

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

WILSON MARQUES DE ANDRADE FILHO

**ESTUDO DA DURABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS  
DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO  
UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS**

Cajazeiras-PB  
2023

WILSON MARQUES DE ANDRADE FILHO

**ESTUDO DA DURABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS  
DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO  
UTILIZANDO 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

A554e Andrade Filho, Wilson Marques de.  
Estudo da durabilidade e propriedades mecânicas de concretos com  
adição de filer calcário utilizando empacotamento de partículas /  
Wilson Marques de Andrade Filho.– 2023.  
  
28f. : 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. Sustentabilidade. 3. Concreto alternativo. 4.  
Cimento. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da  
Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 624.01(043.2)

## CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

Artigo apresentado à coordenação do curso como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

### ESTUDO DA DURABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

**WILSON MARQUES DE ANDRADE FILHO**

wilson.set@hotmail.com

**ROBSON ARRUDA DOS SANTOS**

robson.santos@ifpb.edu.br

#### RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por uma parcela significativa das emissões de CO<sub>2</sub> devido ao consumo de cimento Portland. Ao propor a substituição parcial de cimento por fíler calcário, esse trabalho busca apresentar alternativas na produção de concreto com o objetivo de reduzir a demanda por cimento, utilizando conceitos de empacotamento de partículas, para análise posterior da resistência mecânica e durabilidade contra o ataque de cloretos. Foram realizados ensaios para avaliar o desempenho desses materiais, como ensaio de compressão axial, migração de cloretos e absorção por capilaridade. Os traços contendo fíler calcário apresentaram resultados inferiores em relação ao traço de referência com empacotamento de partículas. No entanto, destaca-se que o traço T240 demonstrou excelentes resultados em termos de compressão, índice de ligantes, absorção por capilaridade e tempo de despassivação das armaduras, reforçando que a substituição parcial por fíler calcário gera resultados positivos nessas propriedades. Por outro lado, o traço T160 obteve os piores indicadores de resistência mecânica, devido à sua composição com maior proporção de fíler em relação ao cimento. O monitoramento eletroquímico das barras de aço mostra que a substituição parcial do cimento por fíler calcário apresenta resultados satisfatórios, mesmo no concreto com o menor consumo de cimento.

**Palavras-Chave:** Sustentabilidade, Durabilidade de concreto, Empacotamento, Migração de cloretos.

#### ABSTRACT

The civil construction industry is responsible for a significant portion of CO<sub>2</sub> emissions due to the consumption of Portland cement. By proposing the partial replacement of cement with limestone filler, this study seeks to present alternatives in concrete production with the aim of reducing the demand for cement using particle packing concepts for subsequent analysis of mechanical strength and durability against chloride attack. Tests and detailed analyses were conducted to evaluate the performance of these materials, including axial compression tests, chloride migration, and capillary absorption. Mixtures containing limestone filler showed inferior results compared to the reference mixture with particle packing. However, it should be noted that the T240 mixture demonstrated excellent results in terms of compression, binder content, and capillary absorption, reinforcing the concept of the study that partial substitution with limestone filler yields positive results in these properties. On the other hand, the T160 mixture obtained the worst indicators due to its composition with a higher proportion of filler compared to cement. The electrochemical monitoring of steel bars shows that the partial replacement of cement by limestone filler presents satisfactory results, even in concrete with the lowest cement consumption.

**Keywords:** Sustainability, Concrete durability, Packing, Chloride migration.

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil enfrenta constantes desafios na busca por materiais de construção duráveis, econômicos e sustentáveis. Nesse contexto, o concreto destaca-se como um dos materiais mais amplamente utilizados, tanto em estruturas de pequeno porte quanto em grandes obras de infraestrutura. No entanto, a necessidade de melhorar o desempenho do concreto, especialmente em relação à durabilidade e às propriedades mecânicas, tem impulsionado pesquisas que visam otimizar essas características.

Um dos caminhos explorados é a adição de fíler calcário ao concreto, um material fino e com pouca atividade, proveniente da indústria de produção de calcário. Estudos realizados por autores renomados têm evidenciado as vantagens dessa adição. Entre elas, destacam-se a melhoria da trabalhabilidade, a redução da retração, a diminuição da permeabilidade e a otimização das propriedades mecânicas do concreto (Liu et al., 2020; Wang et al., 2018).

O fíler calcário também desempenha um papel relevante na sustentabilidade, uma vez que sua utilização como adição mineral permite reduzir a quantidade de cimento Portland necessária na mistura. O cimento é conhecido por ser um dos principais responsáveis pela emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante sua produção. Assim, a incorporação do fíler calcário contribui para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção do concreto (Liu et al., 2020; Wang et al., 2018).

Uma abordagem promissora para otimizar a compacidade e eficiência do concreto é o empacotamento de partículas. Essa técnica visa preencher os vazios entre as partículas de agregados, cimento e fíler calcário, resultando em uma matriz mais densa e homogênea. Estudos têm demonstrado que o empacotamento de partículas contribui para melhorar as propriedades do concreto, tanto em termos de durabilidade quanto de resistência mecânica (Li et al., 2019; Mehta, 1986).

Neste estudo, foi feita uma cuidadosa seleção dos componentes com base no uso de um software especializado chamado Q-mix, que utiliza algoritmos de empacotamento de partículas para otimizar a formulação dos materiais. O software Q-mix foi desenvolvido como parte de uma tese de doutorado do orientador deste trabalho, e seu objetivo é fornecer uma abordagem matemática precisa para maximizar a compacidade e eficiência dos materiais.

A utilização do software Q-mix se justifica pela sua capacidade de simular e otimizar a disposição das partículas no concreto, levando em consideração diferentes fatores, como as características dos agregados, a proporção de fíler calcário e a distribuição do cimento. Com base em cálculos e modelos matemáticos avançados, o Q-mix é capaz de determinar a melhor combinação de componentes para alcançar uma matriz de concreto densa e homogênea, proporcionando assim um material com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade.

Esse estudo tem como objetivo analisar a influência do empacotamento de partículas na durabilidade de concretos com baixo consumo de cimento e elevados teores de fíler calcário. Adicionalmente, foram investigadas as propriedades mecânicas dos concretos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nos países em desenvolvimento, o cimento Portland tem um papel crucial na expansão da infraestrutura e na construção de habitações, devido ao seu amplo uso como material de construção. A produção de cimento é uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa, responsável por cerca de 5 a 8% da emissão global de CO<sub>2</sub>. Destaca-se que o cimento representa 95% do total de emissões relacionadas à produção de concreto (ROBBIE, 2019). A demanda por materiais de construção, e consequentemente por cimento, tem crescido globalmente. De acordo com o relatório "Global Construction 2030", produzido pela consultoria Global Construction Perspectives e pelo Oxford Economics, estima-se que a produção mundial de cimento aumentará de 4,2 bilhões de toneladas em 2019 para 5,8 bilhões de toneladas em 2030 (LONDON, 2020). Esse aumento da produção de cimento pode levar a uma maior pressão sobre o meio ambiente e a uma piora da qualidade do ar, do solo e da água nas regiões de produção.

Nesse contexto, é importante buscar alternativas para o uso do cimento, que possam ser mais sustentáveis e eficientes. Alguns autores apontam a utilização de adições minerais como uma dessas alternativas. Segundo Ramli et al. (2017), as adições minerais podem melhorar as propriedades mecânicas e térmicas do concreto, além de reduzir sua demanda por cimento.

O uso de adições minerais no concreto estrutural também é destacado por Ravikumar et al. (2019), que afirmam que essas adições podem melhorar a resistência e a durabilidade do concreto, além de diminuir seu impacto ambiental. De acordo com esses autores, a utilização de adições minerais pode resultar em reduções de até 50% no consumo de cimento, o que pode levar a uma significativa redução das emissões de gases de efeito estufa.

O fíler calcário tem sido estudado como uma das adições minerais para substituir parcialmente o cimento na produção de concretos. Segundo estudo de Bentz (2005), é possível substituir até 20% do cimento por fíler calcário sem afetar significativamente as propriedades do concreto. Este mineral refere-se a partículas com tamanhos menores que 80  $\mu\text{m}$ , resultado da moagem de rocha calcária. Este material é normalmente considerado uma adição inerte (LIU et al., 2011). O fíler é uma substância pulverizada extremamente fina que é amplamente utilizada na indústria da construção. Ele é adicionado a concretos e argamassas como material de enchimento, aumentando sua compactação e melhorando a distribuição granulométrica das partículas (MARANGON, 2006).

Além da alta finura, o fíler calcário também apresenta uma baixa reatividade química com o cimento, o que pode reduzir a formação de compostos indesejáveis, como a etringita, que pode causar expansão indesejável e danos à estrutura do concreto (BENTZ, 2005). Além disso, o fíler calcário também pode contribuir para a redução da permeabilidade do concreto, o que aumenta sua durabilidade e resistência a agentes agressivos (POON et al., 2000).

Outra propriedade importante do fíler calcário é sua capacidade de aumentar a trabalhabilidade do concreto sem aumentar a quantidade de água, o que pode melhorar a compactação da mistura e reduzir o consumo de água e cimento, contribuindo para a sustentabilidade da construção civil (ALVES et al., 2015).

O fíler calcário atua nos materiais de cimento por intermédio de três mecanismos distintos: o efeito de fíler, a nucleação, e o efeito químico.

O fenômeno do efeito do fíler está fortemente ligado ao tamanho das partículas envolvidas. Quando as partículas do fíler calcário são mais finas comparadas aos grãos do cimento, elas preenchem os espaços vazios entre os grãos de cimento, melhorando a distribuição de tamanho das partículas e, conseqüentemente, aumentando o empacotamento destas. Isso resulta em uma menor necessidade de água, uma maior resistência à compressão e uma maior durabilidade no material (CYR et al., 2006).

No efeito nucleação o fíler calcário serve como centros para a precipitação dos produtos de hidratação, aumentando a velocidade das reações de hidratação (SOROKA; STERN, 1976). A superfície energética e a habilidade de adsorção do fíler calcário aumentam com a redução do seu tamanho (BENTZ et al., 2015). O fíler calcário tende a ser mais efetivo na formação de hidratos do que outras adições, como o quartzo ou a escória, resultando em um efeito de nucleação mais acentuado em comparação com outros aditivos (BERODIER; SCRIVENER, 2014)

O efeito químico do uso de fíler calcário no cimento Portland é devido à formação de carboaluminatos na mistura. Em geral, 4% de adição de fíler calcário já é suficiente para produzir este efeito. O efeito químico é influenciado pelo tamanho das partículas do fíler calcário, pela quantidade de alumina no cimento ou em outras adições, como o metacaulim. O fíler calcário pode reagir com o  $\text{C}_3\text{A}$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$  do cimento, ou com aluminatos de outras adições, formando carboaluminatos. No entanto, como a quantidade de fases aluminatos no clínquer é limitada, o efeito químico do fíler calcário normalmente é moderado (KAKALI et al., 2000; MENÉNDEZ et al., 2003; WEERDT et al., 2011).

Estudos como o de Daminieli (2013) propõem a utilização de fíler como uma ferramenta para aumentar o empacotamento e dispersão das partículas, aprimorando o comportamento reológico da mistura e reduzindo a quantidade de água utilizada em concretos e argamassas

Para maximizar o efeito fíler e obter concretos com menor permeabilidade, é indispensável realizar o estudo de empacotamento das partículas, realizado por meio de uma análise cuidadosa das composições granulométricas dos materiais, através de modelos matemáticos, tais como o de Andreasen Modificado (OLIVEIRA et al., 2000, p.125). Através da granulometria previamente analisada, procura-se preencher os espaços entre os grãos maiores com outros de tamanho menor, baseados em cálculos ou experimentos, a fim de alcançar o máximo de compactação entre as partículas do material composto, o que resulta em uma maior resistência mecânica, maior durabilidade e prolongamento da vida útil das peças estruturais.

### 3 MÉTODO DA PESQUISA

Este estudo é experimental e aplicado, com uma abordagem quantitativa. Estabelece de maneira sistemática uma série de procedimentos para ajudar a desenvolver informações sobre o uso do material alternativo em questão. Além disso, ele sintetiza e analisa esses dados para criar uma explicação mais completa do fenômeno em questão (LAKATOS; MARCONI, 2001).

#### 3.1 Caracterização dos materiais

Para a elaboração do concreto foram utilizados agregados miúdos, graúdos, aglomerantes, aditivos químicos e água. A areia, usada como agregado de menor diâmetro, foi dividida em três faixas granulométrica: fina, média e grossa. O agregado graúdo utilizado foi uma brita cascalhinho. A escolha do aglomerante se deu pelo cimento CPV - ARI, por ter uma alta reatividade em baixas idades tendo a peculiaridade de atingir alta resistência já nos primeiros dias de aplicação. O aditivo químico empregado foi o superplastificante ADVA 525, por ser usado para produzir concreto com baixa relação água/cimento e com um nível normal de trabalhabilidade. Por fim, a água foi coletada nas dependências do IFPB, cujo abastecimento é feito pela CAGEPA.

##### 3.1.1 Cimento

Optou-se pela utilização do cimento Portland (CPV-ARI) especificado pela NBR 5733/1991. Por não possuir adições pozolânicas em sua composição, o estudo das influências das adições minerais não sofreu interferências de outros compostos, podendo assim serem analisadas de forma mais precisa. A Tabela 1 detalha a composição do cimento CPV – ARI.

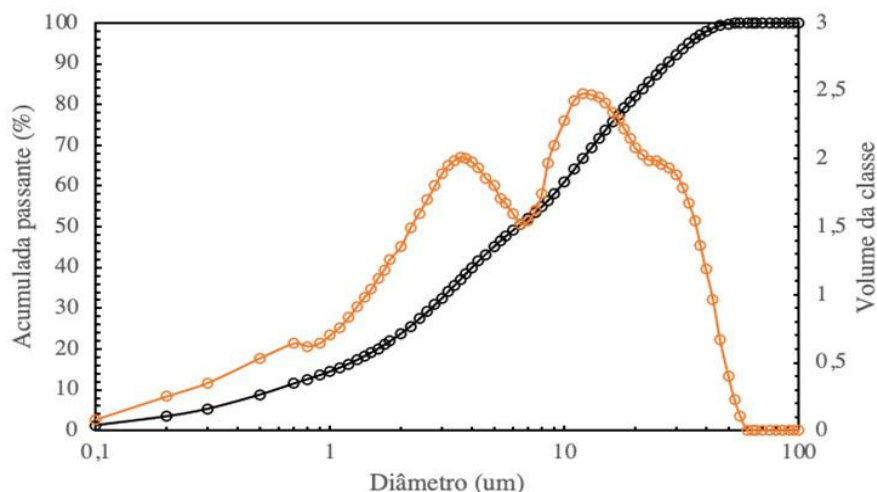
Tabela 1 – Composição química do cimento utilizado.

Óxidos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	BaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	ZrO <sub>2</sub>
(%)	22,11	3,99	3,41	1,97	0,6	0,3	0,37	62,25	0,09	0,64	3,51	0,03	-

Fonte: Autoria própria (2023).

A massa específica do cimento foi determinada de acordo com a ABNT NBR NM 23:2000, em que se obteve o valor de 3,04 g/cm<sup>3</sup>. Além disso, um ensaio de granulometria foi conduzido no material utilizando um equipamento CILAS 1090 SECO, que é capaz de medir partículas dentro da faixa de 0,10 a 500,00 micrômetros, divididas em 100 classes distintas. O resultado obtido neste ensaio pode ser visualizado na Figura 1, a qual apresenta os dados obtidos pela análise de granulometria a laser.

Figura 1 - Granulometria a laser do cimento.



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.2 Fíler calcário

A granulometria do fíler foi realizada no equipamento CILAS 1090 SECO. Esse teste permitiu determinar que o tamanho médio das partículas do fíler foi de 14,90  $\mu\text{m}$ , conforme ilustrado na Figura 2. É importante notar que a finura do fíler ficou próxima do cimento, o que sugere a possibilidade de substituição parcial do aglomerante por fíler calcário, como sugerido por testes anteriores realizados por Bentz (2005).

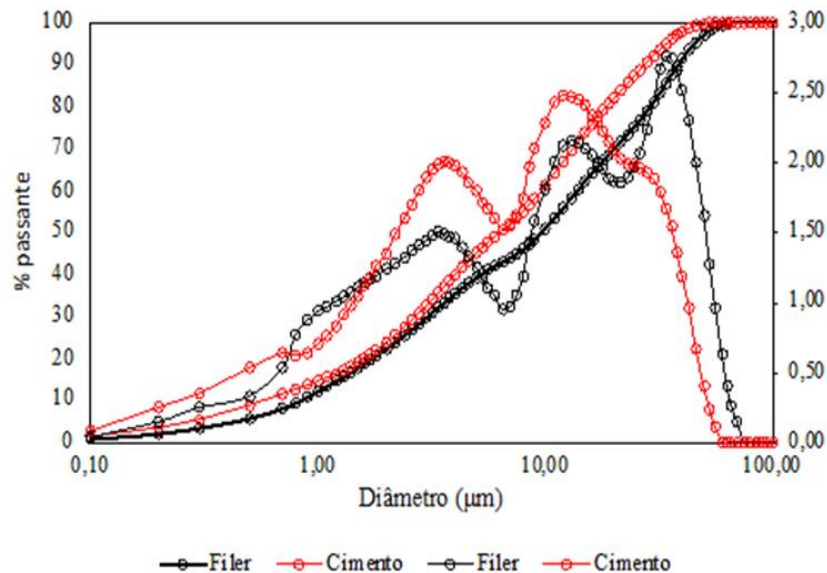
Além disso, a composição química do fíler foi obtida através do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) e os resultados foram apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do fíler calcário.

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

Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 2 – Granulometria a Laser do fíler calcário



Fonte: Autoria própria (2023).

### 3.1.3 Agregados

Desejava-se separar os agregados em diferentes diâmetros para que o empacotamento fosse satisfeito, dessa forma, foram divididos e classificados como areia fina, média e grossa. O procedimento utilizado foi o peneiramento manuseando diferentes tipos de peneiras, cada uma com sua abertura específica. Para separar a areia grossa, uma peneira de 1,2mm foi escolhida, em seguida, empregando uma peneira com abertura de 0,6mm foi separada areia média e fina.

Portanto, designou-se areia 1 (areia grossa) a parte retida na peneira de 1,2mm, já a areia 2 (areia média) igual à passante pela 1,2mm e retida na 0,6mm. Por último, chama-se areia 3 (areia fina) aquela que passa pela peneira de 0,6mm. Para determinar a composição granulométrica das faixas de areias utilizadas, foi seguida às normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A massa específica das areias foi obtida conforme detalha a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Um molde tronco de cone foi utilizado para observar o momento em que o agregado iria apresentar-se saturado e seco, desmoronando-se após a retirada do molde.



## **3.2 DOSAGEM DO CONCRETO**

### **3.2.1 Empacotamento de partículas**

Para encontrar a adequada distribuição granulométrica e satisfazer a condição de empacotamento foi utilizado o modelo teórico de Andreassen Modificado (ou Alfred). A distribuição granulométrica virtual deveria apresentar um valor aproximado ao do sistema real, comprovado em simulações numéricas e misturas reais por Santos et. al. (2021).

Para garantir uma correta escolha da parcela e do diâmetro apropriado dos materiais particulados, de maneira que os vazios maiores sejam preenchidos pelos menores, utilizou-se o software Q-Mix, desenvolvido por Santos et. al. (2021). O referido programa contribui nos cálculos da proporção ótima, otimizando a mistura dos agregados, bem como compreende o modelo de empacotamento A& Modificado.

Em seguida, será exibido o passo a passo para utilização do Q-Mix com o intuito de otimizar o empacotamento.

1° Passo: Anexação dos dados obtidos no ensaio de granulometria dos agregados.

É solicitado ao usuário que insira os valores obtidos através do ensaio de granulometria, e nomeie o respectivo agregado.

2° passo: Seleção dos parâmetros de entrada.

Para o cálculo das curvas granulométricas ideais por meio dos modelos de empacotamento, o software usa o método de Alfred. Para esse fim, cabe ao usuário selecionar o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem empregados.

3° passo: Rodar a mistura e adquirir as porcentagens otimizadas.

Após a escolha dos parâmetros de entrada e execução do algoritmo, aparecerá no canto inferior esquerdo da tela o modelo de Alfred. Deve-se agora, apenas clicar no comando “resolver”.

Para a obtenção de resultados mais satisfatórios é importante que os agregados escolhidos sejam de boa qualidade, pois é através dos dados de entrada desses que a base de cálculo do software é construída.

## **3.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA**

Inicialmente, foram separados e armazenados temporariamente todos os materiais necessários para a realização do concreto, como cimento, areias finas, médias, grossas, fíler calcário, superplastificante e água. Os materiais secos foram acomodados em sacos plásticos translúcidos, enquanto o superplastificante e a água foram depositados em béqueres e baldes.

Em relação aos aditivos, foi utilizado 1,8% da massa total nos concretos com fíler e 0,8% nos traços de referência. Caso fosse necessário, era adicionado mais volume do superplastificante, respeitando as quantidades máximas previstas para a mistura.

O procedimento de elaboração do concreto começou com o lançamento de brita e parte da água na betoneira de 150 L. Após alguns segundos com o equipamento ligado, metade do aglomerante foi inserido, seguido pelo despejo intercalado de 100% da areia grossa para promover uma melhor mistura com o aglomerante, especialmente nos traços com fíler. Em seguida, a maior parte da água foi adicionada na betoneira, deixando apenas uma pequena fração no balde para misturar com o aditivo, caso necessário. Em seguida, adicionou-se a areia média e fina gradualmente. Após alguns segundos com a mistura rodando na betoneira, o restante do aglomerante foi adicionado. Por fim, o aditivo foi adicionado ao concreto, juntamente com a água calculada e armazenada nos béqueres.

O concreto foi moldado em formas metálicas de formato cilíndrico com dimensões de 10x20 cm. Cada mistura resultou em 12 corpos de prova, que foram compactados mecanicamente. Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e submersos em uma solução de água saturada com hidróxido de cálcio por um período de 7 e 28 dias para a realização de testes de

resistência.

### 3.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

#### 3.4.1 Ensaio de resistência (compressão axial)

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em amostras cilíndricas no estado endurecido, de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018) aos 7, 28 e 90 dias. Utilizou-se uma prensa hidráulica, localizada no laboratório de Estruturas do IFPB – Campus Cajazeiras.

#### 3.4.2 Migração de cloretos

Para realizar o ensaio, foram seguidas as orientações estabelecidas no procedimento de preparação do corpo de prova e do teste de migração descritos na norma NT Build 492 (1999). Esta norma tem como objetivo determinar o coeficiente de difusão de cloretos em concretos, argamassas e outros materiais à base de cimento, através de um método de migração em estado não estacionário. O coeficiente de difusão é utilizado como indicador da resistência do material à penetração de cloretos.

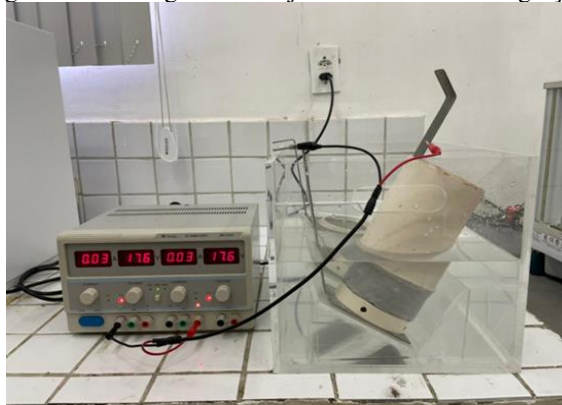
Após um período de cura submersa em uma solução saturada de cal, foram retiradas do tanque, com idade de 28 dias, duas amostras cilíndricas medindo (10x20) cm de cada traço (T160, T240, T320, TRSE e TRCE). Os corpos de prova foram divididos em (cinco) partes, obtidas cortando-os na direção perpendicular ao seu eixo longitudinal, descartando as partes das extremidades e utilizando as três restantes no ensaio de migração. Assim, para cada corpo de prova, foram selecionadas três amostras, resultando em seis amostras a serem testadas para cada traço.

Para começar o ensaio foi necessário preparar duas soluções distintas, uma catódica e outra anódica. A solução catódica foi armazenada em um recipiente de acrílico e contém uma proporção de 100 gramas de cloreto de sódio (NaCl) para cada 900 gramas de água e foi conectada no polo negativo da fonte de alimentação. Já a solução anódica é composta por 12 gramas de hidróxido de sódio (NaOH) para cada litro de água e foi colocada em um tubo de plástico acima das amostras e conectada no polo positivo da fonte de alimentação. Ambas as soluções devem ser mantidas em uma faixa de temperatura específica, geralmente entre 20-25° C.

Para conectar o circuito à fonte de energia foram utilizadas chapas de aço inoxidável, sendo o polo positivo ligado ao ânodo e o negativo ao cátodo. As amostras foram posicionadas em uma caixa específica, conforme ilustrado na Figura 3. Antes de iniciar o ensaio, as amostras foram impermeabilizadas em toda sua face lateral e acondicionadas em tubos de PVC para garantir que somente as faces das superfícies tenham contato com as soluções.

Durante o ensaio, as amostras são submetidas a uma diferença de potencial entre as soluções catódica e anódica. Os resultados do ensaio são utilizados para avaliar a resistência do concreto à corrosão causada pela migração de cloretos.

Figura 3 - Montagem do conjunto do ensaio de migração.



Fonte: Arruda (2022).

Após o período estabelecido para o ensaio, os corpos de prova foram separados em amostras com espessura de 50 mm. Em seguida, é aplicado o método colorimétrico, que consiste na aplicação de uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ) na superfície do concreto. Isso inicia uma reação química, resultando na formação de um precipitado branco onde há a presença de íons livres de cloreto. Com isso, é possível medir a penetração dos cloretos no concreto e, posteriormente, calcular o coeficiente de difusão através da segunda Lei de Fick. O coeficiente de difusão é uma medida da capacidade do concreto de impedir a migração de cloretos através de sua massa.

### 3.4.3 Absorção por capilaridade

O teste de absorção por capilaridade em concretos é utilizado para avaliar a capacidade do concreto em absorver água através de seus poros capilares. Esse tipo de teste é importante porque a absorção excessiva de água pode levar à deterioração do concreto, como a corrosão de armaduras, a redução da resistência mecânica e o surgimento de fissuras. Em resumo, o teste fornece informações importantes sobre a capacidade de absorção de água do material, ajudando a identificar possíveis problemas de durabilidade e auxiliando no desenvolvimento de estratégias de proteção e conservação do concreto.

O processo de teste de absorção por capilaridade seguiu as diretrizes descritas na NBR 9779 (ABNT, 2012) e começou com a retirada dos corpos de prova da água saturada com cal, após 56 dias. Em seguida, esses corpos de prova foram levados para uma estufa com temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  para que sejam estabilizados e, conseqüentemente, mantenham-se com massa constante. Este processo é realizado até que a diferença entre duas pesagens consecutivas, realizadas em períodos de 24 horas, não exceda 0,5% do valor obtido. Quando atingido este equilíbrio, os corpos de prova são resfriados a uma temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e novamente são determinadas suas massas.

No ensaio, os corpos de prova são colocados em um suporte no fundo para que os corpos de prova não entrem em contato com o recipiente. Foram utilizadas seções de fios condutores de  $1,5\text{mm}^2$ , e assim, a quantidade de água se mantenha constante, sendo mantida a  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior dos corpos de prova. O recipiente é então mantido em temperatura ambiente.

Durante o ensaio, a massa dos corpos de prova foi medida nos intervalos de 3, 6, 24,48 e 72 horas, contadas a partir do momento em que são colocados em contato com a água. Antes de cada medição, os corpos de prova foram enxutos com um pano. Após a última pesagem, os corpos de prova são submetidos a uma compressão diametral, conforme previsto pela NBR 7222, para que se possa analisar a distribuição de água em seu interior.

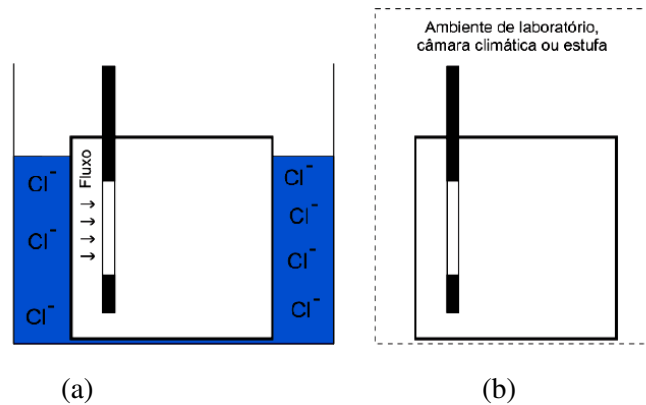
Para obtenção do coeficiente de absorção utilizou-se uma planilha Excel para facilitar os cálculos. A massa saturada menos a massa seca, dividido pela área da seção transversal, é o coeficiente C.

### 3.4.4 Ciclos de imersão e secagem

O ensaio consiste em ciclos de imersão e secagem dos CPs, caracteriza-se por submeter os corpos de prova a períodos de imersão total em solução agressiva e posterior secagem em estufa.

Foi utilizada uma solução de cloreto de sódio a 1M, concentração mais empregada na literatura (PAGE et al., 2002; VIEIRA, 2003; SILVA, 2006). Com relação aos ciclos, foram empregados os períodos de 2 dias para imersão e 5 dias para secagem, também empregados na literatura (CABRAL, 2000; SANTOS, 2006, ANGST et al., 2011). A secagem foi realizada em estufa, com temperatura de  $40^\circ\text{C}$  (VIEIRA, 2003; TAVARES et al., 2006; KISHIMOTO, 2010). A Figura 4 mostra o detalhamento do ensaio de imersão e secagem.

Figura 4 - Configuração de ensaio de imersão e secagem.



Fonte: FERREIRA (2015).

### 3.4.5 Monitoramento eletroquímico

O monitoramento eletroquímico foi realizado através de medidas de potencial de corrosão em circuito aberto e da técnica eletroquímica de resistência à polarização ( $R_p$ ) com compensação da queda ôhmica para obtenção da densidade de corrente instantânea de corrosão. Essa técnica é amplamente empregada em estudos sobre o teor crítico de cloretos, com o objetivo de detectar a despassivação das armaduras (ANGST et al., 2009; ANGST et al., 2011, MEIRA et al., 2014, SOUZA, et. al., 2017).

O equipamento empregado nas leituras foi um potenciostato de bancada, modelo VersaSTAT 3, Princeton Applied Research. Foi empregado um eletrodo de referência de  $Cu|CuSO_4$  (ESC) e um contra eletrodo de aço inoxidável, mantendo-se todo o conjunto envolto em uma gaiola de Faraday para evitar interferências externas, de acordo com a metodologia utilizada por Ferreira (2015).

A norma americana ASTM C876 (2009) sugere a probabilidade de corrosão em relação ao potencial de corrosão medido, como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação dos potenciais de corrosão de acordo com a ASTM C876.

Potencial - E (mV-ESC)	Probabilidade de corrosão
$E > -200$	>10
$-200 \geq E \geq -350$	Incerteza em relação a corrosão
$E < -350$	> 90%

Fonte: ASTM C876 (2009).

As medidas de corrosão, geralmente, não são feitas diretamente na interface aço/concreto, existe o revestimento do concreto que causa redução na leitura real dos valores de potencial do aço, visto que, de acordo com Cascudo (1997), um concreto de cobertura de alta resistividade pode interferir na medida de potencial. Além disso, o mesmo autor ressalta que a profundidade do revestimento, frente de carbonatação, cloretos e teor de umidade do concreto, também podem interferir nas medidas.

Outra técnica não destrutiva, a resistência de polarização linear (LPR), também é usada para caracterizar a iniciação e propagação da corrosão de acordo com a medida da corrente de corrosão (FAHIM et al., 2018).

Estas técnicas baseiam-se na suposição de que existe uma relação linear entre uma pequena polarização ( $\Delta E < 20$  mV) em torno do potencial de circuito aberto e a corrente correspondente ( $\Delta I$ ), tal que  $R_p = \Delta E / \Delta I$ , onde  $R_p$  é chamada de resistência de polarização. Uma vez determinada a  $R_p$ , a densidade de corrente de corrosão da armadura no concreto,  $I_{corr}$ , pode ser estimada usando a equação de Stern-Geary (1) (FAHIM et al., 2018):

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c) \times \frac{\Delta E}{\Delta I}} \quad (1)$$

Como  $R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$ , e  $B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3(\beta_a + \beta_c)}$ , a equação pode ser simplificada, logo:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

Onde:

$\beta_a$  e  $\beta_c$  = constantes de Tafel anódica e catódica, respectivamente;

$\Delta E$  = potencial aplicado;

$\Delta I$  = variação de corrente;

B = constante de Stern-Geary.

As constantes de Tafel podem ser determinadas experimentalmente, porém seria necessária polarização elevada, o que implicaria perturbações irreversíveis no sistema, então, utilizando a equação (2), adota-se o valor para  $B = 26 \text{ mV}$  (ALONSO *et al.*, 2004), considerando as armaduras inseridas no concreto, em condição ativa.

Dividindo-se o valor de  $I_{corr}$  pela área exposta à corrosão, obtém-se a velocidade de corrosão por unidade de área, normalmente expressa em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (ALONSO *et al.*, 2004). Geralmente, quando a  $I_{corr}$  é maior que  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , considera-se a despassivação da armadura.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para analisar os dados apresentados em tabelas, foi utilizada a ferramenta estatística ANOVA (Análise de Variância). Essa ferramenta permite realizar comparações entre múltiplos grupos, baseando-se no teste F, para estabelecer a aceitação ou rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ), que é determinada através da igualdade entre as médias comparadas. Além disso, também foi utilizado o teste Tukey no processo de caracterização dos dados para identificar diferenças e homogeneidade de variância entre os grupos. O nível de significância adotado para o estudo foi de 5%.

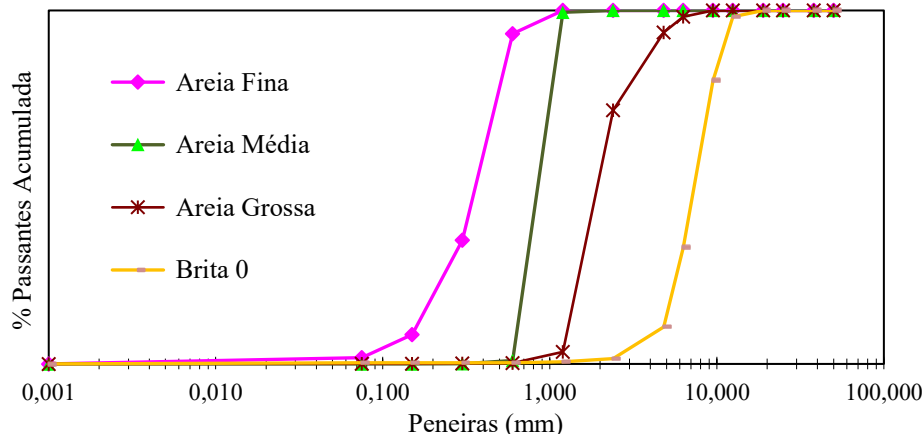
## 4 RESULTADOS DA PESQUISA

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Analisar a caracterização de materiais através do empacotamento de partículas é fundamental para otimizar a dosagem dos componentes em uma formulação. A distribuição granulométrica adequada dos agregados é uma condição primordial para alcançar esse objetivo.

Os resultados da análise são apresentados na Figura 5, que mostra as curvas de massa acumulada passante, obtidas a partir da composição granulométrica das diferentes faixas de areias utilizadas no concreto.

Figura 5 - Curvas granulométricas dos agregados.



Fonte: Autoria própria (2023).

O objetivo da Tabela 3 é apresentar os valores medidos das massas específicas de duas amostras distintas de areia, de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2009). Esses valores são relevantes para avaliar a qualidade das amostras e a sua aptidão para serem utilizadas em formulações para a construção civil.

Tabela 3 – Massas específicas dos agregados

Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )			
Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita 9,5
2,66	2,64	2,65	2,63

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS

A Tabela 4 apresenta informações sobre o consumo de materiais utilizados em formulações de concretos. Os dados apresentados são o resultado de um processo de otimização dos agregados, que buscou determinar a porcentagem ideal para garantir o melhor desempenho desses materiais.

O cálculo dos traços dosados foi realizado por meio do software Q-mix (ARRUDA, 2021), que permite a determinação da dosagem ideal dos materiais a partir de dados prévios.

Tabela 4 - Consumos de materiais dos traços.

	Consumo dos traços (kg/m <sup>3</sup> )							
	Cimen to	Filer	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita 9,5	Brita 19	Água
<b>T160</b>	161,86	222,56	200,70	437,83	510,66	674,95	-	178,05
<b>T240</b>	253,34	147,78	209,42	456,85	532,85	704,27	-	144,40
<b>T320</b>	327,13	61,34	202,82	442,44	516,05	682,06	-	173,38
<b>T – RCE</b>	384,00	-	202,11	436,55	509,31	675,03	-	174,19
<b>T – RSE</b>	384,01	-	-	865,03	-	-	962,05	195,85

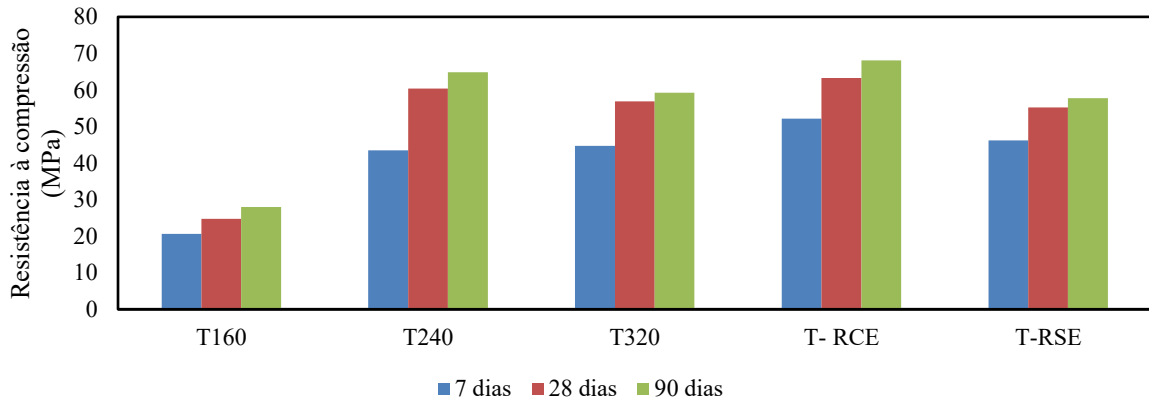
Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para cada traço, mostrando o efeito na resistência com o aumento da percentagem em massa de filer calcário, aos 7, 28 e 90 dias.

Conforme esperado, verificou-se que as resistências à compressão aumentaram com o tempo e diminuíram com o acréscimo da adição do mineral, exceto pelo traço T240 que apresenta uma proporção de filer intermediária entre o pior resultado de compressão, T160, e o melhor, T - RCE. Comparando o traço T240 com os demais de filer, este foi o que apresentou maiores resistências à compressão em todas as idades, sendo mais resistente até que o traço de referência sem empacotamento nas idades de 28 e 90 dias. É importante ressaltar que as misturas T160, T240, T320, T - RCE e T-RSE alcançaram uma resistência mínima de 20 MPa aos 28 dias, como exigido pelas normas.

Figura 6 - Resistência à compressão dos concretos estudados aos 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Autoria própria (2023).

Bentz et al. (2000) concluíram que, em algumas faixas de substituição, a adição de fíler calcário resultou em um aumento na resistência à compressão do concreto, em outras proporções houve uma queda nesta propriedade.

Outros estudos também corroboram essa tendência de redução na resistência à compressão com o aumento do teor de fíler calcário (FC) no concreto. Por exemplo, em um estudo realizado por Silva et al. (2015), foi observada uma diminuição na resistência à compressão com o aumento do teor de FC em concretos com substituição de até 30% de cimento. Os autores concluíram que o aumento do teor de FC resultou em uma redução na resistência à compressão devido às propriedades menos reativas do FC em comparação com o cimento Portland.

Por outro lado, o estudo de Marvila et al. (2018) observou que a redução de resistência com um teor de 15% de FC foi relativamente pequena quando comparada aos níveis mais altos de substituição. Isso sugere que a influência do teor de FC na resistência à compressão é mais significativa em níveis mais altos de substituição, visto que em níveis mais baixos o empacotamento da matriz cimentícia promovida pelo fíler compensa a redução dos produtos de hidratação do cimento. A Figura 9 apresenta o resultado da análise estatística dos resultados de resistência.

De acordo com o teste Tukey realizado, foi observada uma diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão do traço T160 em comparação com todos os outros traços analisados (T.240, T.320, T-RCE, T-RSE), indicando que o traço T160 apresenta uma resistência diferente e inferior. Outra análise importante foi a comparação do concreto T240 com as outras composições, este não apresenta diferença estatística significativa com o concreto T320, mesmo este último contendo 29,12% a mais de cimento Portland. Esse resultado indica que esta proporção de fíler alcançou o melhor empacotamento da matriz.

Figura 7 – Teste de Tukey para resistência à compressão dos concretos

	T160	T240	T320	T-RCE
T160		Green		
T240			Red	Green
T320				Green
T-RCE				
T-RSE				
Apresenta diferença estatística	Green	Não apresenta diferença estatística		Red

Fonte: Autoria própria (2023).

#### 4.4 ÍNDICE DE LIGANTES

A obtenção de um concreto de baixo impacto ambiental vai além da simples substituição do clínquer por adições minerais. Para produzir concretos mais eficientes em termos ambientais, é necessário reduzir o consumo de ligantes ao mesmo tempo em que se aumenta ou mantém o desempenho mecânico. Com base nessa premissa, Damineli et al. (2010) propuseram um indicador, denominado índice de Ligantes (IL), que avalia a eficiência dos concretos considerando a quantidade de ligante necessária para alcançar uma resistência mecânica de 1 MPa, medido em  $\text{kg.m}^{-3}$ . Assim, o Índice de Ligantes permite uma análise mais abrangente da eficiência dos concretos, levando em conta tanto o aspecto ambiental quanto o desempenho mecânico.

$$IL = \frac{C}{R} \quad (3)$$

Onde:

IL = índice de ligantes, em  $\text{kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$ ;

C = consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ );

R = resistência à compressão (Mpa).

Para cada traço de concreto analisado, foi calculado o índice de Ligantes (IL), levando em consideração a resistência à compressão nas idades de 7, 28 e 90 dias, juntamente com os respectivos consumos de cimento. Seguindo a classificação proposta por Damineli (2013), que considera concretos de alta eficiência aqueles com IL de até  $5 \text{ kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$ , aos 28 dias, os valores obtidos foram comparados para determinar a eficiência dos traços estudados. A Tabela 5 apresenta os resultados de IL para todos os concretos

Tabela 5 – Índice de ligante dos concretos estudados com 7, 28 e 90 dias.

Índice de Ligantes							
Traço	Consumo de cimento ( $\text{kg/m}^3$ )	Resistências (MPa)			IL - 7 dias	IL - 28 dias	IL - 90 dias
		7 dias	28 dias	90 dias			
T.160	162,65	20,59	24,71	27,94	7,90	6,58	5,82
T.240	253,33	43,51	60,40	64,87	5,82	4,19	3,90
T.320	327,13	44,72	56,84	59,26	7,32	5,76	5,52
T - RCE	384,01	52,14	63,30	68,12	7,74	6,07	5,63
T-RSE	384,00	46,16	55,18	57,72	8,32	6,96	6,65

Fonte: Autoria própria (2023).

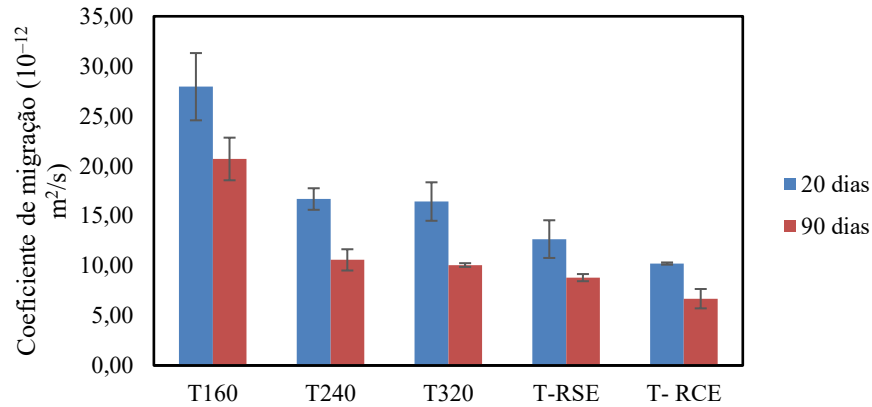
Observa-se na Tabela 5 que o IL diminui seu valor ao passo que o teor de fíler calcário aumenta, com destaque para o traço T240, que apresentou valores inferiores aos concretos com mais adição mineral, evidenciando que existe uma porcentagem ótima de fíler a ser adicionado ao concreto para se obter bons índices do ligante. O traço em questão obteve um melhor desempenho comparado até com o traço de referência com empacotamento, o que significa que de fato, a substituição parcial do cimento por fíler calcário é de significativa relevância no IL.



#### 4.5 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Os testes de migração acelerada em estado não estacionário foram realizados aos 28 e 90 dias de idade do concreto, seguindo o procedimento descrito pela NT BUILD 492 (NORDTEST, 1999). Os valores dos coeficientes de cada traço em suas respectivas idades estão representados na Figura 8.

Figura 8 - Migração de cloretos dos traços estudados.



Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados obtidos demonstraram que a substituição parcial do cimento Portland por fíler calcário resultou em um aumento nos coeficientes de migração de íons cloreto em todas as idades, quando comparado aos traços de referência.

Por outro lado, nota-se uma significativa redução dos coeficientes nos concretos com idades mais avançadas de cura. Aos 90 dias o traço T160 mostrou-se 25,92% mais resistente aos ataques de cloretos quando comparado a 28 dias de cura. Nos traços seguintes, com maiores consumos de cimento, houve também uma redução da migração de cloreto, porém com menores percentuais comparados ao primeiro teste aos 28 dias.

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os estudos de Bentz et al. (2009) e Ghrici et al. (2007), estes autores argumentam que ocorre um aumento na penetração de íons cloreto quando há substituição de fíler calcário (FC) em comparação com concretos que não possuem essa substituição. Esses autores explicam que o aumento na penetração de íons cloreto é resultado da reação do fíler calcário com os aluminatos presentes no cimento Portland, especificamente os compostos C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF. Essa reação leva à formação de compostos que possuem uma capacidade de ligação inferior aos cloretos.

Essa menor capacidade de ligação dos compostos formados pela reação do fíler calcário com os aluminatos resulta em uma maior facilidade de penetração dos íons cloreto no concreto. Essa conclusão é respaldada por Fagerlund (2005), que também destaca a formação de compostos com menor capacidade de ligação em relação aos cloretos.

Tabela 6 – Classificação de acordo com a resistência de penetração dos cloretos

Difusão de cloretos (D28 x 10 <sup>-12</sup> m²/s)	Resistência a penetração dos cloretos
>15	Baixa
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2,5 - 5	Muito Alta
<2,5	Extremamente Alta

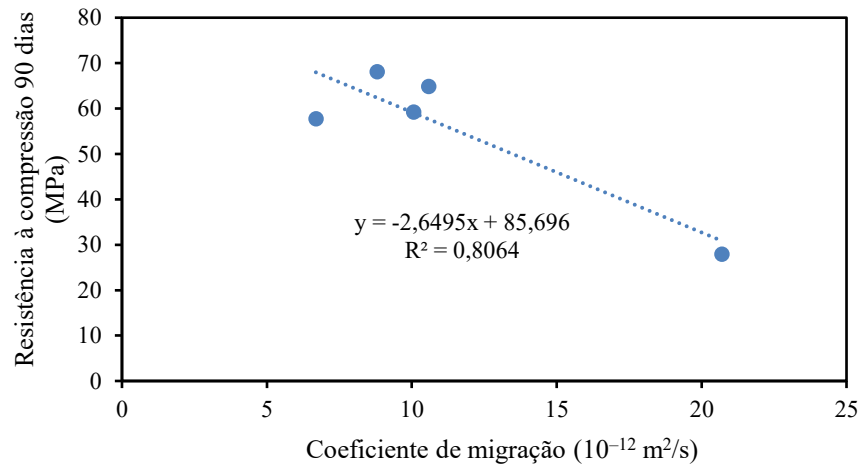
Fonte: Adaptada de Nilsson, Ngo e Gjorv (1998)

A análise da Tabela 6 revela que os traços T-RCE e T-RSE demonstraram uma resistência moderada à migração de cloretos, ao passo que os traços T-320, T-240 e T-160 apresentaram uma

resistência baixa, aos 28 dias.

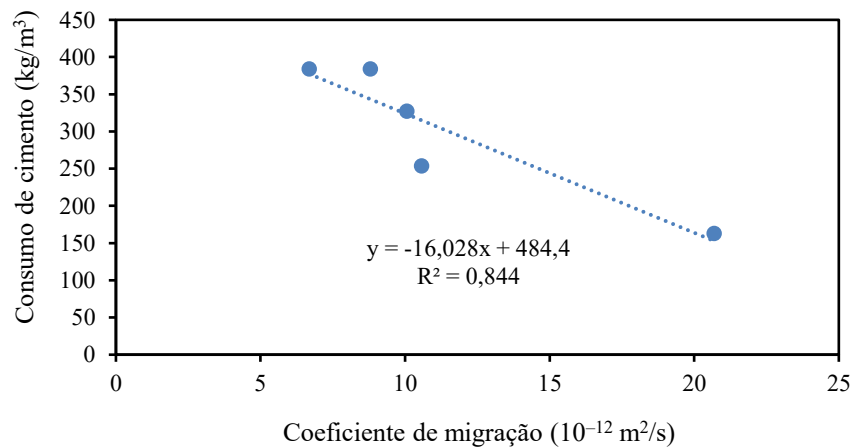
Foram realizadas correlações entre os coeficientes de migração de cloreto e outros parâmetros de estudo do concreto, como resistência a compressão e consumo de cimento, com o objetivo de se estudar as consequências de determinadas faixas desses índices na penetração de cloretos. Os resultados obtidos estão representados em formato de gráfico de dispersão nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Correlação entre migração de cloretos e resistência à compressão.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 10 – Correlação entre migração de cloretos e teor de cimento.



Fonte: Autoria própria (2023)

Quando relacionado os resultados de migração de cloretos com a resistência à compressão e o consumo de cimento, foi possível observar que o consumo de cimento explica melhor os resultados da migração. Contudo, a correlação com a resistência apresenta  $R^2 = 0,8064$ , assim, o efeito de filler na rede de poros da matriz cimentícia teve efeitos positivos na durabilidade dos concretos.

Mehta, P. K. e Monteiro, P. J. M. (2014) mencionam que a resistência à compressão está diretamente relacionada à durabilidade do concreto, incluindo a redução do coeficiente de migração de cloretos. Eles explicam que a matriz de concreto mais densa e com maior resistência tem menor porosidade, o que dificulta a penetração dos íons cloreto.

Seguindo a mesma lógica de resultados, o gráfico da Figura 12, que relaciona consumo de cimento com o coeficiente de migração de cloretos, reforça que quanto maior o consumo de cimento,

menor é a facilidade de entrada de cloretos no concreto

Segundo Beushausen, H. (2008), um menor consumo de cimento, resultando em uma maior relação água-cimento ( $a/c$ ), pode levar a uma maior porosidade e, conseqüentemente, aumentar a permeabilidade do concreto. Ele argumenta que a porosidade é um fator crítico na migração de cloretos, pois a presença de poros conectados facilita a penetração dos íons cloreto na matriz de concreto.

#### 4.6 ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE

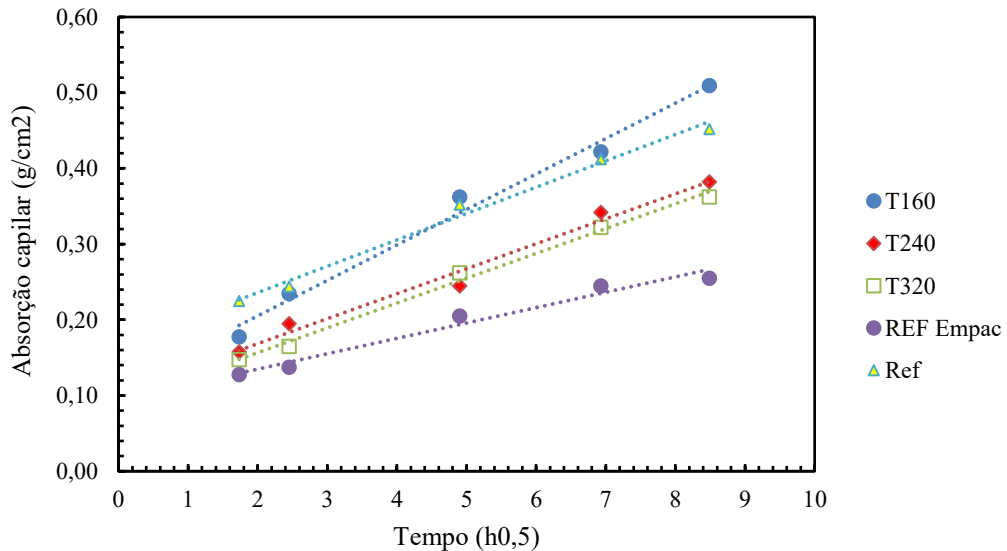
A absorção de água por capilaridade dos corpos de prova cilíndricos (C) é calculada usando a seguinte equação:

$$C = \frac{Msat - ms}{s} \quad (4)$$

onde S é a área da seção transversal em (cm<sup>2</sup>).

Ao traçar um gráfico com os valores de C (g/cm<sup>2</sup>) em relação à raiz quadrada do tempo, é observada uma relação linear, como representado na Figura 11. A inclinação dessa curva é o coeficiente de absorção capilar. Observou-se que nos traços com a presença de fíler, existe uma proporção adequada da porcentagem utilizada deste material que gera bons resultados de absorção. O T160, cuja composição apresenta elevada quantidade de fíler, teve absorção maior que o T320 da ordem de 40%, traço esse que houve menor adição do mineral. Nota-se também a grande influência do empacotamento de partículas no resultado de absorção por capilaridade, devido ao seu preenchimento de vazios, o traço T - RCE foi o que obteve melhores resultados no teste, 56% menor que o traço de referência sem empacotamento.

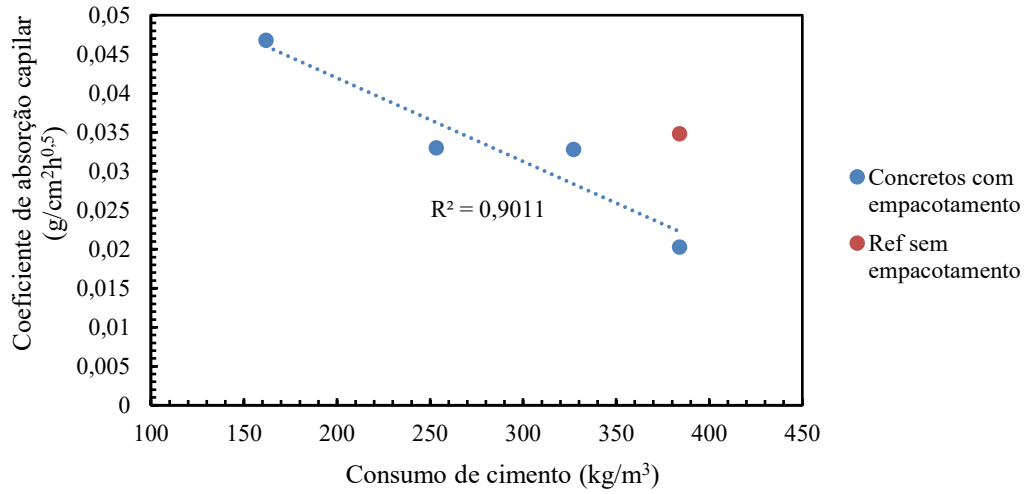
Figura 11 – Correlação entre absorção e a raiz quadrada do tempo



Fonte: Autoria Própria (2023)

Essa correlação de consumo de cimento e absorção fica melhor representada na Figura 12. Concretos com alta taxa de substituição de cimento e conseqüentemente menor consumo desse aglomerante, apresentaram altos valores de absorção, em contrapartida aqueles que foram substituídos de forma mais parcial como o traço T240, indicou bom índice de absorção.

Figura 12 – Correlação entre absorção e o consumo de cimento.

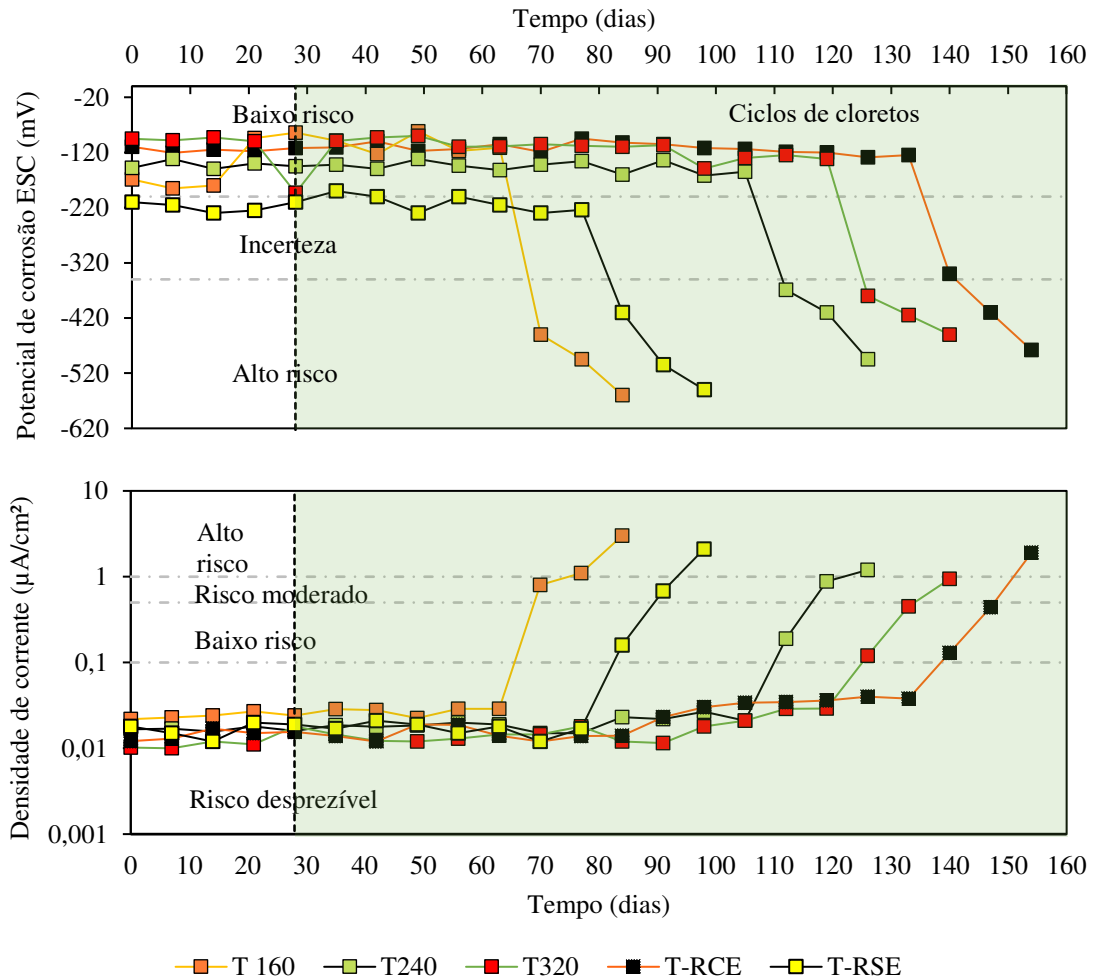


Autoria Própria (2023)

#### 4.7 MONITORAMENTO ELETROQUÍMICO

A Figura 13 apresenta o monitoramento eletroquímico das barras de aço embutidas nos concretos.

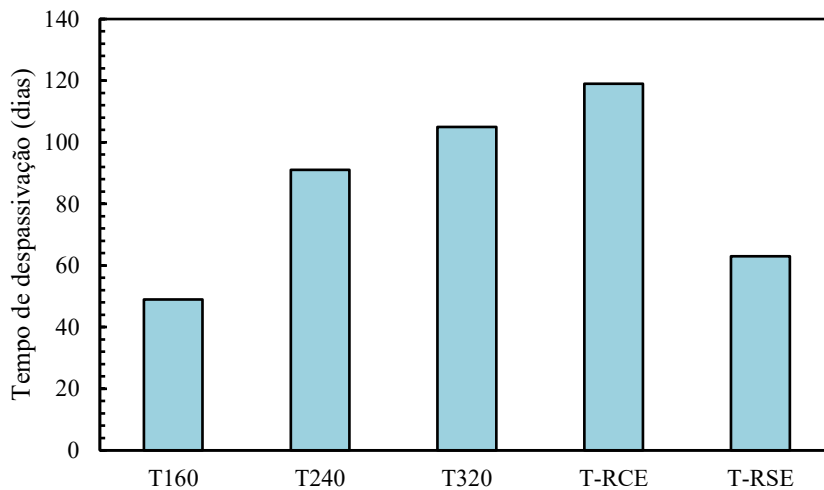
Figura 13 – Monitoramento eletroquímico.



Autoria Própria (2023)

Como era esperado, as barras de aço embutidas no concreto T160, com o menor consumo de cimento, foram as primeiras a despassivarem, com 49 dias de ciclos de imersão e secagem. Logo após, com 63 dias, o concreto de referência sem empacotamento dos agregados (T-RSE) apresentou salto nas medidas de densidade de corrente. Mesmo com 57,19% a menos de cimento, o concreto T160 mostra desempenho próximo ao concreto convencional. A Figura 14 apresenta os tempos de passivação das armaduras de todos os concretos.

Figura 14 – Tempo de despassivação das barras embutidas nos concretos (dias).

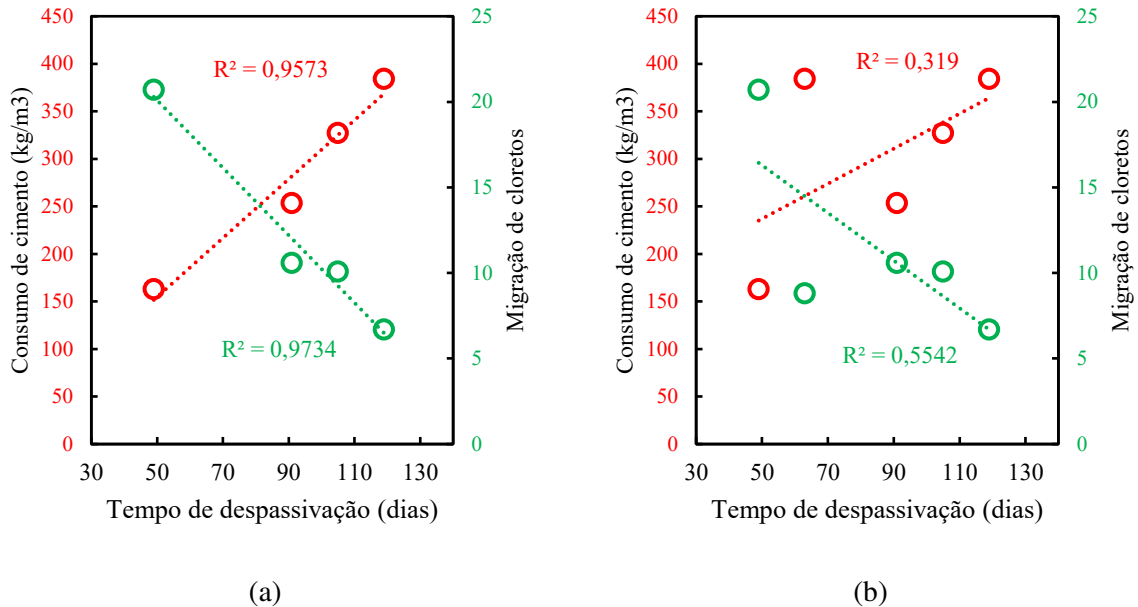


Autoria Própria (2023)

Meira *et. al.*, (2014) estudaram concretos com resíduo cerâmico e monitoraram eletroquimicamente barras embutidas em concretos com substituição de 10% e 30% de tal resíduo, com consumo de cimento de 372,9 kg/m<sup>3</sup> e 290 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, e um concreto de referência com consumo de 414,3 kg/m<sup>3</sup>. O resultado do monitoramento eletroquímico mostra a despassivação das barras de referência em torno de 40 dias, o concreto com 10% de RTM em torno de 28 dias e o concreto com 30% de RTM com 42 dias. Jerônimo *et. al.*, (2018) monitorarem concretos autoadensáveis com consumo médio cimento de 515 kg/m<sup>3</sup>, mesmo com consumo de cimento tão elevado as barras despassivaram com 50 dias. Constata-se, então, que o empacotamento dos agregados aplicado na dosagem dos concretos T160, T240 e T320 compensaram a redução do teor de cimento, reduzindo a porosidade da matriz.

As correlações apresentadas na Figura 15 explica bem o efeito do empacotamento no tempo de iniciação à corrosão provocada pelos cloretos. No monitoramento eletroquímico, considerando o grupo dos concretos com o mesmo esqueleto granular, houve forte correlação com o consumo de cimento e coeficiente de migração de cloretos (Figura 15 (a)), visto que este também é dependente do cimento, pois quanto maior o teor de clínquer, maior será o teor de aluminatos que podem se combinar com os cloretos e fixa-los na matriz, assim, o tempo de despassivação é maior (RIBEIRO *et al.*, 2012; MEDEIROS *et. al.*, 2013). Na Figura 15 (b) pode ser visto que não houve correlação considerável quando se compara os concretos com empacotamento com o concreto de referência, mesmo este tendo maior teor de cimento, confirma-se, então, que o empacotamento foi significativo no retardo da iniciação da corrosão.

Figura 15 – Correlações entre consumo de cimento, tempo de despassivação e migração de cloretos, considerando somente os concretos com empacotamento (a), e considerando todos os concretos (b).



Autoria Própria (2023)

## 5. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados apresentados nas seções anteriores, é possível derivar as seguintes conclusões:

- O concreto T240 apresentou excelentes resultados no ensaio de compressão axial principalmente nas idades de 28 e 90 dias, sendo apenas 4,77% menor que o T - RCE. Quando comparado aos outros traços com adição de FC e ao de referência sem empacotamento também apresentou um melhor desempenho. Conclui-se que as propriedades do fíler realmente foram significativas para esse resultado.

- A resistência à compressão em geral diminuiu seu valor à medida que foi adicionado FC, em comparação com o T - RCE.

- Os concretos com fíler apresentaram índices de ligantes superiores aos concretos de referência, principalmente o T240, que apresentou menor IL, cerca de 30% menor quando comparado ao T-RCE, reforçando a ideia de uma porcentagem ideal de substituição de cimento por fíler.

- Foi constatado que quanto maior a substituição do cimento por fíler, maior será o coeficiente de migração de cloretos. Porém, houve uma significativa redução nesses valores de migração na idade de 90 dias, quando comparado aos testes feitos com 28 dias.

- O traço T240 apresentou valores bem semelhantes aos do T320. Ou seja, mesmo com maior quantidade de fíler, ainda apresentou resultados semelhantes àquele traço com menor porcentagem do mineral no teste de migração de cloretos.

- Na absorção por capilaridade, dois traços com fíler obtiveram resultados superiores em comparação com o concreto de referência sem empacotamento. A adição de fíler se mostrou positiva na resistência a absorção de água por capilaridade em determinadas porcentagens. O T160 foi o que mais absorveu água.

- Ainda com relação à absorção por capilaridade, os resultados da correlação com o consumo de cimento confirmam que a porosidade está ligada aos produtos de hidratação do cimento, contudo, o efeito físico e químico do fíler, junto ao empacotamento dos agregados, fez com os concretos com substituição obtivessem bons resultados comparados ao concreto de referência sem empacotamento e

com 100% de cimento.

- O monitoramento eletroquímico mostra que o empacotamento dos agregados foi fundamental para retardar o início da corrosão nos concretos com alto teor de fíler calcário.

O presente trabalho elucidou os conceitos estudados através dos resultados obtidos, contribuindo com a literatura sobre o efeito do empacotamento e durabilidade de concretos com baixo consumo de cimento pelo uso do fíler. Recomenda-se para trabalhos futuros a análise do teor crítico de cloretos em concretos com elevados teores de fíler calcário.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, R. dosagem e desempenho de concretos com elevadas substituições de cimento por filer 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.
- ALVES, H. J. S.; FERREIRA, G. F.; SILVA, F. B. Adição de fillers calcários na produção de concreto de alto desempenho. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 68, n. 3, p. 347-353, 2015.
- BENTZ, D. P. et al. Chloride binding in hydrated Portland cement pastes containing high volumes of supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 5, p. 433-439, 2009.
- BENTZ, D. P. Influence of mineral admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 1, p. 120-127, 2005.
- BENTZ, D. P. A review of limestone additions to Portland cement and concrete. In: Cement and Concrete Composites. Vol. 27, n. 3, p. 315-328, 2005.
- BEUSHAUSEN, H. Testes de permeabilidade do concreto como base para o projeto de durabilidade. In: \_\_. Anais do Workshop Internacional sobre Durabilidade de Estruturas de Concreto: Do Projeto Baseado em Desempenho ao Projeto com Vida Útil de Serviço. Istanbul, Turquia, 2008. p. 1-14.
- BERODIER, E.; SCRIVENER, K. Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H. Journal of the American Ceramic Society, [s.l.], v. 97, no 12, p. 3764– 3773, 2014. ISSN: 15512916, DOI: 10.1111/jace.13177.



BENTZ, Dale P. et al. Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials*, [s.l.], v. 75, p. 1–10, 2015. ISSN: 09500618, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 36, no 2, p. 264–277, 2006. ISBN: 0008-8846, ISSN: 00088846, DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.07.001.

DHIR, R. K. et al. The effect of limestone filler on the properties of concrete. In: *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 3, p. 475-480, 2000.

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.

FAGERLUND, G. Chloride transport in OPC and OPC/SCMs systems: influence of chlorides in mixing water and carbonation. Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, 2005.

GHRICI, M. et al. Influence of mineral additions on the chloride ingress of concrete: Part I: Experimental study. *Cement and Concrete Research*, v. 37, n. 6, p. 781-789, 2007.

JERÔNIMO, V. L.; MEIRA, G. R.; FILHO, L. C. P. da S. Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 900-910, 2018.

KAKALI, G. et al. Hydration products of C3A, C3S and Portland cement in the presence of CaCO<sub>3</sub>. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 30, no 7, p. 1073–1077, 2000. ISSN: 00088846, DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00292-1.

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.

Liu, M., Chen, L., Huang, Z., Zhu, H., & Liu, Q. (2020). Effects of limestone filler on microstructure, pore structure and carbonation resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 250, 118946.

LONDON. *Global Construction 2030*. [S.l.]: Global Construction Perspectives; Oxford Economics, 2020.

LIU, S.; GAO, Z.; RAO, M. Study on the ultra high performance concrete containing limestone powder. *Advanced Materials Research*, [s.l.], v. 250–253, p. 686–689, 2011. ISBN: 9783037851272, ISSN: 10226680, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.686.

Li, H., Xie, Y., & Huang, Y. (2019). Effects of limestone powder on microstructure of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 225, 345-355.

- LOTTHENBACH, B. et al. Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 38, no 6, p. 848–860, 2008. ISSN: 00088846, DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.01.002
- MEDEIROS, M. H. F., ROCHA, F. C., MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 10, n. 4, p. 864–885, ago. 2017. DOI: 10.1590/s1983-41952017000400005.
- MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R.; JERÔNIMO, V. L.; CARNEIRO, A. M. P. Comportamento de concreto armado com adição de resíduos de tijolo cerâmico moído frente à corrosão por cloretos. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 33-52, 2014.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- Mehta, P. K. (1986). *Concrete: structure, properties, and materials*. Prentice Hall.
- MARVILA, M. T. et al. Influence of limestone filler on the durability performance of concrete. In: *Construction and Building Materials*, v. 165, p. 282-292, 2018.
- MARANGON, Ederli. *Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibra de aço*. Dissertação – Programa de PósGraduação de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, [s.l.], v. 25, no 1, p. 61–67, 2003. ISBN: 0958-9465, ISSN: 09589465, DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00056-7.
- OLIVEIRA, I. R. et al. *Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico*. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000, 224p.
- POON, C. S. et al. The potential of using crushed post-consumer glass as a partial replacement of sand in concrete. In: *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, n. 4, p. 639-647, 2000.
- RIBEIRO, D. V., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, v. 42, n. 1, p. 124–133, 2012. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.09.002.
- ROBBIE, M.A., “Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018”, *Earth System ScienceData*, v. 11, n. 4, pp. 1675–1710, 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-152>.
- RAMLI, A., BACHTIAR, F. B., & SURATMAN, S. (2017). A review on the utilization of waste material as a partial replacement of cement in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 142, 952-962.
- RAVIKUMAR, K., SELVAM, A., & SHANMUGAM, N. (2019). Mineral Admixtures in Concrete: A Review. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019076.
- SOROKA, I.; STERN, N. Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 6, no 3, p. 367–376, 1976. ISBN: 9781435486577, ISSN: 00088846, DOI: 10.1016/0008-8846(76)90099-5.
- SILVA, J. et al. Influence of limestone filler on the mechanical properties of self-compacting concrete. In: *Materials and Structures*, v. 48, n. 8, p. 2627-2639, 2015.

WEERDT, K. DE et al. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, [s.l.], v. 41, no 3, p. 279–291, 2011. ISBN: 0008-8846, ISSN: 00088846, DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.014.

WANG, H., MA, Z., LI, L., & TANG, M. (2018). The role of limestone powder content on the sulfate resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 185, 568-577.

YAO, W., LIU, H., LIU, R., & CHEN, X. (2021). Mechanical properties and carbonation resistance of high-volume limestone powder concrete. *Construction and Building Materials*, 295, 123569.

WU, Q., LIU, F., ZHAO, J., & DING, T. (2017). Influence of limestone filler on pore structure and chloride permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 144, 43-50.

WILSON MARQUES DE ANDRADE FILHO

**ESTUDO DA DURABILIDADE E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS  
COM ADIÇÃO DE FÍLER CALCÁRIO UTILIZANDO EMPACOTAMENTO DE  
PARTÍCULAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, sob forma de artigo, 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 09 de Agosto de 2023

**BANCA EXAMINADORA**




---

Dr. Robson Arruda dos Santos – IFPB-*Campus* Cajazeiras  
Orientador

Documento assinado digitalmente  
 TAYLA FERNANDA SERANTONI DA SILVEIRA  
Data: 09/08/2023 12:39:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

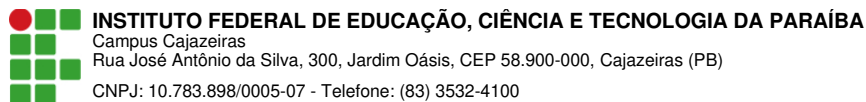
---

Dr<sup>a</sup>. Tayla Fernanda Serantoni da Silveira – IFPB-*Campus* Cajazeiras  
Examinador 1

Documento assinado digitalmente  
 FERNANDO CHAGAS DE FIGUEIREDO SOUS  
Data: 09/08/2023 21:08:57-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Me. Fernando Chagas de Figueirêdo Sousa – IFPB-*Campus* Cajazeiras  
Examinador 2



## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### TCC de Wilson Marques de Andrade Filho

**Assunto:** TCC de Wilson Marques de Andrade Filho  
**Assinado por:** Wilson Filho  
**Tipo do Documento:** Dissertação  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Wilson Marques de Andrade Filho, ALUNO (201712200027) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS, em 10/08/2023 08:21:18.

Este documento foi armazenado no SUAP em 10/08/2023. 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: 903809  
Código de Autenticação: cacf2fd1e4

