aggregate concrete. **Constr. Build. Mater.** 40, 1054–1065. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2012.11.106>.

THOMAS, C. *et al.* Macro-and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 245, p. 118843, 2020.

VERIAN, K. P. ASHRAF, W.; CAO, Y. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete productions. **Resources, Conservations and Recycling**, v. 133, p. 30-49, 1 jun. 2018.

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

VIEIRA FILHO, J. O. **Avaliação da resistência à compressão do concreto através de testemunhos extraídos: contribuição à estimativa do coeficiente de correção devido aos efeitos do broqueamento.** São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Engenharia de Construção Civil e Urbana, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC-EP-USP, 2007. 2 v. 440 p. (tese de doutorado).

YANG, Hong *et al.* **Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China.** Waste management, v. 63, p. 393-396, 2017.