

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

FRANCISCO IGOR DE SOUSA ABREU

JEFFERSON RODRIGO DE ABREU COURA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO LIGANTE EM CONCRETOS COM DIFERENTES
ADIÇÕES MINERAIS DOSADOS COM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

Cajazeiras-PB

2023

FRANCISCO IGOR DE SOUSA ABREU

JEFFERSON RODRIGO DE ABREU COURA

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO LIGANTE EM CONCRETOS COM
DIFERENTES ADIÇÕES MINERAIS DOSADOS COM EMPACOTAMENTO DE
PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação do Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB

2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

A162a Abreu, Francisco Igor de Sousa.

Análise da eficiência do ligante em concretos com diferentes adições minerais dosados com empacotamento de partículas / Francisco Igor de Sousa Abreu, Jefferson Rodrigo de Abreu Coura. – 2023.

47f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.

Orientador(a): Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos.

1. Construção civil. 2. Cimento - Produção. 3. Preservação ambiental. 4. Concreto - Eficiência. I. Coura, Jefferson Rodrigo de Abreu. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

FRANCISCO IGOR DE SOUSA ABREU

JEFFERSON RODRIGO DE ABREU COURA

ANÁLISE DA EFICIENCIA DO LIGANTE EM CONCRETOS COM DIFERENTES
ADIÇÕES MINERAIS DOSADOS COM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 15 de Fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 15/03/2023 20:37:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Robson Arruda dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras

Orientador

Documento assinado digitalmente
 RAQUEL FERREIRA DO NASCIMENTO
Data: 15/03/2023 20:06:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raquel Ferreira do Nascimento – IFPB-*Campus* Cajazeiras

Examinador 1

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DE SOUZA DIAS
Data: 15/03/2023 20:34:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leonardo de Souza Dias – IFSERTAO-PE

Examinador 2

Dedicamos este trabalho as nossas famílias, pois sem eles nos não teríamos forças para esta longa jornada, dedicamos também aos nossos professores e aos nossos colegas que nos ajudaram na conclusão deste ciclo.

AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por sempre estar caminhando comigo e me dando força, coragem e saúde para sempre alcançar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais, Francisco Antônio de Abreu e Eirilucia Maciel de Abreu, por sempre me apoiarem nessa jornada e em todas as etapas da minha vida.

A minha irmã, Iasmin, que sempre esteve comigo, os meus avós tios, e minha madrinha Luma que em nenhum momento me deixaram desistir e me encorajando a seguir com meu sonho.

Agradeço a minha namorada Ana Stephany Pereira Sula da Silva que é a pessoa que mais amo nesse mundo, que me fortalece e me enche de amor todos os dias, é para você que dedico esse trabalho e dedicarei todos os dias da minha vida.

Ao meu companheiro de TCC e de jornada acadêmica, Jefferson Rodrigo, que sempre me ajudou e esteve comigo desde o primeiro período, explicando os conteúdos mais difíceis, entrando de cabeça no primeiro estágio juntos e projetos acadêmicos.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos., por toda a dedicação e empenho na construção deste trabalho.

Aos meus companheiros de estudos: Alyne, Igor, Yohan, Cicero, Ana, Marina, Vitória e todos os outros que não foram citados. Foi uma honra conhecer cada um, e tenho certeza de que sem vocês, teria sido mais difícil chegar até aqui, obrigado pela amizade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB Campus Cajazeiras, pela oportunidade de cursar Engenharia Civil.

Aos professores e funcionários dessa célebre Instituição, por todo apoio nesses quase cinco anos de curso.

Por Francisco Igor de Sousa Abreu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Geraldo Rodrigues Coura e Maria Tarcísia de Abreu, e minha namorada, Nuandra Ferreira Furtado, por sempre me apoiarem nessa jornada e fazerem parte da minha vida.

A minha família, que em nenhum momento me deixaram desistir e me encorajaram a seguir com meu sonho.

Ao meu companheiro de TCC e de jornada acadêmica, Francisco Igor de Sousa Abreu, que sempre me ajudou e esteve comigo desde o primeiro período, explicando os conteúdos mais difíceis e companheiro em todos os projetos acadêmico e profissionais.

Ao nosso orientador, Prof. Dr. Robson Arruda dos Santos., por toda a dedicação e empenho na construção deste trabalho.

Aos meus companheiros de estudos: Alyne, Igor, Yohan, Cicero, Ana, David, Marina, Vitória e todos os outros que não foram citados. Foi uma honra conhecer cada um, e tenho certeza de que sem vocês, teria sido mais difícil chegar até aqui, obrigado pela amizade.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB Campus Cajazeiras, pela oportunidade de cursar Engenharia Civil.

Aos professores e funcionários dessa célebre Instituição, por todo apoio nesses quase cinco anos de curso.

Por Jefferson Rodrigo de Abreu Coura.

RESUMO

Ao olhar a nossa volta é evidente a importância do concreto para construção civil, a evolução da sociedade acompanha o crescente uso deste material, surgindo cada vez mais a necessidade de concretos com alta qualidade e em grande quantidade. Deste modo, a demanda por pesquisas que estudem suas características surge acompanhada das pautas ambientais, muito por conta da indústria do cimento, que emite quantidades significantes de CO₂ na atmosfera. Dentre diversas maneiras de contornar esta questão, estão a diminuição da quantidade de ligante através de estudos da sua eficiência, utilizar de adições na substituição parcial do cimento e utilizar de técnicas como o empacotamento de partículas. Com isso, podemos comparar diversos traços produzidos por este trabalho em relação as suas emissões, eficiência do ligante e resistência a compressão. Desta forma, os traços que utilizaram menores quantidades de cimento não tiveram tanto prejuízo em sua resistência a compressão trazendo assim valores promissores de eficiência, além da diminuição na emissão de CO₂.

Palavras-chave: Empacotamento; Adições; Emissão de CO₂; Eficiência

ABSTRACT

When looking around us, the importance of concrete for civil construction is evident, the evolution of society accompanies the growing use of this material, with an increasing need for high quality concrete in large quantities. Thus, the demand for research to study its characteristics is accompanied by environmental guidelines, largely due to the cement industry, which emits significant amounts of CO₂ into the atmosphere. Among several ways to get around this issue are reducing the amount of binder through studies of its efficiency, using additions in the partial replacement of cement and using techniques such as particle packing. With this, we can compare several samples produced by this work in relation to their emissions, binder efficiency and compressive strength. In this way, the mixes that used smaller amounts of cement did not have so much loss in their compressive strength, thus bringing promising efficiency values, in addition to the decrease in CO₂ emissions.

Palavras-chave: Packing; Additions; CO₂ Emission; Efficiency

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Granulometria a laser dos finos.....	24
Figura 2 – Curvas Granulométricas dos Agregados	25
Figura 3 – Inserção dos resultados da análise granulométrica	27
Figura 4 – Parâmetros de entrada do software.....	28
Figura 5 – Média das resistências e desvio padrão	32
Figura 6 – Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos	33
Figura 7 – Índice de Ligante por Traço	36
Figura 8 – Teste de Tukey para à eficiência do ligante	38
Figura 9 – Intensidade de CO2 Emitido por Traço.....	39
Figura 10 – Porcentagem de Emissão Comparada com o Traço de Referência ..	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Mistura em Agregados	18
Tabela 2 – Características químicas	23
Tabela 3 – Massa específica dos agregados	26
Tabela 4 – Consumo dos Materiais de cada Traço	30
Tabela 5 – Dados de emissão dos agregados, cal e cimento	35
Tabela 6 – Emissão por metro cúbico de cada traço.....	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 EMISSÃO DE CO ₂	15
3.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS	16
3.3 OTIMIZAÇÃO DO EMPACOTAMENTO	18
3.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS E FÍLER	20
3.5 EFICIÊNCIA DO LIGANTE	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	24
4.1.1 Cimento e Adições	24
4.1.2 Agregados	26
4.2 DOSAGEM DO CONCRETO.....	27
4.2.1 Empacotamento de Partículas	27
4.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA.....	29
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS	30
4.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA (COMPRESSÃO AXIAL)	31
4.6 CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO ₂	31
4.7 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO LIGANTE.....	32
4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
5. RESULTADOS	33
5.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	33

5.2	EMISSÃO DE CO ₂	35
5.2.1	Dados de emissões	35
5.2.2	Emissões das adições	35
5.3	EFICIÊNCIA DO LIGANTE	37
5.3.1	Resultados após o cálculo do ci (Intensidade de CO ₂).....	38
6.	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

No futuro próximo, sem a introdução de inovações tecnológicas, as demandas cada vez maiores de materiais à base de cimento nos países em desenvolvimento irão certamente provocar um aumento significativo da porcentagem das emissões globais de CO₂ da indústria do cimento (DAMINELI, *et al.* 2010).

Neste cenário atual em que o desenvolvimento sustentável se apresenta como meta/justificativa de muitas pesquisas acadêmicas visando a minimização dos impactos ambientais, a indústria da construção precisa inserir-se nessa nova ordem. Sustentabilidade, vida útil, durabilidade, entre outros conceitos, estão sendo cada vez mais incorporados pela construção civil, visto que o material mais utilizado por esta é responsável por uma grande emissão de CO₂, proveniente principalmente na fase de produção do clínquer pela indústria do cimento (KAVITHA *et al.* 2016).

Para produção de concreto nos padrões sustentáveis apresentam-se algumas alternativas: utilização de adições minerais para reduzir o volume de clínquer; reduzir o consumo de cimento no concreto; substituir agregados naturais por reciclados (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017). Contudo, considerando manter ou melhorar o desempenho dos concretos, a substituição dos agregados naturais, se não realizada adequadamente, contribui para o aumento de teor de cimento, conseqüentemente para a emissão de CO₂ (RODRIGUES; FUCALE, 2014).

Com a finalidade de minimizar os impactos ambientais, buscam-se produzir os concretos com menor quantidade de ligantes, através de estudos que investigam o aumento das suas eficiências. O avanço destas pesquisas depende da capacidade de desenvolverem soluções relacionadas às características dos agregados (granulometria, forma, composição), métodos de dosagem, desenvolvimento de clínqueres com maior reatividade, novos ligantes e adições minerais resultantes de resíduos (DAMTOFT *et al.*, 2008).

A teoria de empacotamento de partículas discorre que o uso de frações de partículas de tamanhos diferentes, onde os espaços vazios deixados pelas partículas maiores são preenchidos pelos finos, gera uma mistura com significativa diluição de vazios, comparada a uma mistura com agregados de graduação aberta. Sendo esta mistura uma suspensão, como o concreto, em que a presença da água entre os vazios age no movimento das partículas, necessário para sua trabalhabilidade, o controle dos vazios da

mistura é importante, visto que estes refletem diretamente na quantidade de água necessária para garantir a fluidez do concreto (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

A utilização da formulação matemática do empacotamento dos materiais granulares dos concretos ainda é pouco difundida. Uma possível dificuldade de aplicação consiste na difícil otimização da mistura dos agregados, comumente realizada através de porcentagens aleatórias com posterior escolha através da maior massa unitária obtida com tal mistura. Necessita-se, portanto, de um processo com maior precisão, obtido através de um software concebido com a formulação matemática de empacotamento de partículas, resultado da tese de doutorado do coordenador deste trabalho.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho pretende concluir os seguintes objetivos:

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência do ligante em concretos com adições dosados com empacotamento de partículas e sua emissão de CO₂.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Para efetivação do objetivo geral, esta pesquisa se desmembra nos seguintes objetivos específicos:

Desenvolver a dosagem dos concretos em grupos que contemplam a utilização de resíduo cerâmico moído e fíler calcário;

Avaliar o desempenho dos concretos com relação a resistência a compressão, eficiência do ligante e emissão de CO₂;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A otimização da mistura dos agregados no concreto é uma importante ferramenta para dosagens de concretos eco eficientes, visto que o empacotamento das partículas reduz significativamente o consumo de cimento nos traços de concreto.

Esta pesquisa reforça as ações de sustentabilidade na indústria da construção, uma vez que as demandas cada vez maiores de materiais à base de cimento nos países em desenvolvimento provocam um aumento significativo da porcentagem das emissões globais de CO₂ da indústria do cimento.

3.1 EMISSÃO DE CO₂

Um dos gases mais responsáveis pelo desequilíbrio do efeito estufa é o dióxido de carbono (CO₂), que trazendo consigo a poluição do ar, chuvas ácidas e conseqüentemente a elevação das temperaturas.

Kozloski (2020) ressalta que o setor da construção civil está entre os maiores contribuintes para o aquecimento global, em decorrência das altas emissões de CO₂ por atividades humanas. A indústria do cimento é responsável por quase 7% das emissões de CO₂ lançados no globo, sendo um colaborador expressivo para o aquecimento global (GUIGNONE et al. 2019).

Damineli et al. (2010) afirma que atualmente, a indústria de cimento gera aproximadamente 5% do CO₂ antropogênico das emissões mundiais. E esse valor deverá aumentar, logo que se prevê que a procura de produtos à base de cimento se multiplique por 2,5 nos próximos 40 anos e as tradicionais estratégias de mitigação de emissões, centradas na produção de cimento, não sejam capazes de compensar tal crescimento.

Para o cálculo da emissão de CO₂ do concreto, é compreendido a emissão desde a fabricação do material, e seu transporte até o local onde será produzido o concreto. As emissões de CO₂ das matérias-primas utilizadas na produção do concreto são a soma das emissões provenientes da energia consumida na produção dos materiais, eletricidade e combustíveis, e as emissões originadas no processo devido às reações químicas. (PACHECO et al. 2022, p.4)

Os estudos de Costa (2012) a respeito da emissão de CO₂ pelos diversos materiais utilizados na construção, traz metodologias interessantes de como calculá-la para cada um deles. Dividindo-se em três níveis de precisão, o autor traz maneiras de chegar mais

próximos dos valores reais em troca de dados mais específicos do caso que está sendo estudado. Um ano depois, Sousa (2013) utiliza de tais métodos para chegar a valores de emissão relacionadas aos diferentes componentes de uma construção tipo, os quais serão utilizados neste trabalho afim de baseá-lo e trazer uma melhor comparação entre os traços elaborados.

3.2 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

De acordo com a teoria de empacotamento de partículas, o uso de frações de partículas de tamanhos diferentes, onde os espaços vazios deixados pelas partículas maiores são preenchidos pelos finos, gera uma mistura com significativa diluição de vazios, comparada a uma mistura com agregados de graduação aberta. Sendo esta mistura uma suspensão, como o concreto, em que a presença da água entre os vazios age no movimento das partículas, necessário para sua trabalhabilidade, o controle dos vazios da mistura é importante, visto que estes refletem diretamente na quantidade de água necessária para garantir a fluidez do concreto (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

De maneira mais simplificada, pode-se verificar o empacotamento das partículas através da medida de massa unitária da mistura dos agregados, por exemplo. Contudo, as teorias de empacotamento de partículas, muitas delas baseadas em cálculos matemáticos, conferem ao trabalho maior precisão e controle. Estas teorias propõem-se calcular o volume de vazios determinado para um dado conjunto de partículas com dimensões conhecidas (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017).

As abordagens teóricas relacionadas ao empacotamento de partículas sintetizam-se em duas abordagens básicas, uma discreta, que considera as partículas individualmente, representado nos modelos de Furnas (1931) e Westman e Hugill (1930), e outra contínua, que aborda as partículas como distribuições contínuas (FUNK e DINGER, 1994).

O modelo de empacotamento proposto por Furnas leva em consideração a distribuição dos grãos em três classes de tamanhos, grossos (L), médios (m) e finos (S), em que a eficiência de empacotamento máxima ($PE_{máx}$) depende das eficiências de empacotamento das partículas de cada classe, PE_L (grossa), PE_m (média), PE_s (fina). A equação 1 apresenta a formulação do empacotamento máximo de Furnas (FURNAS, 1931).

$$PE_{máx} = PE_L + (1 - PE_L) \times PE_m + (1 - PE_L) \times (1 - PE_m) \times PE_s \quad (1)$$

A extrapolação da Equação (1) para uma mistura com infinitas classes discretas de tamanhos, descreverá a eficiência de empacotamento de uma distribuição contínua, apresentada na Equação (2) (SILVA *et al*, 2004).

$$CPFT = \frac{R^{\log D} - R^{\log D_s}}{R^{\log D_L} - R^{\log D_s}} \quad (2)$$

Onde D é o tamanho da partícula; CPFT (Cumulative Percent Finer Than) é a percentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D; D_L é o tamanho da maior partícula na distribuição; D_s é o tamanho da menor partícula na distribuição; e R é a razão entre os volumes de partículas em classes de tamanhos adjacentes.

Fuller e Thompson (1907) apresentam uma lei de potência para descrever o empacotamento das partículas, descrita na Equação (3).

$$CPFT = \left(\frac{D}{D_L}\right)^q \times 100 \quad (3)$$

Na Equação (3), a potência q é uma constante, módulo da distribuição granulométrica. O valor do q na equação de Fuller é igual a 0,5 (TALBOT *et al*, 1923).

Com a mesma formulação matemática da curva de Fuller, Andreasen e Andreasen (1930) propuseram o uso de um expoente q no intervalo de 0,33 a 0,50, determinado experimentalmente, com resultado dependente das características das partículas.

A equação de Andreasen não contempla um tamanho mínimo de partícula na mistura. Levando em consideração que em distribuições granulométricas reais apresentam-se um tamanho mínimo, Funk e Dinger (1994) introduziram, na equação de Fuller/Andreasen, um tamanho mínimo de partícula, que resultou no modelo conhecido como Alfred ou Andreasen Modificado, apresentado pela Equação (4).

$$CPFT = \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \times 100 \quad (4)$$

A adoção da potência q para o empacotamento máximo de partículas esféricas não é unanimidade nas pesquisas de dosagem de concreto, visto as hipóteses do modelo, que considera a distribuição de partículas esféricas. Contudo, utilizando simulação numérica, Funk e Dinger (1994) demonstraram que o expoente q=0,37 otimiza a distribuição granulométrica.

3.3 OTIMIZAÇÃO DO EMPACOTAMENTO

De acordo com Pereira & Liborio (2011) existem duas possibilidades para obtenção de uma curva granulométrica otimizada, com o objetivo de minimizar os vazios na mistura dos agregados, que resulta na porosidade do concreto:

Método das misturas sucessivas: uma determinada composição de agregados é misturada e através da massa unitária compactada da mistura e da massa específica de cada agregado calcula-se o teor de vazios, assim, escolhe-se a mistura que obtiver o menor teor de vazios. O processo consiste na mistura do agregado de maior dimensão com o agregado de diâmetro intermediário, obtendo-se a melhor mistura entre esses dois materiais, que resulta em um “novo agregado” que é combinado com o agregado imediatamente menor, onde o processo se repete até a obtenção da mistura final com o agregado de menor dimensão. Este método é indicado por diversos autores, que pesquisaram concretos convencionais e autoadensáveis (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Resolução numérica: o método dos mínimos quadrados pode ser utilizado para verificar a mistura com a menor dispersão em relação a mistura ideal (modelos como Andreasen e Fuller). Essa distância é medida pela soma dos quadrados dos desvios em cada peneira.

Na Tabela 1 apresenta-se a solução matemática para o caso de uma mistura com m agregados e n peneiras ou diâmetros.

Tabela 1 – Mistura em Agregados

Φ	pe (%)	pa_1 (%)	pa_2 (%)	..	pa_m (%)	pc (%)	Δ
Φ_1	pe_1	$pa_{1,1}$	$pa_{2,1}$	..	$pa_{m,1}$	pc_1	Δ_1 = pc_1 - pe_1
Φ_2	pe_2	$pa_{1,2}$	$pa_{2,2}$	..	$pa_{m,2}$	pc_2	Δ_2 = pc_2 - pe_2
..
Φ_n	pe_n	$pa_{1,n}$	$pa_{2,n}$	..	$pa_{m,n}$	pc_n	Δ_n = pc_n - pe_n
DM							$\sum \Delta_i^2$

Fonte: SANTOS *et al* (2021)

pe_i = porcentagem retida acumulada especificada para a peneira “i”;

$pa_{j,i}$ = porcentagem retida acumulada na peneira “i” para o agregado a_j ;

pc_i = porcentagem retida acumulada na peneira “i” para uma combinação de agregados;

Δ_i = desvio da mistura em relação à especificação na peneira “i”;

β_j = percentual do agregado a_j na combinação;

DM = desvio máximo, soma dos quadrados dos desvios individuais. Onde: i varia de 1 a n e j varia de 1 a m.

A Equação (5) complementa a Tabela 1.

$$pc_1 = \sum_j^m \beta_j pa_{j,1} \quad (5)$$

A otimização consiste em variar os coeficientes β_j até encontrar o menor valor do desvio DM. Assim, independentemente da quantidade de agregados, será obtida uma

única solução para a combinação destes que resultará no esqueleto granular do concreto a ser dosado.

3.4 ADIÇÕES POZOLÂNICAS E FÍLER

Os materiais pozolânicos são aqueles que possuem propriedades pozolânicas, ou seja, que possuem a capacidade de reagir quimicamente com os íons hidróxido (OH⁻) e formar compostos hidratados, aumentando a resistência mecânica e durabilidade do concreto. Esses materiais são frequentemente utilizados como aditivos para melhorar as propriedades do concreto.

O uso de resíduos cerâmicos na produção de concreto é uma temática cada vez mais relevante, pois permite a valorização desses materiais e contribui para a preservação do meio ambiente. A utilização de materiais como cinza volante, a cinza da casca de arroz e a escória de alto-forno são comuns e alguns deles são utilizados nos trabalhos de Kuffner *et al* (2023) e Medeiros *et al* (2022). Esses autores também destacam que esses materiais possuem alta pozolanicidade e baixo teor de cloretos, o que os torna ideais para aplicações em concretos expostos às agressões ambientais. Kuffner *et al* (2023) estudou a influência da cinza volante e da casca do arroz na resistência à tração do concreto. Ele concluiu que o uso de cinza volante como aditivo pozolânico proporciona um aumento significativo na resistência à tração.

A atenção para o uso de materiais recicláveis também é importante em um contexto de defesa de causas ambientais. Existem trabalhos que abordam a possibilidade de reciclagem de resíduos cerâmicos como agregado graúdo em concretos com elevada resistência e desempenho, como por exemplo o trabalho de Shruthi *et al* (2016), que apresenta resultados promissores para a reciclagem de resíduos cerâmicos em concretos de alta resistência mecânica, chegando a valores de 30% de substituição para as máximas resistências a compressão e cisalhamento, e o de Paixão (2011), que encontrou benefícios físicos e mecânicos na utilização desse tipo de resíduo na confecção de argamassas, atentando aos estudos de verificação dos níveis de retração por apresentar um maior índice de vazios e absorção de água.

A substituição de parte dos finos por outros materiais na composição de produtos cimentícios é o caminho da redução do consumo de cimento. Garcia *et al* (2014) demonstram as características pozolânicas do RTM, utilizando o Ensaio Chapelle, que baseia-se na fixação ou reação química do hidróxido de cálcio. Chegou-se a resultados

acordados pela NBR 15895 (ABNT, 2012), com valores de reatividade superando em 40% os mínimos recomendados pela norma. A questão que surge é até onde sua alteração pode afetar na caracterização do concreto sob sua resistência física e química. O trabalho de Sales e Filho (2014) trouxe os efeitos das diferentes adições do pó de resíduo cerâmico a concretos submetidos a ensaios físicos e mecânicos buscando encontrar o impacto do seu uso. Mostrando que quanto maior a porcentagem de resíduo na mistura, menores eram os desempenhos nos testes, chegando a um valor de 20% para o ideal de substituição, promovendo um menor prejuízo à trabalhabilidade do concreto e proporcionalmente a sua resistência a compressão. A pesquisa de Golçalves (2007) encontrou resultados similares na porcentagem ótima da utilização do resíduo cerâmico, os mesmos 20% de substituição. Os gráficos de tensão versus deformação também são diferentes comparados aos concretos de referência, houve um aumento na deformabilidade dos concretos que utilizaram o resíduo, consequentemente obteve-se uma diminuição do seu módulo de deformação, tornando-o menos rígido.

Como visto no decorrer deste trabalho, muitos esforços estão sendo tomados para frear o aumento das emissões do dióxido de carbono (CO_2) no nosso planeta. Um desses esforços é o uso de materiais alternativos ao cimento na confecção do concreto. Para Cândido *et al.* (2022) a estratégia mais comum para reduzir os impactos ambientais do cimento é substituir o clínquer por adições minerais, reativas ou não reativas, como cinzas volantes, escória de alto-forno e filer calcário. No entanto, a pouca disponibilidade de cinzas volantes e escória de alto-forno, é algo significativo a ser considerado e, portanto, devido à menor quantidade desses materiais reativos, deve haver preferência por materiais inertes como o filer calcário, com maior disponibilidade.

Feltrin, Isaia e Lübeck (2020) também destacaram em seu trabalho como a presença ativa do filer calcário no processo de hidratação leva a um aumento na resistência à compressão inicial em concretos.

Ainda, Santos *et al.* (2019) aferiu que o filer calcário calcítico pode ser utilizado para aumentar a viscosidade e conseguir argamassas autoadensáveis. As argamassas autoadensáveis apresentaram um leve aumento na resistência à tração com a adição do filer calcário calcítico. As argamassas que apresentaram maior resistência a tração tiveram esse resultado devido ao maior teor de finos em sua composição, pois os espaços antes vazios foram preenchidos pelo filer.

Em seus testes Hoppe Filho *et al.* (2015) afirma que mesmo com a redução do teor de cimento da mistura com fíler de calcário, após 42 dias apresentou uma expansão semelhante à observada na argamassa de referência, embora tenha apresentado uma taxa de crescimento diferente. O que fortalece a proposta inicial da redução do cimento sem ter uma queda das suas eficiências as resistências mecânicas.

Além disso, Cândido *et al.* (2022) apresenta em seus resultados que concretos com baixo teor de cimento, dosados para aprimorar o empacotamento das partículas e otimização do volume de pasta apresentam melhor desempenho do que o concreto dosado comumente do ponto de vista mecânico, atingindo valores próximos ao mínimo aos da literatura.

Já para Oliveira *et al.* (2014) fica evidente que o impacto ambiental de concretos e de outros produtos cimentícios depende do impacto do cimento utilizado e do teor de cimento empregado. Assim, evidencia-se a importância do estudo da eficiência dos ligantes com a finalidade de otimizar sua utilização e reduzir os impactos do produto final.

3.5 EFICIÊNCIA DO LIGANTE

A fim de contornar a problemática das excessivas emissões de CO₂ no planeta, é necessário buscar formas para subverter tal dificuldade. Para Damineli *et al.* (2010) são necessárias estratégias adicionais de mitigação, incluindo um aumento na eficiência do uso do cimento.

Em uma abordagem mais geral, é possível definir a eficiência do concreto em termos da quantidade total de ligante, do custo total de produção do concreto ou das cargas ambientais impostas para fornecer uma unidade de desempenho funcional medido por um indicador relevante, por exemplo, resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, resistência à carbonatação. (DAMINELI *et al.* 2010, p.556)

Damineli, Pileggi, John (2017, p. 1022) afirmam que mesmo com as medidas da indústria cimenteira para reduzir emissões de CO₂ na produção do concreto, o aumento de emissões totais é esperado devido ao aumento da produção. Uma estratégia que pode dar certo é aumentar a eficiência do uso de cimento e outros ligantes no concreto, o que significa dosagem de concreto com menor consumo alcançando o mesmo desempenho.

O estudo de Damineli *et al.* (2010) apresenta dois indicadores de eficiência ecológica para o uso do cimento, a intensidade do ligante ou “*binder intensity*” (*bi*) e a intensidade do CO₂ (*ci*). O índice *IL* possibilita medir a quantidade de aglomerante

necessária para fornecer uma unidade de MPa de resistência, conseqüentemente uma medida da eficiência do uso de ligantes. O indicador *ci* permite medir a quantidade de CO₂ emitido para uma unidade de MPa de resistência. Este último indicador, portanto, permite-nos concluir sobre o potencial poluidor do material analisado como explica Medeiros, Araújo, Medeiros e Peralisi (2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido nas instalações laboratoriais de Geotecnia e de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção da mistura de concreto, foram utilizados agregados de diferentes granulometrias, sendo para os agregados miúdos diferentes tipos de areias (fina, média e grossa) e para agregados graúdos o uso da brita cascalhinho (9,5 mm). O aglomerante selecionado para a mistura foi o CPV ARI, que possui poucas adições na sua composição química e apresenta índices de resistência altos com pouca idade e utilizado o aditivo superplastificante GCP ADVA 525, a base de policarboxilato. Foram estudadas duas adições minerais: Resíduo de Tijolo Moído (RTM) e Fíler Calcário. Por último, a água utilizada nos processos provém da rede de abastecimento do IFPB.

4.1.1 Cimento e Adições

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 5733 (ABNT, 1991). Este cimento constitui-se de, no mínimo, 95% de clínquer, não possuindo adições pozolânicas na sua composição. O RTM foi produzido por Santos (2022), através de trituração e moagem de resíduos de tijolos da região de João Pessoa-PB. O fíler calcário foi comprado de uma empresa que extrai minérios na região de Pocinhos-PB. A Tabela 2 apresenta a composição do Cimento CP V-ARI, do RTM e fíler.

Tabela 2: Características químicas.

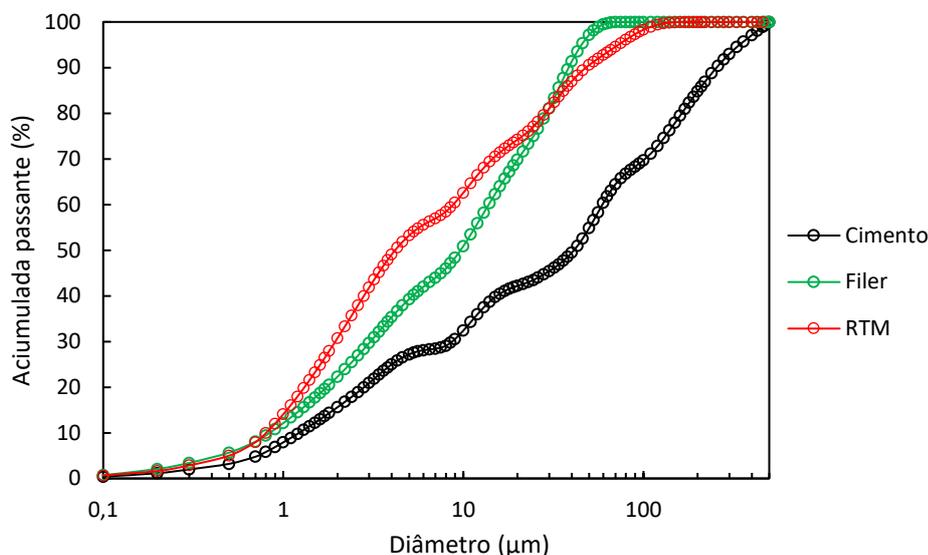
Óxidos (%)												
CPV - ARI												
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	BaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	ZrO ₂
22,11	3,99	3,41	1,97	0,96	0,43	0,37	62,25	0,09	0,64	3,51	0,03	-
RTM												
64,24	18,25	9,68	1,82	1,65	1,40	1,10	0,86	0,28	0,19	0,15	0,14	0,09
Fíler calcário												
CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	CuO	MnO						
95,743	3,455	0,46	0,101	0,1	0,09	0,05						

Fonte: Autor (2023)

O ensaio da massa específica do cimento foi executado seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017). Todo o procedimento obedeceu às condições de temperatura e período, assim como determinado pela norma, e foi realizado para três amostras distintas, com média igual a 3,04 g/cm³ para o cimento, 2,61 g/cm³ para o RTM e 2,84 g/cm³ para o fíler calcário.

Foi realizado ensaio de granulometria a laser em todos os finos, no equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: 0.10 µm - 500.00 µm / 100 Classes. A Figura 1 apresenta o resultado do ensaio.

Figura 1: Granulometria a laser dos finos.



Fonte: Autor (2023)

4.1.2 Agregados

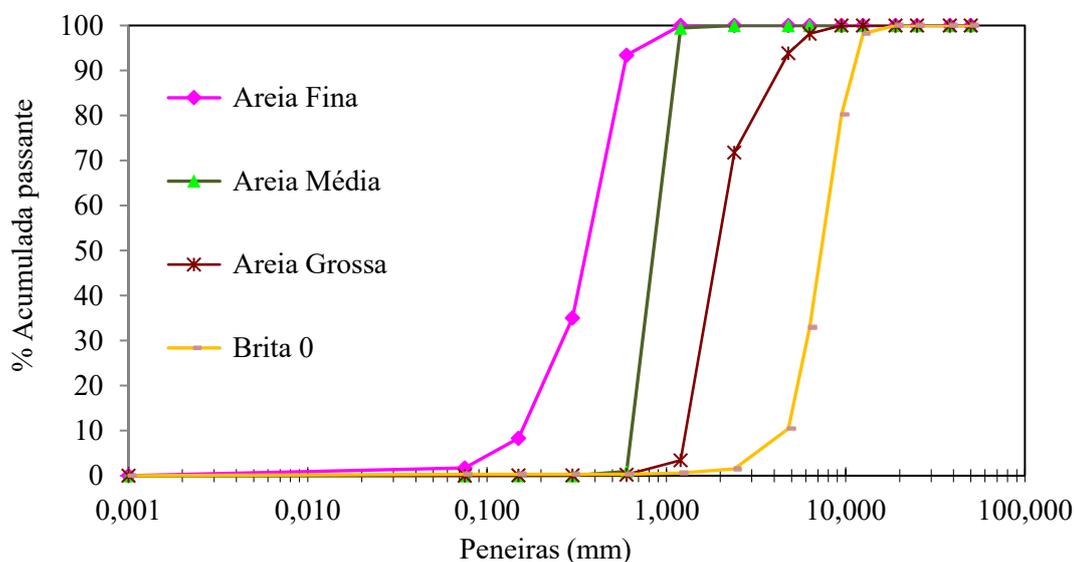
Para a composição do traço determinado pelo empacotamento das partículas, foi necessária a separação, através de peneiramento, para a obtenção adequada da granulometria de três areias, denominadas como areia fina, média e grossa. Dessa forma, para separar a areia grossa, foi utilizada uma peneira com abertura de 1,2mm, em seguida, utilizou-se a peneira com abertura de 0,6mm para separar a areia média e fina.

Sendo assim, denominou-se de areia 1 (areia grossa) a fração que ficou retida na peneira de 1,2mm, já a areia 2 (areia média) equivale à passante pela 1,2mm e retida na 0,6mm. Por último, chama-se areia 3 (areia fina) aquela que passante pela peneira de 0,6mm. A composição granulométrica das faixas de areias utilizadas seguiu a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Com o intuito de obter uma caracterização mais detalhada dos diâmetros das partículas de areia, estas foram submetidas a peneiras de série intermediária e normal.

Para determinar a massa específica das areias, conforme especifica a NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi-se utilizado um molde de tronco de cone para achar o exato momento em que o agregado iria apresentar-se saturado e seco, desmorrando-se após a retirada do molde.

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas dos agregados utilizados em todos os concretos e a Tabela 3 traz o resumo das massas específicas calculadas.

Figura 2: Curvas Granulométricas dos Agregados



Fonte: Autor (2023)

Tabela 3: Massa específica dos agregados

Massa Específica (g/m ³)			
Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	Brita 9,5
2,66	2,64	2,62	2,63

Fonte: Autor (2023)

4.2 DOSAGEM DO CONCRETO

4.2.1 Empacotamento de Partículas

Para garantir um controle na dosagem do concreto, utilizou-se o software Q-Mix, desenvolvido por Santos (2022). O software em questão auxilia nos cálculos das porcentagens ótimas, otimizando as misturas dos agregados, assim como engloba o modelo de empacotamento A&A Modificado.

A seguir, ilustra-se a sequência de utilização do Q-Mix para a otimização do empacotamento

1º passo: Inserção dos resultados obtidos no ensaio de granulometria dos agregados.

O usuário deve inserir as informações dos resultados obtidos através do ensaio de granulometria, nomeando o agregado e preenchendo os resultados da análise granulométrica, assim como mostra a Figura 3.

Figura 3: Inserção dos resultados da análise granulométrica

The screenshot shows a web application interface for 'Gerenciamento de Ensaios'. At the top, there is a navigation bar with the following items: Admin, Usuários, Cadastro de Peneiras, Cadastro de Agregados, Ensaiar Agregados, Mistura, and a user profile 'Robson'. Below the navigation bar, the main heading is 'Gerenciamento de Ensaios'. Underneath, there is a label 'Agregado:' followed by a dropdown menu with the text 'Selecione'. Below this is a table with the following structure:

ABERTURA PANEIRAS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA PASSANTE
50.000	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
38.100	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
25.000	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
19.000	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
12.500	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
9.500	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
6.300	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>
4.800	<input type="text"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>	<input type="text" value="NaN%"/>

Fonte: Autor (2023)

2º passo: Escolha dos parâmetros de entrada.

O software calcula as curvas pelo modelo de A&A Modificado. Para isso, é necessário que o usuário escolha o Diâmetro Mínimo (D_S), o Diâmetro Máximo (D_L) e o Módulo de Distribuição (q) a serem utilizados. A Figura 4 destaca os campos a serem preenchidos.

Figura 4: Parâmetros de entrada do software

The screenshot shows the 'Misturar' (Mixing) interface of a software application. The top navigation bar includes 'Admin', 'Usuários', 'Cadastro de Peneiras', 'Cadastro de Agregados', 'Ensaiair Agregados', and 'Mistura'. The user 'Robson' is logged in.

Misturar

Agregados

- Areia Fina Ensaio id. 1
- Areia Média Ensaio id. 2
- Areia Grossa Ensaio id. 3
- Brita 0 Ensaio id. 4

Segure a tecla CTRL para selecionar vários agregados

Entradas

- VALOR (mm)

q: 0.300

DL: 19.000

DS: 0.075

Areia Fina id.1
Areia Média id.2
Areia Grossa id.3

Resolver Offline Resolver Online

CPFT = $[(D^q - D_s^q)/(D_L^q - D_s^q)] \times 100$

Peneiras - Andreassen		RESULTADO FINAL MISTURA			
mm (d)	Andreassen (CPFT)	mm (d)	Mistura	Andreassen	Dispersão (RSS)
50.000	100.00%				
38.100	100.00%				
25.000	100.00%				
19.000	100.00%				

Fonte: Autor (2023)

3º passo: Executar a mistura e obter as porcentagens otimizadas.

Após escolher os parâmetros de entrada, o CPFT (modelo A&A Modificado) já estará calculado no canto esquerdo da tela (Figura 4), em seguida, o usuário deve clicar no botão “resolver”.

É válido ressaltar que é necessário selecionar bons agregados para que se obtenham bons resultados, pois, é através das condições de entrada que o software calcula e retorna o melhor cenário. A solução do problema consiste na combinação linear que o software executa as misturas dos agregados, guardando o valor dos desvios obtidos entre a curva de cada combinação e a curva do modelo de A&A Modificado (CPFT). Quando todas as combinações forem testadas, o cálculo será finalizado e determinado a melhor proporção dos agregados, pelo menor desvio (RSS).

4.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Para garantir uma melhor eficiência de mistura, utilizou-se uma sequência de inserção dos materiais na betoneira, como segue:

- 1 – 100% do cimento e 80% da água;
- 2 – 20% da água e 100% do aditivo superplastificante;
- 3 – 100% do agregado graúdo, aos poucos;
- 4 – 100% da areia grossa, aos poucos;
- 5 – 100% da areia média, aos poucos;

6 – 100% da areia fina, aos poucos.

A betoneira permaneceu ligada entre 3 e 4 minutos, até que a concreto tomasse um aspecto homogêneo e coeso. Durante o processo de mistura, para possibilitar a remoção das partículas finas que pudessem ter ficado aderidas nas paredes da betoneira, foram realizadas raspagens desses locais, momentos em que a mistura foi pausada.

Ao finalizar a mistura foram moldados, para cada traço, 12 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm. Foi realizado adensamento com vibrador mecânico.

Depois de 24 horas da moldagem, os concretos foram desmoldados, identificados e, posteriormente, levados à cura em imersão com água saturada com hidróxido de cálcio.

4.4 CARACTERÍSTICAS DOS TRAÇOS

No total, foram executados 8 traços de concretos. Dois deles são de referência, onde não foi usado nenhuma adição, com o intuito de servir de comparação para os demais traços. Eles se diferem apenas no seu fator Brita/Areia, pois, os traços com adições de RTM ao usar o fator mais eficiente de 0,6, não possuíam plasticidade suficiente devido sua alta absorção de água pelos finos, tornando o traço extremamente seco. Sendo assim, foi utilizado um fator de 1, e para sua comparação, também foi feito um traço de referência com este fator.

Os outros 6 traços se dividem em 3 com adição de resíduo cerâmico e 3 com adição de fíler calcário. Os traços de RTM não tiveram variação na porcentagem de substituição, fixada assim em 60% da quantidade de ligante em resíduo cerâmico, variando apenas a quantidade de cal, sendo adicionada 5%, 10% e outro sem adicional. Os traços com fíler tiveram uma variação na sua porcentagem de adição, com aproximadamente 15%, 35% e 60%, sendo mantido o fator mais eficiente de B/A de 0,6.

Os agregados, cimento e cal utilizados na composição de todos os traços foram os mesmos. Suas granulometrias e massa específicas foram registradas a fim de ter os valores de entrada para o software Qmix calcular as proporções.

Os traços foram executados conforme as proporções dadas pelo software. Os materiais foram pesados e misturados corretamente, sendo eles moldados em corpos de prova. A Tabela 4 mostra os valores do consumo de cada quilograma de material por metro cúbico de concreto.

Tabela 4: Consumo dos Materiais de cada Traço.

Concretos	Consumo em kg/m ³								
	Cimento	RTM	Filer	Cal hidratada	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita	Água
T150	152,58	233,71	-	-	220,18	587,17	112,02	919,38	167,84
T150 5%	151,31	231,76	-	19,15	218,35	582,28	111,09	911,72	166,44
T150 10%	150,06	229,85	-	37,99	216,55	577,47	110,17	904,19	165,07
T160	161,86	-	222,56	-	200,70	437,83	510,66	674,95	178,05
T240	253,34	-	147,78	-	209,42	456,85	532,85	704,27	144,40
T320	327,13	-	61,34	-	202,82	442,44	516,05	682,06	173,38
REF B/A 0,6	384,00	-	-	-	202,11	436,55	509,31	675,03	184,32
REF B/A 1	380,11	-	-	-	218,56	574,92	109,28	902,76	190,06

Fonte: Autor (2023)

4.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA (COMPRESSÃO AXIAL)

O ensaio de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), com o intuito de explorar as possíveis variações de resistência dos traços confeccionados. Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias.

Para este procedimento, utilizou-se a prensa hidráulica presente no laboratório de materiais de construção civil do IFPB – Campus Cajazeiras.

4.6 CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO₂

Uma das propostas do trabalho foi verificar a quantidade em toneladas de CO₂ emitidas na elaboração de cada traço de concreto realizado e calculá-lo com base no uso de diferentes materiais. Os materiais incluem agregado graúdo, miúdo, cimento, cal, resíduo cerâmico e filer calcário.

O cálculo foi realizado baseado na metodologia de Costa (2012), que ele traz em seu trabalho. O método QE-CO₂, que consiste na multiplicação da quantidade de produto utilizado pelo fator de perda e pelo somatório das emissões geradas pelo consumo de energia e pelo transporte, a equação 6 demonstra esta fórmula.

$$Emiss\tilde{o}n_{MT1,j} = QT_j \times FP_j \times (Emiss\tilde{o}es_{TR1,i} + Emiss\tilde{o}es_{EN1,i}) \quad (6)$$

QT_j = quantidade de produto j necessário, em toneladas

FP_j = fator de perda do produto j , adimensional;

$Emissões_{MT1,j}$ = emissões de CO₂ devido a utilização do projeto j , em toneladas / tonelada de produto j ;

$Emissões_{EN1,i}$ = emissões de CO₂ devido ao consumo da energia i para extração e processamento do produto j necessário na edificação, em toneladas de CO₂ / tonelada de produto j .

Utilizando os dados proposto por Sousa (2013) a respeito dos valores de emissões de CO₂ devido ao consumo de energia para extração e processamento dos materiais, pode-se calcular e comparar as emissões de cada traço executado no trabalho e entender qual o impacto as adições trouxeram ao meio ambiente.

4.7 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO LIGANTE

Como visto anteriormente, primeiramente será calculado o IL e logo após o ci . O primeiro coeficiente mede a eficiência do consumo de ligante, portanto, determina a quantidade de ligante (kg/m³ de concreto) a ser alcançada para atingir uma unidade de determinado indicador de desempenho, por exemplo, 1 MPa de resistência à compressão como trás Medeiros *et al.* (2019). Portanto:

$$IL = \frac{\text{consumo de cimento } \frac{kg}{m^3}}{\text{resistência média aos 28 dias Mpa}} \quad (7)$$

A intensidade de CO₂ (ci) se refere a quantidade de CO₂ emitido para produzir e transportar todo o concreto produzido, em relação à um indicador de desempenho, geralmente, a resistência à compressão afirma Medeiros *et al.* (2019).

$$ci = \frac{CO_2 \frac{kg}{m^3}}{\text{resistência média aos 28 dias Mpa}} \quad (8)$$

4.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados demonstrados na forma de tabelas foram analisados através da ferramenta ANOVA, que propicia a realização de comparações entre múltiplos grupos, garantindo, baseado no teste F, estabelecer a aceitação ou rejeição da hipótese nula H_0 , que é determinada através da igualdade entre as médias comparadas. Utilizou-se também o teste Tukey no processo de caracterização dos dados quanto à diferença e homogeneidade de variância, respectivamente. Para o estudo adotou-se o nível de significância p de 5%.

5. RESULTADOS

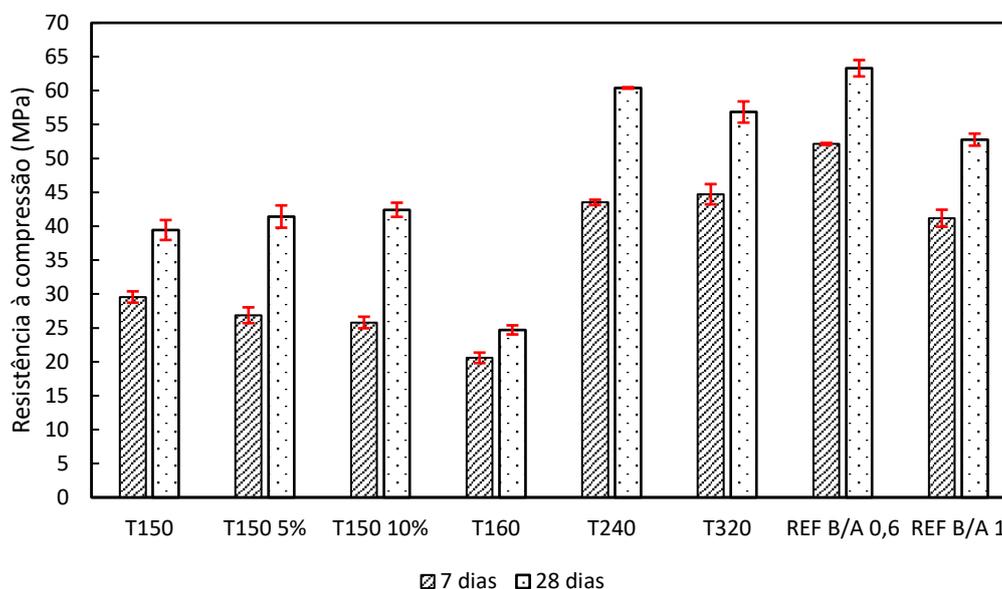
Os resultados deste trabalho se desenvolvem com base na análise das dosagens efetuadas utilizando diferentes proporções e adições no concreto e sua comparação quanto a emissão de CO₂, eficiência do ligante e resistência a compressão.

5.1 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

O ensaio foi realizado aos 7 e 28 dias de cura. Assim, pode-se comparar os valores de resistência mecânica com os outros fatores calculados (eficiência do ligante e emissão de CO₂). Nos respectivos dias marcados, foram rompidas 3 amostras de cada um dos traços para a obtenção de uma média de suas resistências e seu desvio padrão.

A Figura 5 traz os valores de resistência a compressão média dos concretos estudados.

Figura 5 – Média das resistências e desvio padrão



Fonte: Autoria Própria (2023).

Ao analisar a resistência a compressão dos traços aos 28 dias, pode-se notar que os concretos de referência, por utilizarem as quantidades padrões de cimento, alcançaram

altos valores. Eles mostram também que o fator B/A de 0,6 seria o melhor a ser adotado, pois com ele, foi alcançada uma diferença de mais de 10 Mpa.

A utilização das adições no concreto afetou diretamente sua resistência. Dentre os traços com o uso do RTM, aquele que usou 10% de cal (T150 10%), alcançou maiores valores, mostrando o RTM possui atividade pozolânica, pois a adição de cal hidratada reage com o RTM desde as primeiras idades, produzindo CSH, o que justifica a elevada resistência dos concretos. Esse mesmo comportamento de adição de cal em concretos com pozolanas foi visto também nos trabalhos de Diniz *et al.* (2022) e Fonseca *et al.* (2022).

Com relação aos traços com fíler calcário, a porcentagem ideal do uso deste material foi a de 36% (T240), cujos valores ultrapassaram os 60 Mpa, valor maior que concretos na classe de consumo de cimento e filer estudados por Cândido *et al.* (2022).

Ressalta-se que o concreto T150, mesmo sem adição de cal hidratada alcançou valores altos de resistência, em torno de 40 MPa, além da atividade pozolânica, tal resultado mostra a eficiência do refinamento dos poros da matriz cimentícia através do empacotamento dos agregados e finos, confirmado anteriormente pelo trabalho de Santos *et al.* (2021), com a utilização do mesmo RTM e parâmetros de dosagem.

Com a utilização do software Stat Plus foi realizada análise estatística através do teste de Tukey, onde comparou-se as resistências médias entre cada traço, apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos.

	T150	T150 5%	T150 10%	T160	T240	T320	REF B/A 06	REF B/A 1
T150		Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
T150 5%			Red	Green	Green	Green	Green	Green
T150 10%				Green	Green	Green	Green	Green
T160					Green	Green	Green	Green
T240						Green	Green	Green
T320							Red	Green
REF B/A 06								Green
REF B/A 1								
	Possui diferença significativa			Green	Não possui diferença significativa			Red

Fonte: Autor (2023)

O teste de Tukey (Figura 6) mostra que não diferença significativa entre os traços com RTM, com ou sem adição de cal hidratada. A substituição do cimento por fíler mostrou-se eficiente em todos os concretos, com destaque ao T320 sem diferença

estatística com o traço de referência com empacotamento e o T240, com resistências superiores ao concreto de referência REF B/A 1.

5.2 EMISSÃO DE CO₂

O consumo de material demonstrado anteriormente (Tabela 4) servirá de base para entender a emissão de CO₂ de cada concreto elaborado; através deste consumo foi determinada a quantidade de toneladas de CO₂ emitidos por metro cúbico de concreto produzido.

5.2.1 *Dados de emissões*

Tendo isto em mente, foi necessário buscar a emissão de cada material que fará parte das composições, assim, tem-se um valor total de emissão. Para os agregados graúdo, miúdo e o cimento, utilizou-se os dados propostos por Sousa (2013), que faz uso da metodologia QE-CO₂ no cálculo. Salienta-se que na equação proposta por esta metodologia é considerado o transporte do material e as perdas na obra, porém, para o caso estudado, como a emissão de CO₂ é um fator comparativo entre os concretos, além de usar os mesmos materiais base, foram desconsideradas estas duas parcelas, a emissão pelo transporte vai variar de acordo com a região, e não existe perdas, considerando o ambiente controlado em que foram moldados os corpos de prova.

Já para os valores da cal, foram utilizados os dados dos valores máximos de emissão propostos por John *et al* (2014).

5.2.2 *Emissões das adições*

As adições usadas na substituição do cimento a princípio não têm grandes impactos na emissão de CO₂, pois, mesmo a produção de cerâmica tendo graus significantes de emissão, foram utilizados apenas o seu resíduo, material esse que seria descartado. As únicas ações que geram emissão em relação a esse material é seu transporte até o local, que como dito antes, foi desconsiderado, e sua moagem, pois foi transformado em um pó, com menor diâmetro de grãos para a substituição do cimento. O mesmo vale para o fíler calcário.

Utilizando dos dados propostos por Costa (2012) sobre a emissão de CO₂ por consumo de energia elétrica e afirmado por ele que 84% da energia brasileira provém de

hidrelétricas, juntamente dos modelos dos maquinários usados no processo de moagem do material, foi necessário calcular a emissão de cada um deles.

O RTM foi fabricado passando por um moinho de bolas da Contenco. Ele que tem uma potência de 1125 Watts e um fluxo de 3,6 kg/h. Já o fíler calcário foi adquirido, assim, uma das máquinas mais comuns na moagem deste material são os moinhos Raymond. Analisou-se, assim, as características de um moinho da Liming com 37 kW de potência e um fluxo 3 t/h.

Para o cálculo, foi considerado que apenas 16% na energia utilizada pelos maquinários veio de fontes não renováveis com valores de emissão de aproximadamente 0,5 tCO₂/GWh.

$$E = \left(\frac{P}{f} \times 16\% \right) \times \frac{0,5}{10^9} \quad (6)$$

$$E_{RTM} = \left(\frac{1125}{3,6} \times 16\% \right) \times \frac{0,5}{10^9} = 2,5 \times 10^{-8} \text{ tCO}_2/\text{kg}$$

$$E_{FC} = \left(\frac{37 \times 10^3}{3000} \times 16\% \right) \times \frac{0,5}{10^9} = 9,86 \times 10^{-10} \text{ tCO}_2/\text{kg}$$

A Tabela 5 traz os valores de emissões de cada material, já a Tabela 6 mostra a quantidade de CO₂ emitida por metro cúbico de cada concreto.

Tabela 5 – Dados de emissão dos agregados, cal e cimento

Material	Emissão (tCO₂/kg)
Brita (Sousa, 2013)	$7,19 \times 10^{-5}$
Areia (Sousa, 2013)	$7,22 \times 10^{-5}$
Cimento (Sousa, 2013)	$6,29 \times 10^{-4}$
Cal (John <i>et al</i> , 2014)	$4,19 \times 10^{-4}$
RTM	$2,5 \times 10^{-8}$
Fíler Calcário	$9,86 \times 10^{-10}$

Fonte: Autor (2023)

Tabela 6 – Emissão por metro cúbico de cada traço

Traços	Emissão (tCO₂/m³)
T150	0,228
T150 5%	0,235
T150 10%	0,241
T160	0,233

T240	0,297
T320	0,339
REF B/A 0,6	0,373
REF B/A 1	0,369

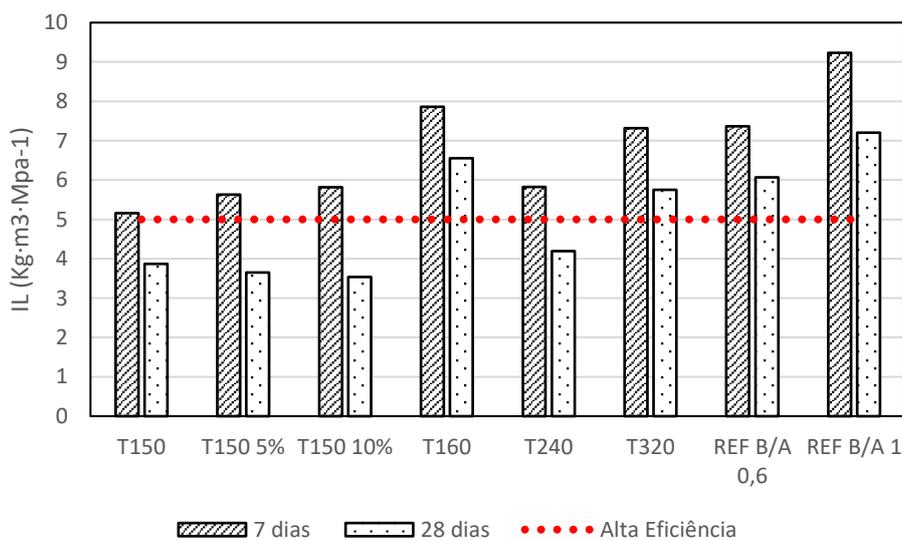
Fonte: Autor (2023)

5.3 EFICIÊNCIA DO LIGANTE

A partir dos dados obtidos nos ensaios de compressão foi possível calcular o índice de ligante de cada traço nos períodos de 7 e 28 dias, como mostra a Figura 7.

Como visto na Figura 7, para cada traço, o índice de ligante expressa a quantidade de cimento em kg/m^3 para se atingir 1 MPa. Logo, quanto menor é o índice de ligante, mais eficiente é a mistura do concreto. Como forma de comparação, Daminelli (2013) relata que concretos com IL até $5 kg/m^3$ MPa são considerados de alta eficiência.

Figura 7 – Índice de Ligante por Traço



Fonte: Autor (2023)

Portanto, observa-se que nenhum traço chegou a ser de alta eficiência nos primeiros 7 dias, sendo o mais eficiente o T150 com um IL aproximado de 5,16. Já com relação às eficiências de 28 dias, observa-se que o T150, T150 5%, T150 10% e o T240 alcançaram a marca da alta eficiência nos parâmetros de Daminelli (2013), se destacando o T150 10% com IL de aproximadamente 3,54. Comparando com os concretos com dosagem por empacotamento de partículas e substituição do cimento filer calcário,

desenvolvido por Cândido *et al.* (2022), nota-se todos ficaram com IL acima de 5 $\text{kg/m}^3 \cdot \text{Mpa}^{-1}$.

Assim, a eficiência dos índices de ligantes se deu de forma positiva para quase todas as substituições, exceto para os traços T320, que não se qualificou para a faixa de alta eficiência e T160, pois para atingir 1 MPa de resistência aos 28 dias, foi necessário cerca de $6,55 \text{ kg/m}^3$ de ligante, um resultado inferior qualitativamente se comparado ao traço de referência REF B/A 0,6, porém ainda satisfatório, visto a quantidade de cimento.

A figura 8 apresenta a análise estatística da eficiência de ligantes.

Figura 8 - Teste de Tukey para à eficiência do ligante

	T150	T150 5%	T150 10%	T160	T240	T320	REF B/A 06	REF B/A 1
T150		Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green
T150 5%			Red	Green	Green	Green	Green	Green
T150 10%				Green	Red	Green	Green	Green
T160					Green	Green	Green	Green
T240						Green	Green	Green
T320							Red	Green
REF B/A 06								Green
REF B/A 1								
	Possui diferença significativa			Green	Não possui diferença significativa			Red

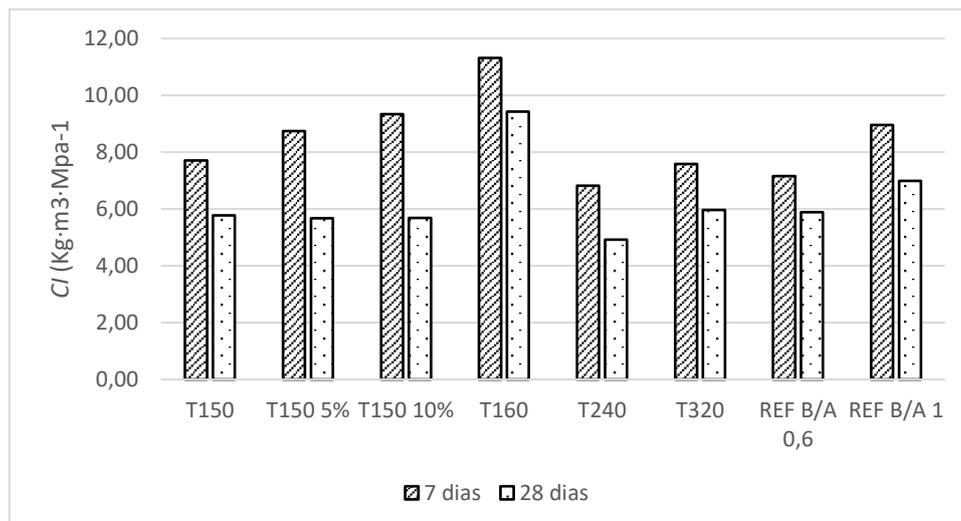
Fonte: Autor (2023)

A composição mais eficiente foram os traços com as adições de RTM, se destacando o traço T150 10%, que demonstra uma progressiva melhora com a adição de 10% da cal hidratada, chegando a ter uma melhora de 42% e 51% em sua eficiência se comparada com os traços de referência REF B/A 0,6 e REF B/A 1, respectivamente. Os resultados mostram desempenho superior aos obtido por Santos *et al.* (2021), em concretos RTM.

5.3.1 Resultados após o cálculo do c_i (Intensidade de CO_2)

O cálculo do c_i proporciona resultados acerca do grau de emissão de CO_2 . A Figura 9 a seguir, mostra a intensidade de CO_2 emitido em $(\text{kg/m}^3) / \text{MPa}$ para cada um dos traços.

Figura 9 – Intensidade de CO_2 Emitido por Traço



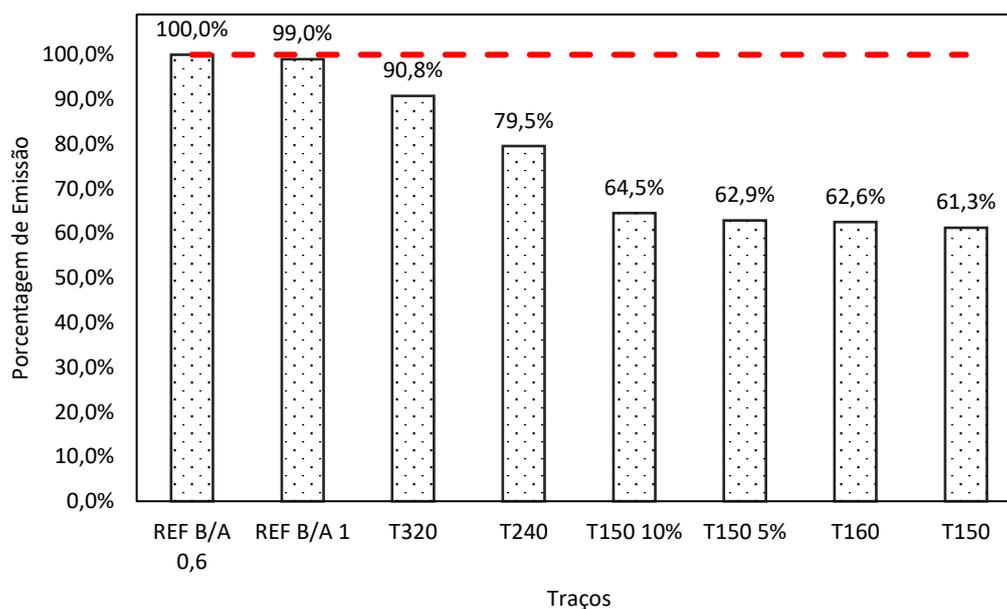
Fonte: Autor (2023)

Quando se trata da emissão de CO₂, os traços que utilizaram menores quantidades de cimento se sobressaíram, o que já era esperado pois a emissão deste material é significativamente maior que as adições. Também pode-se notar que com o acréscimo de cal, as emissões voltaram a subir comparadas com o traço de RTM sem cal, pois sua emissão é tão alta quanto a do cimento. Sendo assim, o traço que teve menor taxa de emissão foi T150, com quase 40% a menos de emissão.

De acordo com Possan *et al.* (2016) e Felix, Possan (2018), concretos produzidos com cimento CPV possuem a maior emissão de CO₂, visto o menor teor de adições na sua produção, e conseqüentemente, maior teor de clínquer. Assim, concretos produzidos por cimentos CPII e CPV, por exemplo, têm uma carga de emissão associada menor.

A Figura 10 compara o traço de maior emissão (Referência) com os demais em porcentagem, onde o traço de referência corresponde 100%.

Figura 10 – Porcentagem de Emissão Comparada com o Traço de Referência



Fonte: Autor (2023)

Tendo em vista o que foi mostrado no trabalho, pode-se inferir que as adições se mostram com grande potencial quanto a resistência à compressão, se bem dosadas. A utilização da cal nos traços de RTM ajudaram a aumentar seus valores, já para os traços de fíler, a porcentagem ideal se dá por volta dos 35%. Salienta-se a importância do cálculo das emissões associadas ao ligante e as adições, pois somente o cálculo do IL não é suficiente para fundamentar decisões acerca das emissões de CO₂ dos concretos (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

6. CONCLUSÕES

Visto os resultados apresentados no tópico anterior, pode-se destacar alguns pontos como conclusão:

- A dosagem do concreto considerando o empacotamento dos agregados é de fácil implementação e baixo custo, visto que não há aumento do custo com emprego de materiais novos, trata-se apenas da obtenção da proporção de agregados e finos que minimize o índice de vazios.

- A melhor proporção dos agregados calculada pelo modelo de A&A Modificado implica no menor índice de vazios, contudo, em termos de fluidez do concreto fresco, deve-se analisar critérios como a relação brita/areia, dentre outros parâmetros que interfiram na reologia da mistura, pois em concretos com substituição do cimento por adições minerais com maior específica, a alta absorção de água é um fator limitante no processo de mistura.

- O RTM e o filer calcário mostraram bom desempenho mecânico e bons índices de ligante e de CO₂, sendo então boas alternativas na produção de concretos ecoeficientes.

- A inserção da cal hidratada nos concretos, com o objetivo de aumentar a reserva alcalina, deve ser realizada com cautela, pois a emissão de CO₂ associada à produção da cal é alta, assim, a porcentagem de 5% já seria suficiente para melhorar o desempenho mecânico e minimizar a perda alcalina com a retirada de parte do cimento Portland.

Para trabalhos futuros sugere-se o estudo da durabilidade dos concretos com RTM e filer com foco resistência à penetração de íons cloreto e carbonatação, visto que a diminuição da reserva alcalina pode comprometer a qualidade do filme passivo do aço.

REFERÊNCIAS

ANDREASEN, A.H.M. and ANDERSEN, J. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Colloid & Polymer Science**, Vol. 50, 1930, pp. 217-228.

CÂNDIDO, T. G. et al.. Mechanical performance and chloride penetration resistance of concretes with low cement contents. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. Rev. IBRACON Estrut. Mater., 2022.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M.. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. Rev. IBRACON Estrut. Mater., set. 2017.

DAMINELI, Bruno L.; KEMEID, Fernanda M.; AGUIAR, Patricia S.; JOHN, Vanderley M.. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 555-562, set. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

DAMINELLI, B.L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013.

DAMTOFT, J. S., LUKASIK, J., HERFORT, D., SORRENTINO, D., GARTNER, E. M. Sustainable development and climate change initiatives, In **Cement and Concrete Research**, Volume 38, Issue 2, 2008, Pages 115-127.

DINIZ, Hugo A.A.; ANJOS, Marcos A.s. dos; ROCHA, Aretuza K.A.; FERREIRA, Ruan L.s.. Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 319, p. 126087, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126087>.

FELTRIN, C. S.; ISAIA, G. C.; LÜBECK, A.. Synergic effects between mineral admixtures on strength and microstructure of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. Rev. IBRACON Estrut. Mater., 2020.

FLOWER, David J. M.; SANJAYAN, Jay G.. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 282-288, 2 maio 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1065/lca2007.05.327>.

FONSECA, Thiago V. *et al.* Evaluation of self-compacting concretes produced with ternary and quaternary blends of different SCM and hydrated-lime. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 320, p. 126235, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126235>.

FULLER, William B.; THOMPSON, Sanford E.. The Laws of Proportioning Concrete. **Transactions Of The American Society Of Civil Engineers**, [S.L.], v. 59, n. 2, p. 67-143, dez. 1907. American Society of Civil Engineers (ASCE). <http://dx.doi.org/10.1061/taceat.0001979>.

FUNK, J.E. AND DINGER, D.R. Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions - **Applied to Ceramic Manufacturing**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994.

FURNAS, C.C. Grading Aggregates; Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density. **Industrial and Engineering Chemistry**. Vol. 23, 1931, pp. 1052-1058.

GARCIA, Eduardo; CABRAL, Marsis; QUARCIONI, Valdecir Ângelo; CHOTOLI, Fabiano Ferreira. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 31-38, 2014. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.083>.

GONÇALVES, J. P.. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. Rem: Rev. Esc. Minas, out. 2007.

GUIGNONE, G. C. et al.. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. Matéria (Rio J.), 2019 24(4), 2019.

HOPPE FILHO, J. et al.. Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio:adições minerais como agentes mitigadores. **Cerâmica**, v. 61, n. Cerâmica, abr. 2015.

KAVITHA, O.R.; SHANTHI, V.M.; ARULRAJ, G. Prince; SIVAKUMAR, V.R.. Microstructural studies on eco-friendly and durable Self-compacting concrete blended with metakaolin. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 124-125, p. 143-149, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.011>.

KOZLOSKI, Cássia Laire. **EMISSÃO DE CO2 DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL: ESTIMATIVAS NA ETAPA PROJETUAL DE EDIFICAÇÕES**. 2020. 272 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura, Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/22670>. Acesso em: 01 jan. 2023.

KUFFNER, B. H. B. et al.. Development of self-compacting concretes using rice husk or fly ashes and different cement types. **REM - International Engineering Journal**, v. 76, n. REM, Int. Eng. J., jan. 2023.

MEDEIROS, F. K. DE . et al.. Concretos autoadensáveis com baixo consumo de cimento e incorporação da casca do arroz e metacaulim. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, n. Matéria (Rio J.), 2022.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; ARAËJO, Emanuel Cunha; MEDEIROS, Ronaldo A.; PIERALISI, Ricardo. Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO₂, resistividade elétrica e migração de cloretos. **Simpósio Paranaense de Patologia das Construções**, [S.L.], v. 4, n. 0, p. 429-438, ago. 2019. UFPR - Grupo de Pesquisa em Patologia e Reabilitação das Construções. <http://dx.doi.org/10.4322/2526-7248.065>. Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/2526-7248.065>. Acesso em: 02 fev. 2023.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al.. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, Ambient. constr., out. 2014.

PACHECO, A. A. L. et al.. Transportation impact on CO₂ emissions of concrete: a case study in Rio Branco/Brazil. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. Rev. IBRACON Estrut. Mater., 2022.

PAIXÃO, Cesar Alexandre; CAETANO, Luciane Fonseca; COLIANTE, Johanna Gabriella Roos; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; BERGMANN, Carlos Pérez; ROSA, Maria Eduarda Souza da; SAVI, Suelen Reus; BAESSO, Vitória Spadel; BARRETO, Priscilla; BÓ, Marcelo dal. Estudo da Viabilidade de Utilização de Resíduos Cerâmicos para Confecção de Argamassas. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 33-38, jul. 2011.

PEREIRA, T. A. C.; LIBORIO, J. B. L. Concreto auto-adensável de alta resistência com baixo consumo de aglomerantes e adição de fibras de poliamida ou lã-de-rocha. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 13, n. 60, p.1-16, 2011.

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da 99 construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. DOS S.. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, v. 14, n. Ambient. constr., jan. 2014.

SANTOS, R. A. DOS . et al.. Use of numerical method for optimization of granulometric curves in eco-efficient concrete. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. Matéria (Rio J.), 2021.

SANTOS, V. C. et al.. Behavior of the self-compacting mortar with sugarcane bagasse ash in the fresh and hardened state. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. Rev. IBRACON Estrut. Mater., jan. 2019.

Shruthi, G. H. *et al.* Reuse of Ceramic Waste as Aggregate in Concrete. **International Research Journal Of Engineering And Technology (Irjet)**. [S. L.], jul. 2016. p. 115-119. Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V3/i7/IRJET-V3I720.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2023.

SILVA, A. P. *et al.* Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica** [online]. vol.50, n.316, pp.345-354, 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em: 02 fev. 2023.

TALBOT, A.N. AND RICHART, F.E. The strength of concrete in relation to the cement, aggregates and water. **University of Illinois Engineering Experiment Station**, Bulletin No. 137, 1923.

TUTIKIAN, BERNARDO FONSECA e MOLIN, DENISE CARPENA DAL. Concreto auto-adensável. São Paulo: Pini, 2008.

Westman, A.E.R; Hugill, H.R. The packing of particles. **Journal of the American Ceramic Society**, Vol. 13, pp. 767-779. 1930.



Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC CORRETO

Assunto: Entrega de TCC CORRETO
Assinado por: Jefferson Coura
Tipo do Documento: Anexo
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jefferson Rodrigo de Abreu Coura, ALUNO (201822200015) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 24/03/2023 12:21:00.

Este documento foi armazenado no SUAP em 24/03/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 789629
Código de Autenticação: 294e86bbcb

