



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE  
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



IARLY DE LIMA TAVARES  
VINICIUS FEITOSA RODRIGUES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FILER CALCÁRIO NA DURABILIDADE DE  
CONCRETOS**

CAJAZEIRAS, PB  
2023

IARLY DE LIMA TAVARES  
VINICIUS FEITOSA RODRIGUES

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FILER CALCÁRIO NA DURABILIDADE DE  
CONCRETOS**

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.

Orientador: 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

T231e Tavares, Iarly de Lima.  
Estudo da influência do filer calcário na durabilidade de concretos / Iarly de Lima Tavares, Vinicius Feitosa Rodrigues. – 2023.  
42f. : il.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação 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. Concreto - Durabilidade. 3. Filer de calcário. I. Rodrigues, Vinicius Feitosa. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III. Título.

**IARLY DE LIMA TAVARES  
VINICIUS FEITOSA RODRIGUES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO FILER CALCÁRIO NA DURABILIDADE DE  
CONCRETOS**

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,  
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 20:34:29-0300  
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 interno**

Documento assinado digitalmente  
 **KEVIN BEZERRA IBIAPINA**  
Data: 15/03/2023 18:27:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Kevin Bezerra Ibiapina**  
**Examinador externo**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a meus familiares e amigos, por suas palavras de apoio e consolo nos dias de muita luta e nos momentos de maior dificuldade que enfrentei nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS - IARLY DE LIMA TAVARES**

Quero começar agradecendo a Deus, por ter me dado forças durante essa jornada nos momentos mais difíceis, por ter sempre mostrado uma luz quando as dificuldades batiam a porta, fossem elas financeiras, emocionais ou de qualquer ordem.

Agradecer a minha mãe, Maria Celma, ao meu pai, Márcio Tavares, e toda minha família que me apoiaram em todos os momentos, desde o início da minha vida acadêmica, que serviram e servem até hoje como minha base.

Aos professores do IFPB Campus Cajazeiras, em especial ao meu orientador Robson Arruda dos Santos, por todo conhecimento compartilhado e por se colocar disponível em todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, onde pude ver toda sua dedicação e esforço para com a educação dos alunos desta instituição.

Aos colegas que contribuíram diretamente na execução deste trabalho dentro e fora do laboratório, Vinícius Feitosa, Robson Raul, Wilson Marques, Galdino Junior e Nivan Furtado.

Aos meus amigos, colegas de moradia e de estudos, pela companhia durante essa jornada e por toda forma de apoio que me deram, Maciel Alencar, Cícero da Silva, Luca Sobreira, Augusto Neto, Ryan, Ruan, Eric Graco, José Iago, Roberto Miguel, Jaine Silva e todos os que contribuíram de alguma forma para minha formação.

## **AGRADECIMENTOS - VINICIUS FEITOSA RODRIGUES**

Agradecer primeiramente a Deus pela a saúde e força para ultrapassar os obstáculos encontrados ao longo do curso.

A minha família, especialmente minha mãe Francisca Feitosa e minha tia Fátima Feitosa, que me apoiaram durante os momentos mais difíceis, me motivando a sempre seguir em frente para que eu alcançasse o meu sonho.

Aos professores que me acompanharam ao longo curso e que, com empenho, contribuíram para minha formação acadêmica e pessoal. Especialmente ao meu orientador Robson Arruda dos Santos, que apesar da intensa rotina de sua vida acadêmica aceitou me orientar nesta monografia e por não ter medido esforços para propiciar todas as condições para a realização deste trabalho. Os seus valiosos ensinamentos fizeram toda a diferença.

Aos meus colegas de curso Iarly Tavares, Robson Raul, Nivan Furtado, Galdino Júnior e Wilson Marques, que contribuíram para a realização dos ensaios laboratoriais necessários para o desenvolvimento da pesquisa e pelo companheirismo e compreensão durante este período.

Aos meus amigos Iasmim Barroso, Iane Lira, Roberto Martins, Raul Barbosa, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o curso.

À banca examinadora pelas contribuições ao trabalho apresentado.

Ao IFPB – *Campus* Cajazeiras, pelas estruturas e materiais disponibilizados para o desenvolvimento dessa pesquisa.

## RESUMO

Na construção civil, o concreto é destacado como o material de construção mais utilizado e, conseqüentemente, é responsável por consumir grandes quantidades de matérias-primas e por uma boa parte das emissões de dióxido de carbono na atmosfera, cerca de 8% do total mundial. Este trabalho tem como objetivo produzir concreto com baixo teor de ligante, parcialmente substituído por fíler calcário, e dosado com empacotamento de partículas, para análise posterior da resistência mecânica e durabilidade contra o ataque de cloretos. Para dosar o concreto com empacotamento de partículas, foi utilizado o software Q-Mix, que adota o modelo matemático de empacotamento de Alfred. Foram produzidos três traços (T160, T240 e T320) com mesmo fator de empacotamento e diferentes porcentagens de substituição de cimento por fíler calcário, além de dois traços de referência sem substituição do ligante: o T-RCE dosado com empacotamento e o T-RSE sem empacotamento. Após os ensaios de compressão axial e migração de cloretos, foram realizadas análises estatísticas utilizando a ferramenta ANOVA e o teste de Tukey para os resultados obtidos. Quanto à eficiência, avaliada pelo índice de ligantes, o melhor resultado obtido foi no traço T-240, o que demonstra ser possível produzir concretos eficientes com baixo teor de ligante. No entanto, em relação à resistência mecânica à compressão e ao ataque de cloretos, o T-RCE apresentou o melhor desempenho. Assim, os resultados mostraram ser possível produzir concretos eficientes mesmo com baixo teor de cimento Portland, bem como a necessidade de estudar alternativas futuras visando principalmente aumentar a durabilidade do concreto e sua resistência à penetração de agentes agressivos como o cloreto, ao se utilizar FC como adição mineral.

**Palavras-chave:** Concreto, fíler calcário, empacotamento de partículas, migração de cloretos, durabilidade.

## ABSTRACT

In civil construction, concrete is highlighted as the most used building material and, consequently, is responsible for consuming large amounts of raw materials and for a good part of carbon dioxide emissions into the atmosphere, about 8% of the world total, during the production of cement used in its composition. This work aims to produce concrete with low binder content, partially replaced by limestone filler, and dosed with particle packing, for later analysis of mechanical strength and durability against chloride attack. To dose the concrete with particle packing, the Q-Mix software was used, which adopts the mathematical model of Alfred packing. Three mixes (T160, T240 and T320) were produced with the same packing factor and different percentages of replacement of cement by limestone filler, in addition to two reference mixes without replacement of the binder: the T-RCE dosed with packing and the T-RSE no packaging. After the axial compression and chloride migration tests, statistical analyzes were performed using the ANOVA tool and the Tukey test for the results obtained. As for efficiency, evaluated by the binder index, the best result obtained was in the T-240 mix, which demonstrates that it is possible to produce efficient concretes with low binder content. However, regarding mechanical resistance to compression and chloride attack, T-RCE showed the best performance. Thus, the results showed that it is possible to produce efficient concrete even with a low Portland cement content, as well as the need to study future alternatives aimed mainly at increasing the durability of concrete and its resistance to the penetration of aggressive agents such as chloride, when using FC as mineral addition.

**Keywords:** Concrete, limestone filler, particle packing, chloride migration, durability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma do procedimento do programa experimental .....	17
Figura 2: Granulometria a laser do cimento.. .....	20
Figura 3: Granulometria a laser do filer calcário.....	21
Figura 4: Inserção dos resultados da análise granulométrica. ....	22
Figura 5: Inserção dos resultados da análise granulométrica. ....	23
Figura 6: Parâmetros de entrada do software. ....	23
Figura 7: Cálculo de CPFT (modelo de Alfred) .....	24
Figura 8: Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada. ....	25
Figura 9: Montagem do conjunto do ensaio de migração. ....	27
Figura 10: Curvas granulométricas dos agregados.....	30
Figura 11: Resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 e 28 dias.....	31
Figura 12: Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos.....	32
Figura 13: Migração de cloretos dos traços estudados.. .....	35
Figura 14: Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 160. ....	36
Figura 15: Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 240. ....	36
Figura 16: Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 320. ....	36
Figura 17: Teste de Tukey para migração de cloretos.....	37
Figura 18: Correlação entre migração de cloretos e resistência a compressão. ....	37
Figura 19: Correlação entre migração de cloretos e teor de cimento. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características químicas do cimento utilizado .....	19
Tabela 2: Composição química do fíler calcário. ....	20
Tabela 3: Massas específicas dos agregados. ....	30
Tabela 4: Consumos de materiais dos traços .....	31
Tabela 5: Índice de Ligantes dos concretos estudados com 7 e 28 dias. ....	33
Tabela 6: Resultados da migração de cloretos .....	34
Tabela 7: Classificação de acordo com a resistência de penetração dos cloretos .....	35

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>17</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	18
2.1.1 Cimento .....	18
2.1.2 Filer Calcário .....	20
2.1.3 Aditivo super plastificante.....	21
2.1.4 Agregados.....	21
2.2 DOSAGEM DO CONCRETO .....	22
2.2.1 Empacotamento de Partículas.....	22
2.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA .....	25
2.4 ENSAIO DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS.....	26
2.4.1 Ensaio de Resistência (Compressão Axial).....	26
2.4.2 Migração de Cloretos .....	26
2.4.3 Análise Estatística .....	29
<b>3 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	30
3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS.....	31
3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	31
3.4 ÍNDICES DE LIGANTES .....	33
3.5 MIGRAÇÃO DE CLORETOS .....	34
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>40</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das atividades econômicas que mais causam impactos ambientais, pelo fato da grande utilização de recursos naturais e consumo de energia. É necessário buscar soluções para mitigar os problemas causados pelos materiais de construção, como o caso do concreto.

O material de construção mais largamente utilizado em obras de engenharia é o concreto de cimento Portland, sendo considerado o material de construção mais consumido em escala mundial. Em relação aos materiais de consumo, é visto como o segundo mais utilizado, ficando apenas atrás da água (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Seu maior impacto ambiental vem das emissões de CO<sub>2</sub> durante a fabricação de cimento, que é responsável por cerca de 8% das emissões de CO<sub>2</sub> no mundo.

Esta percentagem deverá aumentar e as estratégias tradicionais para reduzir as emissões, com foco na produção de cimento, não serão capazes de compensar esse crescimento. Portanto, estratégias de mitigação adicionais são necessárias, incluindo um aumento na eficiência do uso de cimento (DAMINELI et al., 2010).

Existem três abordagens básicas para uma utilização sustentável do concreto: primeiro, a otimização de sua composição, tendo em conta o seu impacto ambiental, mantendo um desempenho e tempo de vida útil igual ou superior; segundo, a melhoria do seu desempenho com igualdade de impacto ambiental e de vida útil; terceiro, a otimização do tempo de vida útil do material de construção e das estruturas de construção com igual impacto e desempenho ambiental (MÜLLER et al., 2014).

A produção de concreto com baixo teor de ligante se baseia na otimização de sua composição, logo, se encontra dentro da primeira abordagem citada por Müller et al. (2014). De acordo com Rebmann (2011), a redução do consumo de cimento não visa apenas garantir maior longevidade para as jazidas de matérias primas do cimento ou redução dos impactos ambientais com a exploração destas jazidas e da emissão do CO<sub>2</sub>. Um uso reduzido do cimento é também vantajoso sob alguns pontos de vista técnicos, como a retração e fluência do concreto.

Nesse contexto, uma técnica promissora para reduzir os efeitos negativos da produção de cimento é utilizar o estudo de empacotamento de partículas. Tem havido um aumento constante no interesse, nos últimos tempos, pela teoria do empacotamento de partículas em diversas áreas da engenharia. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que vários materiais utilizados para industrialização possuem as mais variadas formas e tamanhos

(CASTRO; FERREIRA, 2016).

O empacotamento de partículas pode ser conceituado como o estudo dos tamanhos e proporções adequados de partículas, cujo o objetivo é que partículas menores venham a preencher os vazios deixados por partículas maiores, por sua vez os vazios deixados por essas partículas menores devem ser preenchidos por partículas menores ainda, e assim sucessivamente. Em 1892, Féret realizou estudos sobre empacotamento de partículas no concreto. Nestes concluiu que quanto menor o índice de vazios na mistura maior seria a resistência a compressão do concreto. Desde então, diversos modelos matemáticos de empacotamento de partículas têm sido desenvolvidos para otimizar a densidade de empacotamento no concreto (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Os estudos sobre o empacotamento de partículas possuem duas abordagens principais, uma é a discreta, onde as partículas são consideradas individualmente, e a outra é a contínua, que considera uma distribuição contínua de partículas. Existem vários modelos de empacotamento de partículas, entre estes os modelos de Furnas (abordagem discreta) e o de Andreasen (abordagem contínua), são considerados as bases da teoria; já o modelo de Alfred pode ser considerado como um aprimoramento dos dois anteriores (OLIVEIRA et al., 2000).

Após uma longa comparação e análises feitas entre os modelos de Furnas e Andreasen, considerações foram feitas, chegando-se à conclusão que matematicamente ambos os modelos eram equivalentes, pois no modelo de Furnas, partículas finas de diferentes diâmetros eram adicionadas a distribuição para formar uma progressão geométrica, já no modelo de Andreasen, a distribuição formava uma reta linear quando representada graficamente por uma função logarítmica, sendo equivalente a uma progressão geométrica. O modelo de Alfred é dado pela seguinte equação (FUNK; DINGER, 1994 *apud* LOPES, 2019):

$$CPFT = 100 \left( \frac{D_p^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right)$$

CPFT: é a porcentagem acumulada de partículas diâmetro inferior a  $D_p$ ;

$D_p$ : é o diâmetro da partícula;

DL: diâmetro da maior partícula na distribuição;

$D_s$ : diâmetro da menor partícula na distribuição;

q: coeficiente de distribuição

O empacotamento reduz o volume de pasta final na dosagem do concreto, pois há

diminuição dos vazios na mistura. Assim, conseqüentemente, o consumo final de cimento é reduzido. Com essa metodologia é possível reduzir a emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associada ao concreto.

Uma alternativa para melhorar o desempenho do concreto é a adição de minerais, entre eles pode-se destacar o filer calcário, que apesar de inicialmente ter sido considerado um material inerte, posteriormente verificou-se que o mesmo era responsável por uma série de efeitos, entre os quais os mais notados são um efeito físico, de empacotamento, e outro químico, sendo este em menor intensidade, onde há a formação de carboaluminatos e influenciando também na resistência mecânica (DAL MOLIN, 2011). Entretanto pesquisas sobre a adição desse mineral no concreto tem-se mostrado contraditórias, enquanto umas relatam que houve um ganho de resistência a compressão outros reportam uma redução.

Sabe-se então, que o uso de adições minerais em geral proporciona melhores características técnicas em materiais cimentícios, visto que modificam a estrutura interna desses materiais. Pode-se citar dos fatores positivos, o aumento da resistência do concreto no estado endurecido, como também o aumento da durabilidade, como a exemplo a redução da porosidade capilar, diminuição de fissuras de origem térmica e resistência a ataques por agentes agressivos. Além desses benefícios técnicos, também pode ser mencionados fatores ambientais, uma vez que reduz a quantidade de material cimentício, o consumo energético e as emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera (FONSECA, 2010).

De acordo com Lollini, Redaelli e Bertolini (2014), o uso do cimento Portland com 15% de calcário gerou no concreto uma redução na resistência à compressão. Já Elgalhud, Dhir e Ghataora (2016), com o teor de 15% de calcário adicionado ao cimento não prejudicou no seu desempenho mecânico. Para obter melhores propriedades do concreto, com cimentos com maior teor de calcário, é necessário reduzir o fator de água/cimento. Assim, Palm et al. (2016) relataram que concretos feitos de cimentos com 50% de calcário, e relação água/cimento de 0,35 apresentaram desempenho superior ao concreto feito com cimento sem adição, e fator água/cimento de 0,5.

Estudos realizados em que o filer calcário é substituído de forma parcial no cimento durante a produção do concreto, os resultados indicaram que as misturas apresentaram melhor trabalhabilidade e maior resistência à compressão do que os concretos de referência

(DAMINELI, 2013; HUANG et al., 2017). Para obtenção deste resultado, teve uma otimização da pasta e empacotamento dos agregados.

A contribuição do filer calcário no empacotamento da matriz cimentícia depende de sua distribuição granulométrica (PROSKE et al., 2014) e da sua área superficial específica (PALM et al., 2016). Além disso, para Daminesi (2013), o fator de forma do filer contribui para um melhor comportamento reológico da pasta, com baixa viscosidade e tensão de escoamento.

Em seu estudo, Daminesi (2013), analisou diferentes tipos de finos (calcário, granito, quartzo), e observou que a rugosidade da superfície do filer calcário era pouca e suas partículas tinham poucos vértices pontiagudos, assim, o filer apresentou um menor fator de forma. Com essas características o material proporciona melhor reologia para relação a/c, permitindo maiores reduções de água, aumentando a eficiência no uso dos ligantes.

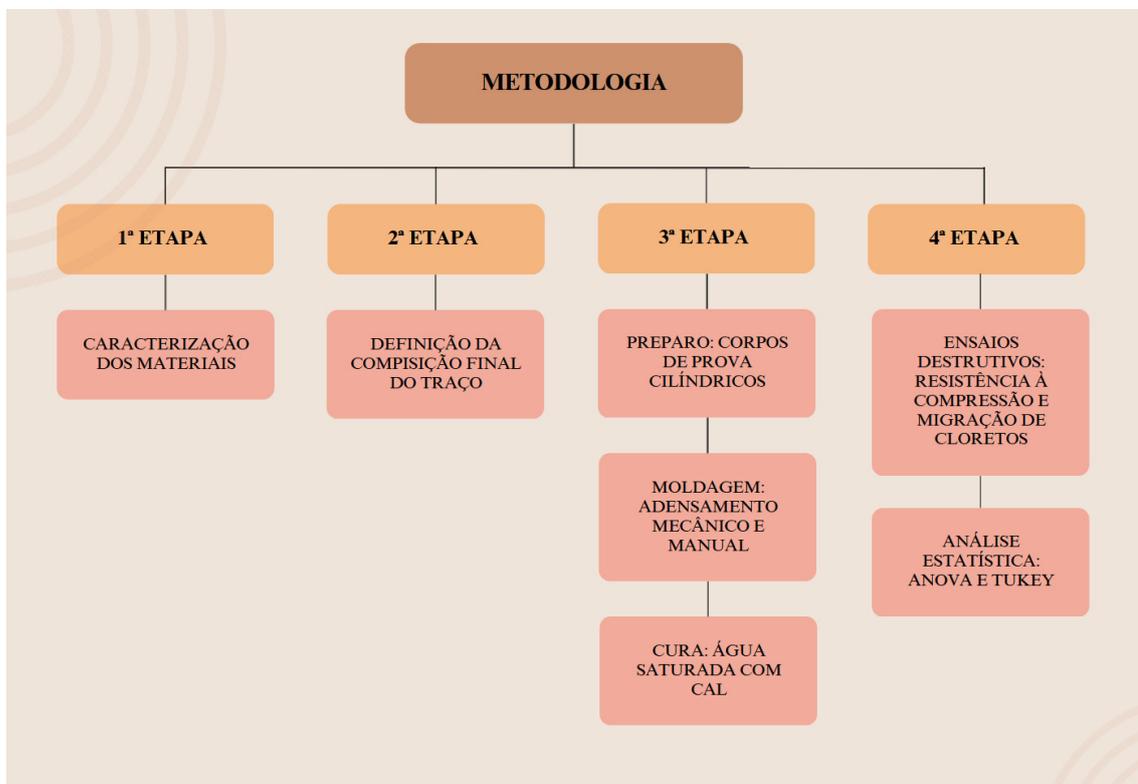
Portanto este trabalho visa elaborar concretos produzidos utilizando o empacotamento de partículas e parte do cimento Portland é substituído por filer calcário. Assim avaliando a influência do empacotamento de partículas e filer calcário no desempenho mecânico. Como também analisar a migração de cloretos nos concretos com menor consumo de cimento.

Na parte inicial deste trabalho está a introdução, contendo os principais conceitos do assunto abordado, definidos por autores relevantes, servindo como um embasamento teórico para o estudo. No capítulo 2 está a caracterização dos principais materiais utilizados na produção do concreto em estudo. Na terceira seção apresenta-se os resultados dos estudos realizados em laboratório, assim como suas respectivas análises. Por fim no último capítulo estão as conclusões e as recomendações para futuras pesquisas relacionadas ao tema.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se de um estudo experimental de natureza aplicada e com uma abordagem quantitativa, estabelecendo de forma sistematizada uma série de procedimentos, que auxiliam no desenvolvimento de informações acerca da utilização do material alternativo estudado, além de sintetizar e analisar esses dados para desenvolver uma explicação mais abrangente do fenômeno em questão (LAKATOS; MARCONI, 2001).

Figura 1 - Fluxograma do procedimento do programa experimental.



Fonte: Autoria própria (2023).

A etapa inicial do estudo caracterizou os materiais utilizados na produção dos concretos, como o cimento, agregados miúdos e graúdos e adições minerais. O estudo foi realizado conforme os procedimentos normatizados, nas instalações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Campus Cajazeiras, nos laboratórios de Geotecnia e de Materiais de Construção.

Posteriormente foram determinados os traços, aplicando o conceito de empacotamento de partículas com e sem adições. E em seguida ocorreu o preparo e moldagem dos corpos de prova, com o uso de betoneira e moldes disponibilizados no laboratório de materiais da

construção no IFPB, para o processo de mistura dos materiais. Após as 24 horas de moldagem, foram desmoldados e colocados no processo de cura submersos em tanque com água saturada com cal. Por último, foram realizados os ensaios destrutivos para obter a resistência e a durabilidade dos concretos com a redução do cimento frente ao ataque de cloretos. Foram realizados ensaios de compressão axial dos corpos de prova e migração de cloretos pelo método não estacionário, de acordo com a norma NT BUILD 492.

## 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para produção das argamassas de concreto, foram utilizados como agregados a brita, como agregado graúdo, e areia, agregado miúdo, sendo essa classificada como grossa, média e fina. O aglomerante utilizado foi o CPV ARI, pelo fato de não possuir adições em sua composição e apresentar elevada resistência mecânica em baixas idades. A adição mineral feita na argamassa foi de filer calcário, para substituir parcialmente o cimento Portland. O aditivo químico empregado foi o superplastificante ADVA 525, que por ser feito à base de policarboxilato possui um alto poder de redução de água. Por fim a água utilizada na argamassa foi obtida pelo abastecimento feito pela concessionária local.

### 2.1.1 Cimento

Por não possuir pozolanas em sua composição o cimento utilizado foi o Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), o mesmo possui no mínimo, 95% de clínquer. Sendo assim a composição presente no aglomerante não interferiu de maneira significativa nas alterações causadas pelas adições minerais, o que facilitou a análise da influência causada pelas adições minerais, na produção da argamassa. A Tabela 1 apresenta a composição do Cimento CP V-ARI.

Tabela 1 - Características químicas do cimento utilizado.

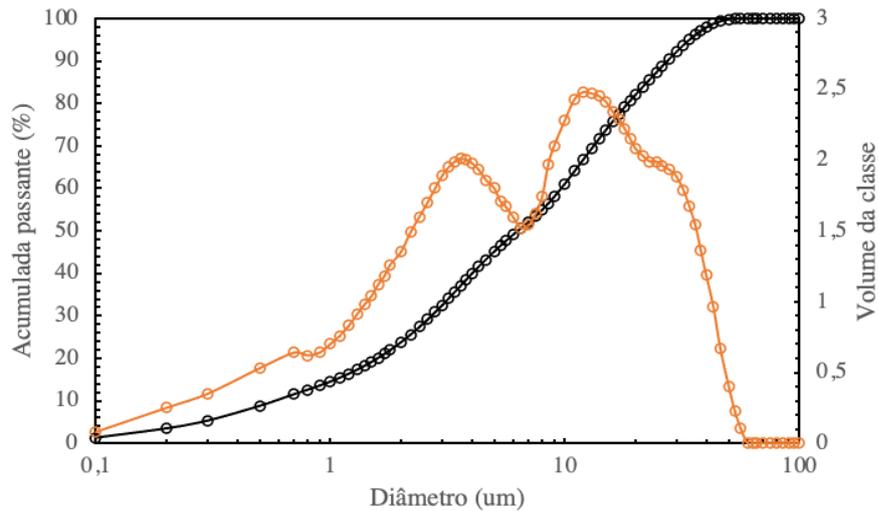
<b>Óxidos (%)</b>	
SiO <sub>2</sub>	22.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.41
MgO	1.97
K <sub>2</sub> O	0.96
Na <sub>2</sub> O	0.43
TiO <sub>2</sub>	0.37
CaO	62.25
BaO	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.64
SO <sub>3</sub>	3.51
MnO	0.03
ZrO <sub>2</sub>	-

Fonte: Autoria própria (2022).

O ensaio da massa específica do cimento foi executado seguindo a NBR 16605 (ABNT, 2017), com o auxílio do frasco volumétrico de Le Chatelier, foi inserido o querosene como líquido reagente, até o volume indicado. Todo o procedimento obedeceu às condições de temperatura e período, assim como determinado pela norma, e foi realizado para duas amostras distintas.

Determinada conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000), a massa específica do cimento utilizado foi de 3,04 g/cm<sup>3</sup>. Foi realizado ensaio de granulometria a laser, no equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: 0.10 µm - 500.00 µm / 100 Classes. A Figura 2 apresenta o resultado do ensaio.

Figura 2 - Granulometria a laser do cimento.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 2.1.2 Filer Calcário

O filler calcário, que pode ser utilizado na produção de plásticos, tintas, fritas cerâmicas, esmaltes, etc., foi utilizado para o estudo. A massa específica utilizada, determinada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2000), foi de 2,84 g/cm<sup>3</sup>. Foi realizado um teste de granulometria a laser no equipamento CILAS 1090 SECO, faixa: 0,10 μm - 500,00 μm / 100 classes.

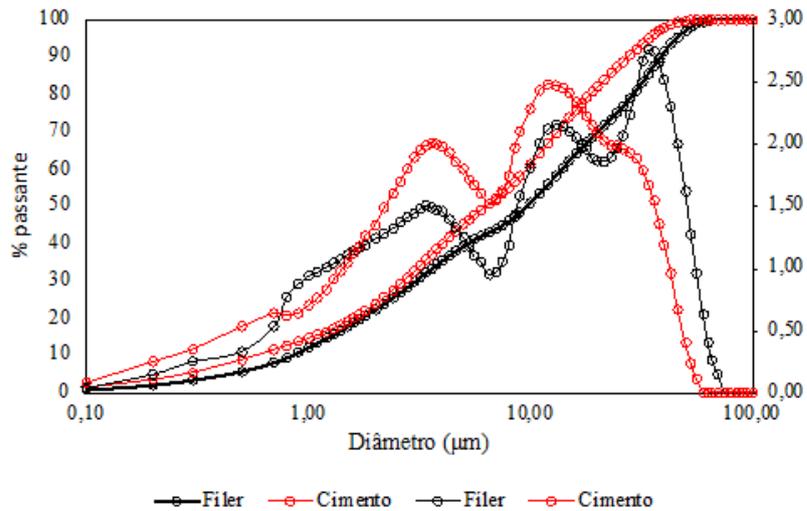
O diâmetro médio obtido para o filer foi de 14,90 μm. A Figura 2 apresenta os valores do ensaio. Como a finura de ambos os materiais é bem próxima é possível concluir que o filer possui potencial para atuar como substituto do cimento, conforme sugerido pelos testes de Bentz (2005). A composição química foi obtida pelo ensaio de XRF apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do filer calcário.

Óxidos (%)	
CaO	95,743
SiO <sub>2</sub>	3,455
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,46
K <sub>2</sub> O	0,101
SrO	0,1
CuO	0,09
MnO	0,05

Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 3 – Granulometria a Laser do fíler calcário.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 2.1.3 Aditivo super plastificante

Com o objetivo de reduzir o consumo de água, utilizou-se o aditivo superplastificante ADVA 585, garantindo a proporcionalidade do fator água/cimento. Este aditivo, apresenta uma massa específica de  $1,075 \text{ g/cm}^3$ , e de acordo com informações do fabricante, apresenta naftaleno sulfonado na sua composição.

Portanto este aditivo permite que a relação água/cimento seja mantida e ainda assim aumentar a trabalhabilidade do concreto. Isaia *et al.* (2011) afirmam ainda que o uso de aditivos superplastificantes permitem, de maneira alternativa, uma economia de cimento, mantendo a consistência, a relação *a/c* e a resistência à compressão.

### 2.1.4 Agregados

Para a composição do traço, inicialmente realizou-se o peneiramento dos agregados, onde classificou-se a areia em três faixas granulométricas distintas, fina, média e grossa, sendo essa separação feita para produção dos traços contendo empacotamento de partículas. Assim, uma peneira com abertura de 1,2 mm foi utilizada para separar a areia grossa, em seguida uma peneira com abertura de 0,6 mm foi utilizada para separar a areia média e fina.

Portanto, foi classificada como grossa a areia retida na peneira de 1,2 mm, a fração que ficou retida na peneira de 1,2 mm foi denominada areia 1 (areia grossa), a areia passante na peneira anterior e que ficou retida na de 0,6 mm foi classificada como média e finalmente a passante na peneira de 0,6 mm foi classificada como fina. Foram seguidas as especificações da NBR NM 248 (ABNT,

2003) para determinar a composição granulométrica das faixas de areia utilizadas.

Para determinar a massa específica das areias conforme especificado na NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi utilizado um formato de cone truncado para estimar com precisão o momento encontrado onde o agregado parece saturado e seco e colapsa após a remoção do molde.

## 2.2 DOSAGEM DO CONCRETO

### 2.2.1 *Empacotamento de Partículas*

Foi utilizado o modelo teórico de Andreassen Modificado (ou Alfred), de modo que encontrasse uma distribuição granulométrica virtual que obtivesse um valor aproximado ao do sistema real.

Para garantir a dosagem correta da argamassa e evitar o aparecimento desordenado de vazios, utilizou-se o software Q-Mix, desenvolvido por Arruda (2022). O software, em questão, auxilia nos cálculos das porcentagens ótimas, otimizando as misturas dos agregados, assim como engloba o modelo de empacotamento A& Modificado.

A seguir, será ilustrada a sequência de utilização do Q-Mix para a otimização do empacotamento:

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

Figura 4 - Inserção dos resultados da análise granulométrica.

Gerenciamento de Ensaios				
Agregado:				
Areia Fina				
ABERTURA PANEIRAS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA PASSANTE
50.000	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
38.100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
25.000	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
19.000	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
12.500	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
9.500	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
6.300	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
4.800	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2.400	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1.200	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
0.600	65.80	6.60%	6.60%	93.40%

Fonte: Arruda, 2022.

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 4. Posteriormente, a quantidade de agregados é definida (Figura 5), flexibilizando os resultados de acordo com as combinações feitas pelo usuário.

Figura 5 - Inserção dos resultados da análise granulométrica.

id	Nome	Cor	Local	Data	*	*
1	Areia Fina	#abe425		2021-10-20 04:55:00		
2	Areia Média	#798e48		2021-10-20 04:55:00		
3	Areia Grossa	#343829		2021-10-20 04:55:00		
4	Brita 0	#c4c7bd		2021-10-20 04:55:00		
5	Brita 1	#c7b0f2		2021-10-20 04:55:00		

© 2020 - Projeto Robson

Fonte: Arruda, 2022.

2º passo: Escolha dos parâmetros de entrada.

Pelo método de Alfred, o software calcula as curvas. Para isso, é necessário que o usuário escolha o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem utilizados. A Figura 6 destaca os campos a serem preenchidos.

Figura 6 - Parâmetros de entrada do software.

**Entradas**

VALOR (mm)

q: 0.300

DL: 19.000

DS: 0.075

Resolver

CPFT =  $[(D^q - D_2^q)/(D_1^q - D_5^q)] \times 100$

Peneiras - Andreassen		RESULTADO FINAL MISTURA				
mm (d)	Andreassen (CPFT)	mm (d)	Passante	Mistura	Andreassen	Dispersão (RSS)
50.000	100.00%					
38.100	100.00%					
25.000	100.00%					
19.000	100.00%					
12.500	85.43%					

Fonte: Arruda, 2022.

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

Após escolher os parâmetros de entrada, o CPFT (modelo de Alfred) já estará calculado no canto esquerdo da tela (Figura 7), em seguida, o usuário deve clicar no botão “resolver”.

Figura 7 - Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).

**Misturar**

**Agregados**

- Areia Média Ensaio id. 2
- Areia Grossa Ensaio id. 3
- Brita 0 Ensaio id. 4
- Brita 1 Ensaio id. 5

Segure a tecla CTRL para selecionar vários agregados

**Entradas**

VALOR (mm)

q: 0,300

D1: 19,000

D5: 0,075

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

Resolver

$CPFT = [(D_1^4 - D_5^4)/(D_1^4 - D_5^4)] \times 100$

Peneiras - Andreasen		RESULTADO FINAL MISTURA				
mm (d)	Andreasen (CPFT)	mm (d)	Passante	Mistura	Andreasen	Dispersão (RSS)
50.000	100,00%					
38.100	100,00%					
25.000	100,00%					
19.000	100,00%					
15.000	96,43%					

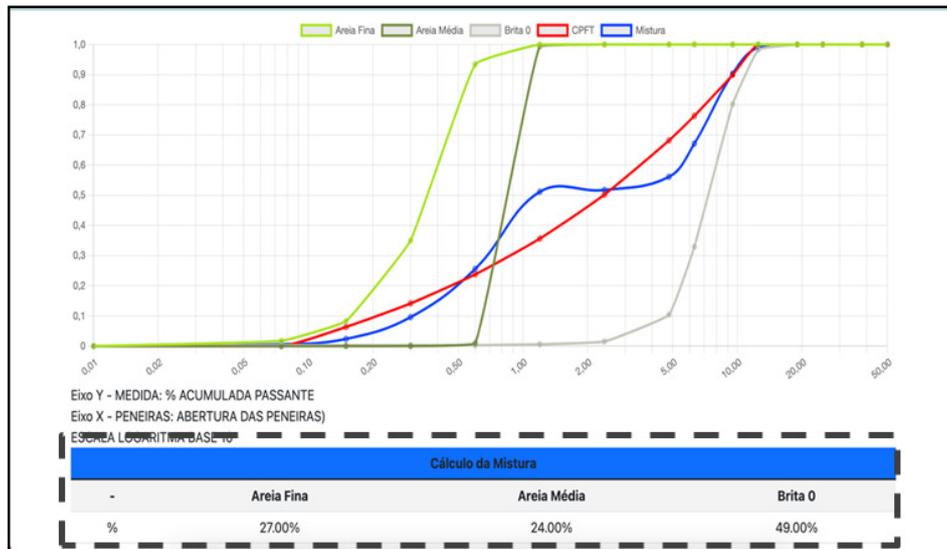
Fonte: Arruda, 2022.

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 resultado.

Para um experimento qualquer, foram selecionados três (3) agregados para uma mistura aleatória, a Figura 8 mostra os resultados do procedimento. Na parte superior da tela, há uma tabela que mostra as porcentagens acumuladas passantes da mistura resultante e os respectivos desvios individuais de cada abertura de peneira. Através dos desvios individuais, o empacotamento da mistura pode apresentar um melhor aspecto, ao adicionar partículas em classes específicas. Isso pode ocorrer devido ao auxílio que os desvios individuais geram na identificação dos diâmetros que estão apresentando maior desvio.

Paralelo a isso, no canto inferior da tela, tem-se as curvas granulométricas apresentando a porcentagem otimizada dos agregados escolhidos para a mistura.

Figura 8 - Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada.



Fonte: Arruda, 2022.

Por fim, a solução do problema constitui-se de uma combinação linear sobre o qual o software executa as combinações dos agregados, guardando o valor dos desvios obtidos entre a curva de cada combinação e a curva do modelo de Alfred (CPFT). Quando todas as combinações forem testadas, o cálculo será finalizado e determinado a melhor proporção dos agregados, pelo menor desvio (RSS).

### 2.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

A mistura de concreto foi produzida utilizando uma betoneira de 150 litros. A preparação dos materiais foi de acordo com o peso calculado para a dosagem do concreto. Para o traço contendo as adições de fíler, a mistura foi realizada com cimento ainda seco em um saco plástico, antes do início do processo de moldagem, com o objetivo de homogeneizar os finos e ter um melhor resultado na combinação de materiais. Para os aditivos, como a relação água/finos (a/f) foi constante, o teor de aditivo foi ajustado durante o processo de mistura, adicionando quantidades extras com porcentagem prevista para o traço, além de quantidades extras de água.

O processo da mistura aconteceu da seguinte forma: inicialmente foi adicionado todo o aglomerante com 80% da água para assim formar uma pasta, em seguida foi adicionado resto da água e 100% do aditivo superplastificante. Os agregados foram colocados seguindo a ordem de brita, areia grossa, areia média e por último a areia fina. A betoneira continuou ligada entre 3 e 4 minutos, até que a concreto tivesse um aspecto homogêneo. Durante o processo, era necessário

pausas para a raspagem das paredes da betoneira em locais para a remoção das partículas finas que pudessem ter ficado aderidas.

Os corpos de prova (CPs) foram moldados em um molde metálico por aplicação de compactação mecânica e manual. Os CPs cilíndricos (10 x 20) cm foram preenchidos em três camadas e compactados com vibrador mecânico, finalizados com auxílio de soquete e de colher de pedreiro.

Após 24 horas os moldes foram desmoldados e identificados, em seguida foram imersos em solução de água saturada com hidróxido de cálcio até os 7 e 28 dias de idade. Para o ensaio de compressão foram utilizados dois dos corpos cilíndricos de (10 x 20) cm e o restante foram utilizados para os ensaios de durabilidade.

## 2.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

### 2.4.1 *Ensaio de Resistência (Compressão Axial)*

No estado endurecido, foram feitos os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de provas cilíndricos, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) 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.

### 2.4.2 *Migração de cloretos*

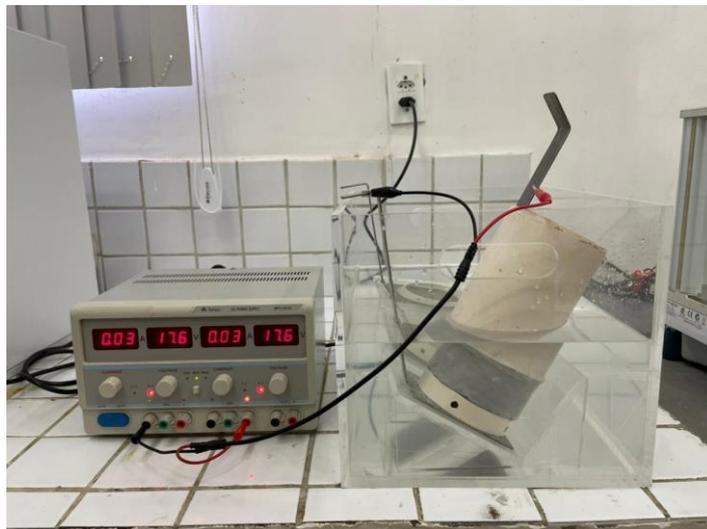
A NT BUILD 492 (1999) tem como finalidade determinar o coeficiente de difusão de cloretos, em concretos, argamassas e materiais a base de cimento, por migração em estado não estacionário; sendo que este coeficiente é utilizado para indicar a resistência do material a penetração de cloretos.

Os corpos de prova após serem submetidos a um período de cura submersa, numa solução saturada de cal, foram retirados com a idade de 28 dias duas amostras cilíndricas 10x20 cm de cada traço, T160, T240, T320, T-RSE e T-RCE do tanque e marcados para o processo de corte. Os corpos de prova foram cortados na direção normal aos seus eixos, onde foram divididos em 4 partes, onde as fatias da extremidade foram descartadas, e as duas centrais foram utilizadas no ensaio de migração. Portanto, para cada corpo de prova foram retiradas duas amostras, totalizando 4 amostras, onde foram consideradas apenas 3 para obtenção dos resultados.

As amostras foram impermeabilizadas em toda sua lateral com epóxi e acondicionadas com tubo PVC na sua parte superior, a fim de garantir que apenas as faces das superfícies tenham contato com as soluções. Para o ensaio de migração, preparou-se duas soluções, uma catódica que foi armazenada no recipiente de acrílico, contendo 100 g de NaCl para cada 900 g de água, e outra anódica com 12 g de NaOH para cada 1 litro de água, colocada na tubo de plástico acima das amostras, sendo ambas mantidas num intervalo de temperatura de 20-25° C.

Foi conectado a solução de NaCl (catódica) no polo negativo e a solução de NaOH (anódica) no polo positivo da fonte de alimentação, foram então utilizadas chapas de aço inoxidável para conectar o circuito a fonte de alimentação. Os eletrodos utilizados para conectar o circuito a fonte de energia foram chapas de aço inoxidável, sendo o polo positivo ligado ao ânodo e o negativo ao cátodo. Com isso, as amostras foram posicionadas na caixa, conforme mostra a Figura 8:

Figura 9 - Montagem do conjunto do ensaio de migração.



Fonte: Autoria própria, 2022.

As amostras são submetidas a uma diferença de potencial que acelera a migração dos íons de cloreto, presentes na solução, na direção do outro eletrodo (ânodo). Decorrido o período definido para o ensaio, os corpos de prova são divididos axialmente em amostras de diâmetro de 50 mm de espessura, é então aplicado o método colorimétrico. Neste método uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) é aplicada na superfície do concreto, dá-se então início a uma reação fotoquímica, havendo a formação de um precipitado branco onde há a presença de íons

livres de cloreto. Sendo então possível medir a penetração dos cloretos no concreto e posteriormente, a partir da segunda Lei de Fick, é calculado o coeficiente de difusão.

Inicialmente é aplicado uma tensão de 30 volts ao espécime de concreto, sendo então medida a corrente que definirá o tempo do ensaio e o novo valor de tensão, conforme mostra a figura a seguir:

Figura 9 - Correção da tensão aplicada e duração do ensaio de migração.

Initial current $I_{30V}$ (with 30 V) (mA)	Applied voltage $U$ (after adjustment) (V)	Possible new initial current $I_0$ (mA)	Test duration $t$ (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Fonte: NT Build 492, 1999.

Após finalizado o período de ensaio, foram aferidas a corrente e a temperatura final e as amostras foram retiradas do equipamento. Posteriormente os corpos de prova são divididos axialmente em amostras de diâmetro de 50 mm de espessura, é então aplicado o método colorimétrico. Neste método uma solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) é aplicada na superfície do concreto, dá-se então início a uma reação fotoquímica, havendo a formação de um precipitado branco onde há a presença de íons livres de cloreto. Sendo então possível medir a penetração dos cloretos no concreto e posteriormente, a partir da segunda Lei de Fick, é calculado o coeficiente de difusão ( $D_{nssm}$ ).

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados demonstrados na forma de tabelas foram analisados através da ferramenta ANOVA, com 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%.

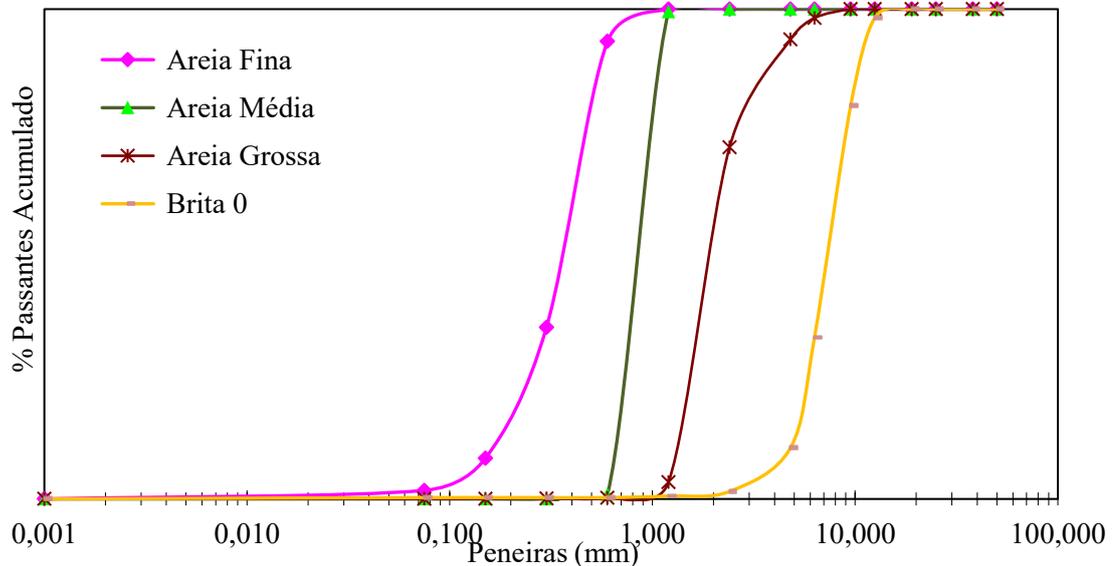
### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para otimizar a dosagem pela definição do empacotamento de partículas é necessário que haja a distribuição granulométrica adequadas dos agregados. A Figura 10 apresenta os resultados das curvas de massa acumulada passante, obtidas pela composição granulométrica de cada faixa de areia utilizada (fina, média e grossa) nos traços da argamassa do concreto.

Figura 10- Curvas granulométricas dos agregados.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A seguir, a Tabela 2 apresenta os valores encontrados das massas específicas de duas amostras de areia, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Tabela 3 – Massas específicas dos agregados.

<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>			
Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita 9,5
2,66	2,64	2,62	2,63

Fonte: Autoria própria, 2022.

### 3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A Tabela 2 apresenta os consumos de materiais para todos os traços dosados através da percentagem otimizada dos agregados, calculada através do software Q-mix (ARRUDA, 2022). Os traços foram calculados com base no consumo de 380 kg/m<sup>3</sup> de cimento, contudo, para chegar na fluidez desejada a quantidade de água foi corrigida e os consumos de cimento foram ajustados de acordo com o executado na moldagem.

Tabela 4 - Consumos de materiais dos traços.

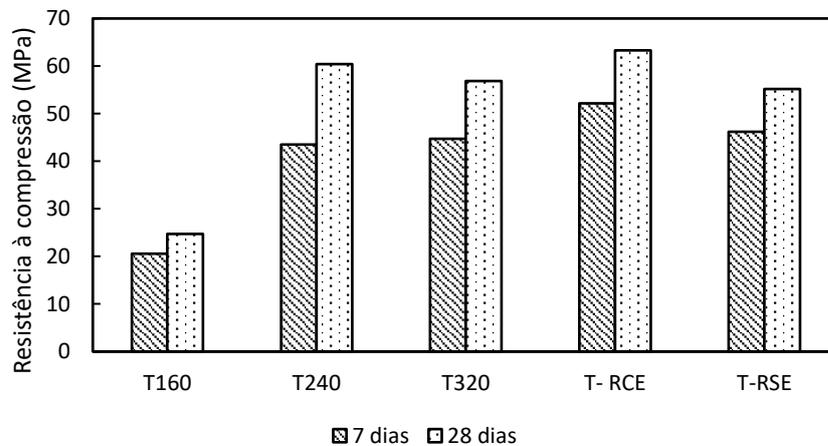
Concretos	Consumo em kg/m <sup>3</sup>						
	Cimento	Filer	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita	Água
T160	161,86	222,56	200,70	437,83	510,66	674,95	178,05
T240	253,34	147,78	209,42	456,85	532,85	704,27	144,40
T320	327,13	61,34	202,82	442,44	516,05	682,06	173,38
T-RCE	384,00	-	202,11	436,55	509,31	675,03	184,32
T-RSE	384,01	-	-	865,03	-	962,05	195,85

Fonte: Autoria própria, 2022.

### 3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O gráfico abaixo traz os resultados de resistência a compressão axial, relacionando essa com o tempo de cura, nas idades de 7 dias e 28 dias, e a quantidade de cimento utilizada.

Figura 11- Resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Na Figura 11 pode-se observar uma tendência de redução da resistência em função do aumento da substituição do cimento pelo filer calcário, exceto no traço T240, que obteve uma

resistência aos 28 dias de cura quase equivalente ao traço de referência. Percebe-se também que para os traços de referência, T – RSE e T – RCE, o que foi dosado com empacotamento de partículas obteve uma maior resistência no ensaio.

Este resultado segue a mesma linha do apresentado por Dhir *et al.* (2007), que mostraram uma diminuição na resistência à compressão com um aumento do teor de FC na faixa de 15% a 45%. No estudo foi perceptível a redução da resistência à compressão em todas as idades analisadas com o aumento do teor de FC, sendo que a redução de resistência com 15% de FC foi pequena quando comparada aos níveis mais altos, onde chegou-se à conclusão que a redução na resistência à compressão está relacionada à redução no teor de CP.

Liu *et. al.* (2011) ao substituírem 20% do cimento Portland por filer calcário, obtiveram uma redução de 19% na resistência a compressão em comparação ao traço sem adição desse mineral. Foi constatado pelos autores através de DRX, que o filer reagiu com as fases aluminatos do cimento, formando carboaluminatos.

Com a utilização do software Stat Plus foi realizada análise estatística através do teste de Tukey, onde comparou-se as resistências médias entre cada concreto (os dosados através do empacotamento):

Figura 12 – Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos.

	T160	T240	T320	T-RCE
T160				
T240				
T320				
T-RCE				
T-RSE				
<b>Apresenta diferença estatística</b>			<b>Não apresenta diferença estatística</b>	

Fonte: Aatoria própria, 2022.

Ficou constatado que houve diferença estatística entre o traço T.160 e todos os outros traços analisados (T.240, T.320, T-RCE), ou seja ( $p < 0,05$ ), não sendo observado diferença significativa quando se comparou o concreto T240 e T320, mesmo com a diferença entre eles de 73,79 kg de cimento por metro cúbico de concreto. Portanto este teste corrobora com a conclusão obtida na análise numérica de que a elevada substituição de cimento Portland por filer calcário resultou numa redução da resistência do traço T.160, assim como apontado por

outros autores na literatura (Dhir *et al.* (2007); Liu *et. al.* (2011)). O desempenho superior do concreto T240 pode ser atribuído ao melhor empacotamento dos finos nessa proporção.

### 3.4 ÍNDICE DE LIGANTES

Apenas a troca do clínquer por adições minerais não é garantia de obtenção de um concreto de baixo impacto ambiental. Portanto, para produção de concretos mais eficientes deve haver uma redução do consumo dos ligantes acompanhado do aumento do desempenho mecânico. Assim, Damineli *et al.* (2010) propuseram um indicador para avaliar a eficiência dos concretos: o índice de Ligantes (IL), em termos da quantidade total de ligante (kg.m<sup>-3</sup>) necessária para fornecer 1 MPa de resistência mecânica.

$$IL = \frac{C}{R}$$

Onde:

IL = índice de ligantes, em Kg·m<sup>3</sup>·Mpa<sup>-1</sup>;

C = consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>);

R = resistência a compressão (Mpa).

Segundo Damineli (2013) são classificados como de alta eficiência concretos com IL de até 5 kg/m<sup>3</sup>· Mpa.

Assim, foram obtidos os valores do IL para os traços do estudo, onde considerou-se a resistência a compressão para os traços de concreto com uma idade de 7 e 28 dias e os respectivos consumos de cimento para cada traço:

Tabela 5 – Índice de ligante dos concretos estudados com 7 e 28 dias.

<b>Índice de Ligantes</b>					
<b>Traço</b>	<b>Consumo de cimento (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistência aos 7 dias (Mpa)</b>	<b>Resistência aos 28 dias (Mpa)</b>	<b>IL - 7 dias</b>	<b>IL - 28 dias</b>
T.160	162,65	20,59	24,71	7,90	6,58
T.240	253,33	43,51	60,40	5,82	4,19
T.320	327,13	44,72	56,84	7,32	5,76
T - RCE	384,01	52,14	63,30	7,74	6,07
T-RSE	384,00	46,16	55,18	8,32	6,96

Fonte: Aatoria própria, 2022.

Portanto, observa-se que todos os concretos com substituição do cimento Portland por filer calcário obtiveram melhores eficiências em relação ao concreto T-RSE, tal fato pode ser

atribuído ao melhor empacotamento dos agregados e também dos finos, que evidencia a importância da dosagem para minimizar o impacto negativo da substituição do cimento Portland. O traço T.240 destaca-se por ser o que apresenta maior eficiência, possuindo valores de IL de 5,82 e 4,19, para as idades de 7 e 28 dias respectivamente.

### 3.5 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Após a conclusão do ensaio de migração de cloreto dos traços analisados, mediante a norma NT Build 492, foram obtidos os seguintes resultados, organizados na Tabela 5.

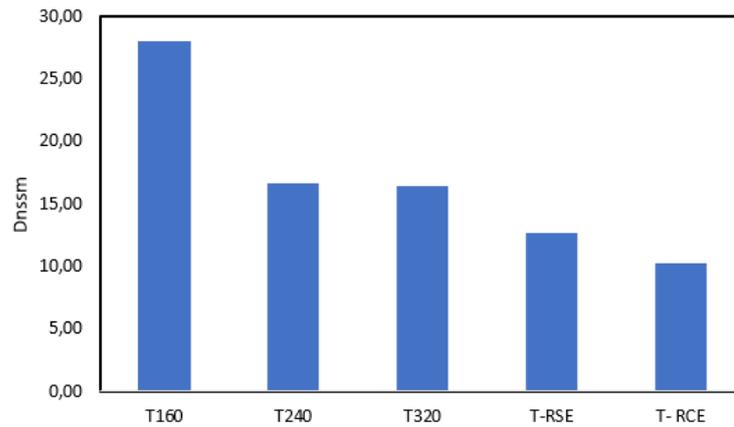
Tabela 6 – Índice de ligante dos concretos estudados com 7 e 28 dias.

Traço	Tensão	Média T (°C)	L (mm)	Xd (mm)	Dnssm ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)	
T160	25	26,5	48,5	48,5	25,74	
	25	26,5	49	49	26,27	27,94
	20	26,5	48	48	31,82	
T240	25	25	49	28	15,70	
	30	25	49	35	16,51	16,68
	30	25	50	37	17,84	
T320	25	25	49	30	16,89	
	25	25	49	32	18,09	16,43
	30	25	50	30	14,30	
T-RSE	30	26	50	25	11,83	12,66
	30	26	50	24	11,33	
	25	26	50	26	14,83	
T-RCE	30	26	49	22	10,13	
	30	26,75	49	22	10,16	10,21
	30	26,75	47,5	23	10,34	

Fonte: Autoria própria, 2022.

O ensaio de migração de cloretos foi utilizado para obter o coeficiente de migração no estado não estacionário, a Figura 13 apresenta os valores desses coeficientes para cada traço, sendo estes analisados com um período de 28 dias de cura úmida. É possível perceber que o traço T 160 foi o que apresentou o maior coeficiente de difusão, e este parâmetro diminuiu à medida que se aumentou o consumo de cimento, sendo o traço T-RCE o que apresentou um menor coeficiente de difusão, com uma redução de 63,45% em relação ao citado anteriormente.

Figura 13 - Migração de cloretos dos traços estudados.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Nessa mesma linha, Bentz et al. (2009) defendem que quando ocorre a substituição de cimento Portland por filer calcário há um aumento na penetração de íons de cloreto quando estes são comparados a concretos sem substituição. Além desses Fagerlund (2005) afirma que esse aumento na penetração de íons cloreto deve-se ao fato que o FC reage com os aluminatos do CP ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), além disso há a formação de compostos que possuem uma menor capacidade de ligação em relação aos cloretos.

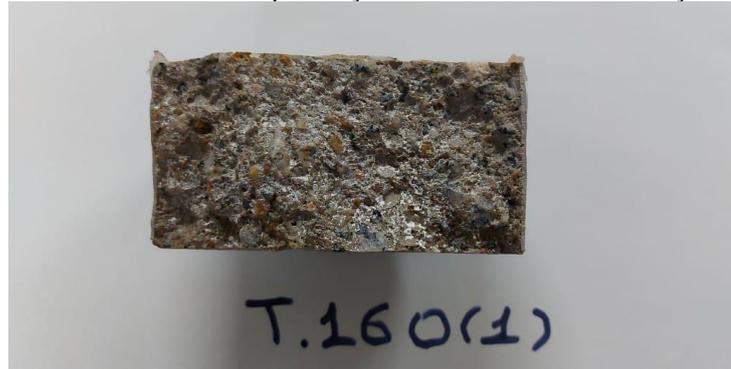
Tabela 7 – Classificação de acordo com a resistência de penetração dos cloretos.

<b>Difusão de cloretos (<math>D_{28} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}</math>)</b>	<b>Resistência a penetração dos cloretos</b>
>15	Baixa
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2,5 - 5	Muito Alta
<2,5	Extremamente Alta

Fonte: Adaptada de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998).

Pela Tabela 7 pode-se observar que os traços T-RCE e T-RSE apresentaram uma resistência moderada a migração de cloretos, enquanto os demais traços, T 320, T 240 e T 160 apresentaram uma baixa resistência, o que reforça a tese dos autores citados anteriormente. As Figuras 14, 15 e 16 mostram um dos corpos de prova de cada concreto ensaiado. No concreto T160 houve penetração total dos cloretos, evidenciando a baixa capacidade de fixação destes íons na matriz com baixo teor de cimento.

Figura 14 - Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 160.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 15 - Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 240.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 16 - Profundidade de penetração dos íons de cloreto nos traços T 320.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Analisando o teste de Tukey (Figura 18), nota-se que o traço T160 apresentou diferença estatística quando comparado a todos os outros traços, tal resultado reforça os estudos de Bentz et al. (2009) e Fagerlund (2005), mencionadas anteriormente, visto a baixa reserva alcalina.

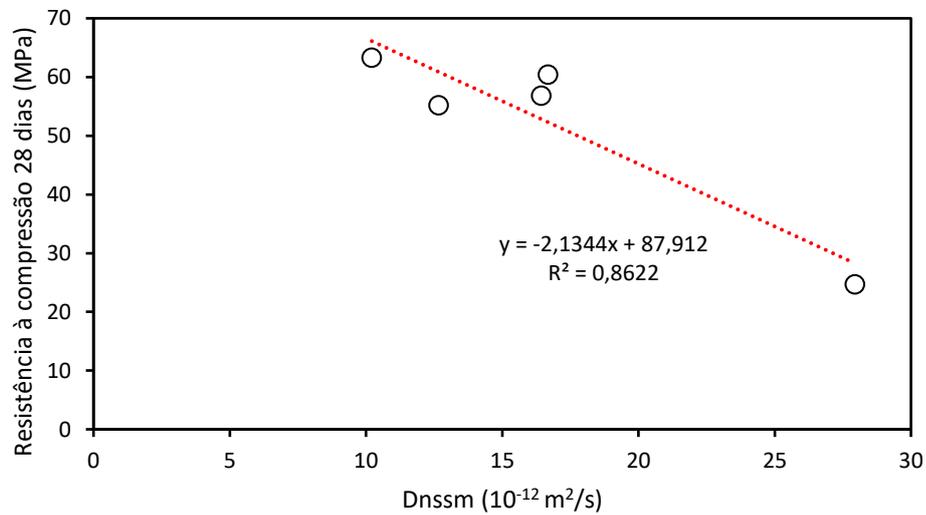
Figura 17 - Teste de Tukey para migração de cloretos

	T160	T240	T320	T-RCE	T-RSE
T160					
T240					
T320					
T-RCE					
T-RSE					
<b>Apresenta diferença estatística</b>				<b>Não apresenta diferença estatística</b>	

Fonte: Autoria própria, 2022.

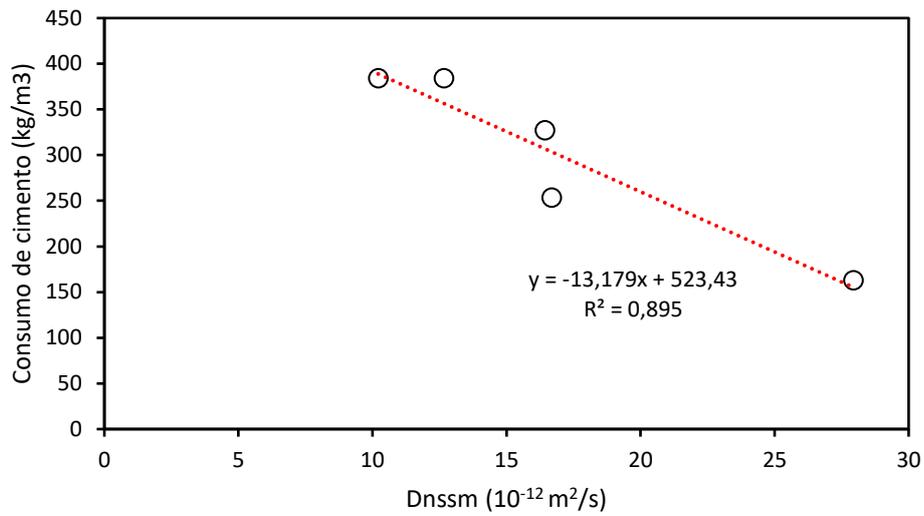
Com o objetivo de analisar o nível de correlação entre o coeficiente de migração de cloretos e outras variáveis que poderiam influenciá-lo, como a resistência de compressão, teor de cimento, porosidade, adição de minerais, utilizou-se regressão linear. As Figuras 19 e 20 mostram os resultados obtidos.

Figura 18 – Correlação entre migração de cloretos e resistência a compressão.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 19 – Correlação entre migração de cloretos e teor de cimento.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Pelas análises, pode-se concluir que houve uma boa correlação entre o teor de cimento e a migração de cloretos, reforçando os resultados obtidos pela ANOVA, além disso, também foi constatada uma correlação significativa entre a resistência a compressão do concreto e a migração de cloretos, onde quanto maior a resistência do concreto menor foi o coeficiente de migração observado. Tal resultado era esperado, visto que não há registro na literatura que adição de fíler calcário atue na fixação de cloretos na matriz cimentícia.

## 4 CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados na seção anterior, pode-se chegar as seguintes conclusões:

- Verificou-se um aumento na penetração de íons de cloreto à medida que se aumentou a substituição de CP por FC, tal fato pode ser explicado pela diminuição do cimento Portland, consequentemente o teor de aluminatos, também pela reação do FC com os aluminatos presentes no CP ( $C_3A$  e  $C_4AF$ ), com a formação de compostos com menor capacidade de ligação em relação aos cloretos.
- Nos traços com menor teor de cimento foi constatada uma redução na resistência mecânica à compressão, sendo a menor resistência verificada no traço T160, em que houve uma substituição bem elevada de 58% de CP por FC, entretanto todos os traços de concreto obtiveram uma resistência estrutural igual ou superior a 20 Mpa.
- Os índices de ligantes obtidos para os traços estudados se mostraram menores quanto maior a substituição de FC por CP, sendo o traço T240 o mais eficiente, pois foi o que necessitou de um menor consumo de cimento para produzir 1 Mpa de resistência a compressão, o que provou a viabilidade da substituição de CP pela adição mineral do estudo do ponto de vista da eficiência mecânica.

Assim, para os trabalhos futuros, recomenda-se o estudo de alternativas visando o aumento da durabilidade do concreto ao se utilizar o fíler calcário como adição mineral, visto que esta adição tem grande potencial de aplicação devido a sua disponibilidade.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, R. Dosagem e desempenho de concretos com elevadas substituições de cimento por filler de resíduos cerâmicos frente a corrosão de armaduras. Tese (doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo- Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: Informação e documentação – Numeração progressiva das seções de um documento – Apresentação. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**: Informação e documentação – Sumário – Apresentação. Rio de Janeiro, 2012b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: Informação e documentação – Resumo – Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.
- BENTZ, D. P. Modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 124-129, 2006.
- BENTZ, D. P.; IRASSAR, E. F.; BUCHER, B. E.; WEISS, W. J. Limestone fillers conserve cement. **Concrete International**, v. 31, p. 35–46, 2009.
- CASTRO, Alessandra Lorenzetti de; FERREIRA, Fernanda Giannotti da Silva. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. **Revista de Ingenieria de Construccion**, v. 31, n. 2, p. 91-104, 2016..
- CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**.

2009, v. 55, n. 333, pp. 18-32. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>. Acesso em: 24 dez. 2021.

CEMHYD3D. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, p. 124-129, 2006.

DAL MOLIN, D. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 1, p. 261- 309, São Paulo: IBRACON, 2011.

DAMINELI, 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.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. **Measuring the ecoefficiency of cement use**. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555–562, set. 2010.

DHIR, R. K.; EL-MOHR, M. A. K.; DYER, T. D. Chloride binding in GGBS concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 26, n. 12, p. 1767–1773. 1996.

DIANA, Daniela. Tabelas, quadros e figuras. 201-?. Disponível em <https://www.diferenca.com/tabelas-quadros-e-figuras/>. Acesso em 10 abr. 2022.

ELGALHUD, A. A.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. **Limestone addition effects on concrete porosity**. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 222–234, set. 2016. 97

FAGERLUND, G. **Imaginable effects of limestone filler on chloride transport (Report TVBM-7187)**. Lund: Lund University, 2005.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) –Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-8ALHAQ>. Acesso em: 25 fev. 2023.

ISAIA, Geraldo Cechella; HELENE, Paulo; TUTIKIAN, Bernardo F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap**, v. 36, 2011.

HUANG, W.; KAZEMI-KAMYAB, H.; SUN, W.; SCRIVENER, K. v. **Cement and Concrete Composites**, v. 77, p. 86–101, mar. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. Normas de apresentação tabular. 3 ed. Rio de Janeiro, 1993.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia do trabalho científico**. 6ª ed., São Paulo: Atlas, 2001.

LIU, Shu Hua; GAO, Zhi Yang; RAO, Mei Juan. Study on the ultra high performance concrete containing limestone powder. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, 2011. p. 686-689.

LOLLINI, F.; REDAELLI, E.; BERTOLINI, L. **Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete.** *Cement and Concrete Composites*, v. 46, p. 32–40, fev. 2014.

LOPES, Herbert Medeiros Torres. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagem de concretos de cimento Portland.** 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2014. 782 p.

MÜLLER, H. S.; BREINER, R.; MOFFATT, J. S.; HAIST, M. **Design and Properties of Sustainable Concrete.** *Procedia Engineering*, v. 95, p. 290–304, 2014.

NORDTEST METHOD. **NT BUILD 492.** Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. 1999.

OLIVEIRA, IR de et al. Dispersão e empacotamento de partículas—princípios e aplicações em processamento cerâmico. **Fazendo arte editorial**, v. 224, p. 119-137, 2000.

PALM, S.; PROSKE, T.; REZVANI, M.; HAINER, S.; MÜLLER, C.; GRAUBNER, C.-A. Cements with a high limestone content – Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 308–318, ago. 2016.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C.-A. Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 413–421, set. 2014.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011. 100



## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### TCC

**Assunto:** TCC  
**Assinado por:** Vinicius Feitosa  
**Tipo do Documento:** Dissertação  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Vinicius Feitosa Rodrigues, ALUNO (201622200330) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 16/03/2023 10:06:34.

Este documento foi armazenado no SUAP em 16/03/2023. 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: 780286  
Código de Autenticação: 842fbef5cc

