

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA LUIZA CORRÊA DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

**CURITIBA**

**2024**

**MARIA LUIZA CORRÊA DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

**Use of construction waste in high-performance concrete**

Trabalho de conclusão de curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Lidiane Fernanda Jochem.  
Coorientador: César Augusto Casagrande.

**CURITIBA**

**2024**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**MARIA LUIZA CORRÊA DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL EM CONCRETO DE ALTO  
DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/junho/2024

---

Lidiane Fernanda Jochem  
Doutora em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Luciene Ferreira Schiavoni Wiczick  
Mestre em Engenharia Mecânica e de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Leonardo Caniato Martioli  
Bacharel em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e à minha família que sempre me apoiou e me incentivou a buscar minhas realizações. Por todos os momentos em que foram minha rede de apoio e que estiveram ao meu lado nos momentos bons e difíceis dessa caminhada.

Agradeço imensamente a minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lidiane Fernanda Jochem por acreditar em mim, por toda a compreensão, e por me aturar durante todo o processo e ao meu coorientador: Prof. César Augusto Casagrande por todo o apoio, dedicação, conselho e aprendizado compartilhados nessa trajetória acadêmica.

Agradeço também à Prof<sup>a</sup>. Waleska Barbosa, por estar no momento e no lugar certo e por todo seu auxílio na produção desse trabalho de conclusão de curso.

Agradeço o apoio de todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho, em nenhum momento me senti sozinha, sempre seguindo esse caminho com fé, o que tornou possível realizar este trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por disponibilizar todos os materiais e laboratórios e a todos que contribuíram com esse projeto, permitindo que mais uma etapa da minha vida fosse concluída.

## RESUMO

Os resíduos de construção civil, também conhecidos como RCC, são materiais resultantes de obras de construção, reformas, demolições e reparos em estruturas, esses resíduos podem ser originados de restos de vigas e pilares. Há aumento significativo do RCC nas cidades pela alta demanda de infraestrutura urbana e conseqüentemente, um crescente impacto no meio ambiente devido a sua disposição inadequada, causando poluição do solo, da água e do ar. A utilização do RCC como agregado miúdo em concretos de alto desempenho (CAD) é uma maneira sustentável para evitar esse impacto. Objetivou-se com esta pesquisa verificar o potencial de reutilização do agregado reciclado em concreto de alto desempenho. O traço utilizado foi de 1: 0,2: 1,5: 0,3 (cimento: microssilica: agregado miúdo: relação água/cimento) e 3% de aditivo superplastificante em relação ao teor de cimento, o qual foi utilizado o CP V-ARI. Dessa forma, os resultados obtidos com a substituição parcial (5, 10 e 15%) aos agregados miúdos que compõem o concreto apresentaram resultados satisfatórios em seu emprego em CAD, quando comparados com a referência (0% de substituição). Na análise de resistência à tração na flexão, verificou-se aumento na resistência de 7 para 28 dias, de 10,8 MPa para 12,2 MPa o que tornou a amostra de 5% equivalente ao referencial (12,2 MPa). As demais substituições, de 10% e 15%, apresentaram resultados estatisticamente compatíveis, respectivamente 11,0 MPa e 10,3 MPa). Seguiu-se essa mesma linha de compatibilidade estatística nos resultados da resistência à compressão, (com 5% correspondendo a 95,6% da referência, 10% correspondendo a 93,6% e 15% a 86,9%). A proporção mais adequada, identificada nesse estudo, foi a substituição de 5% de agregado miúdo por RCC, porque se aproximou mais do valor de referência, as outras proporções também atingiram índices aceitáveis para sua aplicação em concreto de alto desempenho.

Palavras-chave: resíduos de construção civil; concreto de alto desempenho; reciclagem; qualidade ambiental.

## ABSTRACT

Civil construction and demolition waste, also known as CDW, is material resulting from construction work, renovations, demolitions and repairs to structures. This waste can originate from the remains of beams and pillars. There is a significant increase in CDW in cities due to the high demand for urban infrastructure and consequently, a growing impact on the environment due to its inadequate disposal, causing soil, water and air pollution. Using CDW as fine aggregate in high-performance concrete (HPC) is a sustainable way to avoid this impact. The objective of this research was to verify the potential for reuse of recycled aggregate in high-performance concrete. The mixture used was 1: 0,2: 1,5: 0,3 (cement: microsilica: fine aggregate: water/cement ratio) and 3% superplasticizing additive in relation to the cement content, which was used as CP V-ARI. Thus, the results obtained with the partial replacement (5, 10 and 15%) of the fine aggregates that make up the concrete, showed satisfactory results in their use in HPC, when compared with the reference (0% replacement). In the analysis of tensile strength in flexion, there was an increase in resistance from 7 to 28 days, from 10,8 MPa to 12,2 MPa, which made the 5% sample equivalent to the reference (12,2 MPa). The remaining replacements, 10% and 15%, presented statistically compatible results, respectively 11,0 MPa and 10,3 MPa). This same line of statistical compatibility was followed in the compressive strength results (with 5% corresponding to 95,6% of the reference, 10% corresponding to 93,6% and 15% to 86,9%). The most appropriate proportion, identified in this study, was the replacement of 5% of fine aggregate with CDW, because it was closer to the reference value, the other proportions also reached acceptable levels for their application in high-performance concrete.

Keywords: construction and demolition waste; high-performance concrete; recycling; environmental quality.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACI	American Concrete Institute
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
CCA	Cinzas de Cascas de Arroz
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPs	Corpos de Prova
DMC	Diâmetro Máximo Característico
G <sub>c</sub>	Grau de Curvatura
G <sub>u</sub>	Grau de Uniformidade
MF	Módulo de Finura
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos de Construção Civil
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
REF	Referência
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SA	Sílica Ativa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>11</b>
1.1.1	Objetivos Gerais .....	11
1.1.2	Objetivos Específicos .....	11
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Resíduos de Construção Civil</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Reciclagem de Resíduos de Construção Civil</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Agregados Utilizados na Formação de Concreto</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Concreto de Alto Desempenho</b> .....	<b>16</b>
<b>2.5</b>	<b>Produção de CAD Utilizando Agregados Reciclados</b> .....	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>23</b>
3.1.1	Cimento Portland.....	23
3.1.2	Agregado miúdo .....	23
3.1.3	RCC.....	23
<b>3.2</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>23</b>
3.2.1	Caracterização dos agregados.....	23
3.2.2	Dosagem dos concretos .....	24
<b>3.3</b>	<b>Preparo dos concretos</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4</b>	<b>Ensaio dos concretos no estado fresco</b> .....	<b>25</b>
3.4.1	Procedimento de cura .....	26
<b>3.5</b>	<b>Ensaio dos concretos no estado endurecido</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise granulométrica</b> .....	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Massa específica aparente</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Massa unitária no estado solto</b> .....	<b>30</b>
<b>4.4</b>	<b>Material pulverulento</b> .....	<b>31</b>
<b>4.5</b>	<b>Ensaio no estado fresco</b> .....	<b>31</b>
4.5.1	Índice de consistência .....	31
4.5.2	Teor de ar incorporado .....	32
4.5.3	Consumo de cimento.....	33
<b>4.6</b>	<b>Estado endurecido</b> .....	<b>33</b>

4.6.1	Massa específica do concreto .....	33
4.6.2	Resistência à tração na flexão .....	34
4.6.3	Resistência à compressão .....	35
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1990, houve um aumento significativo dos resíduos de construção civil (RCC) nas cidades, devido à alta demanda de infraestrutura urbana, ocasionada com a construção de novos prédios, ampliações, renovações e demolição (Pinto; Gonzales, 2005).

No Brasil, a construção civil é responsável por, aproximadamente, 14% do PIB nacional, sendo que, por dia, são geradas cerca de 122.262 toneladas de resíduos e 40% destes são causados pela construção civil. O RCC causa o aumento do impacto sobre o meio ambiente, devido à extração de matérias-primas não renováveis. Há a previsão do aumento do impacto, ocasionado pela hipótese da crescente demanda de materiais de construção civil para, pelo menos, o dobro dos níveis das situações atuais até o ano de 2050 (ABRELPE, 2014; Pacheco-Torgal, 2013; Allwood *et al.*, 2011; Pinto, 2005; Strand, 2003).

O tratamento do RCC promove a restauração da qualidade ambiental e produz materiais de baixo custo por meio da reciclagem, substituindo os materiais altamente usados na construção civil e reduzindo o desperdício. Após a reciclagem, o resíduo representa suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e ambientais adequadas à produção de materiais de construção (como os agregados). Esse resíduo é considerado um material inerte com grande potencial de reaproveitamento e reciclagem (Lima; Vieira, 2001; Brum, 2000).

Assim, percebe-se que a utilização do RCC pode ser benéfica para o meio ambiente, bem como há a possibilidade de utilizar o RCC em concretos de alto desempenho.

O concreto de alto desempenho, também conhecido como CAD, é caracterizado por possuir propriedades de resistência mecânica e durabilidade superiores às dos concretos convencionais. Os CAD são concretos com resistência à compressão superior a 50 MPa, podendo chegar até 100 MPa. A relação água/cimento usual fica abaixo de 0,4, no que resulta em uma maior resistência característica, baixa porosidade e permeabilidade, e no menor consumo de agregados. O concreto de alto desempenho contém os seguintes materiais na composição: cimento de alta resistência, agregados comuns, superplastificante e sílica ativa, em que se recomenda a utilização de altas quantidades, com percentuais

chegando a 25% de substituição do cimento (Tutikian; Isaia; Helene, 2011; Aïtcin, 2000).

No entanto, agregados de dimensões reduzidas são conhecidos por demandar maior quantidade de água de amassamento, por isso deve-se encontrar um equilíbrio que permita a melhoria nos estados frescos e endurecidos. Os CAD atuam como materiais compostos não isotrópicos, constituídos de pasta de cimento hidratado e agregados. Sua microestrutura é compacta, incluindo a zona de transição com o agregado miúdo, que é delgada ou mesmo inexistente (Tutikian; Isaia; Helene, 2011; Aïtcin, 2000).

Quando substituídos com agregados de propriedades semelhantes, é visto que não há alteração na durabilidade do concreto, mantendo suas características de base. Foram estudadas as alterações com resíduos de borracha de pneus e cinzas de cascas de arroz (CCA), apresentando, com uma relação água/aglomerante de 0,30, com resultados satisfatórios em relação à resistência à compressão (70 MPa), também significativa redução da trabalhabilidade, quando incorporado os resíduos de borracha de pneu. Quanto à porosidade, quando incorporados os resíduos de borracha de pneu ao CAD, os traços com cinza amorfa e sílica ativa não acarretaram alteração em relação aos concretos sem borracha (Vasconcelos; Akasaki, 2010; Barbosa, 2006).

A comparação desses resultados com o traço referência (REF) evidencia ainda a superioridade da sílica ativa (SA) na produção do CAD e na resistência mecânica, o que pode ser justificado pela granulometria mais fina com diâmetro médio menor do que 1  $\mu\text{m}$  da SA em relação a CCA (12,50  $\mu\text{m}$ ) (Vasconcelos; Akasaki, 2010; Barbosa, 2006).

Muitos agregados podem ser utilizados para substituição mais ecológica, sendo eles os resíduos vermelhos (bloco cerâmico), vidros, garrafas PET moídas, tecidos, o trabalho está focado em resíduos do tipo cinza, principalmente os agregados miúdos remanescentes de concreto.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos Gerais

Esse trabalho tem o objetivo de analisar a influência da substituição parcial do agregado miúdo por RCC com dimensões inferiores a 0,075 mm à adição mineral em concreto de alto desempenho, a fim de aferir as alterações ocasionadas nas propriedades físicas e mecânicas do material.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar, no estado fresco do material, as alterações das características físicas do CAD com a utilização de agregado reciclado;
- Verificar as alterações nas propriedades físicas e mecânicas do CAD no estado endurecido;
- Avaliar o potencial de redução do consumo de cimento do CAD quando utilizado agregado reciclado.

## 1.2 Justificativa

Esta pesquisa possui um papel importante no desenvolvimento ecológico, pois possibilita a contribuição em dois dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), sendo eles o décimo primeiro “em tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis” e o décimo segundo com objetivo de “assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”.

Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), na última década houve um aumento de 16% de lixos que são descartados incorretamente, passando de 25 milhões de toneladas por ano, para mais de 29 milhões, trazendo danos permanentes tanto para o meio ambiente e a sociedade quanto para a economia do país (ABRELPE, 2020).

Quando descartados a céu aberto sem cuidado, os resíduos sólidos urbanos (RSU), são meios de cultura para proliferação de bactérias e doenças, além da poluição dos lençóis freáticos, sendo as principais fontes de poluição que continuam em atividade constante. Aterros sanitários minimizam os efeitos do lixo acumulado,

pois neles são feitas a separação para a reciclagem, descarte e armazenamento, que são o destino de 29.448.200 toneladas de resíduos produzidos anualmente no Brasil. Como solução, deve-se seguir a lei 12.305/10, instituída pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), onde é instruída a melhor maneira de tratar esses resíduos, como devem ser utilizadas tecnologias para neutralizar as características negativas dos resíduos. Podem também transformar o resíduo em um produto que gere renda com a produção de uma matéria-prima secundária (Brasil, 2010).

A lei assinala que essas tecnologias de recuperação dos resíduos sólidos urbanos têm que ter sua viabilidade técnica e ambiental comprovadas e deve-se implantar um programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado por órgão ambiental, como explicado no Art. 7º, número XV “incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético” (Croquer, 2021; ABRELPE, 2021; Brasil, 2010).

Este trabalho tem uma abordagem sustentável, com foco em sensibilizar as empresas de construção civil sobre a importância da reciclagem por conta das matérias-primas finitas utilizadas, usando assim, os materiais reciclados como opção substituta.

A reciclagem é duplamente favorável, primeiro em relação à disposição de rejeitos, segundo, pela redução de extração das matérias-primas para a produção de concreto, pois além de tirar os agregados dos aterros sanitários, onde não teriam função alguma, também reduzirá o consumo de recursos naturais finitos. Começando desde já esse conceito, diminuirá o impacto ambiental no futuro.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Resíduos de Construção Civil**

Os resíduos de construção civil são classificados, conforme apresentado na Resolução nº. 469/15 no artigo 3º, pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2015), em quatro classes, as classes A, B, C e D. Os resíduos de classe A são identificados como recicláveis ou reutilizáveis na forma de agregados para serem aplicados em blocos de concreto, tijolos, telhas, no processo de fabricação em peças pré-moldadas em concreto e em argamassas.

São considerados resíduos da construção civil aqueles gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras civis, bem como os resultantes da preparação e da escavação do solo, como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, etc. (CONAMA, 2015).

A geração de resíduos na construção civil pode ocorrer nas diferentes fases do ciclo de vida dos empreendimentos. Na fase de construção, parte das perdas é incorporada nas construções e parte se converte em resíduo.

Já na fase de manutenção e reformas, está relacionada a ações corretivas, reformas ou modernizações das edificações e no descarte de componentes que atingiram o final de sua vida útil (John; Agopyan, 2000).

A geração dos RCC se deve, em grande parte, às perdas de materiais de construção nas obras mediante ao desperdício durante o seu processo de execução, também como pelos restos de materiais que são perdidos por danos em seu recebimento, transporte e armazenamento. Além das construções, as reformas, ampliações e demolições são outras atividades altamente geradoras de RCC, podendo gerar até mais resíduos do que a construção de uma obra (Lima; Lima, 2012).

Assim, a geração desses resíduos causa preocupação quanto aos seus efeitos em relação ao meio ambiente, pois sua deposição poucas vezes obedece a um critério técnico adequado. A forma de deposição dos resíduos, principalmente em aterros clandestinos ou aterros públicos, degrada o meio ambiente pelo esgotamento das áreas saudas, assoreamento dos cursos da água e pela poluição dos aquíferos (Oliveira, 2000).

A Resolução nº 307 do CONAMA, no ano de 2002, estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil a fim de disciplinar as ações necessárias com o intuito de minimizar os impactos ambientais. Em 2015, foi alterada pela resolução nº 469, determinando um sistema de logística reversa, unindo forças com a Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, a qual prevê reaproveitamento e destinação final ambientalmente adequada, tendo como base, a responsabilidade compartilhada (CONAMA, 2010; CONAMA, 2015).

Há a possibilidade da disposição e gerenciamento destes resíduos, considerando o que é possível reutilizar e o que deve ser adequadamente descartado, faz com que esta parte do processo seja útil e ambientalmente correta. Isto bem aplicado e gerenciado traz muitos benefícios, especialmente na reciclagem e reutilização dos resíduos de construção (Dachowski; Komisarczyk, 2016).

## **2.2 Reciclagem de Resíduos de Construção Civil**

No Brasil, a Lei nº 12.305 da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) instituída para proteger a saúde pública e a qualidade ambiental, a não produção, redução, reaproveitamento e destinação adequada dos resíduos sólidos, e a incentivar a reciclagem e sustentabilidade. A Lei se baseia no princípio de responsabilidade compartilhada (art.3º - inciso XVII), pois a maioria dos problemas ambientais vem seguida de questões sociais e econômicas, que acabam por impactar grande parte da sociedade, ou seja, o problema ambiental é compartilhado. Desta forma, todos os agentes envolvidos na fabricação, distribuição, venda e consumo são responsáveis pelos seus resíduos. Ela também estabelece o fechamento dos conhecidos "lixões" (local em que o lixo é depositado sem tratamento ou separação) até o ano de 2014. Para que os aterros sanitários recebam somente os rejeitos, um composto quase na sua totalidade por matéria orgânica (BRASIL, 2010).

Além disso, a PNRS define responsabilidades e multas aplicáveis aos resíduos gerados, bem como políticas fiscais preferenciais para estimular a criação de empresas especializadas em reciclagem. O tratamento do RCC promove a restauração da qualidade ambiental e produz materiais de baixo custo por meio da reciclagem, substituindo os materiais altamente usados na construção civil e reduzindo o desperdício. Após a reciclagem, o resíduo representa suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e ambientais adequadas à produção de materiais de

construção (como os agregados). Esse resíduo é considerado um material inerte com grande potencial de reaproveitamento e reciclagem (Lima; Vieira, 2001; Brum, 2000).

Com a urbanização acelerada, que resultou no rápido adensamento das cidades, e, por conseguinte, o crescimento das atividades do setor construtivo, além da larga exploração dos recursos naturais, a geração de resíduos da construção e demolição (RCD) é produto do desperdício nas obras de construções, reformas e demolições (Halmeman; Souza; Casarin, 2009).

Esses resíduos representam, aproximadamente, de 20 a 30% do fluxo de resíduos sólidos gerados pelas cidades dos países desenvolvidos, sendo que nos demais pode alcançar índices bem maiores (Marchi, 2011; Costa *et al.*, 2007).

Os resíduos gerados pelas obras realizadas são passíveis de reciclagem, e levando em conta a sua contínua geração, o Brasil gera 90% de RCC, e a sua reciclagem é de fundamental importância ambiental e financeira no sentido de que os resíduos sejam reciclados para a obra em substituição à novas matérias-primas de que seriam extraídas do meio ambiente. O ideal seria se a reutilização e reciclagem dos resíduos na obra fossem práticas constantes e incorporadas na rotina das construtoras no próprio canteiro, ou também reutilizadas fora em outras construções como parte integrante do planejamento e execução das obras. Porém, no Brasil essas práticas ainda são vistas como uma sobrecarga de trabalho e até mesmo como um problema ou atraso para o andamento dos serviços e seus prazos (Lima; Lima, 2012).

Reutilizar estes itens é uma ótima forma de preservar o meio ambiente, mantendo esses resíduos fora de aterros. As empresas que decidem reutilizar resíduos de construção, conseguem benefícios aos seus negócios a longo prazo e se apresentam com uma abordagem ecológica, o que pode evoluir a sua reputação entre seus clientes. Portanto, é momento de as empresas de construção aprenderem onde e como dispor corretamente os entulhos de construção (Dachowski; Komisarczyk, 2016).

Um plano de Gerenciamento de Resíduos é uma ótima forma de conduzir os descartes de maneira ética, socialmente responsável e econômica. Fazer com que este plano seja facilmente entendido e a sua importância para a sustentabilidade do planeta, será fonte de sucesso e de uso consciente de produtos recicláveis.

### **2.3 Agregados Utilizados na Formação de Concreto**

Atualmente o consumo anual global de areia é de 32 a 50 bilhões de toneladas. Sem a alternativa de agregados reciclados, a indústria global de concreto, segundo Koehnken e Rintoul (2018) haverá um aumento de 45% da demanda global de areia até 2060, a expectativa é que esse crescimento acontecerá nas regiões de baixa renda, na África (Ocidental, Oriental e Sul), Índia e áreas do Sul da Ásia (Koehnken; Rintoul, 2018).

Conforme citado por Albuquerque e Gonçalves (2010), os materiais reciclados são usados em concreto com o objetivo da substituição de agregados miúdos, graúdos ou ainda atuar como aditivo ao cimento. Muitos materiais que não podem mais ser utilizados no processo de produção são utilizados na manufatura de concreto normal e até mesmo de CAD (Tu; Chen; Hwang, 2006; Atis, 2005; Brito; Pereira; Correia, 2005; Huang; Shu; Li, 2005; Ajdukiewicz; Kliszczewicz, 2002; Poon; Shui; Lam, 2002).

Grandes quantidades de concreto demolido podem ser simplesmente recicladas como agregados e reutilizadas no concreto. Em todo o mundo, atividades de pesquisa e desenvolvimento têm sido realizadas para demonstrar sua praticidade, viabilidade econômica e custo-benefício. Quando utilizado de forma adequada e inteligente, o material reciclado pode entrar na composição e produzir concreto de alta qualidade (Dachowski; Komisarczyk, 2016).

### **2.4 Concreto de Alto Desempenho**

O concreto de alto desempenho (CAD) surgiu na década de 90, com o objetivo de proporcionar elevada durabilidade às estruturas. Diminuindo a permeabilidade de sua mistura, é possível atingir uma forma mais efetiva do concreto, em suas propriedades (Ganasini, 2019). Apesar de torná-lo mais efetivo dessa forma, também pode fazer com que o concreto fique mais vulnerável à retração e fissuração, e pode se tornar sujeito aos efeitos de elevadas temperaturas, o que reduz sua vida útil. Apesar disso, o CAD, quando dosado de forma correta, demonstra alta resistência à compressão pelo refinamento de poros, o que favorece sua durabilidade (Oliveira *et al.*, 2018; Vanderlei, 2004).

Dessa forma, o CAD é uma forma especializada de concreto que exhibe propriedades mecânicas, durabilidade e sustentabilidade excepcionais onde apresenta melhor comportamento com a sua utilização em construções de patamar mais elevado em comparação com o concreto convencional (CC). Normalmente é projetado para o maior alcance em resistência à compressão, possuir melhor trabalhabilidade, maior resistência às fissuras, permeabilidade reduzida e maior durabilidade em condições ambientais adversas (Aïtcin, 2006).

Entende-se por desempenho, além da resistência mecânica, a trabalhabilidade, a estética, o acabamento, a integridade, e, principalmente, a durabilidade (Quissanga; Pimentel, 2019).

Em 1991, através do Comitê 201, o *American Concrete Institute* (ACI), definiu a durabilidade do concreto como a sua capacidade de resistir às ações atmosféricas, ataques químicos, abrasão e outros processos de deterioração. Os efeitos atmosféricos referem-se a influências ambientais, tais como exposição a ciclos de molhagem, secagem, congelamento e degelo. Os processos de deterioração química incluem ataques por substâncias ácidas e reações de expansão, como reações de sulfatos, reações álcali-agregadas e corrosão de armaduras de aço no concreto (Cordeiro, 2001).

Atualmente a expressão “concreto de alto desempenho” não possui um valor de resistência pré-determinado, contendo uma grande oscilação de valores (registrados valores de 50 a 150 MPa). Conforme a pesquisa de Aïtcin (2000), que pode ser vista na Tabela 1.

**Tabela 1 – Classes diferentes de concreto de alto desempenho**

Classe de Concreto de Alto Desempenho	Resistência à Compressão (MPa)
I	50
II	75
III	100
IV	125
V	150

Fonte: AÏTCIN (2000, p. 182)

No Brasil não há uma definição consensual do CAD, apenas do concreto de alta resistência (CAR). A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica pela massa específica,

por grupos de resistência e consistência - divide as misturas em duas classes, onde a classe I contém os concretos de resistência de 20 até 50 MPa, com intervalos de 5 MPa. Já a classe II, considerada a classe para os CAR, abrange os concretos de 55 até 80 MPa, novamente, em intervalos de 5 MPa. Já, ACI determina que o concreto de alto desempenho é aquele cuja resistência mínima seja superior a 41 MPa (Nascimento, 1997).

Segundo o ACI (1998) o parâmetro definidor do CAD são os concretos que apresentam relação *a/c* (água/cimento) ou *a/ag* (água/aglomerante) inferior a 0,4.

Para alcançar essas propriedades, o dimensionamento do concreto requer o uso de agregados menores (muitas vezes eliminando agregados graúdos) e um fator de empacotamento mais alto, em que o conteúdo de ligantes, micro *fillers* e materiais adicionais também aumentam à base de cimento. Ajustar as propriedades e dosagem desses materiais é importante para melhorar as propriedades reológicas e mecânicas. A incorporação de aditivos superplastificantes é essencial para reduzir a tensão de escoamento e a viscosidade sem promover processos de segregação e exsudação mesmo em baixas relações água/aglomerante (Melchior, 2023).

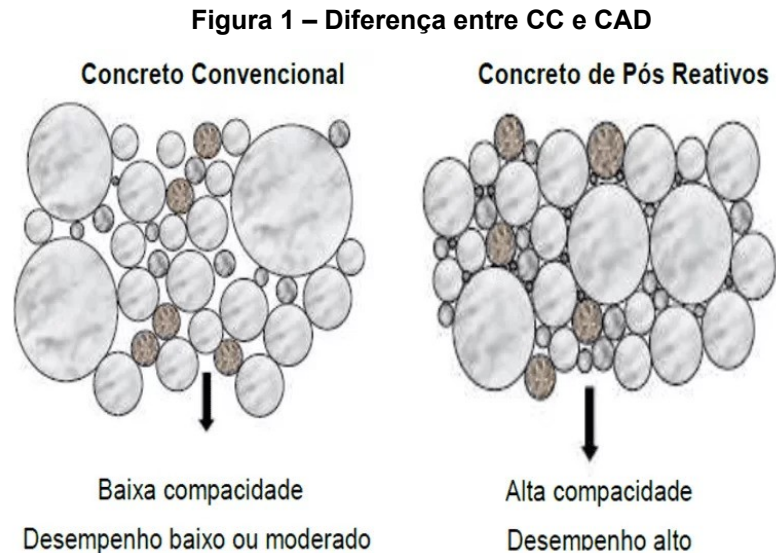
Além de possuir muitos fatores superiores aos concretos comuns, o CAD tem menor consumo de cimento por MPa, podendo, por este aspecto, ser considerado mais econômico que os concretos convencionais (Matos *et al.*, 2019).

A granulometria dos agregados, é analisada por três parâmetros na dosagem do CAD: ajuste granulométrico das partículas finas, empacotamento das partículas maiores e controle de dispersão da pasta de cimento (Oliveira *et al.*, 2018; Mehta; Monteiro, 2008; Richard; Cheyrezy, 1995).

Como citado no artigo de Santiago, Santana e Silva (2020), demonstrando um traço de CAD proposto por Serra (1999 *apud* Watanabe, 2008, p. 15), em valores mínimos e máximos para a produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto em relação água/cimento 0,24 a 0,40.

- 400 kg < Cimento < 500 kg;
- 650 kg < Agregado miúdo < 750 kg;
- 1000 kg < Agregado graúdo < 1100 kg;
- 1% < Superfluidificantes < 2% (da massa do cimento);
- 120 kg < Água < 160 kg;
- 7 % < Sílica ativa < 15 % (massa do cimento).

O empacotamento granulométrico e a consequente elevação da compactidade, são outras vantagens da utilização do CAD, assim como expôs Zanni *et al.* (1996), representado na Figura 1.



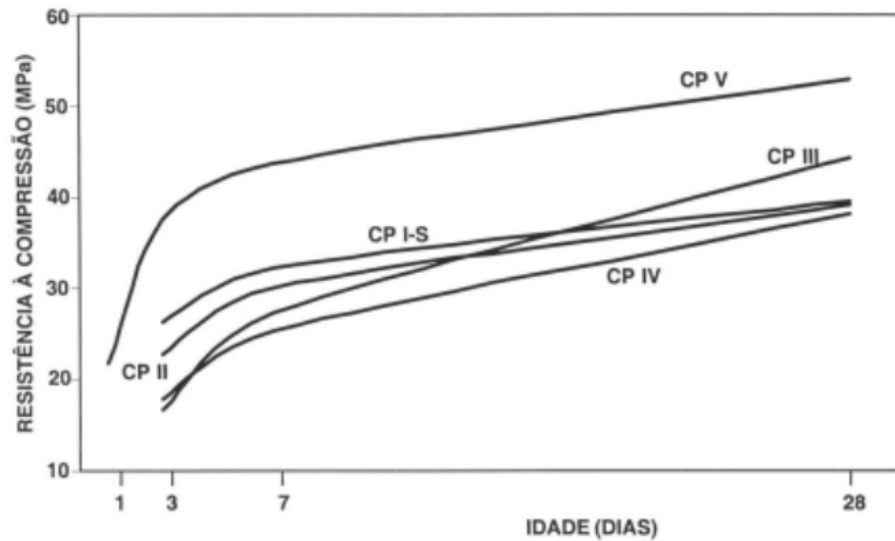
Fonte: Zanni *et al.* (1996)

## 2.5 Produção de CAD Utilizando Agregados Reciclados

A utilização de agregados reciclados no CAD, no entanto, é necessária, pois este método está sendo mais frequente na construção civil. A sua utilização pode levar a indústria de concreto a abranger o conceito de desenvolvimento sustentável. Desse modo, o estudo examina as propriedades mecânicas do CAD com o uso de agregados reciclados originados de concreto de demolição de construção, substituindo parcialmente e totalmente os agregados naturais miúdos e comparando os resultados com o concreto fabricado com agregados naturais (Albuquerque; Gonçalves, 2010).

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) demonstrou através do Boletim Técnico 106 (1999) que a resistência alcançada após 28 dias ultrapassou os limites mínimos especificados pelas normas técnicas da ABNT, que são, para o CPV-ARI, 26 MPa a 1 dia de idade e de 53 MPa aos 28 dias. Na Figura 2 tem-se a evolução média da resistência à compressão dos diferentes tipos de cimento Portland com base em valores experimentais.

**Figura 2 – Evolução média da resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland**



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (1999)

De acordo com a ACI 363R-10, a seleção do agregado miúdo deve considerar as necessidades de água e seu acondicionamento físico, sendo preferidas partículas arredondadas e lisas, pois requerem menos água para agitação. O módulo de finura adequado para concretos de alto desempenho é de aproximadamente 3,0 (Santos, 2021).

Tavakoli, Hashempour e Heidari (2018) em seu estudo, utilizaram variados tipos de agregados reciclados, comprovando que vários não foram uma boa mistura se a finalidade fosse as altas resistências de um concreto de alto desempenho.

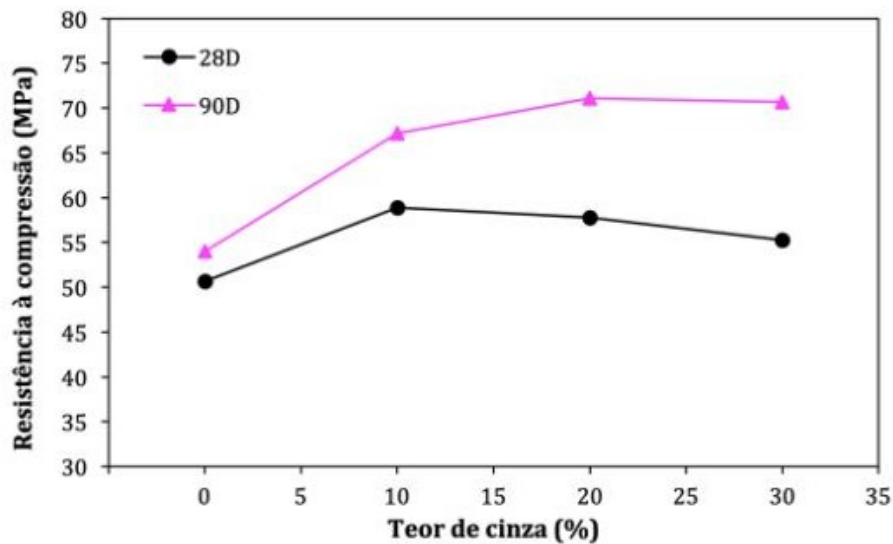
Porém, em seu estudo, com o uso de azulejos cerâmicos, cerâmica sanitária e tijolo de argila, foi comprovado que a resistência mecânica aumentou com a adição de agregados residuais e foi superior à da amostra de controle, a uma taxa de 2% a 8%. Além disso, a profundidade máxima de penetração da água nos agregados residuais no concreto tratado foi menor que no concreto comum; o valor utilizado foi inferior a 30 milímetros. Assim, a substituição de agregados naturais por agregados residuais pode aumentar a resistência à penetração de água (Tavakoli; Hashempour; Heidari, 2018).

Casagrande, Matos, Sakata e Jochem (2019), avaliaram em seu estudo, concretos de alto desempenho com substituição parcial de cimento Portland por cinza volante em teores de 10, 20 e 30% em massa, aos 28 e 90 dias de hidratação. Os autores demonstraram que quanto maior a quantidade de cinza volante de alta

reatividade na mistura, há maior resistência à compressão pelo efeito *filler* e atividade pozolânica.

A amostra com 28 dias de hidratação e adição de 10% do resíduo reciclado, foi analisada com maior resistência à compressão entre os concretos. Já em 90 dias, verificou-se o aumento progressivo da resistência mecânica (Figura 3). O estudo ainda mostra que com 30% de substituição dos agregados apresentou o maior potencial e eficiência em comparação com as outras amostras pesquisadas, em relação ao ponto de vista ecológico (Casagrande *et al.*, 2019).

**Figura 3 – Efeito do teor de cinza volante na resistência mecânica à compressão dos concretos**



Fonte: Casagrande *et al.* (2019)

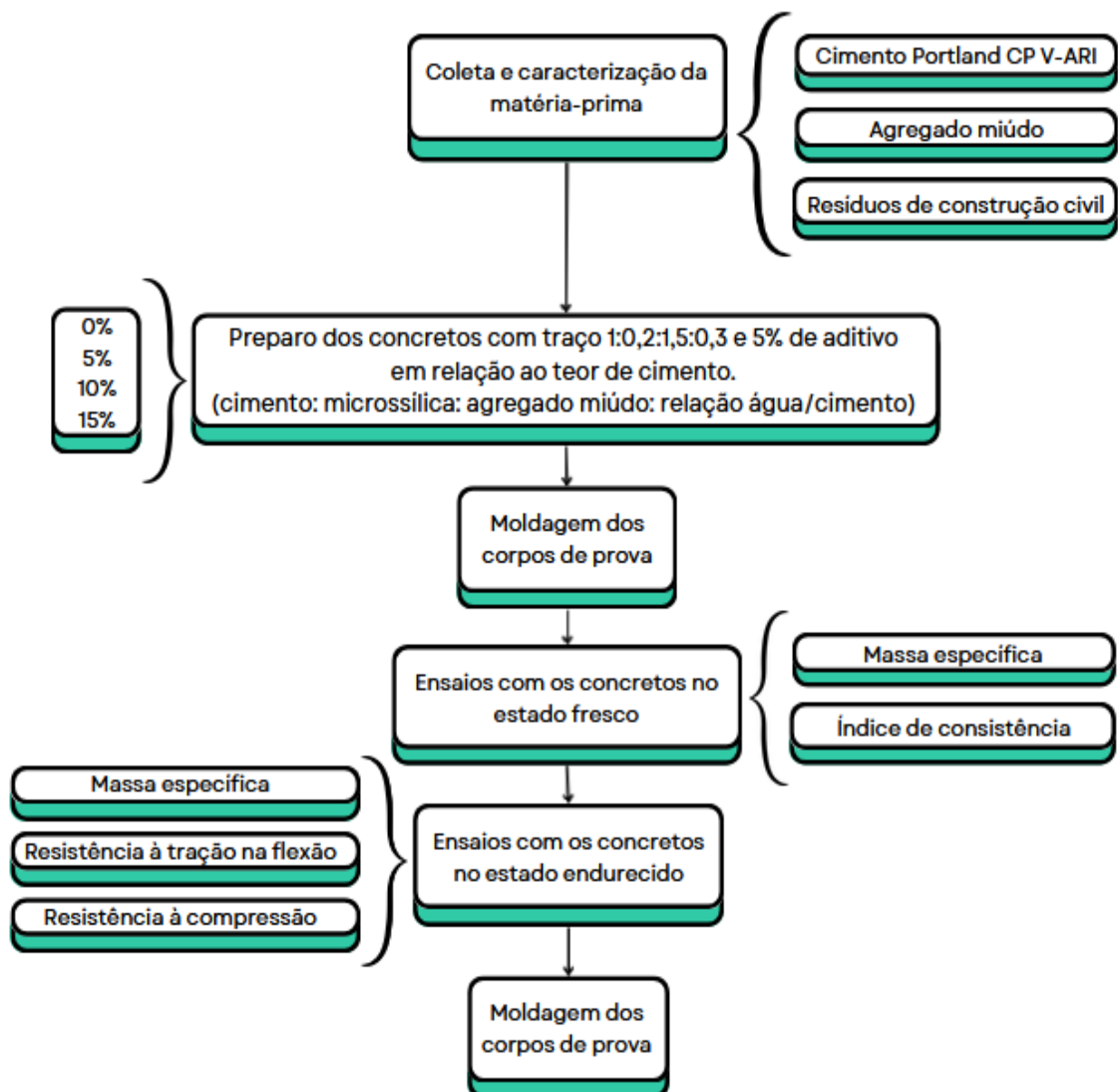
Levy (2006) destaca que a alternativa de produzir concreto a partir de resíduos é uma solução bastante pesquisada. Estudos demonstraram que o uso de agregados reciclados no concreto em proporções de dosagem convenientes não leva à corrosão das barras de aço e, portanto, não leva à diminuição da durabilidade em comparação ao concreto produzido apenas com agregados naturais. A substituição de até 30% de agregados naturais por agregados reciclados não resulta em alterações significativas na resistência à compressão (Araújo *et al.*, 2016).

### 3 METODOLOGIA

As principais etapas da pesquisa, conforme o Fluxograma (Figura 4), serão:

- Caracterização da matéria-prima;
- Produção dos concretos referência e com adição de resíduos de construção civil;
- Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

Figura 4 – Fluxograma dos procedimentos experimentais



Fonte: Autoria própria (2024)

### **3.1 Materiais**

Os materiais que serão utilizados neste trabalho são: cimento Portland CPV-ARI, agregado reciclado de resíduos de construção civil (oriundo de vigas e pilares), areia natural da região metropolitana de Curitiba, aditivo superplastificante e microssílica.

#### **3.1.1 Cimento Portland**

O cimento Portland CP V-ARI foi utilizado nesse estudo, sendo um material de maior pureza pela ausência de adições. Em seguida os ensaios de resistência mecânica foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

#### **3.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo coletado para esse trabalho tem dimensão máxima característica de 2,4 mm e módulo de finura (MF) de 2,42, classificado como areia média de origem natural.

#### **3.1.3 RCC**

O RCC utilizado é proveniente de resíduos de vigas e pilares da construção civil.

### **3.2 Métodos**

#### **3.2.1 Caracterização dos agregados**

A determinação da composição granulométrica do agregado miúdo e do RCC seguiu a NM 248 (ABNT, 2001). Já a determinação da massa unitária no estado solto foi feita seguindo a NBR 16972 (ABNT, 2021). De acordo com a norma 16973 (ABNT, 2021), determinou-se o material pulverulento passante na peneira 0,075 mm e para a massa específica aparente, com o frasco de Chapman, a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009).

### 3.2.2 Dosagem dos concretos

A substituição parcial do agregado miúdo por RCC foi realizada em volume, considerando a massa específica dos materiais. Assim, foram preparados concretos, sem resíduo (referência) e com o resíduo de construção civil com diferentes porcentagens de substituições (5, 10 e 15%).

### 3.3 Preparo dos concretos

Para o preparo dos concretos foi utilizada a argamassadeira (Figura 5), com rotação planetária que trabalha em duas velocidades diferentes (baixa e alta).

Na produção de CAD, a argamassadeira é preferida ao invés da betoneira por razões técnicas que garantem a qualidade superior do produto final. Sendo uma delas, a questão do CAD não possuir em sua composição agregados graúdos, além de permitir um controle mais preciso da dosagem e proporcionar uma ação de mistura mais vigorosa e uniforme.

Recomendada pelo ACI 363R-10, o qual descreve a eficiência da argamassadeira em misturar completamente todos os componentes resultando em um concreto mais homogêneo, com melhor desempenho em termos de resistência e durabilidade (ACI, 2010).

**Figura 5 – Argamassadeira utilizada no laboratório**



**Fonte: A autoria própria (2024)**

Sendo a sequência do preparo do concreto:

- O material seco: agregado miúdo, a microssílica, o aglomerante e o RCC, foram homogeneizados manualmente;
- Foi adicionada a água aos poucos, com a argamassadeira ligada por 1 minuto na velocidade baixa para mistura da água junto à massa seca;
- Inserido o aditivo por mais 1 minuto em velocidade alta para homogeneizar o concreto;
- Logo, o misturador foi desligado por 1 minuto e assim, com o auxílio de uma espátula, as bordas da cuba e a pá do misturador foram raspadas;
- Para finalizar, a argamassadeira foi ligada na velocidade alta por mais 1 minuto;
- Produziu-se então, o concreto de referência (sem adição de resíduos) e o concreto com substituição de parte do agregado miúdo por resíduo de RCC.

O traço seguido foi 1: 0,2: 1,5: 0,3 (cimento: microssílica: agregado miúdo: relação água/cimento) e 3% de aditivo superplastificante em relação ao teor de cimento. O agregado reciclado foi incorporado por substituição parcial do agregado miúdo em 5, 10 e 15%, em volume.

Imediatamente após a conclusão dessa etapa, foi realizado o ensaio de consistência de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016) e foram moldados os corpos de prova prismáticos para ensaios aos 7 e 28 dias.

### **3.4 Ensaio dos concretos no estado fresco**

Os ensaios no seu estado fresco, antes do processo de cura, foram preparados após realizar a mistura (Figura 6) e se dividiram em: massa específica, teor de ar incorporado e índice de consistência, (*flow table*) (Figura 7), seguindo as normas NBR 13278 (ABNT, 2005) e NBR 13276 (ABNT, 2016).

**Figura 6 – Concreto no estado fresco**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

**Figura 7 – Aferição do índice de consistência**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

#### 3.4.1 Procedimento de cura

Para a cura, o concreto foi colocado em moldes de corpos de prova prismáticos, protegidos com placas de vidro na face superior, evitando a perda de água e contato com outras partículas (Figura 8).

**Figura 8 – Processo de cura**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

### **3.5 Ensaio dos concretos no estado endurecido**

Foram preparados 6 corpos de prova (CPs) prismáticos para cada tipo de concreto (referência, 5%, 10% e 15%) com dimensões 40x40 mm de seção transversal e 160 mm de altura, a moldagem e a resistência mecânica de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) totalizando 24 corpos de prova. Após 24 horas da moldagem dos CPs foram desformados, identificados e envoltos em plástico filme, permaneceram em processo de cura, até as idades de ensaio (7 e 28 dias).

Para a caracterização dos concretos no estado endurecido, foram realizados os ensaios: massa específica, resistência à tração na flexão e resistência à compressão baseado na norma NBR 13279 (ABNT, 2005) e a NBR 16738 (ABNT, 2019) (Figura 9 e Figura 10).

**Figura 9 – Corpos de prova desmoldados**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

**Figura 10 – Ensaio de resistência à tração na flexão**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

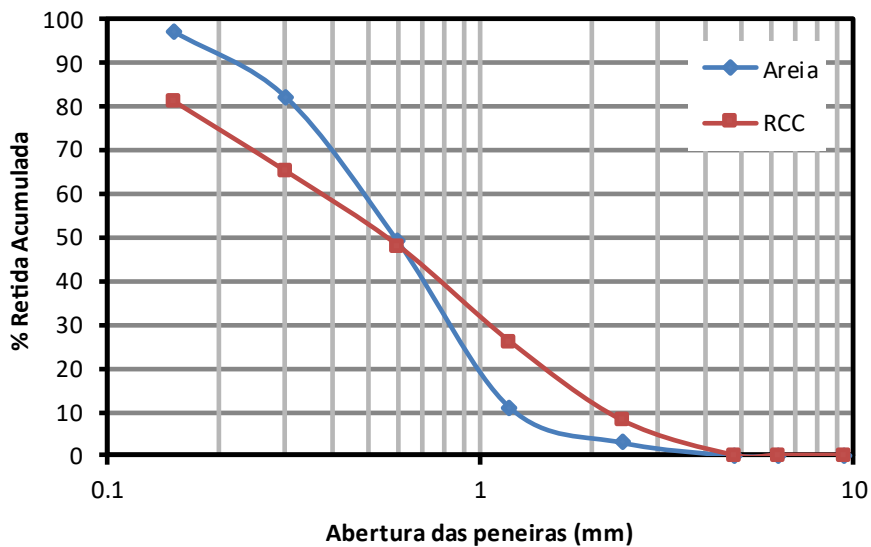
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado no RCC e na areia para determinação do diâmetro máximo característico (DMC) e do módulo de finura (MF). O gráfico da curva granulométrica é determinado pela relação entre o diâmetro das partículas e a porcentagem de material passado pelas peneiras determinadas pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2001).

Na Figura 11, têm-se as curvas granulométricas do agregado miúdo e do RCC, realizou-se a análise da média da composição de duas amostras desses materiais. Sobre o RCC, tem-se o DMC de 4,8 mm e o MF 2,27. Analisando o grau de uniformidade (Gu), obteve-se o resultado de 0,172, o qual caracteriza uma granulometria muito uniforme e o grau de curvatura (Gc) de 1,422, sendo um agregado bem graduado.

Figura 11 – Curvas granulométricas dos materiais



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode ser observado na curva granulométrica que aproximadamente 70% do total da amostra de RCC é composta por material fino, ou seja, retido pela peneira de 0,6 mm e 30% de material de diâmetro maior.

Este mesmo ensaio, foi realizado com o agregado miúdo. O DMC foi de 2,4 mm e o MF de 2,42. Além disso, foi analisado o Gu com resultado de 0,380

caracterizando uma granulometria muito uniforme e o  $G_c$  de 1,031, sendo um agregado bem graduado.

Com auxílio da curva granulométrica, percebe-se que aproximadamente 80% do total da amostra de areia é composta por material fino, sendo retida pela peneira de 0,3 mm e 20% de material de diâmetro maior. Comparando a areia com o RCC, a areia apresentou granulometria mais fina, e atingem a mesma granulometria na porcentagem acumulada de aproximadamente 50% na peneira de 0,6 mm, ou seja, se tornam equivalentes.

#### 4.2 Massa específica aparente

De acordo com a NM 52 (ABNT, 2009), a massa específica aparente obtida para o agregado miúdo foi de  $2,57 \text{ g/cm}^3$ , para o RCC  $2,50 \text{ g/cm}^3$ , para o cimento foi de  $3,11 \text{ g/cm}^3$  e para a microssílica  $0,35 \text{ g/cm}^3$  (Tabela 2).

Tabela 2 – Massa específica aparente

(a) Areia.			(b) RCC.		
Areia	L	$\delta$ , ( $\text{g/cm}^3$ )	RCC	L	$\delta$ ( $\text{g/cm}^3$ )
1	395	2.5641	1	393	2.59
2	394	2.5773	2	405	2.44
3	-	-	3	402	2.48
<b><math>\delta</math> - Média</b>		<b>2.5707</b>	<b><math>\delta</math> - Média</b>		<b>2.50</b>

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.3 Massa unitária no estado solto

Na Tabela 3 têm-se os resultados dos ensaios de massa unitária no estado solto, seguindo a NBR 16972 (ABNT, 2021), esse ensaio é fundamental para a caracterização dos agregados na produção do concreto, a avaliação transforma o traço em massa para o traço em volume.

Tabela 3 – Massa unitária no estado solto

(a) Areia.				(b) RCC.			
Areia	$V_{rec}$ (cm <sup>3</sup> )	$m_{rec+a}$ (g)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	RCC	$V_{rec}$ (cm <sup>3</sup> )	$m_{rec+a}$ (g)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	2042.47	3265.67	1.57	1	2149.23	2820.48	1.29
2	2042.47	3225.05	1.55	2	2149.23	2848.41	1.30
3	2042.47	3191.30	1.54	3	2149.23	2836.50	1.29
<b><math>\gamma</math> - Média</b>			<b>1.56</b>	<b><math>\gamma</math> - Média</b>			<b>1.29</b>

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.4 Material pulverulento

O material pulverulento é definido como a fração com dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$ , sendo normalmente quantificado em processo de lavagem do agregado em uma peneira com a malha descrita na NBR 16973 (ABNT, 2021).

A quantidade de material pulverulento é importante para verificar se a aderência entre a pasta de cimento e o concreto, quando em excesso, pode causar diminuição da resistência mecânica dessas pastas (Sousa *et al.*, 2023) (Tabela 4).

Tabela 4 – Material pulverulento

a) Areia.		b) RCC.	
Areia		RCC	
ms (g)	100.00	ms (g)	100.00
msf (g)	97.93	msf (g)	90.38
MP (%)	2.07	MP (%)	9.62

(a)

(b)

Fonte: Autoria própria (2024)

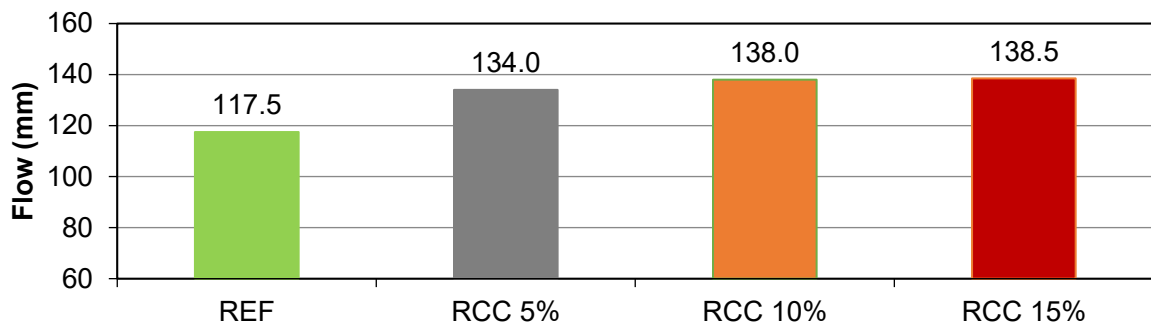
#### 4.5 Ensaios no estado fresco

##### 4.5.1 Índice de consistência

No ensaio de *flow table*, os resultados apontam para valores próximos independente do teor de resíduo no concreto. Conforme os resultados da Figura 12, obteve-se o valor médio de 136,8 mm e a diferença entre o maior e o menor valor identificada foi de 4,5 mm.

Comparados com o referencial, a substituição de RCC, houve um aumento de aproximadamente 14% do valor médio na consistência do concreto, gerando menor consistência e melhor trabalhabilidade em relação à REF. O concreto pode ser considerado autoadensável, por possuir abatimentos maiores de 120 mm, segundo a NM 67 (ABNT, 1996).

**Figura 12 – Índice de consistência**



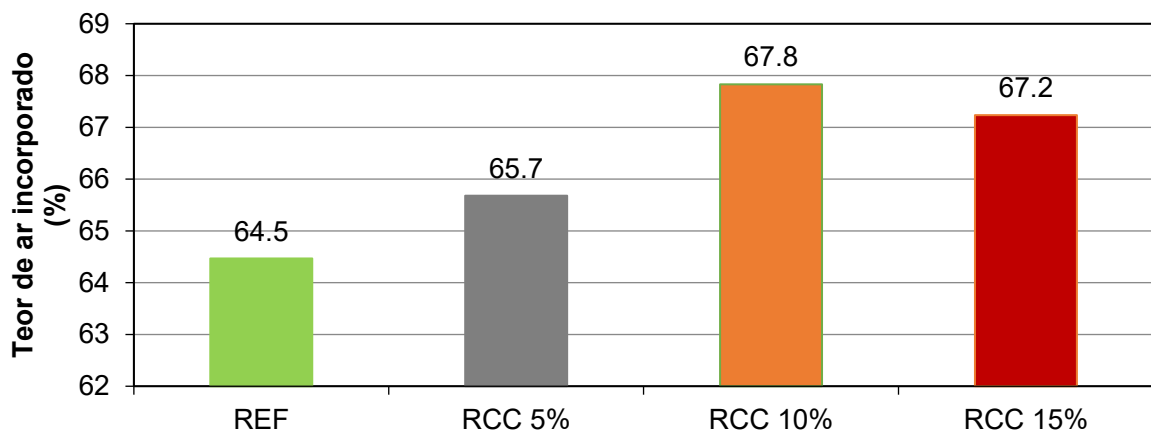
Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.5.2 Teor de ar incorporado

O ar incorporado influencia na qualidade final do concreto, sendo necessário um teor que não reduza sua resistência mecânica e garanta sua durabilidade. Na Figura 13 indica a porcentagem do teor de ar incorporado nos diferentes tipos de concreto.

A amostra que contém substituição de 10% é a que possui a maior porcentagem de ar incorporado.

**Figura 13 – Teor de ar incorporado**



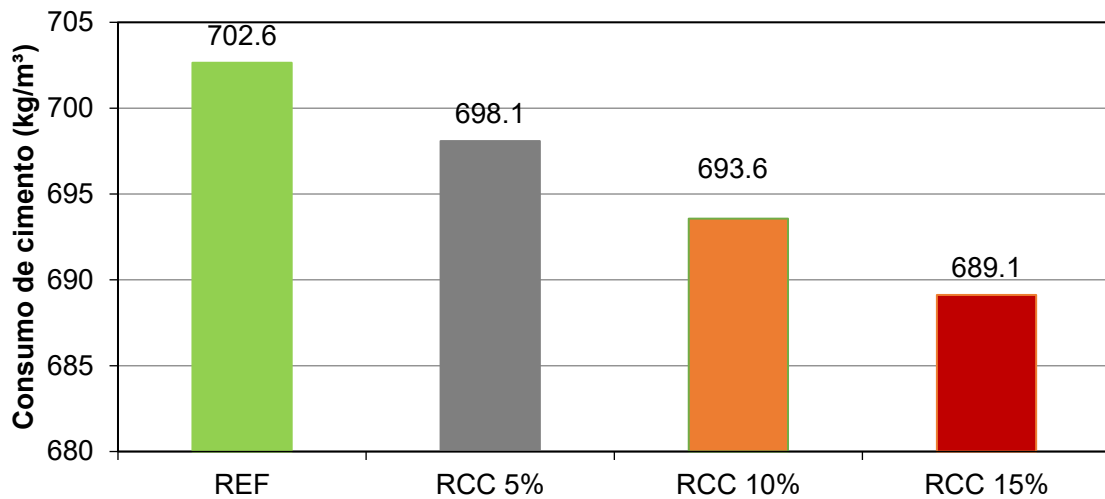
Fonte: Autoria própria (2024)

### 4.5.3 Consumo de cimento

Como um dos objetivos dessa pesquisa é a diminuição do consumo de cimento, uma análise foi feita, observando que quanto maior a substituição de RCC no concreto, menor foi a utilização de cimento, trazendo maior eficiência na sua utilização, diminuindo o custo do concreto e a escolha de um traço mais sustentável.

Usando o RCC de 5% a 15%, tem-se uma economia do uso de concreto que vai de 0,64% a 1,92% (Figura 14).

**Figura 14 – Consumo de cimento**



Fonte: Autoria própria (2024)

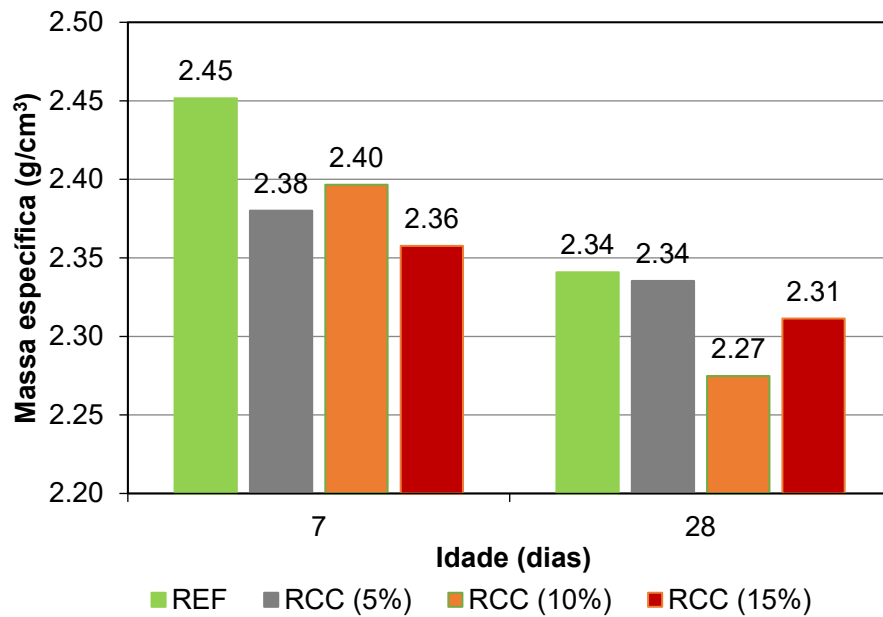
## 4.6 Estado endurecido

### 4.6.1 Massa específica do concreto

A massa específica aparente no estado endurecido diminuiu em todos os concretos com o aumento da idade (de 7 para 28 dias). Concretos com maior massa específica geralmente têm menor porosidade e, conseqüentemente, maior resistência à compressão.

A maior diferença entre as massas específicas aparente de diferentes porcentagens de substituição pode ser verificada nas amostras de 10% em relação às diferentes idades, com redução de aproximadamente 5,4% na massa, conforme Figura 15.

Figura 15 – Massa específica



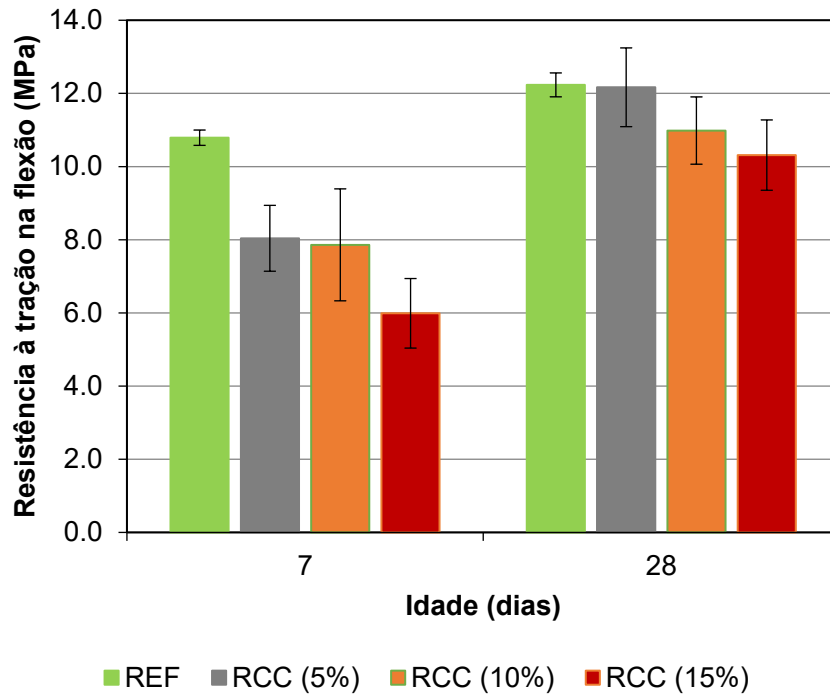
Fonte: Autoria própria (2024)

#### 4.6.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 7 e 28 dias são apresentados na Figura 16, ainda tem-se o desvio padrão localizado na extremidade de cada barra.

Na comparação dos resultados obtidos de resistência à tração na flexão aos 7 dias, observou-se que os concretos tiveram resistência à tração na flexão com valor em torno de 8 MPa, e a menor foi a de 15% com o valor de 6 MPa. A referência apresentou valor superior que as demais (10,8 MPa), e o concreto com teor de 5% de RCC foi o que obteve a maior resistência quando comparado com as amostras com substituição.

**Figura 16 – Resistência à tração na flexão**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

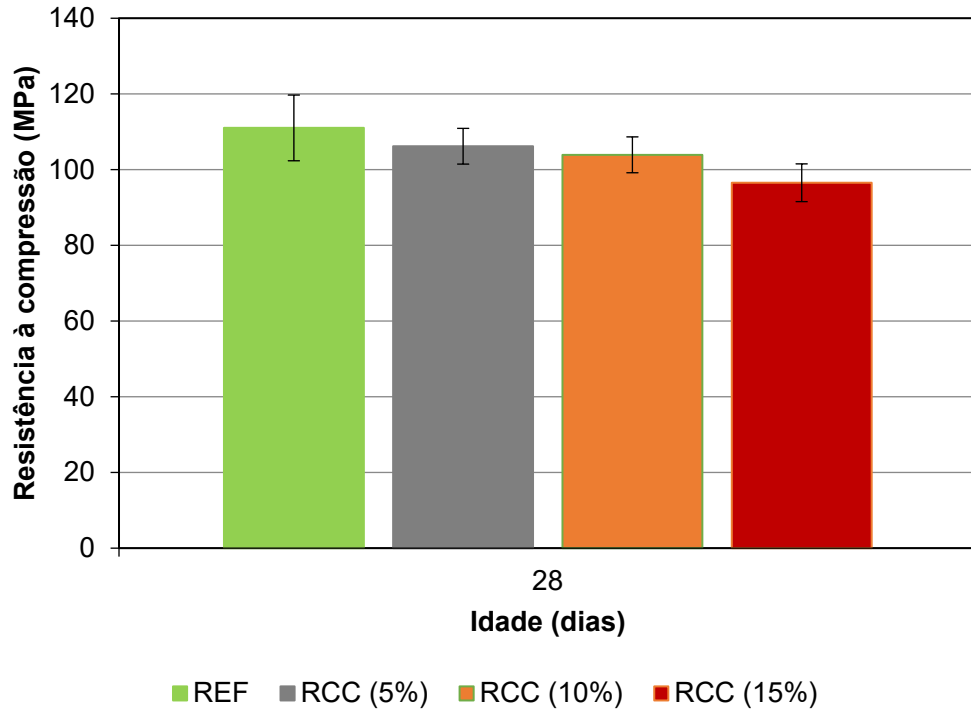
Aos 28 dias, o concreto de referência apresentou um aumento de aproximadamente 13%, em relação à idade de 7 dias, ainda teve valor superior às demais, em torno de 12 MPa. Houve um aumento na resistência à flexão na tração da amostra com 5% de substituição, chegando muito próxima ao concreto de referência, sendo em torno de 99,5% do valor referencial.

#### 4.6.3 Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão aos 28 dias são apresentados na Figura 17. A análise realizada evidencia que o concreto de referência obteve 111 MPa em comparação com os concretos com RCC, as amostras apresentaram resultados de no mínimo 87%, aproximadamente, do valor obtido no concreto referencial.

A amostra com 5% de RCC em sua composição alcançou o maior valor de resistência entre os outros concretos com substituição, chegando a 106,2 MPa, ou seja, em torno de 96% do valor referencial. A mais distante da referência foi a de 15%, com 96,5 MPa. As análises evidenciam que quanto maior a quantidade de substituição por RCC, menor é a resistência à compressão, porém ainda chegam a altos valores, superiores à 50 MPa, sendo considerados concretos de alto desempenho.

**Figura 17 – Resistência à compressão**



**Fonte: Autoria própria (2024)**

## 5 CONCLUSÃO

A partir das análises realizadas, conclui-se que os concretos com substituição do agregado miúdo por RCC possuem o potencial de utilização em concretos de alto desempenho, alcançando os valores de resistência à compressão maiores de 50 MPa com 28 dias de cura. Destaca-se que a maior porcentagem de substituição (15%) pode ser utilizada, sendo a amostra que traz melhor economia com o menor consumo de cimento. Além de ser a mais sustentável, por possuir maior porcentagem de resíduos reciclados em sua composição.

De modo geral, o concreto com o teor de substituição de 5% teve maiores valores de resistência à compressão e à tração na flexão, com resultados similares à de referência, com as restantes amostras contendo valores aceitáveis para o uso como CAD, apesar de possuírem resultados menores que a referência.

O teor de ar incorporado, quando avaliadas as amostras em 28 dias, indicou valores inversamente proporcionais à resistência à tração na flexão e à compressão, e à massa específica, ou seja, a maior massa específica possui menor teor de ar incorporado e assim maior resistência à compressão. Nesse contexto, destaca-se a substituição de 5%, compatível ao valor de referência. As demais substituições também apresentaram resultados satisfatórios.

Em relação ao ensaio de índice de consistência, os ensaios obtiveram valores superiores ao referencial, e dessa forma foram classificadas como concretos autoadensáveis, sem prejudicar a resistência à compressão e à tração na flexão.

Conclui-se com essa pesquisa que o uso de resíduos de construção civil tem grande potencial para ser utilizado, visto que se assemelham aos concretos convencionais, tornando-os bastante atrativos. Os resíduos, de forma geral, são dispostos em local inapropriado, perdendo qualquer tipo de função. Espera-se que a análise do presente estudo, incentive a reciclagem dos resíduos de construção civil como uma alternativa no futuro, em que serão cada vez mais escassos os recursos finitos, especialmente a areia, e com a sua utilização em matriz cimentícia seja em pasta, argamassa ou concreto, não sendo apenas eficiente com suas propriedades, mas também sustentável, o que a torna eficaz.

## 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a realização de outros trabalhos de substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de construção civil, seguindo essa mesma linha de pesquisa, seguem algumas sugestões para incentivar novos trabalhos:

- Estudo de novos traços de concreto de alto desempenho com porcentagens maiores que 15% para diferentes resistências mecânicas;
- Estudo que busque as porcentagens máximas de substituição com resultados satisfatórios, classificando-os como concreto de alto desempenho;
- Produzir novos concretos com misturas de diferentes tipos de RCC, além de resíduos cinza;
- Verificação da durabilidade deste concreto;
- Analisar resultados da absorção de água do RCC utilizado;
- Atualizar a avaliação de custo do uso dos agregados à medida em que se tornam escassos os recursos finitos, que tende a se acentuar no futuro, como é o caso da areia.

## REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P. C. **Binders for Durable and Sustainable Concrete**. London: Taylor and Francis, 2006.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Ed. Pini, 2000.
- AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. **Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC**. Cement and Concrete Composites, v.24. p.269-279, 2002.
- ALBUQUERQUE, M. C. F. e GONÇALVES, A. C. **Estudo Mecânico do Concreto de Alto Desempenho com Agregado Reciclado**. Holos Environment, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 153–164, 2010.
- ALLWOOD, J. M.; ASHBY, M. F.; GUTOWSKI, T. G.; WORREL, E. **Material efficiency: A white paper, Resources, Conservation and Recycling**, 55, 362 – 381, Royal Society, 2011.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 363R-10: **Report on High-Strength Concrete**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2010.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Committee 201, **Guide to Durable Concrete**, ACI Mat. Jour., vol. 88, n.5, p.544-582, 1991.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 363R-92 (Reapproved 1997). **State of the art report on high strength concrete**. ACI Manual of Concrete Practice, part 1. Farmington Hills: ACI, 1998.
- ARAÚJO, D. L.; FELIX, L. P.; SILVA, L. C.; SANTOS, T. M. **Influência de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção em Propriedades Mecânicas do Concreto**. REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 11, n. 1, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (1999). **Guia básico de utilização do cimento Portland – Boletim Técnico BT106**. 7. ed. São Paulo. 28p. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953: concreto para fins estruturais – classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738: determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16972: determinação da massa unitária e índice de vazios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 $\mu$ m por lavagem.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 52: determinação de massa específica e massa aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248: agregados – determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ATIS, C. D. **Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete and influence of curing condition.** Cement and Concrete Research, v.36, n.6, p.1112-1121, 2005.

BARBOSA, M. B. **Utilização de Resíduos de Cinza de Casca de Arroz e Borracha de Pneus em Concreto de Alto Desempenho.** 2006. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

BRASIL. **Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Dispõe sobre princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2010.

BRITO, J.; PEREIRA, A. S.; CORREIA, J. R. **Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates.** Cement and Concrete Composites, v.27, n.4, p.429-433, 2005.

BRUM, I. A. S. **Fabricação de tijolos de solo e entulho reciclado de Salvador estabilizados com cimento.** In: Anais do III Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. Práticas Recomendadas – IBRACON – S.P., 2000.

CASAGRANDE, C. A.; MATOS, P. R.; SAKATA, R.; JOCHEM, L. F. **Efeito Da Substituição Do Cimento Por Cinza Volante Em Concretos Autoadensáveis De Alto Desempenho.** Edição especial 4o SPPC | Revista Técnico-Científica. Set. 2019.

CONAMA Resolução N° 307, de 5 de julho de 2002. **Conselho Nacional Do Meio Ambiente: Gestão de resíduos e produtos perigosos – Tratamento.** Publicado no DOU n° 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.

CONAMA Resolução N° 469. **Conselho Nacional do Meio Ambiente.** Governo Federal. Ministério do Meio Ambiente: Brasília. 2015.

CORDEIRO, G. C. **Concreto de alto desempenho com metacaulinita.** Dissertação (Mestrado) - Ciências de Engenharia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2001.

COSTA N., COSTA JUNIOR, LUNA M., SELIG P., ROCHA J., **Planejamento de Programas de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: Uma Análise Multivariada** Eng. Sanit. Ambiental, 2007.

CROQUER, Gabriel. **Lixo mal descartado em aterros e lixões cresce 16% em uma década.** R7. Brasília, 05 jun 2021.

DACHOWSKI R., KOMISARCZYK K., **Determination of Microstructure and Phase Composition of Sand-Lime Brick after Autoclaving Process,** Procedia Engineering, Volume 161, 2016.

GANASINI, D. **Concreto de alto desempenho reforçado com microfibras de polipropileno e submetido a elevadas temperaturas,** 2019, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2019.

HALMEMAN, M. C. R., SOUZA, P. C., CASARIN, A. N. **Caracterização dos Resíduos de Construção e Demolição na Unidade de Recebimento de Resíduos Sólidos no Município de Campo Mourão - PR.** Revista Tecnológica, Edição Especial ENTECA, p. 203-209, 2009.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, G. **Laboratory investigation of portland cement concrete containig recycles asphalt pavements.** Cement and Concrete Research, v.35, n.10, p.2008-2013, 2005.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção.** In: Seminário reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo. 2000.

KOEHNKEN, L., RINTOUL, M. **Impacts of Sand Mining on Ecosystem Structure, Process and Biodiversity in Rivers.** WWF Review, 2018.

LEVY, S. **Produzindo concretos ecológica e politicamente corretos**. Exacta, vol. 4, núm. 2, pp. 375-384 Universidade Nove de Julho São Paulo, Brasil, 2006.

LIMA, F. B.; VIEIRA, G. L. **Blocos de concreto produzidos com entulho da construção civil**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 43, 2001, Foz do Iguaçu. CDROM. Foz do Iguaçu: Instituto Brasileiro do Concreto, 2001.

LIMA, R. S.; LIMA R. R. R. **Guia para Elaboração de Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil**. Série de Publicações Temáticas do CREA-PR, Paraná, 2012.

MARCHI C. M. D. F., **Perspectivas Gestão Conhecimento**, 2011.

MATOS, P. R; MARCON, M. F; SCHANKOSKI, R. A; PRUDÊNCIO, L. P. **Novel applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes**. Journal of Environmental Management. v. 244, p 294-303. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Pini, 2008.

MELCHIORS, E. F. **Método de dosagem de concretos de alto e ultra-alto desempenho autonivelantes**. 2023. Dissertação (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2023.

NASCIMENTO, F. T. F. **Concreto de alto desempenho e sua aplicação em vigas de edifícios**. 1997. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia das Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

OLIVEIRA, C. O.; MACIEL, G. F.; CASTRO, A. L.; BARBOSA, M. P.; CAMPOS, R. S. **Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 1, p. e-11962, 2018.

OLIVEIRA, M. J. E. **Resíduo de Concreto Reciclado**. In: Anais do III Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. Práticas Recomendadas – IBRACON – S.P., 2000.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Os 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS)**, 2015.

PACHECO-TORGAL, F. **Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW)**. In: Handbook of recycled concrete and demolition waste: Pacheco-Torgal, Tam, Labrincha, Ding, De Brito (Eds.), Woodhead Publishing Limited, Cambridge. 1-6p. 2013.

PINTO, T. P. (Coord.). **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: A experiência do Sinduscon-SP**. São Paulo: Sinduscon. 48p. 2005.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. **Manejo e gestão de resíduos da construção civil**. Vol. I - Manual de orientação: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: CAIXA. 196p. 2005.

POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L. **Strength of concretes prepared with natural and recycled aggregates at different moisture condition.** In: PROCEEDINGS... Of the International Conference on Advances in Building Technology 4-6 december 2002, Hong Kong, China, p. 1407-1414, 2002.

QUISSANGA, V. M.; PIMENTEL, F. **Concreto de Alto Desempenho (CAD).** Revista Tecnológica da Universidade Santa Ursula, V2, N1. 2019.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of reactive powder concretes.** In: Cement and Concrete Research, v. 25, n. 7, p. 1501-1511, out. 1995.

SANTIAGO, D. R.; SANTANA, J. M. R.; SILVA, W. C. T. D. **Utilização do concreto de alto desempenho na construção civil: Uma revisão sobre o tema.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, Vol. 05, pp. 85-95. Novembro de 2020. ISSN: 2448-0959.

SANTOS, J. L. **Estudo do concreto de alto desempenho com adição de agregados reciclados. 2021.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2021.

SERRA, G. **Concreto de Alto Desempenho e a Nova Arquitetura.** CD Rom da ABCP. São Paulo, 1999.

SOUSA, A. C. A.; COSTA J. H. B.; SILVA K. R. M.; CARVALHO T. S. **Estudo da qualidade da areia utilizada na construção civil na região metropolitana de Belém do Pará.** Iguatu, CE: Quipá Editora, p. 13, 2023.

STRAND, S. M. **The MaSe decision support system: Development of an integrated information system for the selection of environmentally preferable materials and products in the building process.** Norwegian University of Science and Technology; Faculty of Engineering Science and Technology; Department of Geology and Mineral Resource Engineering, 2003.

TAVAKOLI, D., HASHEMPOUR, M. and HEIDARI, A. **"Use of waste materials in concrete: A review"**, Pertanika Journal of Science & Technology, Vol. 26, No. 2, 499-522, 2018.

TU, T. Y.; CHEN Y. Y.; HWANG C. L. **Properties of HPC with recycled aggregates.** Cement and Concrete Research, v.36, p.943-950, 2006.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho.** In ISAIA, 2011.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas.** São Carlos: USP, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

VASCONCELOS, A. R. B. DE.; AKASAKI, J. L. **Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu.** Ambiente Construído, v. 10, n. 1, p. 77–90, jan. 2010.

WATANABE, P. S. **Concretos especiais: propriedades, materiais e aplicações.** Bauru, 2008. Disponível em: <https://bv.fapesp.br/pt/bolsas/50683/concretos-especiais-propriedades-materiais-e-aplicacoes/>. Relatório final de pesquisa – Bolsa de Iniciação Científica FAPESP, Bauru, 2008.

ZANNI, H.; CHEYREZY, M.; MARET, V.; PHILIPPOT, S.; NIETO, P. **Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using  $^{29}\text{Si}$  NMR.** Cement and Concrete Research, v. 26, n. 1, p. 93-100, 1996.