

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS

Autor: Victor Ivanildo Gomes da Silva

Orientador: Juliano de Freitas Dutra

Curso: Engenharia Civil **Período:** 10º **Área de Pesquisa:** Materiais de construção

Resumo: O setor da construção civil contribui significativamente para a degradação ambiental devido à extração intensiva de recursos naturais e à grande geração de resíduos. Em Manhuaçu/MG, a expansão da indústria da construção resultou em um aumento na produção de resíduos de construção e demolição, os quais muitas vezes não recebem destinação ou reaproveitamento adequados, ampliando os impactos ambientais. Diante deste cenário, e considerando o crescente impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses resíduos, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a resistência à compressão axial de concretos produzidos com a substituição de 15% de agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado, contribuindo para práticas mais sustentáveis na construção civil e destinação correta desses resíduos. Os materiais utilizados foram coletados em uma concreteira localizada em Reduto/MG. O procedimento experimental adotado incluiu a produção de concretos reciclados e a realização de ensaios de resistência à compressão axial avaliados aos 14 e 28 dias de cura. Os resultados indicaram que o concreto com agregado reciclado não apresentou um aumento significativo na resistência à compressão ao final dos 28 dias. Em comparação com o concreto produzido com agregados naturais, a resistência média do concreto com material reciclado foi consideravelmente menor, mantendo-se inferior ao longo do período analisado. Assim, os resultados demonstraram que o concreto com agregado miúdo reciclado não apresentou resultados satisfatórios inicialmente, necessitando de mais estudos e ajustes no traço utilizado.

Palavras-chave: Construção civil. Resíduos de construção e demolição. Concreto reciclado.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é um ramo de grande impacto na economia mundial, estando diretamente relacionado à produção de insumos, equipamentos, serviços gerados e à criação de empregos. A intensa atividade deste setor resulta em um grande volume de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (Dutra, 2021). Em Manhuaçu/MG, a estimativa de geração de Resíduos de Construção Civil (RCC) e Resíduos Volumosos (RV) é de 46.499,5 toneladas por ano, segundo dados da Secretaria Municipal de Obras, conforme apresentado no Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PREFEITURA DE MANHUAÇU, 2023).

Segundo Paulino *et al.* (2023) no Brasil, as primeiras investigações científicas sobre o uso de agregados reciclados provenientes de RCD foram conduzidas por Pinto (1986) e Levy (1997) em argamassas, Bodi (1997) em pavimentação, e Zordan (1997) em concretos. A geração de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) continua sendo uma preocupação relevante no contexto urbano, com estudos recentes indicando que eles representam de 50% a 63% da massa total dos resíduos

sólidos urbanos no Brasil. De acordo com o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2023), essa alta representatividade é impulsionada pelo crescimento desordenado e pela baixa eficiência em práticas de reciclagem. Lima *et al.* (2023) ressaltam que a implementação de soluções como a reciclagem de RCD para a produção de materiais de construção é fundamental para minimizar os impactos ambientais e fomentar a economia circular

Nos últimos anos, muitos estudos sobre a reciclagem desses resíduos vêm sendo desenvolvidos para que estes materiais possam substituir agregados naturais, componentes dos materiais cimentícios, que são extraídos da natureza (Kisku, 2017). Entretanto, o uso de agregados reciclados enfrenta desafios significativos.

Um dos principais obstáculos é a variabilidade em sua composição que pode afetar a consistência e a qualidade do concreto produzido, além disso, a presença de contaminantes nos RCD pode prejudicar as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto (Poon e Chan, 2014). Ainda de acordo com esses autores, a limpeza e o processamento adequado dos agregados reciclados são essenciais para minimizar esses impactos negativos.

Dentro de uma matriz cimentícia, seja argamassa ou concreto, o agregado é um elemento fundamental para a produção desses materiais, e sua qualidade interfere diretamente nas propriedades finais que se deseja alcançar. Assim, a caracterização dos agregados é crucial para avaliar sua adequação ao tipo de inserção pretendida (Mehta e Monteiro, 2008).

Portanto, buscando dar uma melhor destinação para estes materiais, este estudo visa caracterizar os resíduos de construção e demolição gerados em Manhuaçu/MG e utilizá-los na produção de concretos reciclados com substituição de 15% de agregados naturais por agregados miúdos reciclados para concretos dosados para 30MPa.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

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

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 10004:2004, define resíduos nos estados sólido e semissólido como aqueles resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição. Isso inclui lodos provenientes de sistemas de tratamento de água e resíduos gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição. Também abrange certos líquidos que não podem ser lançados na rede pública de esgotos ou corpos d'água sem tratamento prévio devido às suas características.

Para reduzir os impactos ambientais causados pelos resíduos gerados na construção civil, considerando que esses resíduos representam uma parte significativa dos resíduos sólidos nas áreas urbanas e que seu descarte inadequado é prejudicial, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu algumas definições importantes na Resolução nº 307 de 2002. O Quadro 1 apresenta as definições da resolução nº 307 de 2002 do (CONAMA)

QUADRO 1 - Definições CONAMA Resolução 307 de 2002

I – Definições de resíduos da construção civil	como aqueles originários de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, além dos resultantes da preparação e escavação de terrenos. Esses resíduos incluem materiais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros. Esses materiais são comumente denominados entulhos de obras, caliça ou metralha.
IV - Agregado reciclado:	É o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;
V - Gerenciamento de resíduos:	É o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;
VI - Reutilização:	É o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação dele;
VII - Reciclagem:	É o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;
VIII - Beneficiamento:	É o ato de submeter um resíduo às operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;

Fonte: Adaptado de Resolução 307 de 2002 do CONAMA, 2004

A Resolução citada anteriormente divide os resíduos em quatro classes diferentes na qual os resíduos de construção e demolição se enquadram na classe A, a qual se encontram de duas formas: rejeitos de concreto no estado fresco e/ou endurecido. Ou seja, essa classe considera que praticamente quaisquer tipos de resíduo que se encontrem nesta situação podem ser reciclados.

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), a estimativa de geração nacional de RCD é de aproximadamente 44 milhões de toneladas por ano, podendo estar subavaliada

porque nem todo o fluxo de resíduo passa pelos gerenciadores de resíduos sólidos, ou aterros. A Associação estima, a partir de dados coletados entre 2014 e 2017, que o total de RCD gerado no Brasil tem se mantido praticamente constante e ressalta que as informações levantadas são parciais, visto que não se tem conhecimento do total de RCD gerado pelo setor.

Apesar do alto índice de reciclagem em relação ao RCD gerado nesses países, em média, menos de 20% do agregado natural acaba realmente sendo substituído por agregado reciclado, indicando que grande parte da utilização está focada em regularização/nivelamento de terrenos ou aterramento, que é algo preocupante, isso consoante ao fato de que quando os resíduos têm muitos vazios e são aglomerados, estão sujeitos a deslocamentos excessivos e acabar cedendo com o tempo (Miranda *et al.*, 2009).

Os RCDs consistem em uma variedade de materiais provenientes de diversas atividades do setor (Di Maria *et al.*, 2018). Sormunen e Kärki (2019) explicam que os RCD são compostos por sobras e fragmentos de blocos cerâmicos, tijolos, gesso, solos, metais, concretos, argamassas, entre outros. No Brasil, a maior parte dos RCD provém de atividades de demolição e reforma, representando aproximadamente 60% do total (Favaretto *et al.*, 2017).

Segundo Dutra (2021) uma das principais limitações para o uso desses materiais é a ampla heterogeneidade presente. Mesmo em pequenas quantidades, a presença de contaminantes como vidro, plástico, madeira e solos pode impactar negativamente nas propriedades dos agregados reciclados produzidos (Silva *et al.*, 2020; Akathtar e Sarmah, 2018; Koper *et al.*, 2017). Assim, uma solução para controlar melhor os RCDs produzidos e reduzir a presença de contaminantes é realizar a segregação desses materiais em cada etapa da obra.

Apesar de serem considerados resíduos de baixa periculosidade, os RCDs podem conter materiais orgânicos, substâncias perigosas e embalagens variadas, contribuindo para a proliferação de insetos e doenças (AKHTAR, 2018). Ulubeyli *et al.* (2017) destacam que a reciclagem desses materiais pode conservar áreas de preservação ambiental, prolongar a vida útil de aterros sanitários, reduzir a poluição e os gastos energéticos, além de criar oportunidades de emprego.

2.1.2 Propriedades dos agregados reciclados de concretos

A ABNT NBR 15116 (2004) estabelece uma classificação para os agregados provenientes de RCD. Essa classificação divide os agregados da seguinte forma:

- Agregado de Resíduo de Concreto (ARC): composto por pelo menos 90%, em massa, de resíduos à base de cimento Portland e rochas em sua fração graúda;
- Agregado de Resíduo Misto (ARM): contendo no máximo 89,9%, em massa, de resíduos à base de cimento Portland e rochas em sua fração graúda.

Costa (2021) comenta que os agregados constituem uma parte significativa do volume total do concreto, influenciando diretamente as características finais do material. Para os agregados reciclados, a avaliação de sua qualidade é um desafio devido à frequente incerteza sobre a origem do material. As variações nas fontes de RCD podem introduzir impurezas na argamassa aderida, complicando ainda mais o processo de avaliação, ou seja, quanto maior o grau de impureza, maior a

variabilidade nas propriedades físicas e mecânicas do agregado dificultando principalmente a concretização de uma boa dosagem do concreto para que o mesmo atinja a resistência e durabilidade esperada (HUDA, 2014).

Uma característica distintiva dos agregados reciclados em comparação aos naturais é a sua forma mais angular, o que impacta a trabalhabilidade das argamassas e concretos no estado fresco (ANGULO, 2000). Sua capacidade de absorção de água é outro aspecto significativo, a alta porosidade dos agregados reciclados resulta em características diferenciadas em relação aos agregados naturais. E, de fato, estudos mostram que os agregados reciclados possuem maior porosidade quando comparados aos naturais, o que pode influenciar diretamente as propriedades do concreto produzido com esses materiais (CARASEK *et al.*, 2018).

Sidorova *et al.* (2014) apontam que este fato pode ser explicado diante a maior quantidade de argamassa aderida aos grãos do agregado reciclado, o que pode resultar em menor densidade e maior absorção de água. Quantitativamente, a capacidade de absorção de água dos agregados reciclados, devido à argamassa aderida, varia de 3,2% a 12% para agregados graúdos e miúdos, respectivamente (COSTA, 2021). Em comparação, os agregados naturais apresentam uma absorção de água de aproximadamente 0,3% (HUDA, 2014), enquanto Katz (2003) relata valores entre 0,5% e 1,5%. Observa-se que, quanto menor a granulometria do agregado reciclado, maior é sua absorção de água (COSTA, 2021).

Em termos percentuais, a absorção de água da cerâmica vermelha pode chegar a 24% em massa. Já a absorção de água das partículas cimentícias pode alcançar 15% em massa. Sendo assim, a presença de cerâmica vermelha no agregado RCD pode influenciar fortemente a porosidade desse agregado (ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).

A densidade e a taxa de absorção dos agregados reciclados variam conforme o conteúdo de argamassa aderida. À medida que o teor de argamassa aumenta, a densidade do grão diminui e a taxa de absorção aumenta, resultando em uma redução na qualidade do material (KIM *et al.*, 2019).

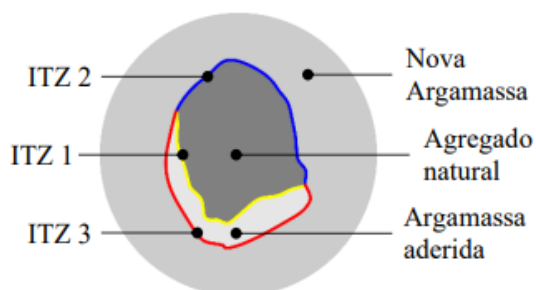
Conhecer a composição dos agregados reciclados é fundamental para determinar suas características e propriedades. Além disso, Sidorova *et al.* (2014) ressaltam a importância do estudo da microestrutura dos agregados reciclados para controlar determinadas propriedades e avaliar a evolução dessas propriedades ao longo do tempo.

Para a avaliação da microestrutura dos agregados reciclados, é fundamental enfatizar as Zonas de Transição Interfacial (ITZ). A ITZ em agregados reciclados refere-se à região ao redor das partículas de agregado reciclado onde ocorrem interações complexas entre o cimento e os agregados. Devido às características variáveis dos agregados reciclados, como maior porosidade e possível presença de resíduos de pasta de cimento endurecida, a ITZ pode apresentar propriedades mecânicas e de aderência diferentes das observadas em concretos convencionais. Compreender e controlar essas ITZs é crucial para otimizar o desempenho e a durabilidade do concreto reciclado, influenciando diretamente na qualidade e na aplicabilidade desse material em diversas aplicações de engenharia civil (DUTRA, 2021).

Conforme explicado por Menegatti (2021), o concreto reciclado, a zona de transição interfacial (ITZ) se forma em três fases distintas, diferentemente do que ocorre no concreto convencional. Essas fases são: entre o agregado natural que originou o agregado reciclado de concreto (ARC) e a argamassa envelhecida que permanece aderida a ele (ITZ 1); entre o agregado natural e a nova argamassa (ITZ

2); e entre a argamassa envelhecida e a nova argamassa do concreto (ITZ 3). Este conceito está ilustrado na Figura 1, facilitando a compreensão do processo.

FIGURA 1- Diagrama esquemático das zonas de transição interfacial (ITZ) antiga e nova.



Fonte: Dutra, 2021

2.1.3. Composição e principais características do concreto reciclado

Kirthika e Singh (2020) realizaram um estudo sobre concretos contendo agregado miúdo reciclado (AMR) em diferentes teores de substituição: 30%, 50%, 75% e 100%. Os resultados indicaram que o teor de 30% foi o mais vantajoso em termos de propriedades mecânicas, apresentando aos 28 dias uma resistência à compressão 1,6% superior ao concreto de referência. Segundo os autores, esse incremento pode ser atribuído à estrutura mais densa e menos porosa da mistura com 30% de substituição, que apresentou uma porosidade 25% menor em comparação ao concreto convencional. Entretanto, conforme o teor de substituição aumentou, observou-se uma redução nas propriedades mecânicas, o que se deve ao aumento da porosidade e à presença de argamassa antiga aderida aos grãos do agregado reciclado, comprometendo a aderência com a nova pasta de cimento.

Hafez *et al.* (2020) revisaram criticamente a aplicabilidade do AMR em concretos, considerando aspectos como desempenho técnico, impacto ambiental, consumo energético e custos. Com relação à resistência à compressão, os autores observaram que a maioria dos estudos concluem que a incorporação de agregados miúdos reciclados tem um efeito negativo nas propriedades mecânicas, principalmente devido à necessidade de aumentar o teor de água, elevando o fator água/cimento. No entanto, os mesmos autores também ressaltam que, em concretos de baixa resistência, o uso de AMR pode não impactar negativamente a resistência à compressão, uma vez que, nesses casos, a qualidade da pasta de cimento desempenha um papel mais relevante do que a qualidade dos agregados.

Leite e Santana (2019) destacam que a alta absorção de água, a textura rugosa e o formato irregular dos agregados miúdos reciclados podem, de fato, favorecer a melhoria da zona de transição do concreto reciclado, resultando em uma maior aderência entre a matriz de cimento e os agregados. Quanto à durabilidade, Hafez *et al.* (2020) comentam que a resistência do concreto à penetração de íons cloreto é afetada negativamente pelo aumento da porosidade, principalmente à medida que o teor de substituição de AMR aumenta. Essa maior porosidade do concreto com AMR compromete sua resistência à penetração de cloretos.

Rodrigues e Fucale (2014) enfatizam que, para o uso de agregados reciclados em concretos estruturais, é necessário um controle rigoroso no processo de dosagem,

além de estudos aprofundados sobre durabilidade, considerando aspectos como retração, fluência e permeabilidade. Quanto à dosagem, eles afirmam que práticas convencionais, como o uso de um teor fixo de argamassa seca, podem levar a um aumento no volume dos materiais e não ocasionar bons resultados.

Costa (2021) aponta que uma das principais dificuldades encontradas nos concretos que utilizam AMR é a maior deformabilidade em comparação aos concretos feitos com agregados naturais. A autora ressalta a importância de compreender melhor as propriedades relacionadas à deformabilidade, como o módulo de elasticidade, retração e fluência, para permitir um controle mais eficaz da tecnologia aplicada, e ainda encontrou que, ao substituir 15% do agregado miúdo natural por agregado miúdo reciclado (AMR) em concretos da classe C30, houve uma redução no abatimento, exigindo ajustes na mistura para manter a trabalhabilidade. A adição de metacaulim tornou o comportamento da mistura mais complexo, com uma diminuição acentuada no abatimento. Apesar disso, o uso de AMR aumentou a deformabilidade do concreto, e a compensação de água ajudou a controlar a absorção capilar, melhorando a durabilidade das misturas, mesmo com o uso de agregados reciclados mais porosos.

Além disso, Costa (2021) observou que a deformabilidade afeta diretamente a retração e a fluência do concreto. Nas misturas da classe C30, foi constatada uma diminuição nos índices de vazios e absorção total à medida que o teor de AMR aumentava. No entanto, o concreto com AMR apresentou maior retração por secagem em comparação ao concreto convencional. O uso de metacaulim mitigou parcialmente esse efeito, demonstrando que o controle adequado da deformabilidade com materiais suplementares pode equilibrar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A pesquisa também revelou que, com o tempo, houve um aumento progressivo na resistência, com o concreto que recebeu 15% de substituição por AMR alcançando uma resistência final em torno de 30 MPa, o que reforça a viabilidade do AMR em concretos de classe C30. Esses resultados indicam que a substituição de agregados naturais por AMR, quando bem controlada, não compromete significativamente a qualidade do concreto, tornando-se uma alternativa sustentável para a construção.

Silva, Geyer e Pantoja (2020) destacam que o volume total de argamassa residual presente em uma mistura de concreto reciclado é um fator crucial que governa a absorção total de água, segundo os autores, esse parâmetro é fundamental para compreender os efeitos dos processos de degradação no desempenho mecânico e estrutural do concreto reciclado.

2.2. Materiais e métodos

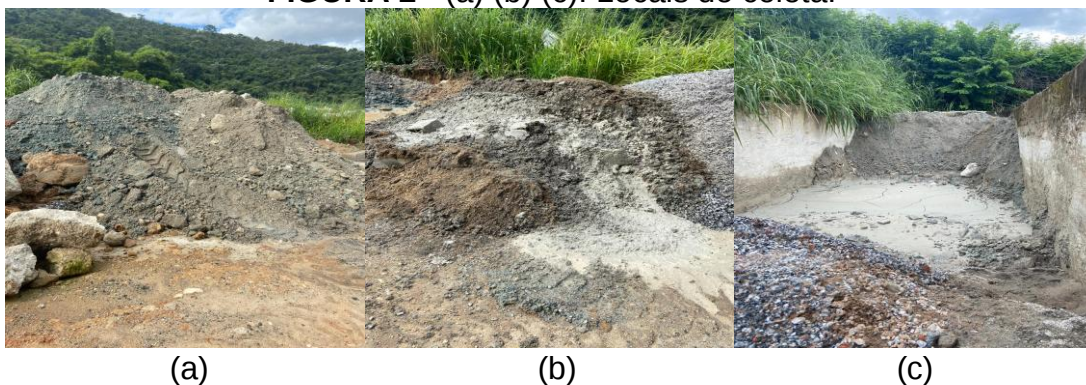
Neste estudo foi realizado a substituição do Agregado Miúdo Natural (AMN) por Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC), proveniente de resíduos de uma área de descarte de uma concreteira chamada Concrelagos Concreto S.A. em Reduto/MG. Os agregados reciclados foram utilizados na fração de 3,36 mm, com um teor de substituição de 15% de substituição do agregado natural pelo reciclado. Foram, portanto, produzidas duas misturas: uma contendo apenas agregado miúdo natural (NAT) e outra com 15% do agregado miúdo natural substituído por agregado miúdo reciclado.

A seguir, será detalhado o procedimento empregado na produção do AMRC, a caracterização de todos os materiais utilizados na confecção dos concretos reciclados, bem como os métodos de ensaios realizados.

2.2.1 Produção e beneficiamento do agregado graúdo reciclado

Os materiais utilizados neste estudo foram coletados na empresa Concrelagos, localizada em uma área de descarte próxima à pedreira em Manhuaçu/MG, conforme ilustrado na Figura 2 Local de coleta.

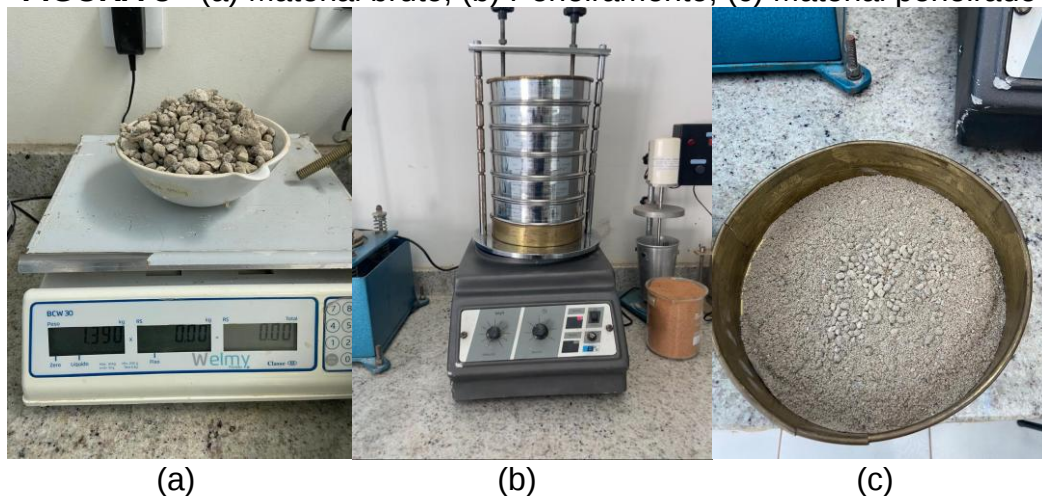
FIGURA 2 - (a) (b) (c): Locais de coleta.



Fonte: O autor, 2024.

Os resíduos selecionados, compostos predominantemente por restos de concreto e argamassa, passaram por um processo de beneficiamento para serem convertidos em agregados miúdos reciclados, com ênfase na obtenção de areia média. Este processo foi realizado no laboratório de solos do Centro Universitário UNIFACIG, onde os resíduos foram inicialmente britados e, em seguida, peneirados utilizando malhas variando de 4,75 mm a 0,075 mm, conforme mostrado na Figura 3 Beneficiamento e pesagem de materiais. O peneiramento foi conduzido em uma mesa vibratória, operando em intervalos de tempo de 10 minutos, para assegurar uma distribuição granulométrica uniforme.

FIGURA 3 - (a) Material bruto; (b) Peneiramento; (c) Material peneirado



Fonte: O autor, 2024.

Com base nos resultados obtidos, os materiais foram cuidadosamente pesados e selecionados para a produção do concreto, respeitando os parâmetros estabelecidos para garantir a qualidade, consistência e desempenho mecânico do produto.

2.2.2. Caracterização dos materiais

Neste trabalho, foi utilizada brita 0 como agregado graúdo, com dimensão máxima de 9,5 mm, proveniente de rochas graníticas extraídas na pedreira Pedramon, localizada em Vila Nova, distrito de Manhuaçu/MG. Os agregados miúdos empregados foram uma areia natural quartzosa, com origem no Rio Ipanema, em Ipanema/MG, apresentando uma dimensão máxima dos grãos de 2,36 mm, e um resíduo de descarte fornecido pela empresa Concrelagos, com dimensão máxima dos grãos de 4,75 mm. A granulometria dos agregados foi determinada por peneiramento mecânico a seco, em conformidade com a norma ABNT NBR 17054:1022.

O ensaio de absorção foi realizado ao longo de 24 horas, seguindo o procedimento padrão da NBR 16916:2021 (Agregado miúdo – Determinação da absorção de água). Esse procedimento garante uma medição precisa da quantidade de água absorvida pelos agregados miúdos, que é essencial para ajustar corretamente a quantidade de água necessária na dosagem do concreto, evitando uma superdosagem de água que possa comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade da mistura.

2.2.3. Dosagem e composição das misturas

A dosagem dos concretos foi baseada em um método desenvolvido por Costa (2021), que utiliza o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), criado por De Larrard *et al.* (1999). Esse modelo consiste em inclusões granulares ligadas por uma matriz e tem como objetivo organizar os grãos de maneira a minimizar a porosidade, possibilitando o uso da menor quantidade de ligante possível (De Larrard, 2014).

O MEC permite a consideração individual das propriedades dos materiais constituintes, atendendo a características específicas definidas pelo usuário. Segundo Silva (2004), este método se destaca por seguir princípios científicos, envolvendo a observação de fenômenos, formulação de hipóteses, desenvolvimento de modelos matemáticos representativos e validação experimental desses modelos.

A moldagem das misturas, bem como os ensaios de caracterização dos materiais e os testes com os concretos, foram realizadas nos laboratórios do Centro Universitário UNIFACIG. A Tabela 1 apresenta as dosagens das misturas utilizadas que foram produzidas por Costa (2021).

TABELA 1 - Traços de moldagem

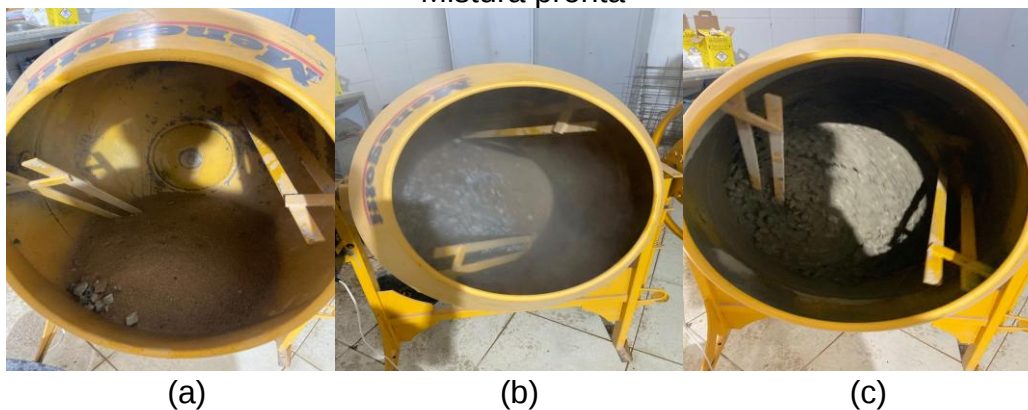
MATERIAIS						
TRAÇO	Brita 0 (kg) NAT	Areia (Kg) RCA	Areia (Kg) NAT	Cimento (kg)	Água (kg)	SP (kg)
C30 NAT	13,33	0,00	13,82	4,65	3,06	0,04
C30 RAC	13,30	2,07	11,72	4,76	3,08	0,04

Fonte: Costa, 2021.

2.2.4. Produção, moldagem e cura dos copos de prova

Os concretos foram preparados utilizando um misturador tipo betoneira, com capacidade de 150 litros, fabricado pela MENEGOTTI. Inicialmente, o misturador foi umedecido com água, sendo removido qualquer excesso com um pano úmido. Em seguida, os agregados foram adicionados na ordem específica, começando pela brita 0 e, posteriormente, pela areia, visando evitar a aderência da areia às paredes da betoneira. Os materiais foram misturados por um minuto para garantir uma homogeneização adequada. Posteriormente, foi adicionada 50% da quantidade total de água à mistura, acionando-se a betoneira por mais um minuto. Após essa etapa, o cimento CPV foi incorporado e misturado por mais um minuto. Em seguida, o restante da água foi adicionado, juntamente com o superplastificante Camargo químico PN 7025. Por fim, a mistura foi processada por mais oito minutos. O tempo total de mistura, a partir da adição da água, foi de aproximadamente dez minutos. A Figura 4 ilustra as etapas descritas.

FIGURA 4 - (a) Inserção dos agregados; (b) Inserção do CPV e início da mistura; (c) Mistura pronta



Fonte: O autor, 2024.

Após o término do processo de mistura, iniciou-se a moldagem dos corpos de prova, conforme o procedimento de adensamento manual estipulado pela ABNT NBR 5738:2015. A moldagem foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, metade do molde foi preenchida com concreto, e, em seguida, foram aplicados 12 golpes com uma haste metálica ao longo de toda a espessura preenchida, tomando cuidado para não atingir a base do molde. Esses golpes foram distribuídos uniformemente por toda a seção transversal do molde, com o objetivo de vibrar o concreto, promovendo um melhor preenchimento dos vazios e uma compactação mais eficaz do material dentro da forma. Na segunda etapa, o restante do volume do corpo de prova foi preenchido com concreto. Após o preenchimento, o excesso de concreto foi removido da superfície do corpo de prova para garantir uma maior planicidade. Para adensar esta última camada, foram aplicados mais 12 golpes com a haste, permitindo que ela penetrasse aproximadamente 20 mm na camada anterior de concreto.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos nos moldes por 24 horas em um ambiente úmido, a fim de preservar a umidade do concreto. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram submersos em um tanque de cura, onde permaneceram até atingirem as idades necessárias para a realização dos ensaios. A Figura 5 ilustra o processo de moldagem e cura dos corpos de prova.

FIGURA 5 - (a) Moldagem dos corpos de provas; (b) Cura dos corpos de provas



(a)

(b)

Fonte: O autor, 2024.

2.2.5. Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone de Abrams foi realizado de acordo com as diretrizes da norma ABNT NBR 16889 (2020). Durante o ensaio, o concreto foi compactado em três camadas, aplicando-se 25 golpes em cada camada, uniformemente distribuídos, utilizando uma haste metálica. Após a compactação, o molde que contém o concreto foi cuidadosamente removido na direção vertical.

Posteriormente, utilizando-se uma régua, foi feita a medição do abatimento, que fornece dados cruciais sobre a consistência e a trabalhabilidade do concreto. A Figura 6 ilustra a etapa final do ensaio.

FIGURA 6 - Teste de abatimento de tronco de cone



Fonte: O autor, 2024.

2.2.6 Resistência a compressão axial

O processo de caracterização da resistência à compressão dos concretos foi realizado em conformidade com os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 5739 (2018). Para cada idade de ruptura, foram preparados três corpos de prova com dimensões de 10 x 20 cm, submetidos a períodos de cura de 14 e 28 dias. As rupturas dos corpos de prova foram executadas utilizando uma prensa Paviteste, modelo 3025A 054 05/93. Antes de cada ensaio, os corpos de prova passaram por um processo de faceamento para garantir a planicidade e regularidade das extremidades,

em conformidade com as especificações normativas. A Figura 7 demonstra o processo de ruptura dos corpos de prova.

FIGURA 7 – (a) Retificação do corpo de prova; (b) Carga aplicada ao corpo de prova na prensa; (c) Ruptura do corpo de prova.



Fonte. O autor, 2024.

2.3. Discussão dos resultados

2.3.1. Caracterização dos materiais

2.3.1.1. Granulometria

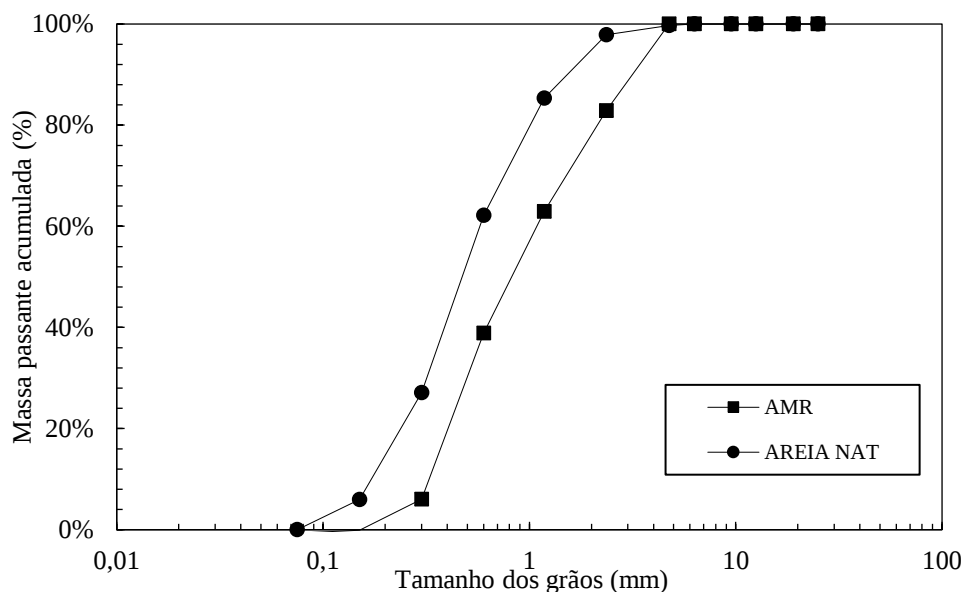
Durante o ensaio de granulometria conforme o Gráfico 1, observou-se que a granulometria da areia reciclada é significativamente mais grossa em comparação com a areia natural. Essa diferença pode ser atribuída à natureza dos agregados reciclados, que tendem a possuir partículas mais angulares e menos uniformes devido ao processo de britagem dos resíduos de concreto. O módulo de finura do resíduo de concreto reciclado foi determinado em 3,09, indicando uma granulometria mais grossa, enquanto o módulo de finura da areia natural foi de 2,20, o que reflete uma distribuição granulométrica mais fina. Esses resultados, conforme apresentados na Tabela 2, são fundamentais para compreender o impacto da granulometria na trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto.

TABELA 2 – Dimensões dos grãos

Ensaio	Materiais	
	Areia natural	Areia reciclada
Dim. Máx. característica (mm)	4,75	4,75
Módulo de Finura (%)	2,20	3,09

Fonte: O autor, 2024.

GRÁFICO 1 –Curvas granulométricas dos agregados

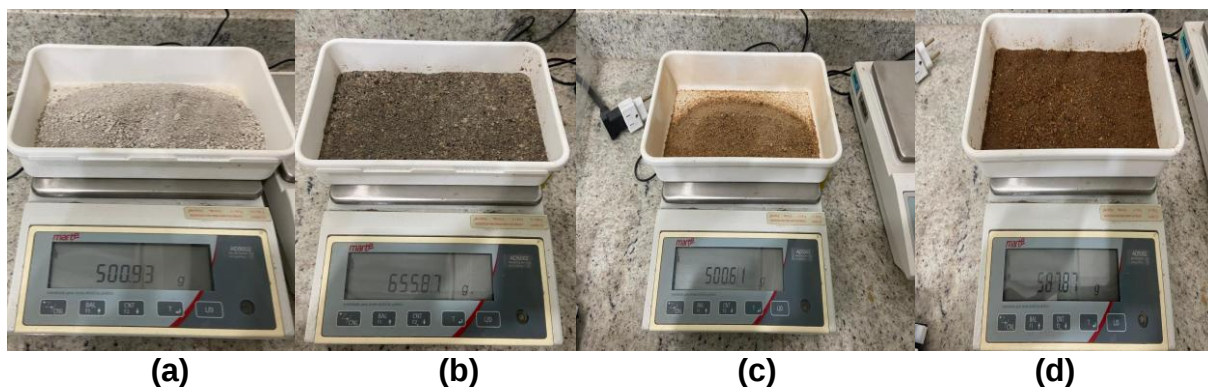


Fonte: O autor, 2024.

2.3.1.2. Absorção de água

Após a etapa de beneficiamento, os agregados foram submetidos ao ensaio de absorção de água, conforme ilustrado na Figura 8. Esses ensaios são essenciais para avaliar o comportamento dos agregados reciclados dentro da matriz cimentícia, especialmente no que se refere à demanda de água da mistura. A obtenção de dados precisos sobre a absorção de água permite ajustar a dosagem de água no concreto, assegurando a coesão e a trabalhabilidade adequadas da mistura (COSTA, 2021).

FIGURA 8 – (a) Areia reciclada seca; (b) Areia reciclada húmida; (c) Areia natural seca; (d) Areia natural húmida



Fonte: O autor, 2024.

No ensaio realizado, os valores de umidade encontrados foram de 30,98% para o agregado reciclado e 17,57% para o agregado natural. Esses resultados indicam uma maior capacidade de absorção de água por parte do agregado reciclado em comparação ao natural. Esse aumento na absorção deve ser levado em consideração para evitar possíveis impactos na resistência e na durabilidade do material final. A absorção total é calculada pela Equação (1).

$$(1) A = \frac{(m_{sat} - m_s)}{m_s} \times 100$$

Onde,

A é a absorção total de água (%);

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

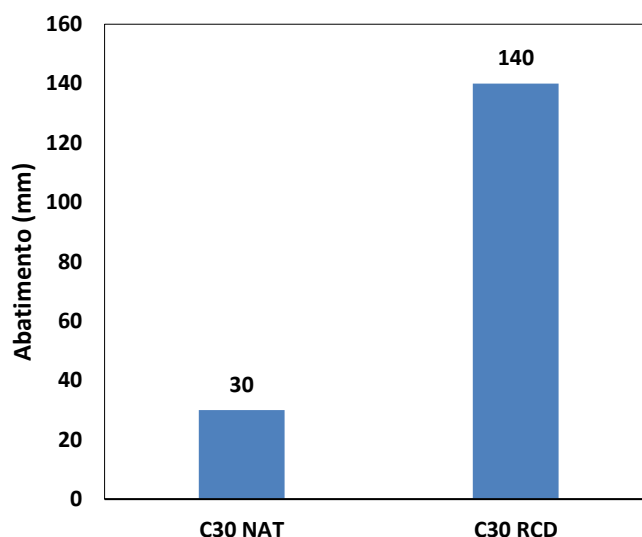
m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

2.3.2. Caracterização dos concretos produzidos

2.3.2.1. Abatimento do tronco de cone

O Gráfico 2 apresenta os resultados obtidos de cada concreto para o abatimento do tronco de cone.

GRÁFICO 2 – Abatimento do tronco de cone



Fonte: O autor, 2024.

A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que para o concreto com agregado reciclado o batimento foi de 140 mm, para o concreto com agregado natural o abatimento foi de 30 mm. Devido ao resíduo reciclado de concreto ser um agregado mais poroso do que a areia natural, houve uma diferença de abatimento 4,6 vezes maior para o concreto com agregado reciclado diante o aumento da porosidade na mistura do material que estar diretamente ligado ao aumento de água necessário. Assim, os abatimentos dos concretos produzidos não ficaram dentro da faixa esperada, que era de 100 ± 20 mm.

2.3.2.2. Resistência à compressão axial

Aos 14 dias de cura, os corpos de prova apresentaram uma resistência à compressão média de 31,7 MPa para o concreto com agregado natural (NAT), e 18,9

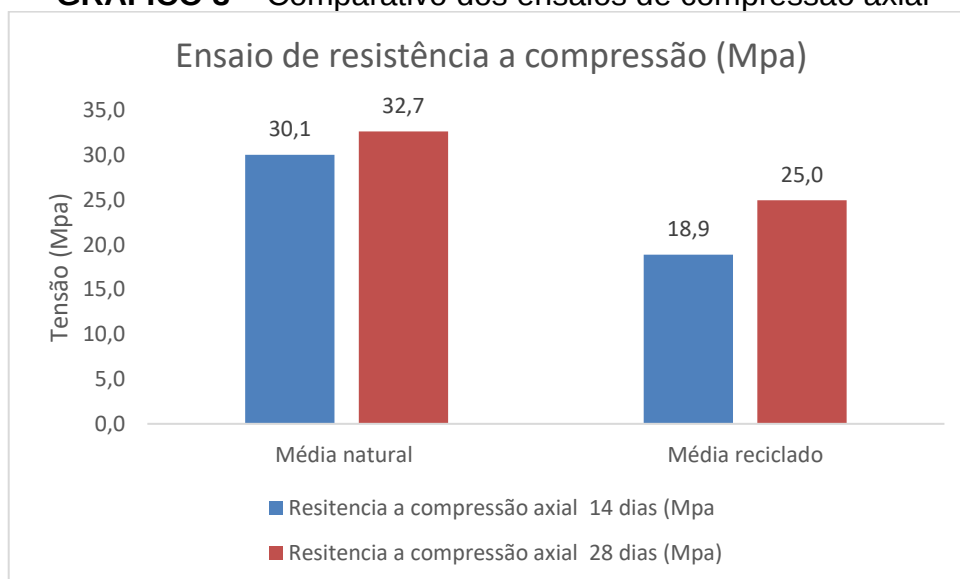
MPa para a mistura com 15% de substituição do agregado natural pelo reciclado (C30), conforme gráfico 3.

Os resultados indicam que a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado leva a uma redução significativa na resistência à compressão, com uma diferença de 37,2% em comparação ao concreto com agregado natural. Este declínio pode ser explicado pelo aumento da porosidade resultante da inclusão do AMR, que facilita uma maior absorção de água e consequentemente diminui a resistência mecânica do concreto, para esta confirmação, é necessário realizar caracterização física do concreto (Absorção total de água e índice de vazios).

Segundo pesquisadores como Costa (2021) e Dutra (2021), esta condição eleva a demanda de água para obter a trabalhabilidade e consistência desejada, aumentando o fator água/cimento afetando negativamente a resistência. Portanto, é crucial manter um equilíbrio cuidadoso na relação água/cimento para assegurar adequada trabalhabilidade, sem sacrificar ou diminuir a resistência estrutural do material.

Aos 28 dias de cura, os concretos apresentaram resistências média de 33 MPa para o NAT e 25 MPa para o reciclado C30. Esses valores correspondem a aumentos de 0,41% para a mistura natural e 32,3% para a mistura com 15% de substituição em relação aos 14 dias. O Gráfico 3 apresenta os resultados obtidos.

GRÁFICO 3 – Comparativo dos ensaios de compressão axial



Fonte: O autor, 2024.

Os resultados demonstram que a substituição parcial do agregado natural por agregado miúdo reciclado, afeta significativamente a resistência à compressão do concreto. De acordo com Costa (2021), devido ao grande índice de absorção de água que o material utilizado possui, e com o aumento de água na mistura, haverá uma perda significativa de resistência a compressão axial.

Esses resultados evidenciam que, embora a resistência inicial do concreto com areia reciclada seja inferior, a performance do material melhora com o tempo de cura, sugerindo que o uso de areia reciclada pode ser uma alternativa eficaz e sustentável dependendo para o que será usada. A melhoria contínua na resistência do concreto reciclado ao longo do tempo destaca a importância de considerar o tempo de cura ao avaliar a viabilidade do uso de materiais reciclados na construção.

3.CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que a incorporação de 15% de agregado reciclado no concreto, especificamente agregado miúdo, afeta a resistência à compressão, mas mantém as propriedades físico-mecânicas dentro de limites aceitáveis para aplicações estruturais. Aos 14 dias de cura, o concreto com 15% de substituição apresentou uma resistência média de 18,9 MPa, 32,3% inferior ao concreto com agregado natural (25 MPa). No entanto, aos 28 dias, a resistência do concreto com agregado reciclado aumentou para 26 MPa, reduzindo a diferença para 21,2% em relação ao concreto com agregado natural, que alcançou 33 MPa. Essa recuperação progressiva das propriedades mecânicas ao longo do tempo sugere que o uso de agregado reciclado pode ser uma alternativa sustentável viável, desde que se leve em consideração o tempo de cura.

Para trabalhos futuros, é recomendado a exploração de diferentes tipos de agregados reciclados e a investigação de aditivos e técnicas de cura para potencializar as propriedades mecânicas. Além disso, estudos de ciclo de vida e análises de desempenho em condições extremas devem ser realizados para validar a aplicabilidade do concreto reciclado em diferentes contextos construtivos.

Recomenda-se também uma investigação mais aprofundada sobre o impacto de diferentes proporções e tipos de agregados reciclados na resistência e durabilidade do concreto, explorando também a combinação com aditivos que possam melhorar suas propriedades. Além disso, é essencial conduzir estudos de durabilidade em longo prazo e em diferentes ambientes, incluindo condições extremas, para validar o comportamento do concreto reciclado. Pesquisas de ciclo de vida também são fundamentais para quantificar os benefícios ambientais e econômicos dessa prática, reforçando a viabilidade técnica e sustentável do uso de materiais reciclados na construção civil.

Adicionalmente, a análise da microestrutura do concreto com agregado reciclado pode fornecer insights sobre os mecanismos que contribuem para a recuperação de resistência ao longo do tempo, permitindo a identificação de possíveis melhorias nos processos de produção. O desenvolvimento de modelos que integrem variáveis como tipo de agregado, tempo de cura e condições ambientais também seria valioso para orientar o uso eficiente desses materiais. Além disso, a implementação de estudos comparativos em larga escala, envolvendo diferentes regiões e condições climáticas, pode ajudar a consolidar as práticas mais eficazes e economicamente viáveis para o uso de agregados reciclados em diversos contextos.

4. REFERÊNCIAS

ABRELPE (*Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies*), 2017. Panorama of Solid Waste in Brazil 2016 (in Portuguese). **Brazilian Association of Public Cleaning and Waste Companies Press**, São Paulo. Acessado em: http://www.abrelpe.org.br/panorama_apresentacao.cfm Acessado dia: 29 de novembro de 2024.

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

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

ANGULO, S. C. FIGUEIREDO, Antonio D. Concreto com agregados reciclados. *In*: ISAIA, Geraldo C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2011. cap. 47.2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16916:2021** – Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 10004**: Resíduos - sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

BRASIL, **Resolução Conama 307**, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 25 maio 2011.

CARASEK, H. *et al.*, GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C, **Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento**, Revista Cerâmica, CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, Tratamento de Minérios, 5ª ed., Rio de Janeiro, Luz, Adão; Sampaio, J. A.; França, S. C. A., 2018.

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

COSTA, Maíra. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos produzidos com agregados miúdos reciclados e metacaulim dosados pelo modelo de**

empacotamento compressível. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

DE LARRARD, F., FERRARIS, C.F., SEDRAN, T., Fresh concrete: a Herschel-Bulkley material, **Materials and Structures**, 1999.

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

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

DUTRA, Juliano de Freitas. **Comportamento mecânico e durabilidade de concretos de resistência normal e de alta resistência contendo agregados de resíduos de concreto e metacaulim.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

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

HAFEZ, Hisham. *et al.*, KURDA, Reben; KURDA, Rawaz; A critical review on the influence of fine recycled aggregates on technical performance, environmental impact and cost of concrete, **Applied Sciences**, 2020.

HUDA, Sumaiya Binte., **Mechanical and durability properties of recycled and repeated recycled coarse aggregate concrete.** 2014. D.Sc. The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2014.

KATZ, Amnon – **treatments for the improvement of recycled aggregate**, 2003.

KIM, Jung-Ho. *et al.*, SUNG, Jong-Hyun.; JEON, Chan-Soo.; 2019, A study on the properties of recycled aggregate concrete and its production facilities. **Applied Sciences**, 2019.

KIRTHIKA, S.K.; SINGH, S.K., Durability studies on recycled fine aggregate concrete”, **Construction and Building Materials**, 2020.

KISKU, N.; JOSHI, H.; ANSARI, M. *et al.* A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Material**, 2017.

KOPER, A.; KOPER, W.; KOPER, M. **Influência da Qualidade do Material de Concreto Bruto em Propriedades Seleccionadas de Agregados Reciclados de Concreto.** Procedia Engineering, 2017.

LEITE, M. B.; SANTANA, V. M., Evaluation of an experimental mix proportion study and production of concrete using fine recycled aggregate, **Journal of Building Engineering**, 2019.

LIMA, F. *et al.* **Análise da viabilidade do uso do RCD na produção de blocos de solo-cimento.** ResearchGate, 2023.

MENEGATTI, Lucas Caon. **Degradação de concretos reciclados submetidos a ciclos de molhagem-secagem e imersão contínua em água do mar.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo P. M. **Microestrutura do Concreto**, In: Nicole Pagan Hasparyk, *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3ª ed., Cap. 2, São Paulo, IBRACON – Instituto Brasileiro do Concreto, 2008.

MIRANDA, L. F. R. *et al.* Reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2009.

PAULINO, R. S.; LAZARI, C. H.; MIRANDA, L. F. R.; VOGT, V. **Atualização do cenário da reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** Ambiente Construído. 2023. Artigo - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

PREFEITURA DE MANHUAÇU. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos.** Secretaria Municipal de Obras, Manhuaçu, 2023. https://www.manhuacu.mg.gov.br/abrir_arquivo.aspx/Plano_de_Municipal_de_Gestao_Integrada_de_Residuos_Solidos__PMGIRS?cdLocal=2&arquivo=%7BDB83BDAB-E7A1-D2DD-D4CC-0BE8BBD32A4E%7D.pdf. acessado dia: 29 de novembro de 2024.

POON, C. S.; CHAN, D. Paving blocks made with recycled concrete aggregate and RODRIGUES. *et al.*, **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**, *Ambiente Construído*, 2014.

SIDOROVA, Anna. *et al.*, VAZQUEZ-RAMONICH, Enric.; BARRA-BIZINOTTO, Study of recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ, **Construction and Building Materials**, 2014.

SILVA, Alex Sandro Malaquias da, 2004, **Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aïtcin-Faurý modificado.** M.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004

SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B.; PANTOJA, J. C. Porosidade do concreto versus forma do agregado graúdo. **Brazilian Journal of Development**, 2020.

(PNRS). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**, 2023.

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

ULUBEYLI, Serdar; KAZAZ, Aynur; ARSLAN, Volkan. Construction and demolition waste recycling plants revisited: management issues. **Procedia Engineering**, 2017.

