



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



NIVAN FERREIRA FURTADO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS NA
DURABILIDADE DE CONCRETOS**

CAJAZEIRAS, PB
2022

NIVAN FERREIRA FURTADO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS 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
2022

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

F992e Furtado, Nivan Ferreira.

Estudo da influência do empacotamento dos agregados na durabilidade de concretos / Nivan Ferreira Furtado. – 2024.

40f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2024.

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

1. Estrutura de concreto. 2. Análise do cimento. 3. Empacotamento de partículas. 4. Índice de ligantes. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 624.012.4 (043.2)

NIVAN FERREIRA FURTADO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS 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 02 de setembro de 2022

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 17/09/2024 18:41:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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



Documento assinado digitalmente
JOSE HENRIQUE MACIEL DE QUEIROZ
Data: 17/09/2024 10:41:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. José Henrique Maciel de Queiroz – IFPB-*Campus* Patos
Examinador externo



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO KLEBER DANTAS DUARTE
Data: 17/09/2024 08:47:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

A handwritten signature in blue ink that reads "Francisco Kleber Dantas Duarte".

Esp. Francisco Kléber Dantas Duarte – CBX Engenharia
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

Inicialmente queria agradecer a Deus pela oportunidade que me foi dada para realizar este curso em uma grande instituição que é o IFPB, mesmo que em certos momentos da minha trajetória acadêmica surgiram dificuldades físicas e emocionais que me fizeram desacreditar que eu poderia concluir este ciclo da minha vida.

Aos meus familiares, especialmente minha mãe Ivétt Ferreira, que foi capaz de me dar forças, consolo e refúgio em situações em que eu não tinha mais motivos para seguir em frente, estando sempre ao meu lado a me motivar.

A cada um dos professores que, ao longo desses cinco anos, contribuíram significativamente para minha formação acadêmica, através de suas experiências dentro e fora das salas de aula.

Ao meu orientador Robson Arruda dos Santos e ao professor Gastão Coelho, que me auxiliaram a desenvolver o projeto, pela confiança e dedicação depositados em mim, em especial ao meu orientador por ter se prontificado ao máximo em realizar um trabalho com inúmeros ensinamentos que poderei levá-los comigo e por ceder alguns dias para estar dando apoio de maneira presente.

Aos meus colegas de curso Galdino Júnior, Vinicius Feitosa, Iarly e Wilson Marques, que contribuíram de maneira significativa nos ensaios laboratoriais realizados para o desenvolvimento da pesquisa e pelas trocas de conhecimento feitas durante esse período.

Aos meus amigos Gustavo Alexandre, Jaine Ferreira, Júnior Ferreira, Hilary Ferreira, Luiz Felipe e Katylla Rodrigues por me acolherem desde o primeiro dia que nos conhecemos e por proporcionarem momentos em minha vida que eu jamais esquecerei.

À banca examinadora por estarem presentes nesse momento final de conclusão dessa etapa que abre outras inúmeras oportunidades.

Ao IFPB – *Campus* Cajazeiras, pelos materiais e laboratórios disponibilizados para que se fosse possível desenvolvimento dessa pesquisa.

RESUMO

É notória a importância da criação de novas técnicas quando se trata da rapidez com que as diversas necessidades surgem no âmbito da construção devido as constantes evoluções e desenvolvimentos dos centros urbanos. Percebemos que com o passar desse crescimento faz-se necessário cada vez mais o uso dos principais materiais de construção, como cimento e agregados. Atualmente, o cimento é um dos materiais mais consumidos do mundo, em especial na sua aplicação na Construção Civil, e o seu consumo é atribuído as suas características, como resistência e plasticidade, que auxiliam no controle das patologias que surgem no concreto. O cimento é responsável por cerca de 7% do total das emissões de dióxido de carbono (CO₂) através das misturas cimentícias. Dessa forma, a presente pesquisa tem o objetivo principal de analisar a influência significativa da inserção do empacotamento de partículas na durabilidade de concretos com menor teor de cimento. Para esse estudo, a metodologia de empacotamento foi aplicada seguindo as análises do Modelo Andreassen Modificado, sendo usado quatro tipos de fatores de empacotamento para que se faça possível uma avaliação mais detalhada da influência do empacotamento sobre a durabilidade dos concretos. Tal avaliação do modelo contou com a ajuda do software ANOVA, que determina a significância entre as variáveis das médias entre e dentro dos grupos escolhidos, e também do Q-Mix, para a dosagem dos concretos, após a caracterização dos materiais. Foram definidos quatro traços para serem analisados com diferentes fatores “q”, T0.2, T0.25, T0.35, T0.4 e T-RSE, de modo que cada um possui suas respectivas caracterizações quanto ao consumo de materiais. Quanto a resistência e aos índices de ligantes, T0.25 apresentou os melhores resultados nos períodos de 7 e 28 dias de cura, no entanto, T0.4 apresentou melhores índices no controle de migração por possuir uma maior quantidade de cimento composto de aluminatos, importantes na blindagem dos concretos expostos a cloretos por fixarem os mesmos, impedindo que continuem a migrar no restante da estrutura exposta. Diante disso, o concreto T0.4 foi classificado como de alta resistência a migração, enquanto os demais traços foram como de moderada resistência a migração de cloretos. Portanto, pode se concluir que o empacotamento é um importante aliado na produção de um CAD (Concreto de Alto Desempenho) e que certos concretos com valores altos de resistência nem sempre serão eficientes no quesito durabilidade.

Palavras-Chave: Empacotamento; Fator de empacotamento “q”; Migração; Cloretos; Compressão, Modelos Alfred & Andreassen, Cimento.

ABSTRACT

The importance of creating new techniques is notorious when it comes to the speed with which the various needs arise in construction due to the constant evolutions and developments of urban centers. We realize that with the passage of this growth it is increasingly necessary to use the main building materials, such as cement and aggregates. Currently, cement is one of the most consumed materials in the world, especially in its application in Civil Construction. Its consumption is related to its characteristics, such as resistance and plasticity, which help to control pathologies that arise in concrete. Cement is responsible for about 7% of total carbon dioxide (CO₂) emissions from cement mixtures. Thus, the present research aims to analyze the significant influence of the insertion of particle packing on the durability of concrete with lower cement content. For this study, the packing methodology was applied following the analysis of the Modified Andreassen Model, using four packing factors to make possible a more detailed assessment of the influence of packing on the durability of concrete. This model evaluation relied on the help of the ANOVA software, which determines the significance between the variables of the means between and within the chosen groups, and also the Q-Mix, for the dosage of the concretes, after the characterization of the materials. Four traits were defined to be analyzed with different “q” factors, T0.2, T0.25, T0.35, T0.4 and T-RSE, so each has its respective characterizations regarding the consumption of materials. As for strength and binder indices, T0.25 presented the best results in the periods of 7 and 28 days of curing. However, T0.4 presented better indices in the migration control for having a more considerable amount of cement composed of aluminates, important in shielding concrete exposed to chlorides by fixing them, preventing them from continuing to migrate in the rest of the exposed structure. Therefore, the T0.4 concrete was classified as having high resistance to migration, while the other traits were classified as having moderate resistance to chloride migration. Therefore, it can be concluded that packing is an essential ally in producing a CAD (High Performance Concrete) and that certain concretes with high strength values will not always be efficient in terms of durability.

Keywords: Packaging; Packing factor “q”; Migration; Chlorides; Compression, Alfred & Andreassen Models, Cement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais teorias de empacotamento.....	14
Figura 2: Granulometria a laser do cimento.....	19
Figura 3: Inserção dos resultados da análise granulométrica.....	21
Figura 4: Inserção dos resultados da análise granulométrica.....	22
Figura 5: Parâmetros de entrada do software.....	22
Figura 6: Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).....	22
Figura 7: Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada.....	23
Figura 8: Esquema de corte das amostras.....	25
Figura 9: Impermeabilização e acondicionamento das fatias das amostras.....	25
Figura 10: Montagem do conjunto do ensaio de migração.....	26
Figura 11: Correção da tensão aplicada e duração do ensaio de migração.....	26
Figura 12: Ilustração da medição para profundidade de penetração de cloretos.....	26
Figura 13: Curvas granulométricas dos agregados.....	28
Figura 14: Resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 e 28 dias.....	30
Figura 15: Teste de tukey para resistência à compressão dos concretos.....	30
Figura 16: Migração de cloretos dos traços estudados.....	32
Figura 17: Migração do cloreto no Traço 0.2.....	32
Figura 18: Migração do cloreto no Traço 0.25.....	32
Figura 19: Migração do cloreto no Traço 0.35.....	33
Figura 20: Migração do cloreto no Traço 0.40, ensaio 1.....	33
Figura 21: Migração do cloreto no Traço REF.....	33
Figura 22: Correlação entre a migração de cloretos e a resistência à compressão.....	34
Figura 23: Correlação entre o coeficiente de migração e o teor de cimento. (a) considerando todos os traços, (b) considerando o grupo dos concretos dosados com empacotamento de partículas.....	34
Figura 24: Índice de ligante em relação à literatura.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado.....	19
Tabela 2: Massas específicas dos agregados	28
Tabela 3: Consumos de materiais dos traços.....	29
Tabela 4: Resultado do ensaio de migração dos concretos estudados.....	31
Tabela 5: Índice de Ligantes dos concretos estudados com 7 e 28 dias.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 MATERIAIS E MÉTODOS	18
2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	18
2.1.1 Cimento	18
2.1.2 Agregados	18
2.2 DOSAGEM DO CONCRETO	20
2.2.1 Empacotamento de Partículas	20
2.3 Preparo, cura e moldagem de corpos de prova	23
2.4 Ensaio destrutivos e não destrutivos	24
2.4.1 Ensaio De Resistência (Compressão Axial)	24
2.4.2 Migração de Cloretos	24
2.5 Análise Estatística	27
3 ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	29
3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS	29
3.3 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO	29
3.4 MIGRAÇÃO DE CLORETOS	31
3.5 ÍNDICES DE LIGANTES	35
4 CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

Século XXI, época de constante desenvolvimento das tecnologias, dos mecanismos de produção em grande escala de maneira automatizada, da busca incessante, dos humanos, por inovações que se tornam cada vez mais importantes para sua evolução. E junto a esse desenvolvimento há a necessidade de se expandir novos territórios capazes de se tornarem grandes centros urbanos que irão comportar o aumento populacional causado por esses fatores. Ligados a isto está a construção civil, que para construir esses novos centros urbanos, passou a consumir mais materiais e com isso provocando mais problemas ambientais, como por exemplo o aumento das emissões de CO₂ através do uso cada vez maior de cimento, que são responsáveis pelo efeito estufa.

A indústria da construção civil emite grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa, segundo estudos de Presco (1999, apud BARBOSA *et al.*, 2003), nas cidades Europeias as emissões de CO₂ da indústria da construção correspondem aproximadamente a 30% do total das emissões. Somente a indústria do cimento é responsável por 7% das emissões globais de CO₂ para Demanboro *et al.* (2003). A indústria da construção civil brasileira tem grande parcela de contribuição na situação atual, apontada como um dos setores da economia que maior impacto gera sobre o ambiente natural (GRIGOLETTI e SATTLER, 2003) já que consome algo em torno de 75% dos recursos naturais disponíveis no planeta segundo John *et al.* (2001).

Diante desses fatos, surgem novos métodos e alternativas para que se possa continuar a produção em grande escala dos cimentos, desde que se reduza essa emissão de CO₂ nos processos térmicos durante sua produção. Uma rota possível para tal redução é o aumento da carga de adições (ativas e/ou inertes) na fabricação do cimento.

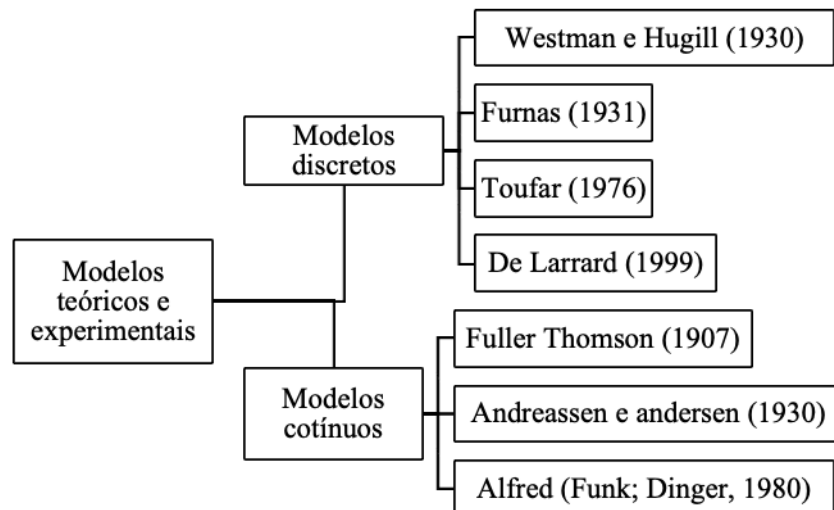
Enquanto a indústria do cimento se prepara para a nova geração de ligantes com baixa emissões de CO₂, tem-se outras alternativas viáveis de serem aplicadas na produção de concretos, como a introdução de resíduos industriais e otimização do projeto granulométrico dos agregados. Para que essas buscas importantes sejam postas em prática, com resultados satisfatórios, se faz necessário seguir certos cuidados quanto ao fundamento reológico das dosagens utilizadas, através de três pontos importantes: 1) manuseio e uso de matérias-primas de melhores características, 2) elaboração de um projeto granulométrico que busque ao máximo a redução dos vazios, e 3) garantir maior fluidez com índices menores de água, através da dispersão e empacotamento das partículas (DAMINELI *et al.*, 2017).

No caso do empacotamento de partículas – técnica utilizada para a otimização da produção de concretos de alto desempenho (CAD) – há uma constante busca por materiais que possuam grandes performances em seus comportamentos mecânicos e de durabilidade associados a redução do uso de cimento. Desse modo, é necessária uma maior otimização do traço de concreto para minimizar o consumo de cimento, a fim de reduzir os impactos ambientais e econômicos em concretos convencionais e de alta resistência, sem comprometer suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Nesse contexto, uma técnica eficiente para reduzir os efeitos negativos da produção de cimento é utilizar o estudo de empacotamento de partículas, que consiste em obter misturas com densidade de empacotamento elevada, reduzindo os vazios da microestrutura do concreto e minimizando o consumo de pasta, refletindo em melhor desempenho mecânico e durabilidade do material (REBMANN, 2016).

O empacotamento de partículas, assunto abordado pela engenharia de microestrutura de materiais, propicia um aumento considerável na densidade da matriz do material, conferindo uma boa resistência mecânica, trabalhabilidade adequada para aplicação (alcançada por meio da dispersão das partículas promovida pela incorporação de aditivos químicos à mistura) e, principalmente, a durabilidade das estruturas, a fim de reduzir custos com manutenção (CASTRO; FERREIRA, 2016).

As abordagens teóricas relacionadas ao empacotamento de partículas sintetizam-se em dois tipos: uma discreta, que considera as partículas individualmente, representado nos modelos de Furnas (1931) e Westman e Hugill (1930), e outra contínua, que aborda as partículas como distribuições contínuas (ANDREASSEN e ANDERSEN, 1930). A Figura 1 apresenta as principais teorias de empacotamento.

Figura 1 - Principais teorias de empacotamento.



De acordo com a teoria de empacotamento de partículas, o uso de frações de partículas de tamanhos diferentes, onde os espaços vazios deixados pelas partículas maiores são preenchidos pelos finos, gera uma mistura com significativa diluição de vazios, comparada a uma mistura com agregados de graduação aberta (DAMINELI *et al.*, 2017).

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

Dentre os modelos matemáticos, o modelo de Andreasen Modificado (ou Alfred), proposto por Funk; Dinger (1980), é amplamente utilizado na literatura, em que considera os tamanhos mínimo e máximo das partículas, e um coeficiente de distribuição granulométrico, apresentado na equação (1).

$$CPFT = \frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

D é o tamanho da partícula;

CPFT (Cumulative Percent Finer Than) é a percentagem acumulada de partículas de diâmetro inferior a D;

D_L é o tamanho da maior partícula na distribuição;

D_S é o tamanho da menor partícula na distribuição;

E q é o coeficiente de distribuição granulométrica.

A adoção da potência q para o empacotamento máximo de partículas não esféricas não é unanimidade nas pesquisas de dosagem de concreto, visto as hipóteses do modelo, que considera a distribuição de partículas esféricas. Contudo, utilizando simulação numérica,

Funk e Dinger (1994) demonstraram que o expoente $q = 0,37$ otimiza a distribuição granulométrica.

A aplicação do empacotamento de partículas em concretos, como já mencionado, é das alternativas para desenvolver materiais resistentes/duráveis, e neste contexto, um dos ambientes de grande agressividade a serem atendidos por estes novos materiais são as construções localizadas em zona da atmosfera marinha, submetidas à ação da salinidade do aerossol marinho, fonte de problemas de corrosão na estrutura, devido a presença dos íons de cloreto (MEIRA, 2017).

A NBR 6118 (ABNT, 2014) traz, na seção que discorre sobre diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto, o entendimento para a vida útil de projeto como o período durante o qual se mantêm as características destas estruturas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor.

A degradação de estruturas de concreto devido ao problema da corrosão é um dos mecanismos que diminui a capacidade resistente destas, com implicação direta na sua vida útil. Tais consequências representam uma preocupação mundial no setor da construção civil, devido ao número de ocorrências registradas, que resultam em um montante representativo de recursos associados (MEIRA, 2017). A velocidade em que ocorre a deterioração está relacionada a diversas variáveis ligadas à execução e utilização das estruturas (MEDEIROS *et al.*, 2017). Assim, é de grande importância, além da resistência mecânica, avaliar a resistência do material ao ingresso dos íons cloretos e demais agentes agressivos.

Visto o cenário em que está inserido este trabalho, da necessidade de produzir concretos com desempenho mecânico satisfatório, resistente ao ingresso de agentes agressivos, e com baixa emissão de CO₂, esta pesquisa tem como objetivo principal o estudo da influência da variação do q (modelo de Alfred) nas propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos e como objetivo específico sua influência no ingresso de cloretos nos concretos, visto que a adoção do coeficiente de distribuição granulométrica não apresenta um valor ótimo estabelecido na literatura, considerando a morfologia das areias e britas (não-esféricas).

Este objeto de pesquisa foi escolhido devido a carência na literatura de trabalhos que investiguem no mesmo estudo o comportamento dos concretos/argamassas dosados com

diferentes valores de q , para que seja então avaliado se há diferenças significativas nestes compósitos.

Este trabalho está dividido em quatro capítulos, sendo o primeiro referente a introdução, em que se conceitua os principais pontos abordados no trabalho.

O capítulo 2 aborda as características determinadas a respeito dos materiais e aos métodos utilizados durante a pesquisa para a realização do empacotamento das partículas.

O capítulo 3 apresenta dos resultados obtidos através do estudo e as discussões acerca das análises feitas a partir da comparação do uso mais abrangente dos fatores de empacotamento em relação com as demais pesquisas feitas por outros autores. No capítulo 4 apresenta-se a conclusão e recomendações para trabalhos futuros.

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).

O estudo foi operado nas instalações laboratoriais de Geotecnia e de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus Cajazeiras*, onde tais procedimentos experimentais produziram uma quantidade calculada de corpos de prova e analisados de acordo com as metodologias escolhidas.

Os procedimentos práticos para investigação e desenvolvimento desses ensaios se dividiram em três fases: levantamento teórico e conceitual; caracterização do cimento, agregado e aglomerante; e experimentação destrutiva e não destrutiva dos moldes cimentício produzidos.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para a produção da mistura de concreto, foi-se utilizado agregados de diferentes granulometrias, sendo para os agregados miúdos diferentes tipos de areias (fina, média e grossa) e para agregados grãos o uso da brita cascalhinho (9,5 mm). O aglomerante selecionado para a mistura foi o CPV ARI, que possui poucas adições na sua composição química e apresenta índices de resistência altos com pouca idade e o aditivo químico escolhido foi o superplastificante ADVA 525, feito a base de policarboxilato, utilizado para a redução do uso de água nas misturas cimentícias. Por último a água utilizada nos processos provem da rede de abastecimento do IFPB.

2.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 5733/1991. Este cimento constitui-se de, no mínimo, 95% de clínquer, não possuindo adições pozolânicas na sua composição. A Tabela 1 apresenta a

composição do Cimento CP V-ARI.

Tabela 1 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado.

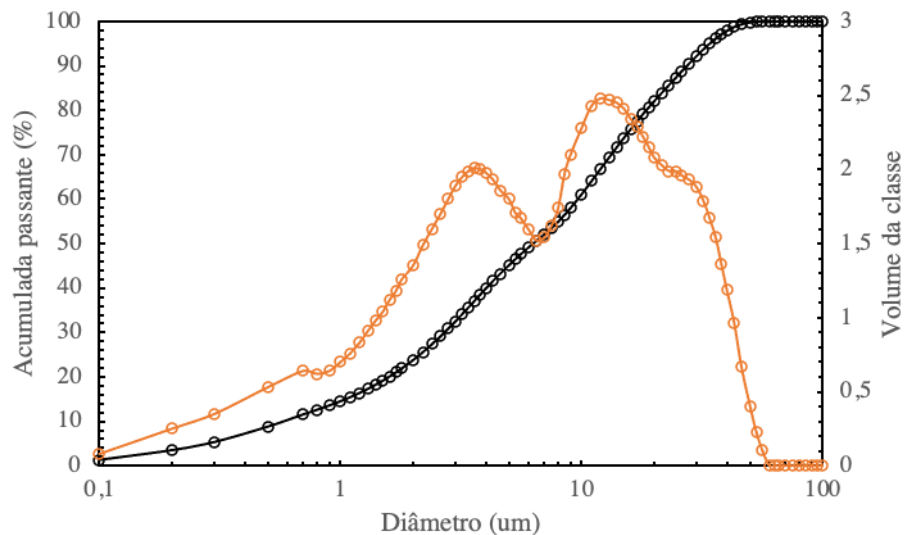
Óxidos (%)												
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	CaO	BaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	ZrO ₂
22.11	3.99	3.41	1.97	0.96	0.43	0.37	62.25	0.09	0.64	3.51	0.03	-

Fonte: Autor (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 ABNT NBR NM 23:2000, a massa específica do cimento utilizado foi de 3,04 g/cm³. 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.



2.1.2 Agregados

Para a composição do traço determinado pelo empacotamento das partículas, foi necessária a separação, através de peneiramento, para a obtenção adequada da granulometria de três areias,

denominadas como areia fina, média e grossa. Dessa forma, para separar a areia grossa, foi utilizada uma peneira com abertura de 1,2mm, em seguida, utilizou-se a peneira com abertura de 0,6mm para separar a areia média e fina.

Sendo assim, denominou-se de areia 1 (areia grossa) a fração que ficou retida na peneira de 1,2mm, já a areia 2 (areia média) equivale à passante pela 1,2mm e retida na 0,6mm. Por último, chama-se areia 3 (areia fina) aquela que passante pela peneira de 0,6mm. Para determinar a composição granulométrica das faixas de areias utilizadas, foi-se seguida as normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Com o intuito de obter uma caracterização mais detalhada dos diâmetros das partículas de areia, estas foram submetidas a peneiras de série intermediária e normal.

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

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.

Dentro da possibilidade, 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.

O usuário deve inserir as informações dos resultados obtidos através do ensaio de granulometria, nomeando o agregado e preenchendo os resultados da análise granulométrica, assim como mostra a Figura 3. Posteriormente, a quantidade de agregados é definida (Figura 4),

flexibilizando os resultados de acordo com as combinações feitas pelo usuário.

Figura 2 - Inserção dos resultados da análise granulométrica.

Gerenciamento de Ensaios

Agregado: Areia Fina

ABERTURA PENEIRAS	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.

Figura 3 - Inserção dos resultados da análise granulométrica.

Projeto Robson Dropdown Admin Usuários Agregados Peneiras Ensaios Mistura

Gerenciamento de Agregados

Novo Cadastro

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 5 destaca os campos a serem preenchidos.

Figura 4 - Parâmetros de entrada do software.

The screenshot shows the 'Misturar' software interface. At the top, there is a navigation bar with 'Projeto Robson' and a dropdown menu. Below it, there are tabs for 'Admin', 'Usuários', 'Agregados', 'Peneiras', 'Ensaio', and 'Mistura'. The main content area is titled 'Misturar' and contains several sections:

- Agregados:** A list of aggregates: 'Areia Fina Ensaio id. 1', 'Areia Média Ensaio id. 2', 'Areia Grossa Ensaio id. 3', and 'Brita 0 Ensaio id. 4'. A note below says 'Segure a tecla CTRL para selecionar vários agregados'.
- Entradas:** A section with a dashed border containing input fields for 'VALOR (mm)'. The values are: 'q: 0.300', 'DL: 19.000', and 'DS: 0.075'.
- Resolver:** A green button labeled 'Resolver'.
- Equation:** The formula $CPFT = [(D^4 - D_s^4)/(D_L^4 - D_s^4)] \times 100$ is displayed.
- Peneiras - Andreasen:** A table with two columns: 'mm (d)' and 'Andreasen (CPFT)'. The data is as follows:

mm (d)	Andreasen (CPFT)
50.000	100.00%
38.100	100.00%
25.000	100.00%
19.000	100.00%
12.500	85.43%
- RESULTADO FINAL MISTURA:** A table with five columns: 'mm (d)', 'Passante', 'Mistura', 'Andreasen', and 'Dispersão (RSS)'. The table is currently empty.

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 6), em seguida, o usuário deve clicar no botão “resolver”.

Figura 5 - Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).

This screenshot is similar to Figure 4 but shows the results after clicking the 'Resolver' button. The 'Agregados' list now includes 'Areia Média Ensaio id. 2', 'Areia Grossa Ensaio id. 3', 'Brita 0 Ensaio id. 4', and 'Brita 1 Ensaio id. 5'. The 'Entradas' section remains the same. The 'Resolver' button is still present. The 'Peneiras - Andreasen' table is the same as in Figure 4. The 'RESULTADO FINAL MISTURA' table is still empty.

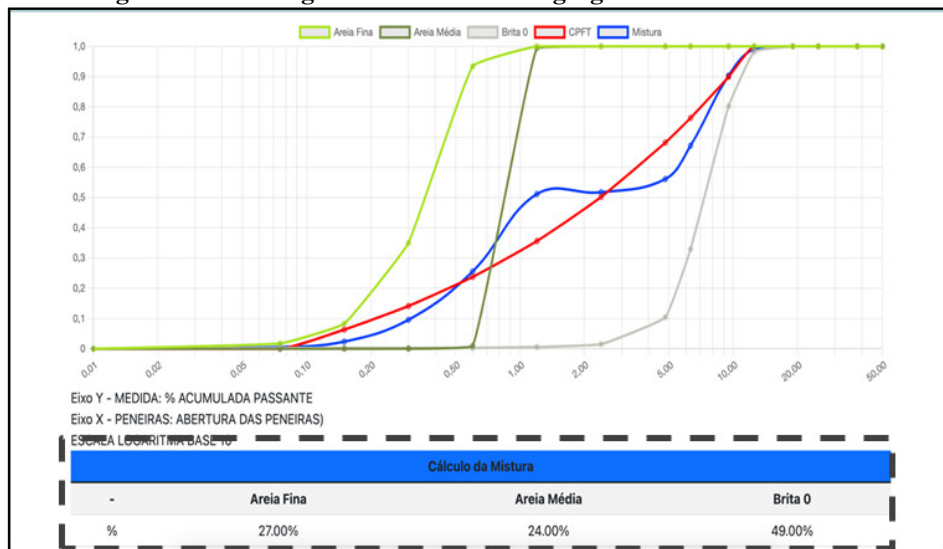
Fonte: Arruda, 2022.

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 7 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 6 - 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

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

1 – 100% do cimento e 80% da água;

- 2 – 20% da água e 100% do aditivo superplastificante;
- 3 – 100% do agregado graúdo, aos poucos.;
- 4 – 100% da areia grossa, aos poucos;
- 5 – 100% da areia média, aos poucos;
- 6 – 100% da areia fina, aos poucos.

A betoneira permaneceu ligada entre 3 e 4 minutos, até que a concreto tomasse um aspecto homogêneo. Durante o processo de mistura, para possibilitar a remoção das partículas finas que pudessem ter ficado aderidas nas paredes da betoneira, foram realizadas raspagens desses locais, precisando haver algumas paradas no funcionamento da betoneira.

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

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

2.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

2.4.1 *Ensaio de Resistência (Compressão Axial)*

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

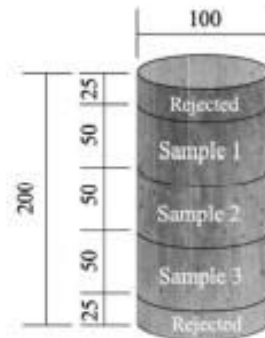
Para este procedimento, utilizou-se a prensa hidráulica presente no laboratório de materiais de construção civil do IFPB – Campus Cajazeiras.

2.4.2 *Migração de cloretos*

Para execução do ensaio, foram seguidas as condições de preparação do corpo de prova e do teste de migração descritos na norma NT Build 492 (1999).

Após o processo de cura na solução de água saturada com cal até a idade de 20 dias, foram retirados dois CPs cilíndricos 10x20 cm de cada traço, T1 e T2, do tanque e realizadas as marcações dos pontos de corte. Os CPs foram serrados perpendicularmente ao eixo, sendo divididos em 5 partes conforme a Figura 8, em que as duas fatias provenientes do topo são descartadas, e as três restantes utilizadas para os testes. Estas foram limpas as superfícies com escova e água e submetidas ao pré condicionamento estabelecido na norma.

Figura 7 - Esquema de corte das amostras.



Fonte: Adaptado de Sell Jr., Wally, Teixeira e Magalhães, 2021.

Desta forma, para cada CP, foram obtidas três amostras, totalizando seis amostras a serem ensaiadas para cada traço.

Antes de iniciar o procedimento do teste, as amostras foram impermeabilizadas em toda sua face lateral e acondicionadas com tubo PVC, como mostra a Figura 9, a fim de garantir que apenas as faces das superfícies tenham contato com as soluções.

Figura 8 - Impermeabilização e acondicionamento das fatias das amostras.

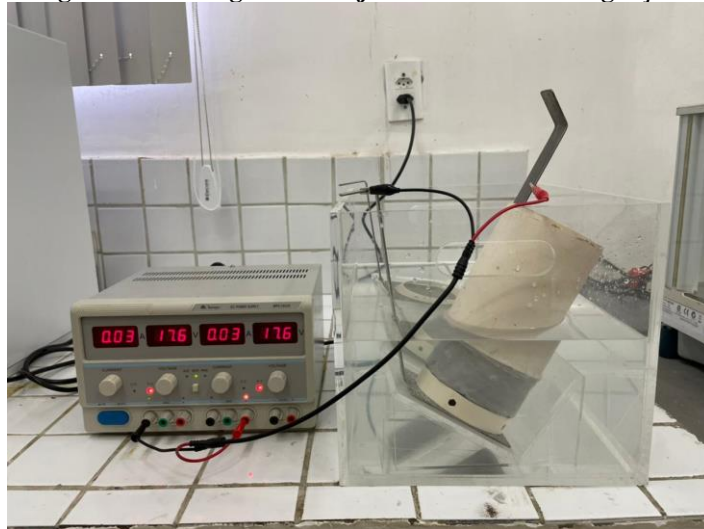


Fonte: Autoria própria, 2022.

Para o procedimento do ensaio, foram preparadas duas soluções diluídas em água. Encheu-se um recipiente plástico com a solução de catódica, cloreto de sódio (NaCl), sendo 100 g de NaCl em 900 g de água, e o tubo acima das amostras foi preenchido com a solução de anódica, hidróxido de sódio (NaOH), sendo 12 g de NaOH em 1 L de água, ambas armazenadas a uma temperatura de 20-25°C.

Foi conectado o cátodo no polo negativo e o ânodo no polo positivo da 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, o conjunto foi posicionado na caixa, com o auxílio de um suporte de modo a ficarem inclinados conforme a Figura 10 mostra.

Figura 9 - Montagem do conjunto do ensaio de migração.



Fonte: Autoria própria, 2022.

No primeiro momento, foi aplicada uma tensão predefinida de 30 V e registrada a corrente inicial, posteriormente foi ajustada a tensão a ser aplicada no ensaio conforme Figura 11 da norma com relação a corrente inicial. Para T1 a corrente inicial, após aplicação da tensão predefinida, foi de 70 mA, sendo assim a tensão foi ajustada para 25 V. Já para T2 a corrente inicial foi de 30 mA, sendo a tensão foi ajustada para 35 V, colocada em série com 17,6 V em cada fonte. Ambos os ensaios tiveram 24 horas de duração.

Figura 10 - 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

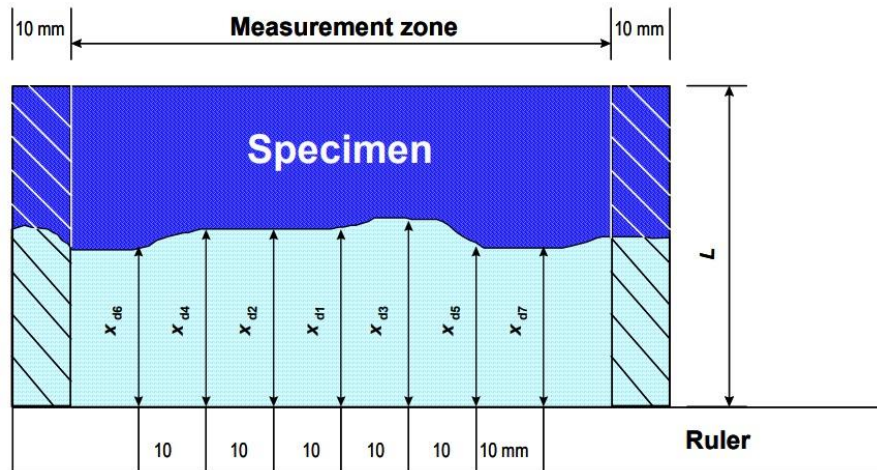
Fonte: NT Build 492, 1999.

Após um tempo de ensaio de aproximadamente 8 horas, foi verificado se houve variação da corrente, pois caso tenha significação que houve variação também da tensão e,

consequentemente, da resistência da argamassa do concreto, de modo que quanto menor for a corrente maior a tensão aplicada, o que significa que será maior a resistência do material a migração dos íons, ou seja, o material apresenta melhor qualidade em relação a porosidade.

Completado o tempo de ensaio, foram registradas a tensões e as temperaturas finais da solução de cloreto de sódio. Posteriormente, as amostras foram partidas axialmente em duas partes para ser feito a pulverização da solução de nitrato de prata 0,1 M. Posteriormente, a profundidade de penetração de cloreto pode ser medida a partir da precipitação visível de cloreto de prata branca, Figura 12, e assim ser calculado o coeficiente de migração (NT BUILD 492, 1999).

Figura 12 - Ilustração da medição para profundidade de penetração de cloretos.



Fonte: NT Build 492, 1999.

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

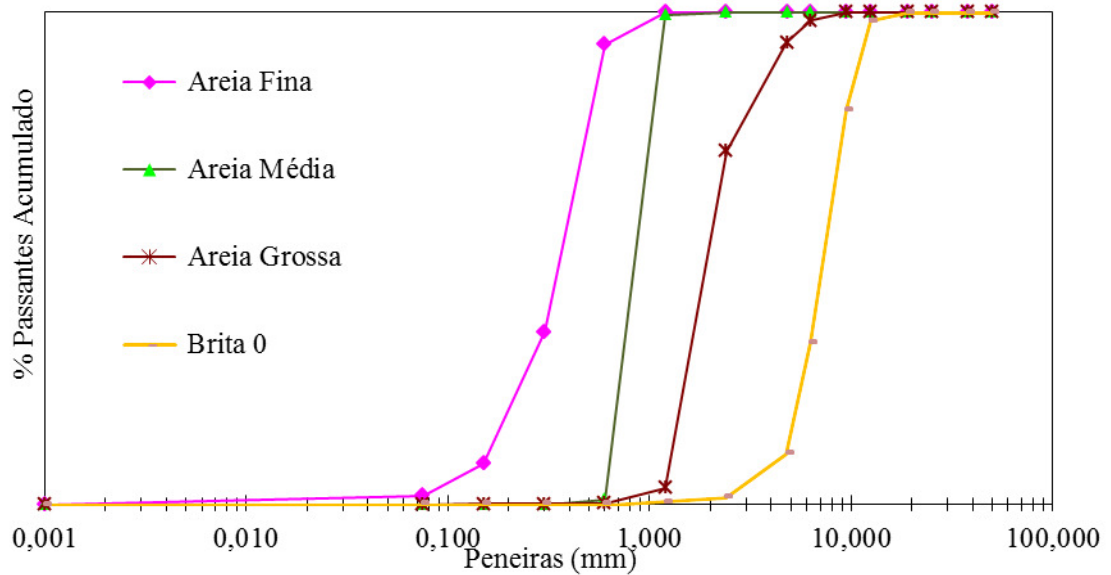
Os dados demonstrados na forma de tabelas foram analisados através da ferramenta ANOVA, que propicia a realização de comparações entre múltiplos grupos, garantindo, baseado no teste F, estabelecer a aceitação ou rejeição da hipótese nula H_0 , que é determinada através da igualdade entre as médias comparadas.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

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

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 13 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 13- Curvas granulométricas dos agregados.



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 2 – Massas específicas dos agregados

Massa específica (g/cm ³)			
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 3 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/m³ 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. A quantidade de aditivos utilizada foi de 0,9% em relação ao peso do cimento.

Tabela 3 - Consumos de materiais dos traços.

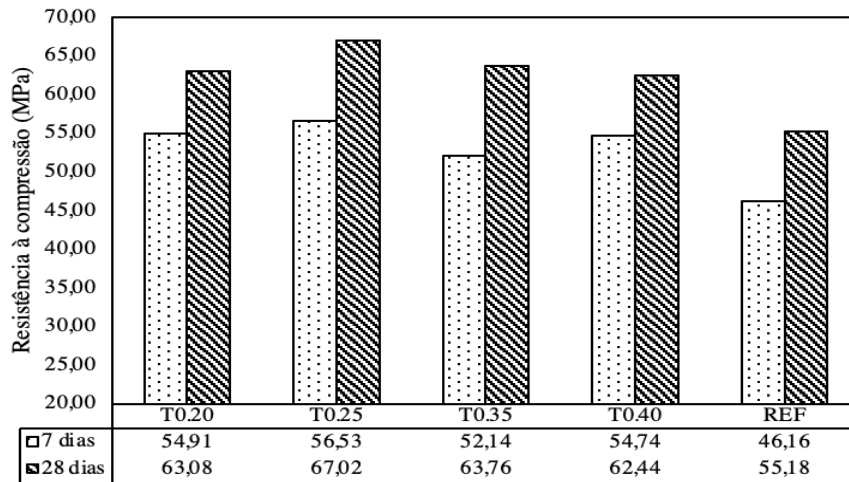
Consumo dos traços (kg/m ³)							
	Cimento	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Brita 9,5	Brita 19	Água
T0.20	382,30	346,08	434,61	507,05	527,17	-	187,33
T0.25	383,87	292,95	439,43	510,14	585,91	-	184,26
T0.35	384,00	202,11	436,55	509,31	675,03	-	184,32
T0.40	387,08	162,98	423,75	513,39	733,41		174,19
REF	384,01	-	865,03	-	-	962,05	195,85

Fonte: Autoria própria, 2022

3.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para determinar dados de uma análise dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, são demonstradas as resistências à compressão (f_c), em megapascal (Mpa), na Figura 14.

Figura 14- Resistência à compressão dos concretos estudados aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autoria própria, 2022

Diante das informações coletadas do ensaio em questão, foi possível relacionar o aumento ou diminuição das resistências perante as mudanças dos fatores de empacotamento “q”, onde se observa que, aos 28 dias, à medida que os valores vão se aproximando de “q” igual a 0,25, as resistências à compressão se tornam maiores e o fator 0,25 se torna o ponto analisado com maior valor, comparado aos outros e ao de referência. Esse valor de q é recomendado na literatura para concretos autoadensáveis, com registro de maiores valores de resistência (VANDERLEI, R. D., 2004; LOPES, H.M.T.; PEÇANHA, A.C.C.; CASTRO, A.L, 2020).

Como o objetivo do trabalho é comparar o desempenho com a variação do valor do q, foi realizada análise estatística através de uma ANOVA de um fator com variável de grupo, no Software Stat Plus. Foi confirmado que houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os valores de resistência à compressão do concreto T0.25 e todos os outros concretos (T0.2, T0.35, T0.4 e REF). Na Figura 15 são apresentados os valores do teste de Tukey, que comparou as médias das resistências dos concretos.

Figura 15 – Teste de tukey para resistência à compressão dos concretos.

	T0.20	T0.25	T0.35	T0.40	REF
T0.20		Red	Red	Green	Red
T0.25			Red	Green	Red
T0.35				Green	Red
T0.40					Green
REF					

Fonte: Autoria própria, 2022.

Analisando as proporções de materiais e fatores como de água/cimento, utilizadas nos traços do estudo, comparada a de outros trabalhos como Candido (2018), nota-se uma superioridade nas resistências a compressão observadas durante os 7 e 28 dias. Essas diferenças nas resistências podem ser associadas às características dos diferentes materiais, os seus consumos no traço, os fatores que relacionam entre si como o uso de aditivos plastificantes de acordo com traço, a relação de água/cimento e também no uso de diferentes fatores de empacotamento, em que nos dados da Figura 13 usou-se fatores diferentes (0.2, 0.25, 0.35, 0.4) enquanto em Candido (2018) usou-se apenas fator “q” =0.37, segundo o recomendado pelo modelo de Alfred ou Andreasen modificado.

3.4 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 4.

Tabela 4 - Resultado do ensaio de migração dos concretos estudados.

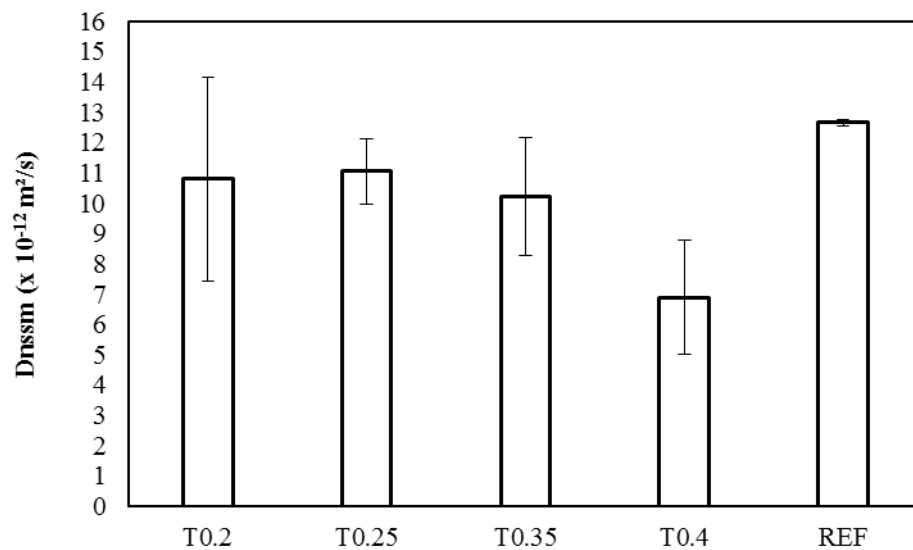
Traço	Tensão (V)	Média T (°C)	L (mm)	Xd (mm)	Dnssm (10 x 10-12 m ² /s)	
T0.20	30	26,75	48	22	9,96	10,80
	30	27,5	49	23	10,67	
	25	27,5	47	22	11,76	
T0.25	25	26	49	19	10,39	11,06
	30	26	49	25	11,61	
	30	26,75	47	25	11,19	
T0.35	30	26	49	22	10,13	10,21
	30	26,75	49	22	10,16	
	30	26,75	47,5	23	10,34	
T0.40	30	27,5	47	18	7,90	6,89
	30	27,5	48	16	7,10	
	30	27,5	48	13	5,67	
REF	30	26	50	25	11,83	12,66
	30	26	50	24	11,33	
	25	26	50	26	14,83	

Fonte: Autoria própria, 2022

Para os corpos de prova do traço T0.40 foi possível analisar médias de profundidade inferiores aos demais traços e conseqüentemente menores coeficientes de migração, demonstrando que para valores com fator de empacotamento “q” igual a 0,40, considerando este possuir uma resistência a compressão inferior as demais compressões determinadas, foi capaz de resistir de maneira eficiente migração do cloreto, sendo classificado como

resistência elevada à migração de cloretos, visto que Nilsson; Ngo; Gjrv (1998) apresentam uma classificação para a resistncia do concreto à penetração dos ins cloretos: reduzida ($D_{nssm} > 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), moderada ($10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{nssm} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), elevada ($5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{nssm} < 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), muito elevada ($2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{nssm} < 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) e ultraelevada ($D_{nssm} < 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Quanto maior o coeficiente de difuso, menor ser a resistncia do concreto à penetração dos cloretos.

Figura 16 - Migração de cloretos dos traos estudados.



Fonte: Autoria prpria, 2022.

As figuras 17, 18, 19, 20 e 21 ilustram o comportamento da migração dos corpos de prova utilizados no ensaio, onde se fica perceptvel a ação do cloreto ao penetrar o concreto.

Figura 17 - Migração do cloreto no Tração 0.2.



Fonte: Autoria prpria, 2022.

Figura 18 - Migração do cloreto no Tração 0.25.



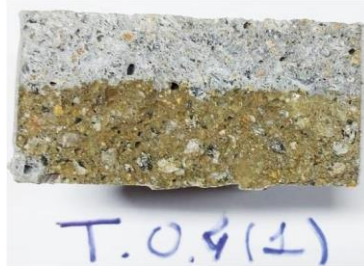
Fonte: Autoria prpria, 2022.

Figura 19 - Migração do cloreto no Traço 0.35.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 20 - Migração do cloreto no Traço 0.40, ensaio 1.



Fonte: Autoria própria, 2022.

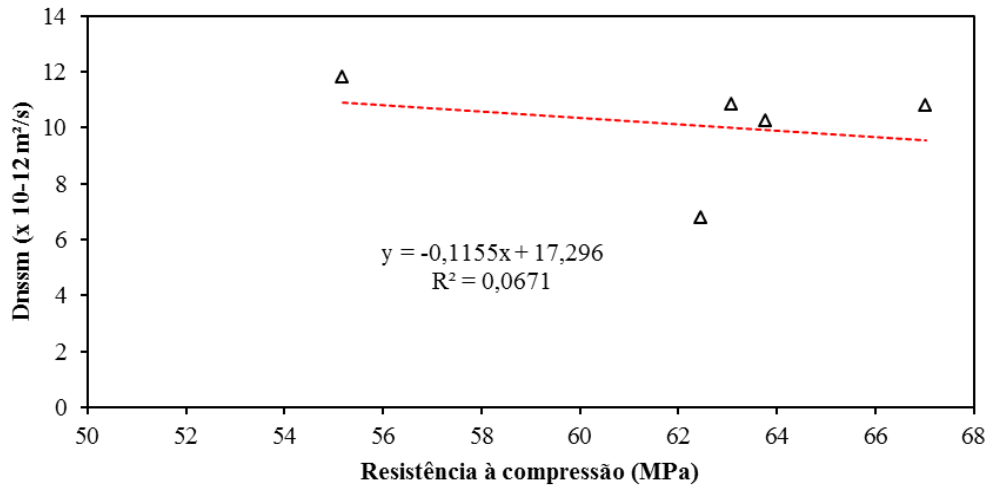
Figura 21 - Migração do cloreto no Traço REF



Fonte: Autoria própria, 2022.

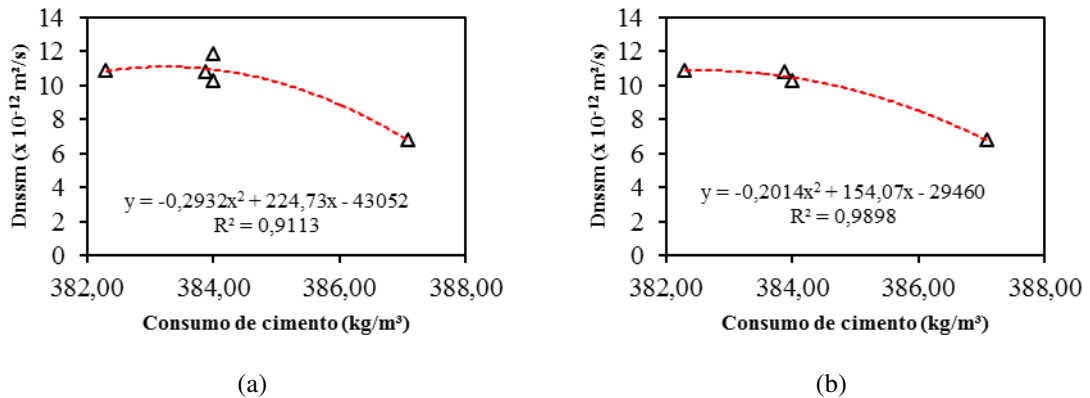
Os resultados de migração podem ser explicados pelo teor de cimento, porosidade, utilização de adições minerais, por exemplo, assim, foram realizadas algumas correlações para avaliar a influência do consumo de cimento, resistência à compressão e fator de empacotamento. As Figuras apresentam essas correlações.

Figura 22 – Correlação entre a migração de cloretos e a resistência à compressão.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 23 – Correlação entre o coeficiente de migração e o teor de cimento. (a) considerando todos os traços, (b) considerando o grupo dos concretos dosados com empacotamento de partículas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Como visto nas Figura 22 e 23, incluindo ou não o concreto de referência na análise da influência do consumo de cimento na migração identifica-se uma alta correlação, resultado oposto à análise com a resistência à compressão, que apresentou fraca correlação com os resultados de ingresso de cloretos, como visto também por e Ribeiro, Labrincha e Morelli (2012) e Medeiros et. al. (2013). Assim, contata-se que o efeito químico de fixação de cloretos através dos aluminatos do cimento prevalece em relação à resistência mecânica, consequentemente à porosidade, corroborando o estudo de Ribeiro et al. (2021).

3.5 ÍNDICE DE LIGANTES

Utilizado anteriormente como objeto de estudo em outros trabalhos (DAMINELLI, KEMEID, AGUIAR, JOHN, 2010; DAMINELLI, PILEGGI, JOHN, 2013; DAMINELLI, 2013; MILLER, MONTEIRO, OSTERTAG, HORVATH, 2016), o uso dos ligantes são determinados através de um índice denominado Índice de Ligantes – IL, que avalia, nas misturas de concreto, sua contribuição na eficiência das resistências dos concretos, associada ao uso de cimento.

De maneira geral, define-se essa eficiência do concreto uma relação do consumo total de ligantes, em kg.m⁻³, com a sua resistência a compressão (MPa). Tal definição pode ser obtida através da seguinte equação (2).

$$IL = \frac{C}{R} \quad (2)$$

Onde:

IL = índice de ligantes (kg/m³. MPa);

C = consumo de cimento (kg/m³)

R = resistência à compressão (MPa)

Diante disso se obteve valores de IL para os traços analisados, levando em consideração suas resistências mecânicas aos 7 e 28 dias de idade dos corpos de prova e seus respectivos consumos de cimento nas misturas. Tais valores encontrados foram organizados e disponibilizados na Tabela 5.

Tabela 5 - Índice de Ligantes dos concretos estudados com 7 e 28 dias.

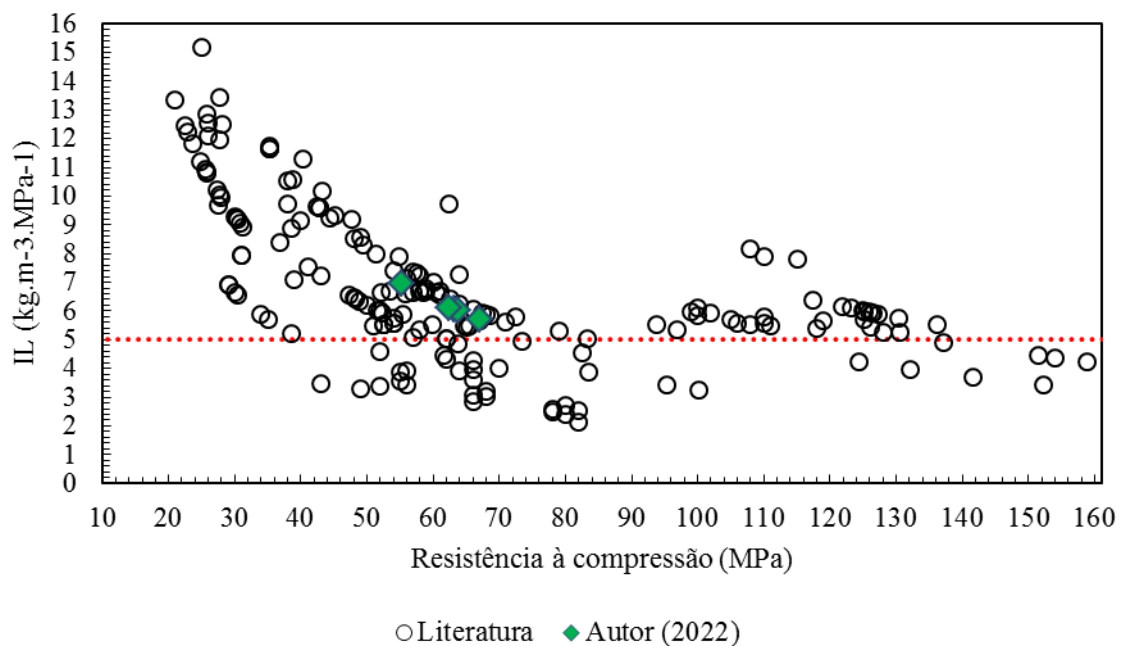
Índice de ligantes - IL					
Traço	Consumo de cimento (kg/m³)	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	IL -7 dias	IL - 28 dias
T0.2	382,3	54,91	63,08	6,96	6,06
T0.25	383,87	56,53	67,02	6,79	5,70
T0.35	384	52,14	63,76	7,36	6,03
T0.4	387,08	54,74	62,44	7,07	6,12
REF	384	46,16	55,18	8,32	6,96

Os estudos de Daminelli (2013) mostram que quanto maior for a resistência de uma mistura, levando em consideração o mesmo consumo de cimento, menor será o valor de seu IL, indicando que tal mistura possui maior eficiência relacionada à quantidade de ligantes por

unidade de resistência. O mesmo autor discorre que concretos com IL até $5 \text{ kg/m}^3\text{MPa}$ são considerados alta eficiência.

Visto isso, ao analisar a Tabela 5 percebe-se que o T0.25, que possui maior resistência em ambos os períodos, apresenta a melhor eficiência de todos os concretos, visto que necessita apenas de $5,7 \text{ kg}$ de cimentos por metro cúbico de concreto para produzir 1 MPa de resistência à compressão. Tal análise expande o conceito de desempenho dos concretos para além da resistência, pois com consumos de cimento próximos, caso dos concretos T0.25 e REF, alterando apenas o empacotamento dos agregados é possível reduzir o consumo de cimento e maximizar a resistência mecânica. Na Figura 24 é possível ver os resultados do IL aos 28 dias em relação à outros trabalhos encontrados na literatura.

Figura 24 – Índice de ligante em relação à literatura.



Fonte: Autoria própria, 2022

A Figura 24 apresenta um comparativo das eficiências obtidas com diversos trabalhos, mostrando que os resultados obtidos estão próximos ao limite de $5 \text{ kg/m}^3\text{MPa}$, com o consumo de cimento relativamente baixo (380 kg/m^3) sem utilização de pozolanas ou outras adições.

4 CONCLUSÃO

Diante dos resultados e discussões apresentados no capítulo anterior, podem ser elencados os pontos de conclusão:

- A variação do coeficiente de distribuição granulométrica interfere na rede porosa dos concretos, influenciando nos consumos de cimento, conseqüentemente na resistência mecânica, em que obtive maiores valores para o T0.25;
- Mesmo com o aumento do teor de areia fina nos traços com empacotamento, maior área superficial, o traço de referência demandou maior quantidade de água, ao contrário do que se esperava. Tal resultado deve-se ao fato de que nos concretos com empacotamento o índice de vazios intergranular é reduzido, requisitando menor quantidade de água para preenchimento dos vazios;
- A migração de cloretos foi governada pelo consumo de cimento, devido a maior quantidade de aluminatos presente nos produtos de hidratação, que fixa os cloretos na matriz cimentícia com a formação do sal de Friedel;
- Os resultados do índice de ligantes mostram que é possível reduzir o consumo de cimento apenas com ajuste nas proporções dos agregados, produzir concretos mais resistentes e mais duráveis com menor quantidade de cimento.

Assim, como recomendação para trabalhos futuros tem-se:

- Estudo de misturas com valores de q em um intervalo no intervalo de 0,2 a 0,35, para verificar qual o valor maximizaria a eficiência dos concretos;
- Estudar os tempos de despassivação dos aços através de medidas eletroquímicas de potencial e densidade de corrente em corpos de prova de concreto armado;
- Estudar a influência do empacotamento no avanço da carbonatação de concretos.

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 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 3310-1**: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 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 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- AUDENAERT, K., YUAN, Q. & DE SCHUTTER, G., 2010. On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete. **Construction & building materials**, 24(3), pp.396–402.
- BADOGIANNIS, E. G; SFIKAS, I. P; VOUKIA, D. V, TREZOS, K. G; TSIVILIS, S. G. Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete. **Construction and Building Materials**,

v. 82, p. 133-141, 2015, ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023>. Acessado em 18/08/2022.

CÂNDIDO, T. G. **Desempenho de concretos com baixo uso de ligantes**. 2019. 100f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019, disponível <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15324/1/Arquivototal.pdf>. Acessado em 26/08/2022.

CASTRI, A; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concrete. **Ingeniería de Construcción**, v. 31, n.2, p. 91 – 104, 2016.

GRIGOLETTI, G.C., SATTTLER, M.A., **Estratégias ambientais para indústrias de cerâmica vermelha do Estado do Rio Grande do Sul**. Artigo de julho de 2003, disponível www.antac.org.br/ambienteconstruido/pdf/revista/artigos/Doc11390.pdf. Acessado em 15/08/2022.

DAMINELI, B. L. KEMEID, F. M. AGUIAR, P. S. JOHN, V. M. **Measuring the ecoefficiency of cement use**. *Cement and Concrete Composites*, V. 32, Issue 8, 2010.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. **Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes**. *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, v. 10, p. 998-1024, 2017.

HAN, Y. et al., 2021. The Resistance of Novel Concrete Prepared by Gap-Graded Blended Cement under Chloride-Sulfate Attack. **Journal of physics**. Conference series, 2109(1), p.12024

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

LIU, J., WANG, X., QIU, Q., OU, G., & XING, F. (2017). Understanding the effect of curing age on the chloride resistance of fly ash blended concrete by rapid chloride migration test. **Materials Chemistry and Physics**, 196, 315-323.

LOPES, H. M. T. **Aplicação do conceito de empacotamento de partículas na otimização de dosagens de concreto de cimento Portland**. 2019. L684a. Dissertação (Mestrado) – Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de Concentração em Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019, disponível https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-04072019-123140/publico/ME2019_HerbertMedeirosTorresLopes.pdf. Acessado em 26/08/2022.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, Diagnóstico e Prevenção**. João Pessoa: Editora IFPB, 2017.

PRESCO. Energy, Environmental and Sustainable Development. European Thematic Network na Pratical Recommendations for Sustanaible Construntion, EC 5º Framework Programme (1999).


RATTANASHOTINUNT, C. et al., 2018. Investigation on the strength, chloride migration, and water permeability of eco-friendly concretes from industrial by-product materials. **Journal of cleaner production**, 172, pp.1691–1698.

REBMANN, M. S. **Robustez de concretos com baixo consumo de cimento Portland: desvios no proporcionamento e variabilidade granulométrica e morfológica dos agregados**. 2016. 252 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SONG, Q. et al., 2018. Steel fibre content and interconnection induced electrochemical corrosion of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC). **Cement & concrete composites**, 94, pp.191–200.

NILSSON, L.; NGO, M. H.; GJØRV, O. E. **High-performance repair materials for concrete structures in the port of Gothenburg**. In.: Second international conference on concrete under severe conditions: environment and loading, v. 2, p. 1193-1198, 1998.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Chloride diffusivity in red mud-ordinary portland cement concrete determined by migration tests**. *Materials Research*, v. 14, n. 2, p. 227–234, 2011.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Cajazeiras - Código INEP: 25008978
	Rua José Antônio da Silva, 300, Jardim Oásis, CEP 58.900-000, Cajazeiras (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0005-07 - Telefone: (83) 3532-4100

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC

Assunto:	Entrega de TCC
Assinado por:	Nivan Furtado
Tipo do Documento:	Dissertação
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Nivan Ferreira Furtado, ALUNO (201612200435) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS**, em 25/10/2024 10:06:48.

Este documento foi armazenado no SUAP em 25/10/2024. 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: 1291076

Código de Autenticação: 0e30412164

