

**UNIGUAÇU – UNIÃO DE ENSINO SUPERIOR DO IGUAÇU LTDA
FACULDADE UNIGUAÇU
ENGENHARIA CIVIL
PROJETO FINAL DE CURSO II**

CARLOS EDUARDO DA SILVA MACHADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA EM
CONCRETOS COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO**

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025

CARLOS EDUARDO DA SILVA MACHADO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA EM
CONCRETOS COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES
PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO**

Projeto de pesquisa apresentado como requisito para aprovação na disciplina de Projeto Final de Curso II do curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU.
Orientador(a): Profa. Me. Melissa Pastorini Proença

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU - PR

2025



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO

CARLOS EDUARDO DA SILVA MACHADO

ANÁLISE COMPARATIVA DE RESISTÊNCIA MECÂNICA EM CONCRETOS COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES PROVENIENTES DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil apresentado, sob a orientação da Profa. Me. Melissa Pastorini Proença, aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel no curso de Engenharia Civil da Faculdade UNIGUAÇU, pela seguinte banca examinadora:

Professora Me. Melissa Pastorini Proença
Faculdade UNIGUAÇU

Professor Me. Aleksey Grando
Faculdade UNIGUAÇU

Professora Me. Daniela Kunz
Faculdade UNIGUAÇU



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

SÃO MIGUEL DO IGUAÇU, 05 DE NOVEMBRO DE 2025



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AGRADECIMENTOS

Ao concluir esta etapa fundamental da minha jornada acadêmica, não poderia deixar de expressar minha gratidão primeiramente a Deus e a todas as pessoas que, de alguma forma, tornaram a realização deste trabalho não apenas possível, mas também uma experiência de profundo aprendizado e superação.

Em primeiro lugar, aos meus pais. Não existem palavras que possam verdadeiramente capturar a dimensão da minha gratidão. Obrigado pelo amor incondicional, pelo apoio inabalável em todos os momentos e por serem meus maiores exemplos de resiliência e caráter. Cada sacrifício de vocês ecoa nesta conquista, que é tão minha quanto de vocês. Esta vitória eu dedico a vocês.

Aos meus avós, os alicerces da nossa família. Se hoje cheguei até aqui, é por conta das orações, pelos conselhos sábios e pelo amor incondicional que sempre foi meu maior sustento. Vocês plantaram as sementes de honestidade e perseverança que hoje tento colher. Esta vitória é de vocês também.

E também a toda a minha família extensa. Aos meus tios e tias, que são como segundos pais, e aos meus primos e primas, que são os irmãos que a vida me deu pela sorte. Obrigado por todo o carinho, pelos momentos de descontração que foram um oásis no meio do estresse e por sempre torcerem por mim. Esta conquista não seria a mesma sem a certeza do lugar especial que ocupo no coração de vocês. Levo cada um de vocês comigo em todas as minhas conquistas.

À minha orientadora, meu sincero agradecimento pela paciência, pela orientação sábia e pela dedicação. Suas críticas foram construtivas e suas palavras de incentivo um alívio. Sua expertise e paixão pelo assunto foram verdadeiramente inspiradoras e fundamentais para a qualidade deste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de jornada. Obrigado pelas risadas que aliviavam o estresse, pelos "vamos dar um jeito nisso" nos momentos de desespero e por toda a cumplicidade.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta caminhada. Aos professores que me inspiraram ao longo do curso, aos colegas de classe e a todos que acreditaram em meu potencial. E é uma honra tê-los ao meu lado.

EPIGRAFE

“...O essencial é invisível aos olhos; só se vê bem com o coração. É o tempo que dedicas às coisas e às pessoas que lhes dá valor...”

Antoine de Saint-Exupéry

RESUMO

A busca por alternativas sustentáveis na construção civil é imperativa, considerando o impacto ambiental do setor, notadamente as emissões de CO₂ da produção de cimento e a geração expressiva de Resíduos de Demolição (RCD). Neste contexto, este estudo objetiva comparar a resistência mecânica e a ecoeficiência de concretos que utilizam materiais cimentícios suplementares (MCS) provenientes de RCD, especificamente o pó de concreto (PC) e o pó de cerâmica vermelha (PT), dosados pelo método de empacotamento de partículas de De Larrard. A metodologia compreendeu a caracterização física e a análise da reatividade dos MCS, seguida da dosagem, moldagem e ensaio de corpos de prova de concreto. Os resultados demonstraram que, embora nenhum dos MCS tenha atendido integralmente aos requisitos normativos para classificação como pozolânico, o PT apresentou significativa reatividade pozolânica, enquanto o PC atuou predominantemente por efeito filler. Os concretos produzidos apresentaram trabalhabilidade adequada (abatimento entre 160 e 220 mm) e resistências à compressão aos 14 dias de 38,11 MPa (PC) e 35,19 MPa (PT), atendendo à classe C35. A análise de ecoeficiência revelou que o concreto com PT obteve melhor desempenho ambiental, com reduções de aproximadamente 47% no índice de ligante e 45,8% no índice de carbono em relação ao concreto com PC. Conclui-se que a técnica de dosagem por empacotamento permitiu a incorporação viável dos pós de RCD, resultando em concretos com desempenho mecânico satisfatório e significativo ganho ambiental, promovendo a valorização de resíduos e a redução do consumo de cimento Portland.

Palavras-chave: Concreto. Resíduos de construção. Empacotamento de partículas.

ABSTRACT

The search for sustainable alternatives in the construction industry is imperative, considering the sector's environmental impact, notably the CO₂ emissions from cement production and the significant generation of construction and demolition waste (CDW). In this context, this study aims to compare the mechanical strength and eco-efficiency of concretes that use supplementary cementitious materials (SCMs) from CDW, specifically concrete powder (CP) and red ceramic powder (RCP), proportioned using De Larrard's particle packing method. The methodology involved the physical characterization and reactivity analysis of the SCMs, followed by the mix design, molding, and testing of concrete specimens. The results showed that, although none of the SCMs fully met the normative requirements for classification as pozzolanic, RCP showed significant pozzolanic reactivity, while CP acted predominantly through a filler effect. The produced concretes showed adequate workability (slump between 160 and 220 mm) and compressive strengths at 14 days of 38.11 MPa (CP) and 35.19 MPa (RCP), meeting the C35 strength class. The eco-efficiency analysis revealed that the concrete with RCP achieved better environmental performance, with reductions of approximately 47% in the binder index and 45.8% in the carbon index compared to the concrete with CP. It is concluded that the particle packing mix design technique allowed for the viable incorporation of CDW powders, resulting in concretes with satisfactory mechanical performance and significant environmental gain, promoting waste valorization and reduced Portland cement consumption.

Keywords: Concrete. Construction waste. Particle packing.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 JUSTIFICATIVA	7
3 OBJETIVOS	8
3.1 OBJETIVO GERAL.....	8
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
4 REVISÃO DE LITERATURA	9
4.1 SUSTENTABILIDADE X INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	9
4.2 PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.....	11
4.3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES.....	13
4.4 CONCRETO.....	15
4.4.2 Dosagem de concreto	15
5 MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1 MATERIAIS	18
5.2 MÉTODOS	19
5.2.1 Caracterização de materiais.....	19
5.2.2 Dosagem de concreto	20
5.2.4 Ensaio de atividade pozzolânica	22
5.2.5 Moldagem de CPS e Ensaio.....	23
5.2.5.1 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos	23
5.2.5.2 Índice de carbono	25
5.2.5.3 Índice de ligante.....	26
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	27
6.2.1 Propriedades físicas dos agregados e materiais cimentícios	27
6.2.2 Granulometria de agregados	27
6.2.3 Consumos de materiais e traços	28
6.2.4 Reatividade dos MCS	29
6.3 CONCRETO	30
6.3.1 Slump Test	31
6.3.1 Resistência a compressão axial	31
6.4 ÍNDICE DE CARBONO E LIGANTE.....	33
7. CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda global por recursos naturais.....	9
Figura 2 - Consumo de cimento em M.ton ou kg/ton Ano	11
Figura 3 - Esquema das etapas produtivas do cimento Portland	12
Figura 4 - Emissões de CO ₂ , da produção de cimento no Brasil.....	13
Figura 5 - Mistura binária sem interação - partículas maiores dominantes	17
Figura 6 - Mistura binária sem interação - partículas menores dominantes	17
Figura 7 - Origem dos RCD	18
Figura 8 - Etapas da metodologia.....	19
Figura 9 - Cura úmida dos corpos de prova de concreto.....	24
Figura 10 - Prensa hidráulica com corpo de prova	24
Figura 11 - Curva granulométrica dos agregados	28
Figura 12 - Índice de desempenho com cimento aos 28 dias.....	29
Figura 13 - Atividade com cal aos 7 dias	30
Figura 14 - Gráfico de abatimento (Slump Test) do concreto	31
Figura 15 - Gráfico de resistência média do concreto aos 14 dias	32
Figura 16 - Índices de carbono e ligante	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de MCS conforme composição NBR 15116	18
Quadro 2 – Proporções volumétricas de agregados	20
Quadro 3 - Valor de K para diferentes métodos de compactação	22
Quadro 4 - Dados das emissões de CO ₂	25
Quadro 5 - Propriedades físico-químicas dos materiais	27
Quadro 6 - Consumos dos materiais constituintes do concreto.....	29

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Empacotamento virtual	21
Equação 2 - Efeito de afastamento.....	21
Equação 3 - Efeito de parede	21
Equação 4 - Densidade efetiva	21
Equação 5 - Equação de índice de desempenho com cimento	23
Equação 6 - Índice de carbono	25
Equação 7 - Índice de ligante	26

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil desempenha papel crucial nos índices de desenvolvimento socioeconômico, proporcionando a infraestrutura urbana necessária para o crescimento urbano. Por outro lado, este setor está relacionado com impactos ambientais como a geração de resíduos sólidos, a emissão de gases do efeito estufa, e a extração de recursos naturais (ABRECON, 2020).

Entre os maiores emissores de CO₂ globais destaca-se a indústria do cimento Portland com cerca de 7% das emissões, durante o processo de clínquerização. Esse processo acontece pela calcinação de calcário e argila a temperaturas entre 1400 °C e 1600 °C, assim ocorrendo a descarbonatação do calcário, que libera CO₂, tornando-o uma importante fonte de emissões na produção cimenteira. As principais formas de supressão dessas emissões nas indústrias são a substituição parcial do cimento com uso de materiais cimentícios suplementares, uso de adições minerais (pozolanas naturais) e a captura de carbono (RIGO, 2019; SNIC e ABCP, 2019).

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são subprodutos ou matérias-primas alternativas que possuem granulometria fina e que podem substituir parte do clínquer na produção de cimento. Podem se classificar como cimentantes que atuam como cimento e endurecem em contato com a água, como pozolanas que tem uma fonte original rica em dióxido de silício (SiO₂) e óxido de alumínio (Al₂O₃) que reagem com o hidróxido de cálcio do cimento formando silicatos de cálcio hidratados, aluminatos de cálcio hidratados e ferritos de cálcio hidratados (SNIC e ABCP, 2019 e COSTA, 2021), e também podem ser caracterizados como fillers quando são inertes ou tem baixa reatividade (CECEL, 2019).

Neste contexto diversos estudos vem sendo explorados como por exemplo as com cinzas de biomassa com trabalhos como as de cinzas de casca de arroz com 15% de substituição que elevou a durabilidade do concreto (ISAIA et al, 2017), a cinza de cavaco de eucalipto com 5, 10 e 15% de substituição que apresentou resistência equivalente a mistura sem adições (RESENDE,2013), já com resíduos de vidro com até 20% de substituição o concreto apresentou propriedades mecânicas similares as misturas tradicionais (HARRISON, 2020).

Aproveitar a fração de pó do resíduo de construção e demolição (RCD) como MCS, é uma estratégia de circularidade na indústria da construção civil, a qual gera no Brasil em média 100 milhões de toneladas por ano de RCD bruto, com uma

geração per capita de 500 kg/hab.ano sendo que apenas 35% acabam sendo reciclados na forma de agregados, com baixa incorporação tecnológica, e o restante tem seu descarte em locais impróprios tornando-se prejudiciais ao ambiente urbano (AKTHAR; SARMAH, 2018 e ABRECON, 2020).

Uma alternativa de diminuir a exploração de recursos naturais seria a da utilização dos RCD na forma de MCS. Porém, com a incorporação desses materiais o concreto pode ter alterações nas suas propriedades quanto à sua durabilidade e resistência mecânica (AKTHAR; SARMAH, 2018).

Manter os atuais padrões de produção cimentícia demonstra se tornar inviável a médio e longo prazo, portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de soluções que tenham menor impacto ambiental e ao mesmo tempo não afetem o desempenho técnico, buscando atender às crescentes demandas de forma sustentável (JOHN, 2017). Neste contexto, este estudo busca investigar os efeitos do uso de MCS originários de resíduos de construção e demolição, no desempenho mecânico de concretos, dosados por empacotamento de partículas.

2 JUSTIFICATIVA

As crescentes preocupações com a necessidade de reduzir as emissões de carbono tornam essencial a busca por alternativas sustentáveis na indústria da construção civil (ABRECON, 2020; NASCIMENTO, 2022). A inviabilidade dos padrões produtivos atuais exige o desenvolvimento de soluções sustentáveis que aliem desempenho técnico e menor impacto ambiental (JOHN, 2017).

O concreto se configura não apenas como um material tradicional, mas como um elemento dinâmico e em constante evolução, capaz de se adaptar às exigências tecnológicas e ambientais do mundo moderno. Sua complexa composição, aliada à possibilidade de incorporar inovações que potencializam sua performance e reduzem seu impacto ecológico, reforça sua importância no cenário da engenharia civil.

Nesse contexto, a utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) como materiais cimentícios suplementares (MCS) representa uma alternativa para reduzir a exploração de recursos naturais e promover a ecoeficiência. No entanto, as incorporações desses materiais podem alterar as propriedades do concreto relacionadas a sua durabilidade e resistência mecânica exigindo investigação aprofundada (AKTHAR; SARMAH, 2018).

Portanto, diante da crescente demanda por práticas construtivas sustentáveis, torna-se imprescindível a realização de estudos que avaliem as alterações nas propriedades dos concretos ecoeficientes, decorrentes da incorporação de RCD. A compreensão das alterações físico-químicas decorrentes dessa adição é essencial para assegurar a viabilidade técnica e o desempenho a longo prazo desses materiais.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a resistência mecânica de concretos que utilizam MCS oriundos de resíduos de construção e demolição na sua composição.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar e comparar reatividade dos pós de concreto e pó de tijolo através de ensaios do índice de desempenho de cimento, atividade com cal e consumo de hidróxido de cal;
- Analisar o efeito da técnica de empacotamento de partículas durante a dosagem, no desempenho mecânico dos concretos;
- Verificar a ecoeficiência em termos de índices de carbono e ligante.

4 REVISÃO DE LITERATURA

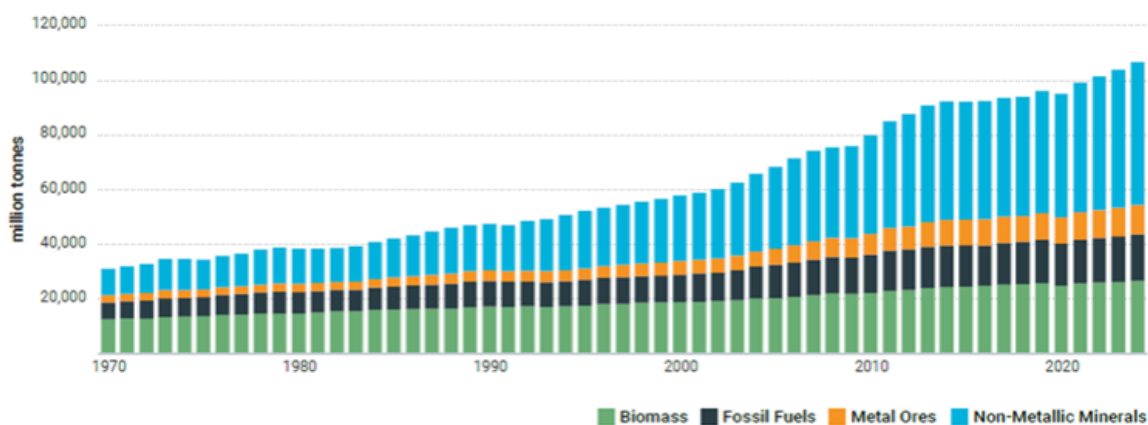
4.1 SUSTENTABILIDADE X INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A indústria da construção civil desempenha um papel fundamental para o progresso da civilização e para a economia global, também é uma das principais causadoras de impactos ambientais devido à necessidade de modificar a paisagem para viabilizar as construções, aliada ao intenso consumo de recursos minerais, energéticos e hídricos (NASCIMENTO, 2022).

Todas as atividades humanas dependem de um ambiente construído a partir de materiais, ou seja, o conforto, o aumento na longevidade humana e o desenvolvimento econômico dependem de um fluxo continuamente crescente de materiais retirados da natureza. No século XX, a demanda por recursos naturais aumenta de forma gradativa conforme Figura 1 (JOHN, 2017 e ALVES, 2024).

O consumo de minerais utilizados na construção, como rochas naturais, agregados e minérios destinados à produção de cimento e cerâmica, tem crescido em ritmo mais acelerado que a demanda global por materiais, representando atualmente cerca de 40% do total extraído conforme figura 1, Além de minerais, a indústria da construção utiliza diversos outros materiais, como biomassa, metais e combustíveis. Estima-se que mais de 50% da extração global de recursos naturais seja destinada à construção civil, sendo que a maioria dos materiais utilizados é de origem não renovável (JOHN, 2017).

Figura 1 - Demanda global por recursos naturais



Fonte: Alves, 2024

Outro desafio significativo está relacionado à gestão inadequada dos resíduos. O Brasil gera anualmente cerca de 100 milhões de toneladas de resíduos sólidos, com uma geração per capita de 500 kg/hab.ano (ABRECON, 2020). Parte considerável ainda é descartada de maneira inadequada, agravando a degradação ambiental e ocasionando problemas de saúde pública (VIEIRA, 2022).

A análise das práticas de gerenciamento de resíduos na construção civil no Brasil revela desafios complexos que incluem a conscientização dos envolvidos, a necessidade de infraestrutura adequada e tecnologias eficientes. A gestão de resíduos vai além dos aspectos técnicos, abrangendo questões sociais, econômicas e ambientais. São necessárias soluções inovadoras e integradas que promovam tanto a sustentabilidade quanto a modernização do setor (GUEDES, 2024).

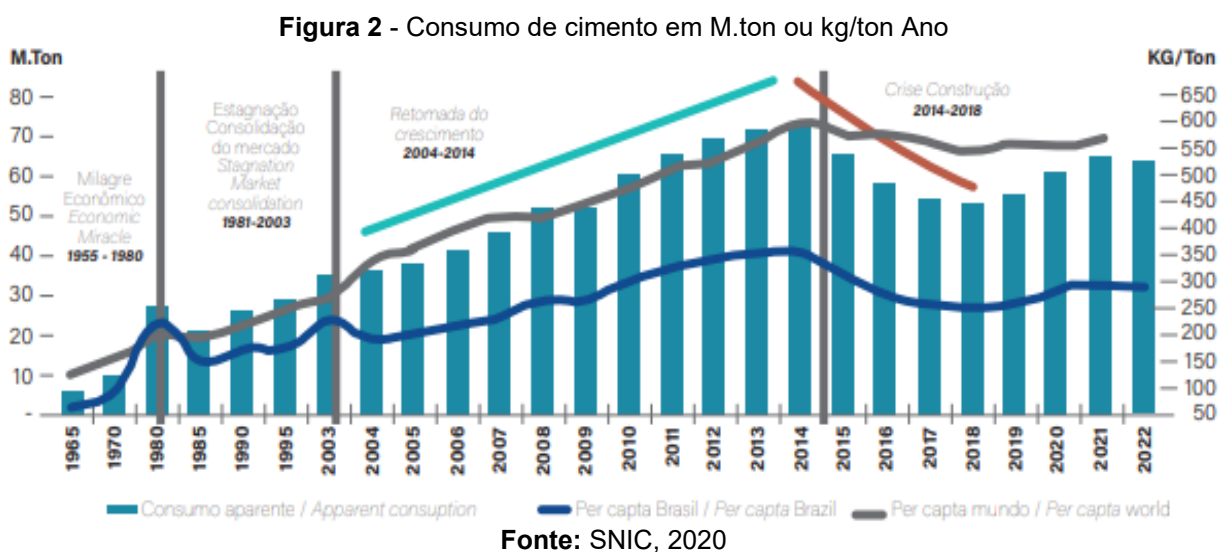
Devido à grande demanda por insumos na construção civil, à restrição na disponibilidade escalável e à constituição química do planeta, torna-se inviável que o setor elimine os materiais amplamente empregados atualmente, salvo quando representem riscos à saúde. Nesse panorama, é imprescindível escolher processos e produtores mais ecoeficientes, bem como selecionar, para cada propósito e empreendimento, os insumos que apresentem os melhores desempenhos (JOHN, 2017).

Além disso outro grande fator a se considerar na indústria da construção são as altas taxas de emissão de CO₂ relacionadas a produção do cimento Portland com cerca de 7% das emissões (RIGO, 2019). Diante desse cenário, mecanismos para mitigação de emissões como créditos de carbono e taxaço de emissões surgem como alternativas fundamentais para promover a sustentabilidade no setor (GOULARTE, 2011; EIBEL e PINHEIRO, 2016).

Os créditos de carbono surgem como um mecanismo econômico para incentivar práticas sustentáveis na construção civil, permitindo que empresas compensem emissões através de projetos certificados sendo que cada crédito equivale a 1 tonelada de CO₂ não emitida, negociável em mercados regulados ou voluntários. Já a taxaço de carbono estabelece custos sobre emissões (média de US\$ 50–100/t CO), pressionando a cadeia construtiva a adotar alternativas ao cimento Portland (WORLD BANK, 2021). Então o uso de RCD como materiais cimentícios suplementares (MCS) destaca-se como uma solução viável para reduzir os grandes volumes de resíduos descartados de forma inadequada na construção civil além de mitigar emissões de CO₂ (AKTHAR; SARMAH, 2018).

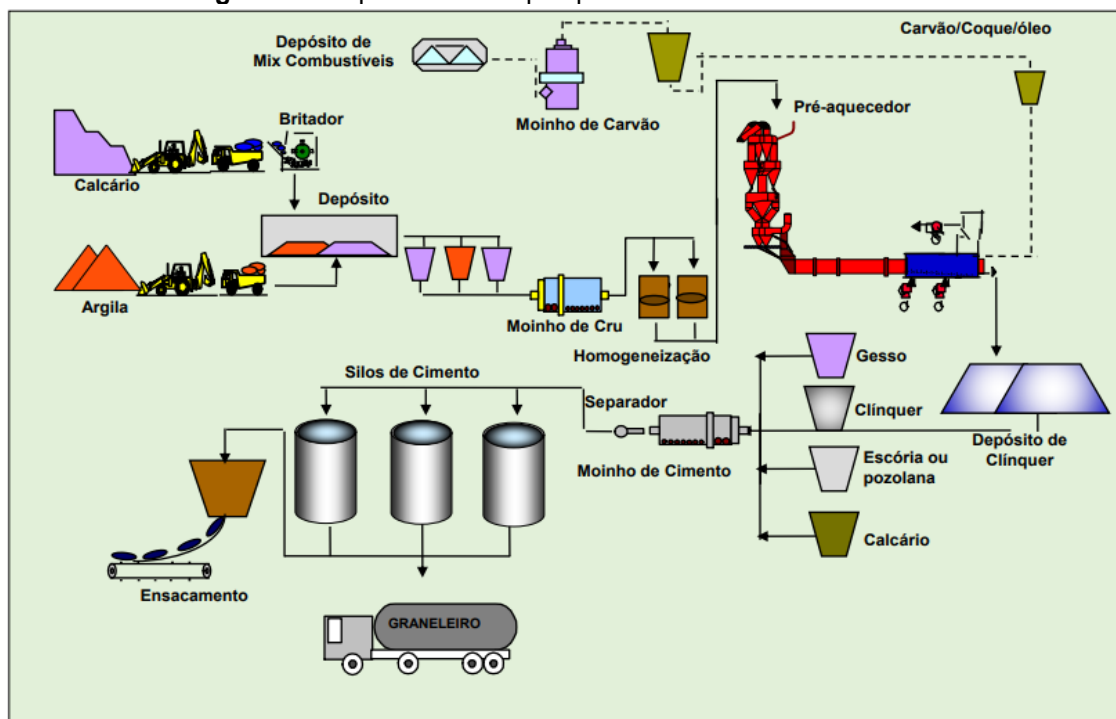
4.2 PRODUÇÃO DE CIMENTO PORTLAND

O cimento é um material fundamental na construção civil, com demanda global crescente devido ao aumento e urbanização da população conforme exposto na Figura 2. No entanto, seu processo de produção emite altas taxas de CO₂ na atmosfera. (SNIC e ABCP, 2019).



A Figura 3 ilustra e sintetiza o processo de produção cimentícia que se inicia com a extração do calcário e da argila, que são britados, moídos e homogêneos no moinho de cru. Depois, os materiais seguem para o pré-aquecedor e, em seguida, para o forno, onde ocorre a calcinação e a formação do clínquer. O clínquer é armazenado e misturado a sulfato de cálcio e outros aditivos no moinho de cimento, onde é moído até a granulometria ideal. Por fim, o cimento é armazenado em silos, sendo posteriormente ensacado ou transportado a granel (ABCP, 2020).

Figura 3 - Esquema das etapas produtivas do cimento Portland



Fonte: ABCP, 2020

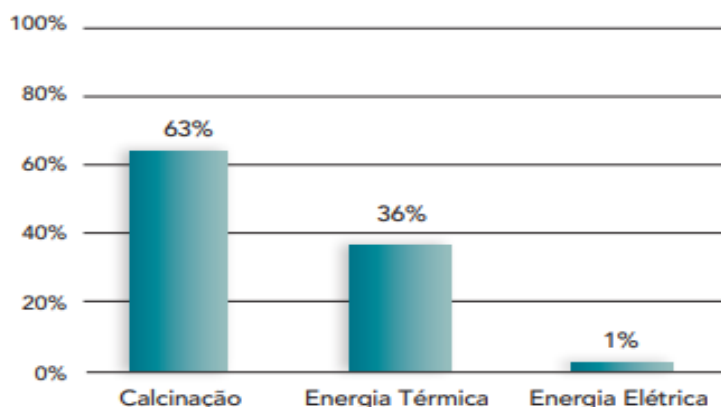
O cimento é fabricado com cerca de 75-80% de calcário e 20-25% de argila, onde estes materiais são encaminhados para a etapa de pré-homogeneização, formando assim o argical e que é estocado empilhado, após essa etapa o material segue para um britador secundário. Posteriormente, o material é submetido a um processo de aquecimento gradual em uma torre de ciclone, começando com temperaturas de 45°C a 70°C na primeira etapa e alcançando 440°C. Na segunda etapa, a temperatura sobe para 650°C, atingindo 770°C na terceira etapa e, finalmente, 900°C na quarta, momento ideal para a clínquerização. Em seguida, a farinha é transferida ao forno, onde é cozida por uma chama que pode atingir impressionantes 2000°C, completando esta etapa (LIMA, 2011).

Nessa etapa ocorrem emissões diretas de CO₂ no Brasil cerca de 36% dessas emissões ocorrem a partir da queima de combustíveis, 63% ocorrem provenientes da reação química de calcinação (tratamento térmico ao qual o argical é submetido) que antecedem a formação do clínquer, e 1% ocorrem de forma indireta resultantes do consumo elétrico, conforme a Figura 4 (SNIC e ABCP, 2019).

O produto final, clínquer, sai do forno com uma temperatura em torno de 1450°C e é necessário ser feito um resfriamento rápido pois o silicato tricálcio (C3S) é instável a temperaturas inferiores a 1250 °C. Para isso, ventiladores injetam ar nas câmaras e

são armazenados em um galpão, seguindo para a moagem. Quando o material está sendo moído adicionam-se escória, gesso e material pozolânico a fim de fabricar os diferentes tipos de cimento Portland (DANTAS, 2023).

Figura 4 - Emissões de CO₂, da produção de cimento no Brasil



Fonte: SNIC e ABCP, 2019

Nesse contexto a preocupação crescente com a necessidade de redução das emissões de carbono e a gestão inadequada de resíduos vêm ganhando relevância significativa na construção civil. Devido a isso políticas como a taxaçoão de carbono e créditos de carbono vem sendo implantadas para mitigação de impactos, já que a taxaçoão funciona como forma de penalizaçoão a quem polui muito, e o os créditos permitem que empresas que reduzem suas emissões negociem no mercado o direito a créditos de carbono (GOULARTE, 2011 E EIBEL e PINHEIRO 2016).

Dentro desse panorama a utilizaçoão de RCD como MCS é uma das principais alternativas a diminuiçoão das altas emissões de carbono, já que podem substituir o clínquer ou cimento Portland nas centrais de produçoão (AKTHAR; SARMAH, 2018).

A substituiçoão parcial do cimento Portland por materiais suplementares reduz significativamente a pegada de carbono do concreto e oferece empresas do setor uma oportunidade para compensar suas emissões através de projetos sustentáveis gerando créditos negociáveis (GOULARTE, 2011 E EIBEL e PINHEIRO 2016).

4.3 MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES

Os materiais cimentícios suplementares (MCS) são subprodutos ou matérias-primas alternativas ao cimento Portland um componente essencial na construção civil, podendo cumprir a mesma função mesmo que de forma parcial a inclusão de MCS na

composição do cimento permite o aproveitamento de subprodutos industriais que, se descartados, seriam prejudiciais ao meio ambiente (ROSA, 2020 e COSTA 2021).

Esses materiais são formados por partículas finas que apresentam propriedades similares ou complementares às do cimento (FIGUEIREDO E KUSTER, 2019). Os MCS podem ser provenientes de fontes de origem natural, com erupções vulcânicas ou argila calcinada, ou origem artificial, como subprodutos industriais que iriam para descarte (TORRES, 2023).

São geralmente cimentantes, pozolânicos ou fillers. Os cimentantes tem características similares a do cimento convencional que tem endurecimento em contato com a água. Já as pozolânica que tem uma origem rica em dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (AlO_3) que em contato com o hidróxido de cálcio do cimento gera reação formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados (C-A-H) e ferritos de cálcio hidratados (C-F-H) (COSTA, 2021), já os fillers são uma adição mineral que é considerada inerte ou de baixa reatividade e tem ação relacionada a diluição do cimento ou melhoria de empacotamento de material seco (CECEL, 2019)

No Brasil, os MCS mais empregados são a escória de alto-forno e a cinza volante, subprodutos da indústria siderúrgica e termoelétricas, respectivamente. Contudo, sua disponibilidade tornou-se limitada frente ao crescimento da produção cimentícia, devido à redução na atividade siderúrgica e à transição energética que diminuiu a geração de cinzas. Essa escassez evidencia a necessidade de desenvolver novas fontes de MCS (ABRÃO, 2019).

A utilização de MCS pode melhorar significativamente a resistência à penetração de cloretos e, ao elevar a resistividade elétrica do concreto, diminuir a velocidade de corrosão da armadura. Contudo, a substituição direta de cimento por um MCS, sem ajustes adequados na dosagem ou nos métodos de preparo e aplicação do concreto, pode resultar em diversos problema como maior risco de trincas devido à retração plástica causado pelo aumento do conteúdo de pasta, redução da exsudação e menor desenvolvimento precoce de resistência , ganho de resistência mais lento por conta da reação de hidratação menos acelerada, lixiviação de metais pesados, comportamento tixotrópico inadequado, superfície menos resistente, redução do limite crítico de cloretos e avanço acelerado da carbonatação devido à menor disponibilidade de álcalis no material (PILLAI et al, 2020)

4.4 CONCRETO

O concreto é um dos materiais de construção mais fundamentais e versáteis da atualidade. Em 2020, sua produção global atingiu cerca de 14 bilhões de metros cúbicos, refletindo sua importância na infraestrutura moderna e no desenvolvimento urbano em escala mundial (GCCA, 2021). Trata-se de um material resultante da mistura de cimento, água e agregados (como areia e brita), combinados de forma a gerar uma massa que, após a hidratação, adquire elevada resistência e durabilidade (COUTO et al., 2013).

Em sua essência, o comportamento do concreto decorre da reação de hidratação do cimento Portland com a água, processo que gera uma pasta que une os agregados e forma uma estrutura monolítica. A qualidade do concreto depende diretamente da correta dosagem dos componentes, da pureza da água utilizada e, principalmente, das condições de adensamento e cura, que garantem a integridade da matriz cimentícia. Dessa forma, a interação entre a pasta e os agregados é determinante para conferir ao material características como a alta resistência à compressão e a progressiva consolidação estrutural (ANDRADE, 2016).

Apesar de ser indispensável para o desenvolvimento urbano e a evolução das construções, a produção de concreto é também uma fonte significativa de impactos ambientais (SNIC e ABCP, 2019).

4.4.2 Dosagem de concreto

A definição do traço do concreto – ou dosagem – consiste na determinação das proporções ideais entre os materiais constituintes (cimento, água, agregados, adições, aditivos, ar incorporado, pigmentos e fibras) para que o produto final apresente as propriedades desejadas, como trabalhabilidade, resistência e durabilidade, além de assegurar a eficiência econômica e a sustentabilidade construtiva. Essas características são fundamentais para que o concreto, como o material de construção mais empregado, atenda aos requisitos de projetos e condições ambientais específicas (SNIC e ABCP, 2020).

Ao longo dos anos, diversos métodos para a dosagem do concreto foram desenvolvidos, cada um buscando otimizar a mistura com base em parâmetros como

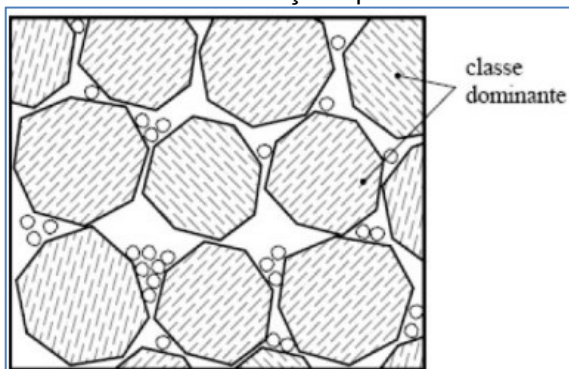
a relação água/cimento, a granulometria dos agregados, e a trabalhabilidade da mistura (LIMA et al., 2023).

Um destes métodos é o de empacotamento de partículas que se refere à escolha apropriada da proporção e do tamanho de materiais particulados, de maneira que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, e os vazios resultantes sejam preenchidos novamente num processo contínuo. Em 1892, Féret apresentou o primeiro estudo formal sobre empacotamento de partículas em concreto. Desde então, diversos modelos foram desenvolvidos para calcular a densidade de empacotamento e aprimorar a composição de misturas granulares utilizadas na produção de concreto (OLIVEIRA et al., 2018). Neste tópico será abordado sobre o Modelo de Empacotamento Compressível de De Larrard.

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por De Larrard em 1999 avalia todos os materiais para a distribuição do tamanho da partícula, assim como a interação entre elas. O modelo de empacotamento compressível é estruturado em dois módulos principais: o virtual e o real. O empacotamento virtual descreve um arranjo idealizado das partículas, organizadas individualmente para formar uma configuração geométrica perfeita. Por exemplo, partículas cúbicas idênticas estariam dispostas uma a uma, atingindo uma compactação teórica máxima de 100% de densidade. Por outro lado, no empacotamento real, não é possível atingir essa compactidade máxima idealizada devido às propriedades físicas dos materiais e ao processo aplicado. Esse método considera a relação entre o empacotamento virtual e o real por meio de um parâmetro chamado fator de compactação, que reflete as limitações práticas do procedimento. Assim, a densidade no empacotamento real é sempre inferior à do cenário virtual (SOTOMAIOR, 2017).

Um conceito essencial é a presença de uma classe dominante de grãos, que garante a estrutura sólida do corpo granular. Quando partículas maiores predominam, o volume é preenchido como se os grãos menores estivessem ausentes conforme Figura 5.

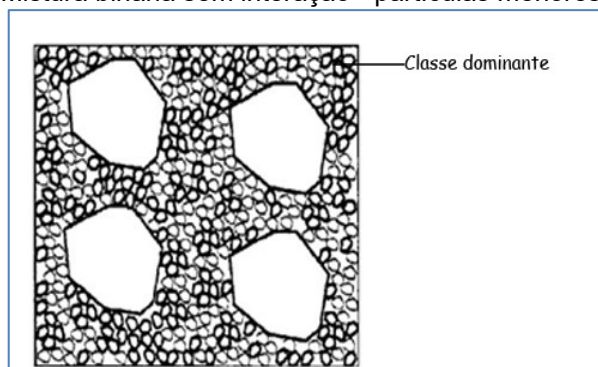
Figura 5- Mistura binária sem interação - partículas maiores dominantes



Fonte: Sotomaior (2017)

Já quando partículas menores lideram, elas ocupam os espaços entre os grãos maiores. Sem uma classe dominante, a mistura se tornaria uma suspensão, com todos os grãos dispersos em líquido, em vez de formar um empacotamento Figura 6 (SOTOMAIOR, 2017).

Figura 6 - Mistura binária sem interação - partículas menores dominantes



Fonte: Sotomaior (2017)

Evidencia-se que a combinação criteriosa das dimensões e frações dos componentes via empacotamento de partículas pelo método de De Larrard possibilita que os espaços vazios de maior porte sejam ocupados por partículas reduzidas alcançando altas resistências pelo melhoramento do arranjo geométrico dos materiais e diminuição da porosidade (SILVEIRA, 2022).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 MATERIAIS

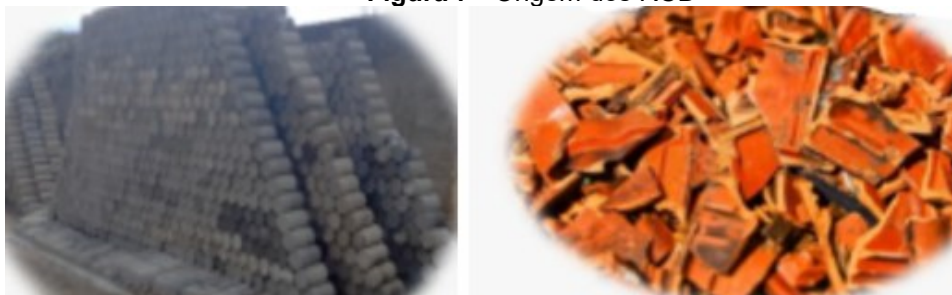
Para a produção de concreto foi necessário a utilização de agregados graúdos e miúdos, sendo estes a areia natural de rio e brita 0 e brita 1 de origem basáltica, aditivo plastificante a base de policarboxilato, também será feita a utilização de aglomerantes onde se utilizará cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) e os materiais cimentícios suplementares sendo estes o pó de concreto (PC) proveniente de concreto residual de corpos de prova, e pó de cerâmico derivado de tijolos cerâmicos de RCD, é possível verificar a origem dos resíduos a partir da Figura 7. A procedência dos materiais cimentícios suplementares (MCS) e a sua classificação conforme os preceitos da norma NBR 15116 [38] encontram-se representadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação de MCS conforme composição NBR 15116

Classificação - RCD NBR 15116	Concreto	Cerâmico vermelho
Fragmentos de pasta de cimento (%)	86,01	0
Fragmentos de rocha (%)	13,99	0
Fragmentos de cerâmica vermelha(%)	0	100
Fragmentos de gesso, metais, plástico, vidro, orgânicos (%)	0	0

Fonte: Autor, 2025

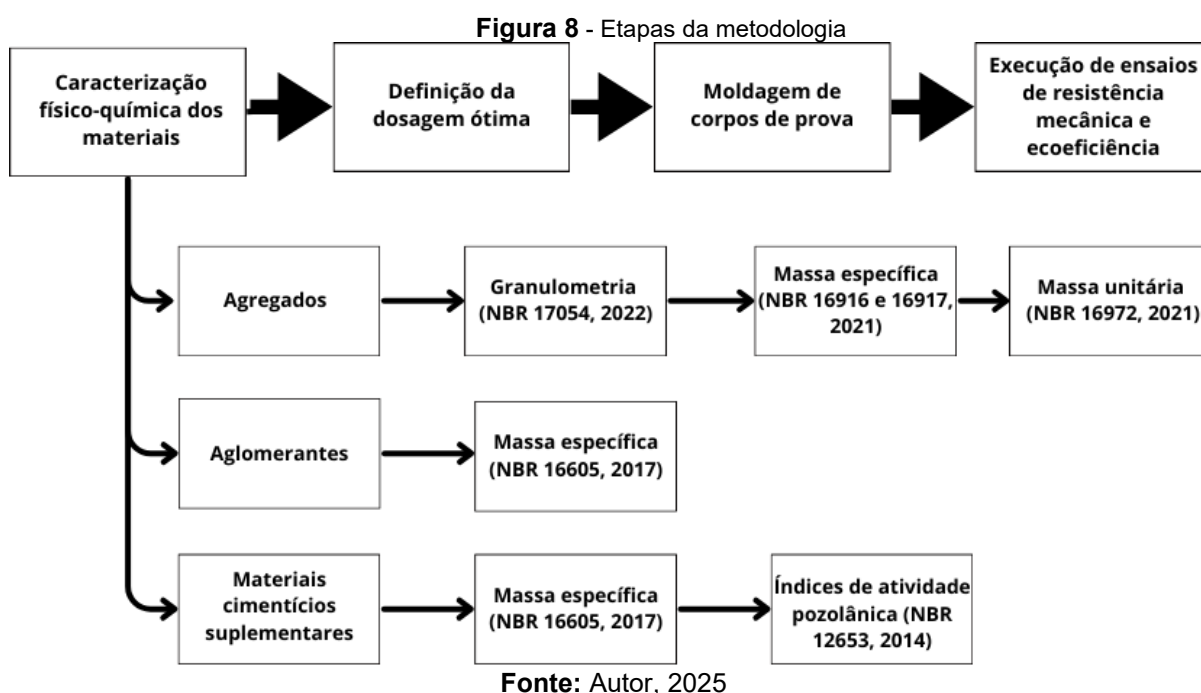
Figura 7 - Origem dos RCD



Fonte: Autor, 2025

5.2 MÉTODOS

O projeto experimental (Figura 8) dividiu-se em três etapas sequenciais: inicialmente fez-se a caracterização físico-química dos materiais constituintes além dos ensaios de reatividade dos materiais cimentícios suplementares (atividade com cal, índice de desempenho com cimento e consumo de hidróxido de cálcio), em seguida a definição da dosagem ótima do concreto considerando suas propriedades no estado fresco e endurecido, e procedendo à moldagem de corpos de prova (CP's) e execução de ensaios de resistência mecânica a compressão.



5.2.1 Caracterização de materiais

A caracterização dos materiais cimentícios, incluindo cimento convencional e dos materiais cimentícios suplementares (MCS), foram realizados a partir ensaios para massa específica baseadas na NBR 16605 (ABNT, 2017), além da definição dos índices de atividade pozolânica conforme NBR12563 (ABNT, 2014). Para os agregados, foram executados ensaios granulométricos conforme NBR 17054 (ABNT,

2022), massa unitária conforme NBR 16972 (ABNT, 2021), massa específica de acordo com NBR 16916 e 16917 (ABNT, 2021).

5.2.2 Dosagem de concreto

Foi realizada dosagem a partir do método de empacotamento de partículas seguindo modelo proposto por De Larrard. Onde inicialmente foi determinado o empacotamento experimental dos materiais cimentícios por meio do método de Wong e Kwan (2008). Este método consiste na produção de pastas com diferentes relações água/sólidos (a/s). A densidade aparente de cada pasta é determinada pela massa de um volume conhecido, medido em um recipiente padrão. A partir desse valor, calculam-se a relação de vazios e a concentração de sólidos de cada mistura, permitindo encontrar a condição de máxima densidade de empacotamento dessas classes.

Com esses dados, e o diâmetro médio, massa unitária e específica das partículas encontradas de forma experimental inseridas as equações do modelo de empacotamento de partículas de De Larrard (Compressive Packing Model - CPM) para proporcionamento da pasta. O esqueleto granular de agregados foi obtido a partir da análise de 11 combinações de proporções, conforme Quadro 2, ajustando-se progressivamente as proporções para buscar a composição com a melhor densidade de empacotamento. Após isso foi realizada a verificação experimental de massa unitária dos três materiais misturados manualmente, com isso foi possível calcular o índice de vazios da mistura para definir qual o teor mínimo de pasta +2% para envolver os agregados da mistura e formar o concreto.

Quadro 2 – Proporções volumétricas de agregados

AGREGADO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Areia	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Brita 0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Brita 1	40	39	38	37	36	35	34	33	32	31	30

Fonte: Autor, 2025

O modelo CPM se prevê que a densidade de empacotamento efetiva (Φ) de misturas polidispersas a partir de três parâmetros, sendo estes a distribuição granulométrica obtida de forma experimental, forma dos grãos também obtida e forma experimental (via densidade de empacotamento individual β_i) e o método de

compactação. O cálculo foi aplicado com a determinação do empacotamento virtual (γ_i), dado pela Equação 1, que considera interações entre partículas (efeitos de afastamento a_{ij} e parede b_{ij}), conforme Equações 2 e 3 respectivamente. Já a densidade efetiva (Φ) é obtida pela Equação 4, que incorpora o parâmetro de compactação (K), dependente do método utilizado no Quadro 3.

$$Y_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} * \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] * \gamma_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} * \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] * \gamma_j} \quad (1)$$

- Y_i = Empacotamento virtual;
- β_i e β_j = densidade de empacotamento para cada classe;
- γ_j = volume de material de cada classe;
- a_{ij} = efeito de afastamento;
- b_{ij} = efeito de parede;

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad (2)$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,50} \quad (3)$$

- a_{ij} = efeito de afastamento;
- b_{ij} = efeito de parede;
- d = abertura da peneira
- d_i = menor dimensão;
- d_j = dimensão seguinte de d_i .

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\gamma_j}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} + \frac{1}{Y_i}} \quad (4)$$

- K = valor referente ao processo de compactação;
- γ_j = volume de material de cada classe;

- β_i = densidade de empacotamento para cada classe;
- Y_i = Empacotamento virtual;
- Φ = Densidade de empacotamento real.

Quadro 3 - Valor de K para diferentes métodos de compactação

COMPACTAÇÃO SECA				COMPACTAÇÃO MOLHADA	
Sem vibração	Vibração com haste	Vibração	Vibração + compressão de 10 kPa	Demanda de água	Proctor teste
4,1	4,5	4,75	9	6,7	12

Fonte: Adaptado de Campos, 2019

5.2.4 Ensaio de atividade pozolânica

A qualificação de um material como pozolânico, conforme a ABNT NBR 12653 (2014), baseia-se no atendimento a requisitos químicos, físicos e de atividade pozolânica, avaliados por meio de ensaios complementares padronizados. Dois métodos principais são utilizados para comprovar a atividade pozolânica sendo estes o índice de atividade pozolânica com cal, prescrito pela NBR 5751 (ABNT, 2015), e o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, estabelecido pela NBR 5752 (ABNT 2014). Estes ensaios avaliam a capacidade do material de reagir com hidróxido de cálcio ou de contribuir para o desenvolvimento de resistência mecânica em composições com cimento Portland.

Para os ensaios de índice de atividade pozolânica com cal NBR 5751 (ABNT, 2015) são moldados corpos de prova cilíndricos (50 mm x 100 mm) a partir de uma argamassa composta por uma parte de cal hidratada, nove partes de areia normal e uma quantidade de material pozolânico equivalente ao dobro do volume de cal, calculado com base nas massas específicas de ambos. A cura é realizada em duas etapas: 24 h a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e mais 144 h a $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$, em moldes vedados para preservar a umidade. Após sete dias, os corpos de prova são rompidos à compressão, e a resistência média obtida indica a atividade pozolânica do material, que deve atender aos critérios mínimos estabelecidos pela norma devendo atender uma resistência mínima de 6 MPa.

Para os ensaios de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias NBR 5752 (ABNT 2014), avalia a contribuição do material pozolânico para a

resistência mecânica em substituição parcial ao cimento Portland. Preparam-se duas argamassas: a Argamassa A (de referência), composta por cimento CP II-F-32 e areia normal; e a Argamassa B, com 25% em massa do cimento substituído pelo material pozolânico. Ambas são moldadas em corpos de prova cilíndricos (50 mm x 100 mm) e curadas conforme a NBR 7215. Aos 28 dias, determina-se a resistência à compressão de cada argamassa. O Índice de Desempenho (Icimento) é calculado pela equação 5.

$$C_i = \frac{f_{cB} \cdot 100}{f_{cA}} \quad (5)$$

- f_{cB} = resistência médias da argamassa B (Mpa);
- f_{cA} = resistência médias da argamassa A (Mpa);

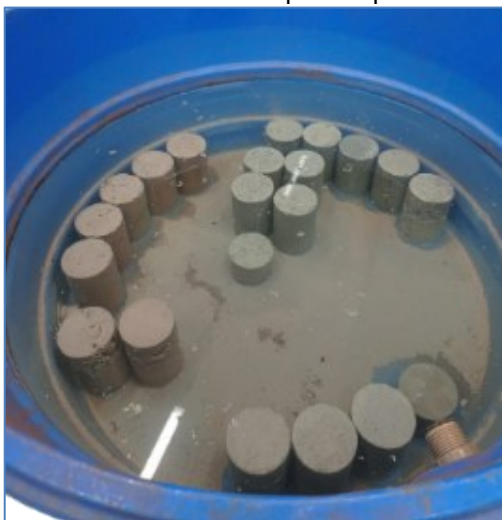
5.2.5 Moldagem de CPS e Ensaios

Após fase de dosagem, foram moldados corpos de prova conforme NBR 5738 (ABNT, 2015) para cada ensaio onde foi realizado o teste de abatimento (slump test) com o objetivo de controlar a quantidade de água na mistura. Esse procedimento permitiu classificar o concreto dentro da categoria de bombeável.

5.2.5.1 Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos

Os ensaios foram realizados a partir da NBR 5738 (2015), onde corpos de prova foram preparados e submetidos a um regime de cura úmida, conforme Figura 9. Este processo consistiu na manutenção constante dos corpos de prova em um ambiente saturado, com umidade relativa superior a 95%, por um período total de 14 dias. Etapa é crucial para garantir a hidratação completa do cimento, o desenvolvimento das propriedades mecânicas e a minimização de fissuras por retração plástica, assegurando que as amostras atingissem suas características ótimas no estado endurecido antes da realização dos ensaios de resistência.

Figura 9 - Cura úmida dos corpos de prova de concreto



Fonte: Autor, 2025

A preparação para o ensaio de compressão inicia-se com o acabamento e o nivelamento rigoroso das faces de aplicação de carga dos corpos de prova. Este procedimento é fundamental para assegurar um contato uniforme e paralelismo perfeito entre as superfícies do corpo de prova e os pratos da máquina de ensaio, garantindo assim uma distribuição homogênea das tensões durante o carregamento.

Posteriormente, o corpo de prova é cuidadosamente posicionado no equipamento de compressão, sendo centralizado no prato inferior com o auxílio de círculos concêntricos de referência gravados no próprio prato. Este alinhamento visa garantir a coincidência entre o eixo geométrico do corpo de prova e o eixo de aplicação de carga da máquina. Conforme ilustrado na Figura 10, o desalinhamento máximo permitido entre estes eixos não deve exceder 1% do diâmetro nominal do corpo de prova, uma tolerância essencial para prevenir a introdução de esforços excêntricos indesejados que poderiam comprometer a integridade do resultado do ensaio.

Figura 10 - Prensa hidráulica com corpo de prova



Fonte: Autor, 2025

Após isso aplica-se carga de forma contínua e sem choques, com velocidade constante entre 0,3 MPa/s e 0,8 MPa/s, utilizando-se uma escala de força compatível para que a ruptura ocorra entre 10% e 90% da capacidade da máquina. A carga é mantida até que se observe o recuo do ponteiro (em máquinas analógicas) de aproximadamente 10% da carga máxima, registrada como carga de ruptura, a partir da qual se calcula a resistência à compressão dividindo-se esta carga pela área da seção transversal do corpo de prova, expressando o resultado com aproximação de 0,1 Mpa (NBR 5739,2007).

5.2.5.2 Índice de carbono

O índice de carbono (c_i) quantifica as emissões de CO_2 por unidade de resistência, calculado pela razão entre as emissões totais ($*c*$, em kg/m^3) e a resistência à compressão ($*p*$, em MPa) conforme Equação 6. As emissões serão estimadas considerando apenas a produção do clínquer (1 t CO_2 /t clínquer), desprezando contribuições de transporte e adições minerais (DAMINELI, 2010).

$$C_i = \frac{c}{p} \quad (6)$$

- C_i = corresponde ao índice de carbono (kg/m^3);
- c = Corresponde emissões de CO_2 (kg/m^3);
- p = Corresponde resistência à compressão (Mpa);

As emissões dos agregados e do cimento CP V – ARI foram obtidos através do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), para o superplastificante foi utilizado uma declaração ambiental de produto similar e as emissões do processamento por moagem dos pós de RCD foram calculadas com base no indicador de moagem do clínquer (processo industrial), multiplicado pelos períodos de moagem dos materiais (OLIVEIRA, 2022) podem ser observados no Quadro 4.

Quadro 4 - Dados das emissões de CO_2

Materiais	Kg de CO_2 /Kg	FONTE
CP V-ARI	0,7764	SIDAC (2025)
Agregado miúdo	0,01251	

Agregados graúdos	0,004669	
Superplastificante	1,53	EFCA (2021)
Pó de concreto	0,049	OLIVEIRA (2022)
Pó cerâmico vermelho	0,025	

5.2.5.3 Índice de ligante

O índice de ligante (b_i) quantifica a eficiência do uso de materiais aglomerantes (como cimento e adições minerais) em relação ao desempenho mecânico do concreto. Ele é calculado pela razão entre o consumo total de ligante (b , em kg/m^3) e a resistência à compressão (p , em MPa) do concreto aos 28 dias conforme equação de índice de ligante observado pela Equação 7 (DAMINELI, 2010).

$$b_i = \frac{b}{p} \quad (7)$$

- b_i = Corresponde ao índice de ligante (kg/m^3);
- b = Corresponde ao consumo de ligante (kg/m^3);
- p = Corresponde resistência à compressão (Mpa);

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

6.2.1 Propriedades físicas dos agregados e materiais cimentícios

A seleção dos agregados foi orientada pelo princípio de combinar materiais com distribuições granulométricas complementares, assim a composição do conjunto incorporou o agregado miúdo representado pela areia, complementado por dois agregados graúdos: a brita 0 e a brita 1. Esta escolha também levou em consideração a representatividade e a ampla disponibilidade desses materiais no mercado da construção civil, assegurando a relevância prática do estudo. Os ensaios foram realizados conforme normatização e repetidos para assim obtenção de uma média entre esses resultados conforme Quadro 4.

Quadro 5 - Propriedades físico-químicas dos materiais

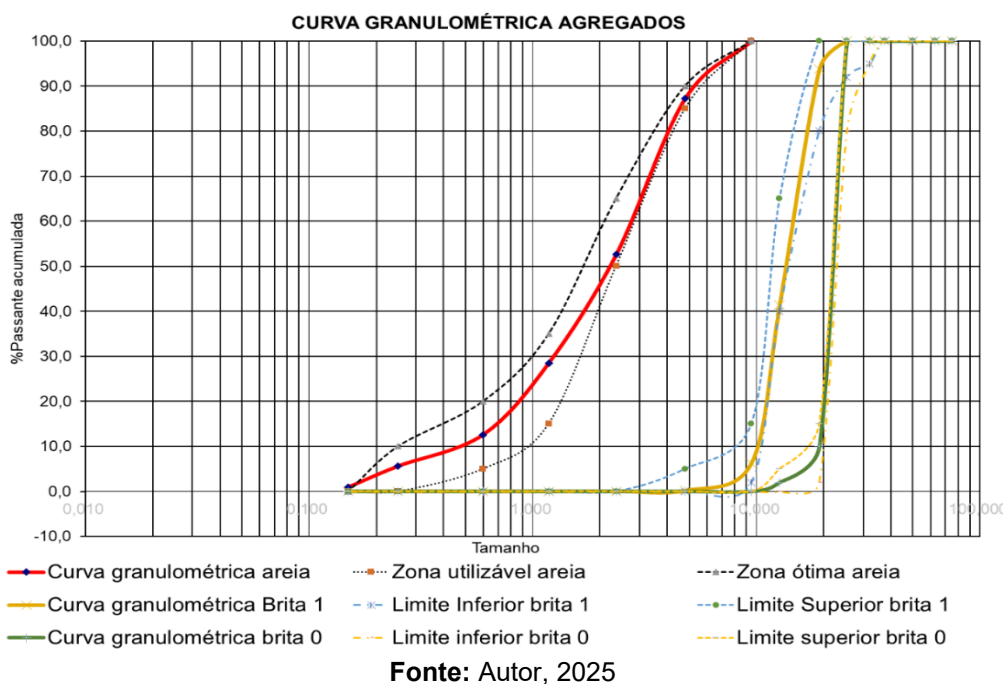
PROPRIEDADE	AREIA	BRITA 0	BRITA 1	CP V ARI	PT	PC
ME (g/cm ³)	2,64	2,53	2,51	3,01	2,59	2,58
MU (KG/m ³)	1,649	1,575	1,772	-	-	-
MF	2,01	5,79	7	-	-	-
DMC (mm)	4,75	9,50	19	-	-	-
D50(mm)	2,36	6,3	12,50	-	-	-

Fonte: Autor, 2025

6.2.2 Granulometria de agregados

A análise granulométrica tem como objetivo determinar a distribuição dos diferentes tamanhos de grãos que compõem uma amostra, classificando-a de acordo com as faixas de peneiramento estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A curva granulométrica apresentada na Figura 11, apresenta os resultados para os agregados

Figura 11 - Curva granulométrica dos agregados



Verifica-se que a Brita 1 encontra-se integralmente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), demonstrando conformidade total com os parâmetros normativos. A curva granulométrica da areia encontrasse integralmente dentro da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 para o módulo de finura da zona utilizável inferior que varia entre 1,55 a 2,20 (ABNT, 2009). Já para a curva granulométrica da brita 0 identifica-se que a maior parte de sua distribuição está dentro das zonas utilizáveis com apenas uma pequena parcela situando-se fora dos limites recomendados em determinada faixa de peneiras.

6.2.3 Consumos de materiais e traços

Os consumos de materiais, expressos em kg/m^3 foram obtidos com base no método de dosagem empacotamento de partículas, visando a otimização da distribuição granulométrica dos materiais constituintes combinando materiais com distribuições granulométricas complementares, para o caso foi incorporado o agregado miúdo representado pela areia, complementado por dois agregados graúdos a brita 0 e a brita 1. Foram consideradas duas formulações distintas, onde uma foi utilizando pó de concreto e outra com pó de tijolo, mantendo-se constantes os teores de areia, brita 0 e brita 1 conforme Quadro 5.

Quadro 6 - Consumos dos materiais constituintes do concreto

CONSUMOS C/ PÓ DE CONCRETO		CONSUMOS C/ PÓ DE TIJOLO	
MATERIAL	CONSUMO (KG/M ³)	MATERIAL	CONSUMO (KG/M ³)
Cimento	322,98	Cimento	106,35
Pó de Concreto	80,74	Pó de tijolo	106,35
Água	113,04	Água	76,57
Aditivo	0,046	Aditivo	0,034
a/f	0,28	a/f	0,36
Areia	576	Areia	576
Brita 0	489	Brita 0	489
Brita 1	530,4	Brita 1	530,4

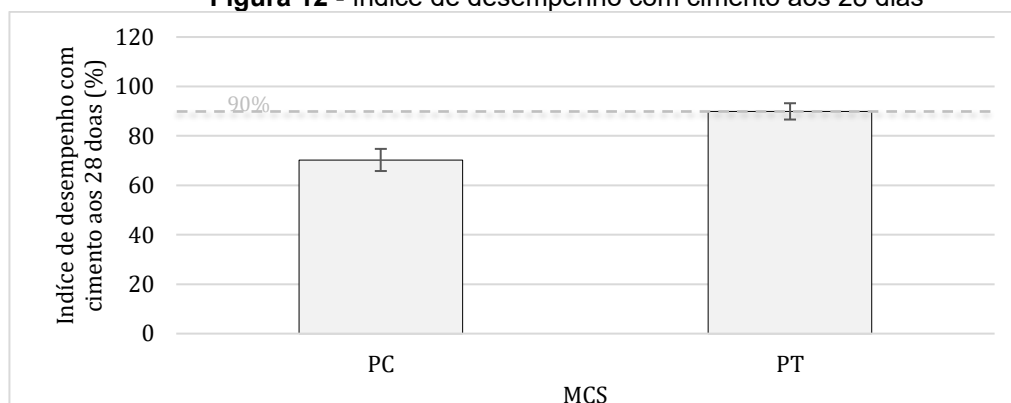
Fonte: Autor, 2025

A partir dos consumos obtidos, foi possível estabelecer os traços em massa do concreto para cada composição. Para o concreto com pó de tijolo, obteve-se o traço 1: 1: 0,72: 5,42: 4,60: 4,99, correspondente a cimento: pó de tijolo: água: areia: brita 0: brita 1. Já para o concreto com pó de concreto, determinou-se o traço 1: 0,25: 0,35: 1,78: 1,51: 1,64, seguindo a mesma ordem de componentes.

6.2.4 Reatividade dos MCS

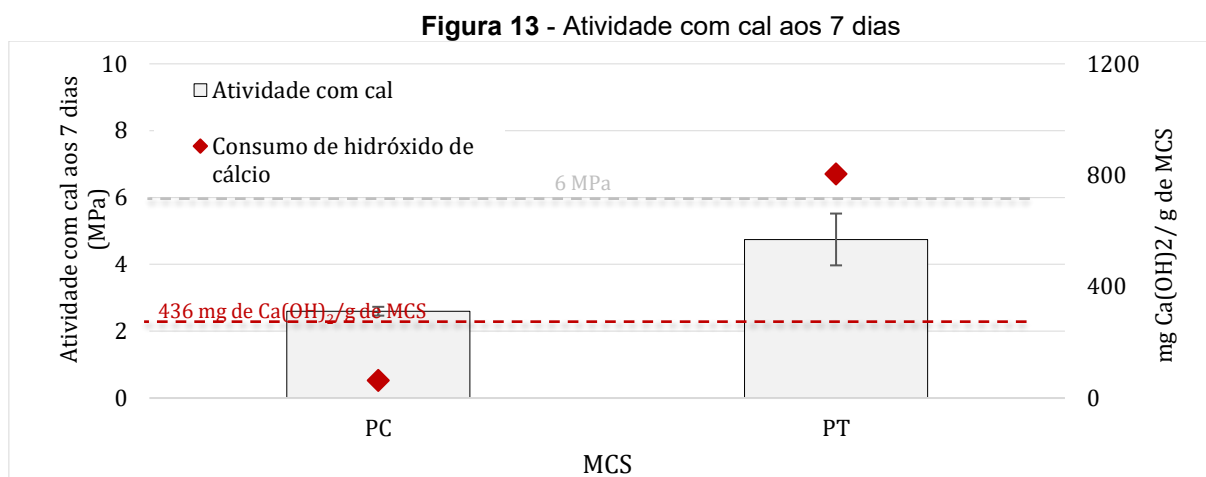
A NBR 12653 (ABNT,2014) define os requisitos para aceitação para a aceitação de materiais pozolânicos baseando-se em propriedades físicas, químicas e de desempenho, com destaque ao índice de desempenho com cimento aos 28 dias e atividade com cal aos 7 dias.

A Figura 13 indica que o MCS de pó de concreto apresentou um índice de desempenho com cimento inferior a 90% aos 28 dias, valor mínimo estipulado pela norma.

Figura 12 - índice de desempenho com cimento aos 28 dias

Fonte: Autor, 2025

A Figura 14 indica que o MCS de pó de concreto e pó de tijolo apresentaram atividade com cal inferior a 6 Mpa, valor mínimo estipulado pela norma. O resultado do ensaio do consumo de hidróxido de cálcio do pó de concreto apresenta reatividade próxima ao limite de especificação que indicam que não possui quantidade significativa de compostos silicosos ou aluminosos capazes de consumir hidróxido de cálcio, enquanto o pó de tijolo demonstra alta reatividade pozolânica.



Fonte: Autor, 2025

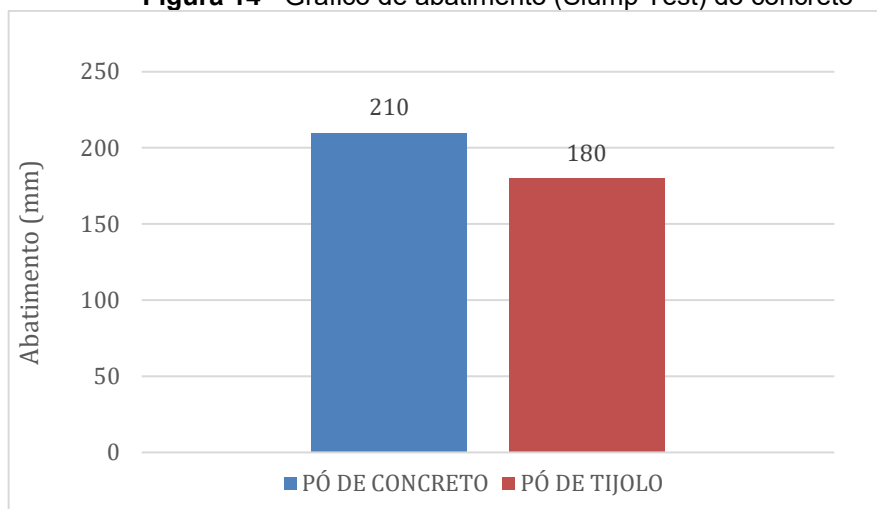
Apesar dos índices físicos observados não atenderem a norma para materiais pozolânicos a análise dos dados indica que o pó de tijolo demonstra evidências de atividade pozolânica através do consumo significativo de hidróxido de cálcio identificado nas análises na qual a sílica e a alumina presentes no pó de tijolo, em sua forma amorfa, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland, já o pó de concreto sem apresentar o mesmo consumo de hidróxido de cálcio, parece atuar predominantemente por efeito filler, atuando no preenchimento físico de vazios e da melhoria da distribuição granulométrica do sistema.

6.3 CONCRETO

6.3.1 Slump Test

Na Figura 15 é possível observar o gráfico de abatimento dos concretos, no qual os concretos se enquadram entre os abatimentos de 160 e 220 o que segundo a NBR 15823 (ABNT, 2017) a classifica como concreto bombeável

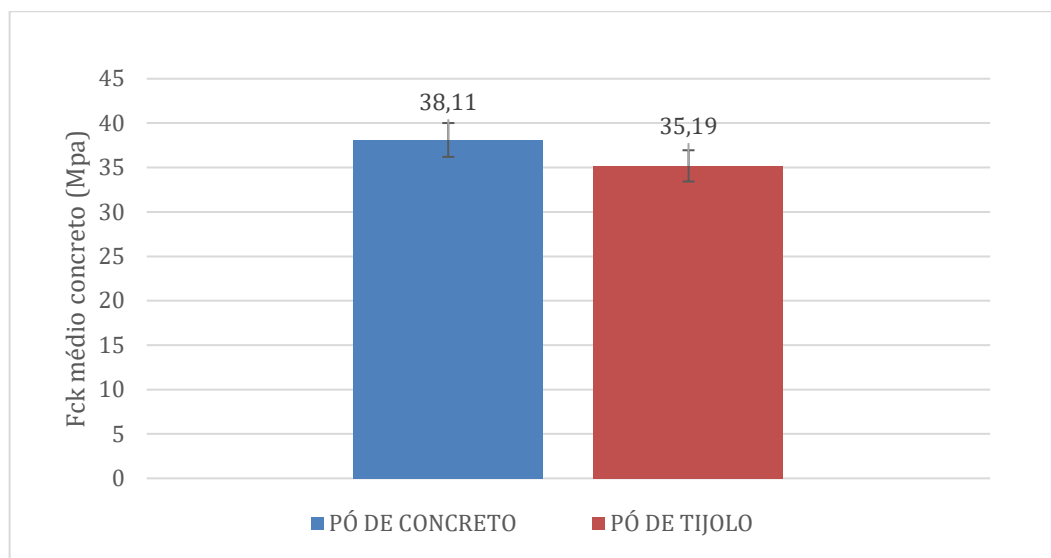
Figura 14 - Gráfico de abatimento (Slump Test) do concreto



Fonte: Autor, 2025

6.3.1 Resistência a compressão axial

Para determinar a resistência à compressão, foram moldados cinco corpos de prova para cada tipo de concreto, dos quais foi retirada a média dos valores de resistência após 14 dias em cura úmida. A figura 16 expõe os resultados para os dois tipos de concretos.

Figura 15 - Gráfico de resistência média do concreto aos 14 dias

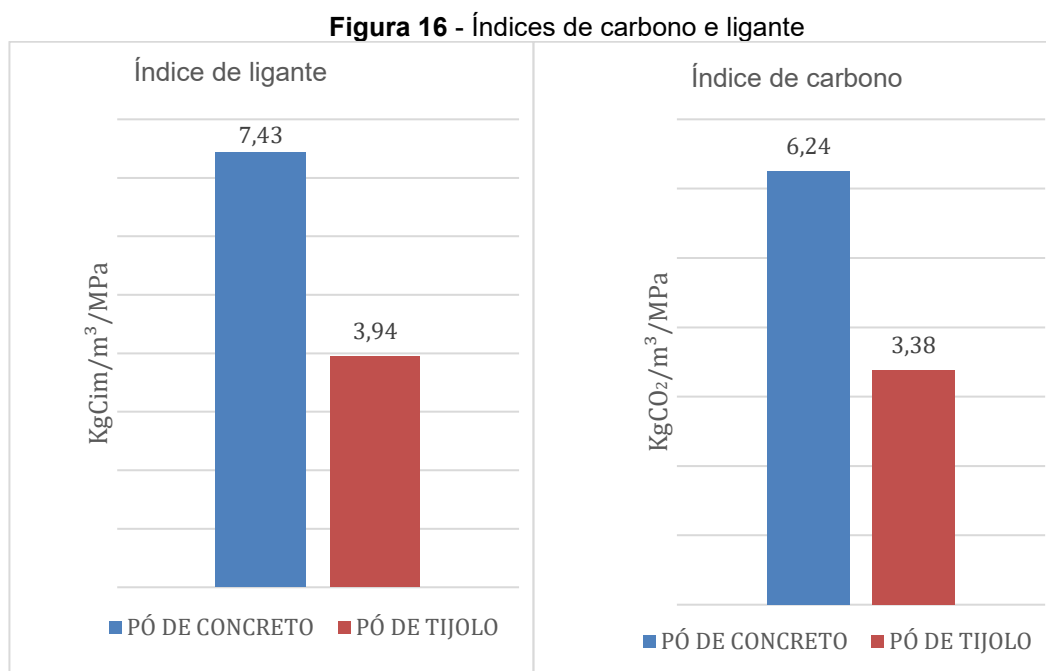
Fonte: Autor, 2025

Ambos os concretos atendem a classe C35 de resistência de compressão axial da NBR 8953 aos 14 dias (ABNT, 2015) já que possuem resistências próximas a 35 Mpa, porém com a possibilidade de ganhos de resistência em idades mais avançadas. O concreto com substituição de cimento de pó de concreto em 25% (PC) obteve um desempenho médio de cerca de 38,11 Mpa sendo 8,3% superior ao com 50% de substituição de pó de tijolo (PT). Proença et al, (2024) obteve em ensaios com substituição de 33% de cimento por pó de concreto, obteve uma média de resistência de 50 Mpa aos 28 dias, e obteve desempenho similar ao traço de referência demonstrando assim a viabilidade do emprego desse RCD para obtenção de um desempenho parecido ao concreto convencional com diminuição do clínquer.

No caso do pó de tijolo, os resultados indicam que teores de substituição mais baixos podem ser mais benéficos para o ganho inicial de resistência, porém o efeito pozolânico do pó pode fazer com que aconteçam ganhos de resistência em idades mais avançadas. Silva Jr, (2022) obteve em seus ensaios com substituição de 10% do cimento por resíduo de tijolo moído (RTM) resultou na maior resistência à compressão aos 28 dias (36,8 Mpa) por outro lado SANTOS et al., (2023) demonstrou que concretos com substituição de 40% de cimento por RTM, utilizando um resíduo de moagem mais grossa, atingiram resistências equivalentes ao concreto referencial aos 90 dias. Ambos atribuem o bom desempenho do desenvolvimento de reações pozolânicas em idades mais avançadas nesse tipo de mistura.

6.4 ÍNDICE DE CARBONO E LIGANTE

Um maior índice de ligante indica um maior índice de materiais aglomerantes ou adições minerais na mistura, podendo elevar custos e reduzir a sustentabilidade e diretamente ligado a isso, o índice de carbono mede a pegada de carbono na mistura (DAMINELI, 2010). A Figura 17 expõe os resultados para os índices de carbono e ligante dos concretos aos 14 dias onde é possível observar que o concreto com pó de tijolo obteve melhor desempenho ambiental em relação ao com pó de concreto com cerca de 47% para o índice de ligante e 45,8% para o índice de carbono.



Fonte: Autor, 2025

Os resultados são considerados com boa ecoeficiência quando apresentam índices de carbono (IC) inferiores a 5,9, conforme estabelecido por John (2011), e índices de ligante (IL) menores que 5, de acordo com parâmetros indicados por Daminieli (2010). A performance do concreto com pó de tijolo consegue atender consistentemente a esses parâmetros o que valida sua viabilidade alinhada com os princípios da sustentabilidade. Embora o concreto com pó de concreto não tenha atingido os parâmetros de ecoeficiências inferiores a 5,9 para IC e 5 para IL a incorporação deste resíduo ainda representa uma significativa redução no consumo de cimento Portland em comparação com concretos convencionais, refletindo diretamente na diminuição da pegada de carbono da mistura.

7. CONCLUSÃO

Retomando ao objetivo proposto de analisar comparativamente a resistência mecânica de concretos com materiais cimentícios suplementares (MCS) provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD), pode-se concluir:

- A otimização da dosagem por meio do modelo de empacotamento de partículas de De Larrard permitiu a incorporação de teores significativos de pó de RCD mantendo resistências que atendem à classe C35 além de manterem alta trabalhabilidade (abatimento entre 160 e 220 mm), o que reforça a eficácia do método de dosagem por empacotamento.
- Ambos os materiais não atenderam integralmente aos requisitos de atividade pozolânica normatizadas, com índice de desempenho inferior a 90% (PC) e atividade com cal abaixo de 6 MPa (PC e PT), porém com PT apresentando maior reatividade.
- O concreto com pó de concreto (PC) apresentou resistência média de 38,11 MPa aos 14 dias, cerca de 8,3% superior ao concreto com pó de tijolo (PT – 35,19 MPa), indicando maior eficiência do PC na resistência mecânica axial do concreto.
- Os concretos com MCS de RCD apresentaram desempenho ambiental satisfatório, porém com desempenho superior para o PT com eficiência maior em aproximadamente 47% no índice de ligante e 45,8% no índice de carbono em relação ao concreto com PC indicando significativa mitigação das emissões de CO₂.

Assim demonstrando a viabilidade técnica e ambiental da aplicação de resíduos de construção aplicados como materiais cimentícios suplementares em concretos, apresentando bom desempenho mecânico e bons índices de ecoeficiência já que é possível realizar a redução de cimento Portland na mistura e tem potencial de valorização de resíduos antes destinados a aterros.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais**. 2019. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

AKHTAR, Ali; SARMAH, Ajit K. **Generation of construction and demolition waste and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective**. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 6, p. 397-402, 2018.

ANDRADE, Bruno Souza Oliveira. **CONCRETO ARMADO: UM ESTUDO SOBRE O PROCESSO HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS, DURABILIDADE, PROTEÇÃO E RECUPERAÇÃO DE SUAS ESTRUTURAS**. Rio de Janeiro. 2016

ANGULO, Sérgio Cirelli; OLIVEIRA, Lidiane Santana; MACHADO, Leonardo Camara. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2022. DOI: 10.11606/9786589190103. Acesso em: 3 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Cimento Portland**. São Paulo: ABCP, 2020. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2020/07/Cimento_Portland_ABCPonLINE.pdf. Acesso em: 06 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: **Concreto autoadensável**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. 182 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BONADEU, Jefferson Rodrigo. **ANÁLISE DA PENETRAÇÃO DE CLORETOS NO CONCRETO ARMADO EXPOSTOS EM AMBIENTE NATURAL E SIMULADO**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento acadêmico de Construção Civil curso de Engenharia Civil.2016

CAMPOS, Heloisa Fuganti. **Dosagem de concreto sustentável e de alta resistência, otimizada por modelos de empacotamento de partículas, com substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra e sílica ativa**. 2019. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

CECEL, Rafael Testoni. **Influência do uso de filler calcário como material cimentício suplementar nas propriedades de fratura de pastas de cimento**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26082019-104226/>. Acesso em: 26 maio 2025.

COSTA, Josiane Moraes. **Análise da influência de diferentes teores de materiais cimentícios suplementares em concreto**. 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/>, Acesso em: 04 maio 2025.

CORDEIRO, Priscilla Coelho. **ESTUDO DO AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PRODUZIDOS COM BAIXOS TEORES DE ADITIVOS INCORPORADORES DE AR**. 2018. 163 f. Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

COUTO, José Antônio Santos; CARMINATTI, Rafael Lima; NUNES, Rogério Reginato Alves; MOURA, Ruan Carlos A. **O concreto como material de construção**. Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, out. 2013.

CURTI, R. **Dosagem do concreto pelo método ABCP**. Palestra online, 22 jul. 2020. Disponível em: <https://abcp.org.br/wp->

content/uploads/2020/07/Metodo_Dosagem_Concreto_ABCPonLINE_22.07.2020.pdf. Acesso em: 26 mar. 2025.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. **Measuring the eco-efficiency of cement use. Cement & Concrete Composites**, v. 32, n. 7, p. 555-562, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>. Acesso em: 23 mai. 2025.

DANTAS, Alessandra Raquel. **Estudo do processo produtivo de fabricação do cimento Portland**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/531a5679-3c2a-406c-8782-47baad323a79/content>. Acesso em: 08 abr. 2025.

EIBEL, Eliana; PINHEIRO, Rosa Beatriz Madruga. **Crédito de carbono**. R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 588-601, out. 2015/mar. 2016.

FIGUEIREDO, Aline; KUSTER, Luana. **Materiais cimentícios suplementares: alto desempenho tecnológico**. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2019. Disponível em: <https://reciclos.ufop.br/news/materiais-cimenticios-suplementares-alto-desempenho-tecnologico>. Acesso em: 11 maio 2025.

FRANÇA, Clério Bezerra de. **AVALIAÇÃO DE CLORETOS LIVRES EM CONCRETO PELO MÉTODO DE ASPERSÃO DE SOLUÇÃO DE NITRATO DE PRATA**. UCPE. Mestrado. Recife. 2011

GOULARTE, Bruno Silveira; ALVIM, Augusto Mussi. **A comercialização de créditos de carbono e seu impacto econômico e social**. Análise: A Revista Acadêmica da FACE, Porto Alegre, v. 22, n. 1, p. 72-88, jan./jun. 2011.

GUEDES, Igor Figueiredo et al. **Gestão sustentável de resíduos na construção civil: desafios e estratégias**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, v.06, 2024. ISSN 2178-6925.

HARRISON, Edward. **Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. Environmental Science and Ecotechnology**, v. 4, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498420300569>. Acesso em: 23 mai. 2025.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 47-61, out./dez. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/5jfS5wZGYkL4Nt7KGfQGMzh/?lang=pt>. Acesso em: 15 mai. 2025.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, Geraldo Cechelia (Editor). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. v. 02. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 1843-1869.

JOHN, V. M. (2017). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. In G. Isaia (Ed.), *Materiais de construção e o meio ambiente* (pp. 2-26). IBRACON.

SILVA Jr, Enilson Ribeiro da. **SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO ACERCA DA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS E RESÍDUO DE TIJOLO MOÍDO**. 2022. Trabalho de conclusão de curso. UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/35905/1/Sustentabilidade%20na%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil%20um%20estudo%20acerca%20da%20produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20concretos%20com%20agregados%20recicladose%20e%20res%C3%ADduo%20de%20tijolo%20mo%C3%ADdo.pdf>

KALSING, Felipe Schneider. **Causas e efeitos da carbonatação na durabilidade do concreto armado**. 2020. 46 f. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

LIMA, André Barbosa de. **Processo produtivo de cimento Portland**. Monografia (Graduação em Engenharia de Recursos Minerais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf. Acesso em: 08 abr. 2025.

LIMA, P. H. A. et al. **Análise teórica e comparativa entre diferentes métodos de dosagem do concreto: ABCP, IPT, INT e ITERS**. *Revista Vozes dos Vales, UFVJM*, 2023. Disponível em: <http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2023/05/An%C3%A1lise-te%C3%B3rica-e-comparativa-entre-diferentes-m%C3%A9todos-de-dosagem-do-concreto-ABCP-IPT-INT-e-ITERS.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

MAGRO, Isabel Cristina. **Comportamento do cimento supersulfatado (CSS) exposto à carbonatação acelerada**. 2021. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2021. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28541/1/PB_COECI_2021_1_07.pdf. Acesso em: 23/05/2025.

MATTIAS, Lucas Willian Aguiar; ARAÚJO, Leilson Joaquim; RAMOS, José Gustavo Venâncio da Silva. **Métodos de empacotamento de partículas e de dosagens de concretos especiais**: revisão. IBRACON, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/366617952_Metodos_de_empacotamentos_de_particulas_e_de_dosagens_de_concretos_especiais_-_revisao_Methods_of_particle_packing_and_special_concrete_dosages_-_review. Acesso em: 16 abr. 2025.

MAZER, W. **DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÍONS SULFATO EM**

ESTRUTURAS DE CONCRETO. COBEQ. OUT 2014. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/chemicalengineeringproceedings/cobeq2014/0733-24251-154679.pdf>. Acesso em 23 mai. 2025

NASCIMENTO, Pedro Paulo Gonçalves. **A contribuição das técnicas de aproveitamento de resíduos para a economia circular e para a sustentabilidade da indústria da construção civil.** 2022. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/c9073fc4-d04d-4938-bb89-cd1060c92520/content>. Acesso em: 13 abr. 2025.

OLIVEIRA, Caroline Oliveira e et al. **Impacto do conceito de empacotamento de partículas na dosagem de concretos de alto desempenho.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/PTrk3PVCJc6rkMWLWtB5RCL/?lang=pt>. Acesso em: 09 abr. 2025.

OLIVEIRA, Dayana Ruth Bola; PROENÇA, Melissa Pastorini. **Pó de resíduo misto de construção como material cimentício suplementar: estudo em pastas empacotadas.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENTAC), 19., 2022. Anais [...]. [S.l.]: ANTAC, 2022. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2156>. Acesso em: 15 jul. 2024.

PILLAI, R. G., GETTU, R., SANTHANAM, M. (2020), **“Uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em sistemas de concreto armado - Benefícios e limitações”**, Revista ALCONPAT, 10 (2), pp. 147 – 164, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.477>.

PROENÇA, Melissa Pastorini et al. **Concretos Ecoeficientes – Uma oportunidade de valoração do pó de RCD.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. Anais [...]. Maceió: ANTAC, 2024. p. 1-15.

REAL, L.V et al. **Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte.** Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84.2015>

RESENDE, Domingos Sávio de. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar.** 2013. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/63e2b1f2-0c8b-4d91-aab3-c659c06c6d50>. Acesso em: 23 mai. 2025.

RIGO, Eduardo. **Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação.** 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Foz do Iguaçu, 2019.

ROSA, Luis da Silva. Et al. **Materiais cimentícios suplementares: Histórico e novas tendências.** *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 05, Ed. 04, Vol. 07, pp. 121-127. Abril de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/materiais-cimenticios>.

SILVEIRA, Getúlio César et al, **Desenvolvimento de modelo matemático para a determinação do consumo de água de concretos secos.** DOI: 10.4322/1809-7197.2022.108.0003. IBRACON. 2022

SNIC e ABCP, **ROADMAP Tecnológico do cimento**, 2019, pesquisa Setorial, SNIC e ABCP, p69 . Disponível em: https://coprocessamento.org.br/wp-content/uploads/2019/11/Roadmap_Tecnologico_Cimento_Brasil_Book-1.pdf. Acesso em 16 abr. 2025

SANTOS, Robson Arruda dos. **DESEMPENHO DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO POR RESÍDUO DE TIJOLO PRODUZIDO EM DIFERENTES TEMPOS DE MOAGEM.** 2023. ENARC(Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção: Circularidade e sustentabilidade). Disponível em:<https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3071>, Acesso em: 26 out. 2025

SOTOMAIOR, Maurício Jacichen. **Estudo de modelos de empacotamento de agregados para concretos.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Construção Civil, Curitiba, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8090/1/CT_COECI_2017_1_17.pdf. Acesso em: 16 abr. 2025.

STACHERA JR., Theodozio. **Avaliação de emissões de CO2 na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná.** 2008. Trabalho apresentado no XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_tn_sto_090_554_12351.pdf. Acesso em: 3 mar. 2025.

LUZ, Thalita Mendonça et al. **ANÁLISE SOBRE ATAQUES POR SULFATOS AO CONCRETO DE FUNDAÇÕES.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*. 2022

TORRES, Allan Thierry Branco. **Viabilidade técnica e ambiental da lama do beneficiamento de rochas ornamentais como material cimentício suplementar em argamassas de cimento Portland.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2023. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/32040/1/rochasornamentaismaterialcimenticio.pdf>. Acesso em: 11 maio 2025.

TRONQUINI, S. A. **Dosagem e controle tecnológico do concreto.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade de Araraquara, Araraquara, 2020. Disponível em:

http://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/dosagem_e_controle_tecnologico_do_concreto.pdf. Acesso em: 26 mar. 2025.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo R. L. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. Florianópolis: IBRACON, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em 26 mar. 2025.

VALVERDE, S. S. **Sustentabilidade e Gestão Ambiental na Construção Civil**. Belo Horizonte: Editora Sustenta, 2001.

VIEIRA, Lucas Tito. **Planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos: análise dos processos de gerenciamento de resíduos da construção civil**. 2022.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing**. 2021. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>.