

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

MARIA LUÍZA DE CARVALHO COUTINHO

**ANÁLISE DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM ARGAMASSAS COM BAIXO
CONSUMO DE CIMENTO**

Cajazeiras-PB
2022

MARIA LUÍZA DE CARVALHO COUTINHO

**ANÁLISE DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM ARGAMASSAS COM BAIXO
CONSUMO DE CIMENTO**

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, sob Orientação do Prof.
Dr. Robson Arruda dos Santos.

Cajazeiras-PB
2022

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Suellen Conceição Ribeiro CRB-2218

C871a Coutinho, Maria Luíza de Carvalho

Análise da migração de cloretos em argamassas com baixo consumo de cimento / Maria Luíza de Carvalho Coutinho. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

71f.:il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-IFPB, Campus Cajazeiras. Cajazeiras, 2022.

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

1. Argamassa. 2. Durabilidade. 3. Migração de Cloreto. 4. Cimento.

I. Coutinho, Maria Luíza de Carvalho. II. Título

CDU: 691 C871a


MARIA LUÍZA DE CARVALHO COUTINHO

**ANÁLISE DA MIGRAÇÃO DE CLORETOS EM ARGAMASSAS COM BAIXO
CONSUMO DE CIMENTO**


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

Aprovado em 25 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 25/04/2022 16:07:22-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

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

Documento assinado digitalmente
 DANIEL TORRES FILHO
Data: 23/04/2022 15:18:30-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Daniel Torres Filho – IFPB - *Campus* Cajazeiras
Examinador 1

Leonardo de Souza
Dias:10215853431

Assinado de forma digital
por Leonardo de Souza
Dias:10215853431
Dados: 2022.04.22 14:16:44
-03'00'

Leonardo de Souza Dias – IFSERTÃO - *Campus* Santa Maria da Boa Vista
Examinador 2

“É justo que custe muito o que muito vale.”

(Santa Teresa d'Ávila).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me proporcionou perseverança ao longo dessa última etapa, assim como no decorrer dos 5 anos da graduação. Foi nele que encontrei forças para não desistir.

Aos meus pais, Aparecida e Juveni, pelo exemplo de vida, por me dar a oportunidade de buscar os meus sonhos e objetivos. E ao meu irmão, Mateus, pelo apoio e conselhos durante essa jornada. A vocês, mais essa vitória.

Aos meus amigos de curso, em especial Luanda e os grupos República e Universitários: Ana Caroline, Carollyne, Deise, Danyelle, Jéssica, Leila, Alan, Catarine, Edmilson, Mateus, Gabriel e Tiago, por todas as alegrias, aflições e momentos que passamos juntos, e também pelas palavras positivas durante esse último período. Vocês são minha família.

Aos amigos de Cajazeiras, Mayanne, Arthur, Kelliany, Letícia, Paulena, Ingrid, Emilly, Lindinêz e Milena, agradeço pelo acolhimento e por me proporcionarem os melhores momentos vividos na cidade. Os levarei para vida inteira.

À Izadora, agradeço por não ter desistido de todo o trabalho realizado junto a mim, mesmo quando tudo parecia dar errado, diante de todas as dificuldades e choros nos laboratórios. Além da amizade firmada. Sabíamos que não seria fácil, mas acredite, vencemos.

Ao meu orientador, Robson Arruda, agradeço pela orientação, paciência, conhecimento compartilhado, disposição e confiança depositada durante a realização desse trabalho. Obrigada por fazer parte da minha formação e contribuir para tal.

Não poderia deixar de agradecer aqueles que me ajudaram na execução dos trabalhos no laboratório: Leila, Jéssica, Caroline, Edmilson, Deise e professor Daniel Torres, agradeço pela disponibilidade e apoio.

À cada um, em particular, gratidão.

RESUMO

Sabe-se que o concreto é um dos materiais mais consumidos na atualidade, especificamente, na construção civil. Esse destaque revela-se devido as suas propriedades de resistência e plasticidade, as quais colaboram para que haja uma redução na deterioração do material, quando este for exposto à água. Dentre os materiais utilizados na produção do concreto e argamassa, tem-se o cimento, o qual é responsável pela emissão de cerca de 7% das emissões de CO₂ no mundo. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar a influência do empacotamento de partículas na durabilidade das argamassas com baixo consumo de cimento frente ao ataque por cloretos. Para isso, foi realizado um estudo experimental, utilizando o conceito de empacotamento de partículas de Alfred com o auxílio do software Q-Mix para a dosagem das argamassas estudadas, após a caracterização dos materiais. Sendo assim, foi definido dois tipos de traços, T1 e T2, de modo que T2 apresenta a adição de fíler calcário e metacaulim na sua composição. Posteriormente, foram feitas as análises e verificações dos resultados. Quanto à resistência mecânica, T1 apresentou melhor resultado em 7 e 28 dias de idade, no entanto, quanto à eficiência e à durabilidade, T2 se mostra mais eficiente, devido menor índice de ligantes, e com melhor resistência à penetração de íons cloretos, visto que resultou em valores significativamente menores para os coeficientes de migração. Com isso, T2 foi classificado com resistência elevada e T1 se classificou com resistência moderada. Portanto, com os resultados obtidos, foi observado que com a dosagem adequada de argamassas/concretos, pode-se obter melhores resultados quanto à durabilidade, tendo em vista que resistência mecânica não necessariamente implica em maior durabilidade.

Palavras-chave: argamassa; empacotamento; durabilidade; cloretos.

ABSTRACT

It is known that concrete is one of the most consumed materials today, specifically in civil construction. This highlight is revealed due to its properties of resistance and plasticity, which collaborate to reduce the deterioration of the material when it is exposed to water. Among the materials used in the production of concrete and mortar, there is cement, which is responsible for the emission of about 7% of CO₂ emissions in the world. Thus, this work aims to analyze the influence of particle packing on the durability of mortars with low cement consumption against chloride attack. For this, an experimental study was carried out, using the Alfred particle packing concept with the help of the Q-Mix software for the dosage of the studied mortars, after the characterization of the materials. Therefore, two types of traces were defined, T1 and T2, so that T2 presents the addition of limestone filler and metakaolin in its composition. Subsequently, the analysis and verification of the results were carried out. As for mechanical strength, T1 showed better results at 7 and 28 days of age, however, in terms of efficiency and durability, T2 is more efficient, due to the lower rate of binders, and with better resistance to chloride ions penetration, since which resulted in significantly lower values for the migration coefficients. Thus, T2 was classified as having high resistance and T1 was classified as having moderate resistance. Therefore, with the results obtained, it was observed that with the proper dosage of mortar/concrete, better results regarding durability can be obtained, considering that mechanical strength does not necessarily imply greater durability.

Keywords: mortar; packing; durability; chlorides.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de CO ₂ da produção de cimento.....	20
Figura 2 - Esquema da fabricação de cimento.....	21
Figura 3 - Consumo aparente no Brasil, em milhões de toneladas.....	21
Figura 4 - Teor crítico admitido por diferentes países.....	30
Figura 5 - Esquematização da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.....	31
Figura 6 - Diagrama esquemático das condicionantes do processo de transportes de fluidos no concreto.	32
Figura 7 - Perfis de concentração para três diferentes instantes de tempo.	34
Figura 8 - Esquema do processo de migração.	35
Figura 9 - Processo real no sistema de migração de íons.	35
Figura 10 - Ilustração da medição para profundidade de penetração de cloretos.....	37
Figura 11 - Classes de resistência à penetração de cloretos.	37
Figura 12 - Fluxograma do procedimento do programa experimental.	38
Figura 13 - Faixas do agregado miúdo.	39
Figura 14 - Retirada dos seixos da areia grossa.....	40
Figura 15- Processo do ensaio da massa específica do agregado miúdo.....	40
Figura 16 - Inserção dos agregados.	42
Figura 17 – Banco de dados dos agregados.....	42
Figura 18 – Parâmetros de entrada do software.	43
Figura 19 – Cálculo do CPFT (modelo de Alfred).....	43
Figura 20- Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada.	44
Figura 21 - Preparo dos materiais secos e água.....	46
Figura 22 - - Preparo dos aditivos e copos extras de água.	46
Figura 23 -- Fluxograma do procedimento de mistura.	46
Figura 24 - Medição do índice de consistência da argamassa para o traço T2.....	48
Figura 25 - Antes e depois da ruptura com 7 dias: traço T1.....	48
Figura 26 - Antes e depois da ruptura com 7 dias: traço T2.....	49
Figura 27 - Esquema de corte das amostras.	49
Figura 28 - Impermeabilização e acondicionamento das fatias das amostras.	50
Figura 29 - Montagem do conjunto do ensaio de migração.	50
Figura 30 - Correção da tensão aplicada e duração do ensaio de migração.	51

Figura 31 - Ruptura com 28 dias: traço T1.....	57
Figura 32 - Ruptura com 28 dias: traço T2.....	57
Figura 33 - Profundidades da migração dos íons cloretos nos corpos prova das argamassas estudadas T1 e T2, respectivamente.	59
Figura 34 - Classificação das argamassas.....	60
Figura 35 - Relação do coeficiente de migração com o consumo de cimentos de concretos e argamassas.....	60
Figura 36 - Relação do coeficiente de migração com o índice de ligantes de concretos e argamassas.....	61
Figura 37 - Argamassa do traço T1.....	62
Figura 38 - Argamassa do traço T2.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA).....	29
Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto	45
Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova para cada traço.	47
Tabela 4 - Módulo de finura das areias.	53
Tabela 5 - Massa específica do agregado miúdo.....	53
Tabela 6 - Massa específica do aglomerante.....	53
Tabela 7 - Massa específica da adição – filler.....	53
Tabela 8 - Massa específica da adição – metacaulim.....	54
Tabela 9 - Proporção e consumo dos materiais utilizados para o traço com empacotamento das partículas.....	54
Tabela 10 - Índice de Consistência (IC) para T1 e T2.....	55
Tabela 11 - Cargas de ruptura aplicadas na argamassa.	56
Tabela 12 - Índice de Ligantes das argamassas com 28 dias.....	58
Tabela 13 - Resultado do ensaio de migração para T1 e T2.....	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração.....	28
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria das areias.....	52
Gráfico 2 - Resistência à compressão dos corpos de prova.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

a/f – Relação água/finos

a/c – Relação água/cimento

CP – Corpo de Prova

CSI – The Cement Sustainability Initiative

IFPB – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

PIB - Produto Interno Bruto

CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CA – Concreto Armado

PVC - Policloreto de Vinila

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	EMISSÃO DE CO ₂ PELA INDÚSTRIA DO CIMENTO	20
3.2	TEORIA DO EMPACOTAMENTO	22
3.2.1	<i>Modelo de Furnas</i>	<i>23</i>
3.2.2	<i>Modelo de Andreasen e Andersen.....</i>	<i>24</i>
3.2.3	<i>Modelo de Alfred.....</i>	<i>24</i>
3.3	ADIÇÕES MINERAIS	25
3.4	DURABILIDADE.....	27
3.4.1	<i>Efeitos dos íons de cloreto</i>	<i>29</i>
3.5	DIFUSÃO	32
3.5.1	<i>Difusão em estado estacionário.....</i>	<i>33</i>
3.5.2	<i>Difusão em estado não estacionário</i>	<i>33</i>
3.5.3	<i>Ensaio de migração de cloretos.....</i>	<i>34</i>
4	METODOLOGIA	38
4.1	CACTERIZAÇÃO DO MATERIAIS	39
4.1.1	<i>Agregados</i>	<i>39</i>
4.1.2	<i>Aglomerante</i>	<i>40</i>
4.1.3	<i>Adições minerais e aditivos.....</i>	<i>41</i>
4.1.4	<i>Água de amassamento.....</i>	<i>41</i>
4.2	DOSAGEM DA ARGAMASSA DO CONCRETO.....	41
4.2.1	<i>Empacotamento de partículas.....</i>	<i>41</i>

	15
4.2.2 <i>Relação a/c</i>	44
4.3 PREPARO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	45
4.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS	47
4.4.1 <i>Ensaio de Consistência (Flow Table)</i>	47
4.4.2 <i>Ensaio de resistência – compressão axial</i>	48
4.4.3 <i>Migração de cloretos</i>	49
5 RESULTADOS E ANÁLISES	52
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	52
5.2 DOSAGEM DOS TRAÇOS FINAIS	54
5.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA	55
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	56
5.5 ÍNDICE DE LIGANTES	57
5.6 MIGRAÇÃO DE CLORETOS	58
6 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil representa um setor estratégico para o Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Segundo a Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC) (2021), no 1º trimestre de 2021 o PIB da construção civil cresceu 2,1% em relação ao 4º trimestre de 2020. Além disso, a construção civil liderou a geração de emprego em doze estados do país e ficou em segundo lugar em outros seis, no período de janeiro a agosto do ano de 2020, esse dado em número representa a geração de 58.464 novas vagas com carteira assinada, mesmo diante dos desafios como incremento dos seus custos e do cenário pandêmico da COVID 19 (CBIC, 2020). Em razão de todo esse desenvolvimento, também é notório o aumento dos custos dos insumos da construção civil, onde na sondagem da indústria da construção civil realizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) com o apoio da CBIC, no 1º trimestre de 2021 a alta dos insumos foi apontada por 57,1% dos empresários entrevistados como o maior problema que o setor enfrenta (CBIC, 2021).

Dos materiais mais disseminados pelo setor da construção tem-se o concreto, sendo o mais consumido na atualidade, com cerca de 19 bilhões de toneladas ao ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014, *apud* SCHMAL, 2018). Esse destaque pode ser relacionado à duas propriedades do concreto, resistência mecânica e plasticidade, que permitem sofrer menor deterioração quando exposto à água e possibilitam obter formas construtivas de diversas geometrias (PEDROSO, 2009).

Os concretos e argamassas possuem como principais componentes o cimento, a água e os agregados (OLIVEIRA, 2013). O cimento é um aglomerante hidráulico que em contato com a água forma fases hidratadas responsáveis pela resistência mecânica, permitindo a sua utilização para diversas aplicações (SCHMAL, 2018).

Diante dos materiais constituintes das argamassas e concretos, tem-se os agregados em que segundo Daminieli (2013), geralmente, formam mais de 80% da massa total do concreto, e o cimento e outros ligantes entre 8% e 20%, mesmo os agregados apresentando maior porcentagem na composição desses materiais, observa-se que o grande impacto ambiental do concreto está relacionado ao clínquer incorporado no cimento, pois mais de 70% das emissões de NO_x e 80% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) estão relacionadas ao clínquer. Porém, embora haja possibilidade das emissões geradas pelo clínquer diminuírem, isso será compensado pelo aumento estimado da produção de cimento, sendo comprovado em uma análise da evolução histórica do crescimento da produção de cimento e a previsão de evolução

desta produção, em que de acordo com o relatório sobre a produção anual de cimento Portland elaborado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) (2019), o consumo aparente de cimento teve o acréscimo de 1,8 milhão com relação a 2018, totalizando 54,8 milhões de toneladas em 2019, e em consumo per capita resulta em 261 kg/hab/ano.

O concreto é um material heterogêneo e de comportamento complexo, a sua dosagem consiste em uma atividade importante e que demonstra um desafio para os profissionais responsáveis por tal, visto que é necessário determinar a proporção ideal dos materiais constituintes de maneira a produzir uma mistura tecnicamente adequada e economicamente viável (LOPES; PEÇANHA; CASTRO, 2020).

Frente a isso, nos últimos anos, tem-se notado o crescimento do interesse no empacotamento de partículas em diferentes áreas da engenharia, já que grande parte dos materiais usados são ou contêm partículas de diferentes formas e tamanhos. Assim, o estudo de empacotamento de partículas pode ser definido como o problema de selecionar o tamanho e a proporção adequada dos materiais particulados de modo que vazios maiores sejam preenchidos por menores partículas. Logo, a durabilidade do concreto depende em grande parte da facilidade com a qual os fluidos podem penetrar no concreto e se mover dentro dele, em que o tamanho, volume dos poros e continuidade, bem como a compreensão do mecanismo de transporte de agentes agressivos no concreto consistem em fatores importantes para estimar a vida útil e a qualidade de estruturas de concreto (CASTRO; FERREIRA, 2016).

À vista disso, define-se a durabilidade como a capacidade de uma estrutura suportar a ação de intempéries, ataques químicos e outros processos de deterioração (BALBINO, 2012). Nota-se que a vida útil das edificações vem ganhando relevância diante dos projetistas e construtores, em que não só o desempenho mecânico é importante, mas também a durabilidade adequada ao meio ambiente em que estão inseridas. Visto que, a frequência de casos em que estruturas de concreto armado apresentam deterioração excessiva antes do término da vida útil prevista pela norma NBR 15575:2013 (SCHMAL, 2018).

Além disso, também há implicação para a economia, pois com a deterioração das edificações seria necessário ações e, conseqüentemente, recursos financeiros para reparação das estruturas, gerando cerca de 40% dos gastos totais. Sendo assim, a partir dos anos 90, devido ao crescimento de estruturas deterioradas, as pesquisas na área de durabilidade de concretos de cimento Portland ganharam maior enfoque (BALBINO, 2012).

A corrosão consiste no processo de deterioração que incide nas barras e nos fios de aço do concreto. Um dos agentes que provocam o fenômeno da corrosão os íons de cloretos

originários da água do mar ou de poluentes ambientais, que penetram através dos poros totais ou parcialmente saturados. Por consequência, o desempenho das estruturas de concreto não se torna satisfatório diante das exigências estabelecidas pelas normas (VILASBOAS, 2013).

Sendo assim, buscou-se reunir informações com o propósito de diminuir o impacto do consumo do cimento, principal insumo da composição das argamassas e concretos, objetivando garantir não só a resistência deste material, como também a sua durabilidade diante do ataque de agentes agressivos, com íons cloretos.

Dessa forma, esta pesquisa se delimita em analisar a durabilidade dos concretos na fase da argamassa utilizando o método de dosagem do empacotamento de partículas frente ao ataque de cloretos. Nesse conceito, o estudo se justifica pela necessidade de utilizar argamassas/concretos a partir de uma melhor dosagem, com baixo teor de cimento e com a otimização da mistura dos agregados, a fim de solucionar ou ao menos amenizar os impactos ambientais e ainda assim obter resultados satisfatórios com função e características estruturais.

“Uma economia de 5kg de cimento por m³, proporcionada por uma melhor dosagem, poderia acarretar uma redução da emissão de 100.000t de dióxido de carbono (CO₂) à atmosfera.” (HELENE; TUTIKIAN, 2011, p. 5). Além disso, com relação ao requisito durabilidade, segundo Helene e Tutikian (2011), consiste em um tema muito complexo que depende de diversas variáveis e, em função disso, ainda não se tem um método consensual para ser medida. Logo, é relevante o estudo também pela necessidade de analisar esse aspecto de durabilidade frente as condições de exposição previstas e as ações de agentes agressivos, como o cloreto.

Este trabalho está dividido em seis capítulos, organizados da seguinte forma: o primeiro, Capítulo 1, corresponde à introdução do trabalho, na qual é apresentada a contextualização do tema abordado, como também a justificativa e a delimitação da pesquisa. No Capítulo 2 são apresentados os objetivos, geral e específicos. O Capítulo 3, contempla a revisão de literatura, dispondo de um embasamento teórico para a execução do programa experimental da pesquisa. O Capítulo 4, descreve a metodologia, com os materiais e métodos empregados na execução dos procedimentos efetuados no estudo, visando atingir os objetivos propostos. O Capítulo 5, aborda os resultados e as respectivas análises e discussões da produção. O último capítulo, sendo este o Capítulo 6, é referente a exposição das conclusões do trabalho executado e as sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência do empacotamento das partículas na durabilidade das argamassas de concretos com baixo consumo de cimento frente ao ataque por cloretos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

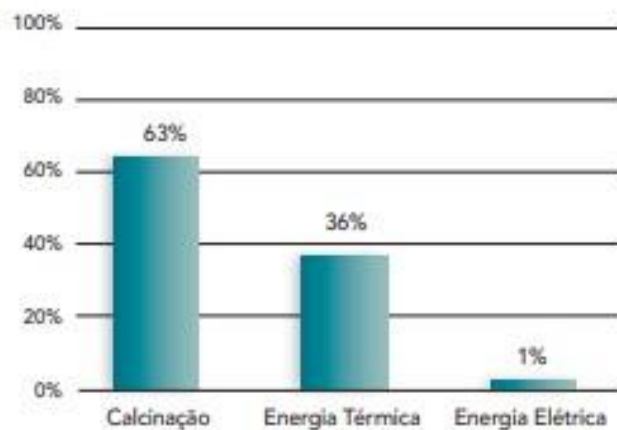
- Avaliar a influência do empacotamento dos agregados no desempenho das argamassas estudadas.
- Investigar a migração de cloretos nas argamassas estudadas com menor consumo de cimento, com a utilização de metacaulim e fíler calcário.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 EMISSÃO DE CO₂ PELA INDÚSTRIA DO CIMENTO

O processo de fabricação do cimento possui como uma das etapas principais, a produção de clínquer em fornos de alta temperatura, nessa etapa ocorre as emissões diretas de CO₂, em que quase 2/3 das emissões do setor são inerentes a esse processo, conforme Figura 1 (SNIC, 2019).

Figura 1 - Emissões de CO₂ da produção de cimento.



Fonte: CSI; SNIC, 2014.

A fabricação do clínquer através do tratamento térmico proporciona a queima da mistura de minerais em altas temperaturas e, por consequência, ocorre a alta liberação do gás carbônico (CO₂), o qual afeta diretamente no efeito estufa, que é responsável por regular a temperatura na atmosfera. Dessa forma, o clínquer é encarregado por mais de 91% das emissões de CO₂ do concreto, isto depende também, por exemplo, do tipo de forno, o que significa em termos de variação que a produção de uma tonelada de clínquer emite entre 825 e 1150 kg de CO₂ (DAMINELI, 2013).

Visto isso, o processo de fabricação de cimento é bastante complexo e exige uma atenção meticulosa para com o controle da formulação química e dos equipamentos especializados (SNIC, 2019). O processo de forma esquematizada é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema da fabricação de cimento.



Fonte: IEA/WBCSD, 2009.

Países em desenvolvimento, como o Brasil, apresentam um importante programa de infraestrutura a ser implementado, consequentemente, a demanda por cimento, que é o principal insumo na produção de concretos e argamassas, deverá ser impulsionada nas próximas décadas dentro da cadeia produtiva da indústria da construção. Visto isso, cerca de 7% de todo o gás carbônico emitido pelo homem, globalmente, corresponde a indústria cimenteira, destacando assim o processo produtivo de cimento por ser intensivo na emissão de gases de efeito estufa (SNIC, 2019).

O consumo de cimento no Brasil, mesmo diante do cenário pandêmico, que provocou dificuldade no setor econômico e social, obteve crescimento de 10,6% com relação a 2019, totalizando 60,6 milhões de toneladas, em consumo per capita representa 286 kg/hab/ano (SNIC, 2020). A Figura 3 apresenta esses dados.

Figura 3 - Consumo aparente no Brasil, em milhões de toneladas.



Fonte: SNIC, 2020.

Diante dos impactos da fabricação do cimento para com o meio ambiente, existem esforços da indústria do cimento para reduzir as emissões no Brasil, em que entre os anos de 1990 e 2019, teve uma redução de 19%, e isso se deve a fatores como as adições ou substitutos do clínquer, o uso de combustíveis alternativos e a eficiência térmica e elétrica. Sendo a adição ou substitutos do clínquer, além de diminuir o consumo de clínquer por tonelada de cimento, diminui também a queima de combustíveis e a emissão por calcinação/descarbonatação, contribuindo ainda para a preservação de jazidas (SNIC, 2020).

Existem dois meios que possibilitam a redução da quantidade de cimento na produção do concreto, sendo estes: a diminuição do teor de pasta; e a diminuição do teor de cimento na pasta. Estes consistem no empacotamento das partículas, pois com esse método de dosagem haverá menos vazios entre os mesmo a serem preenchidos pela pasta (DAMINELLI, 2013 *apud* CÂNDIDO, 2018).

Além disso, possibilita a diversificação das aplicações do cimento e das suas propriedades físicas e mecânicas, apresentando vantagens relacionadas com a maior durabilidade e vida útil de estruturas de concreto, como a baixa permeabilidade, a resistência ao ataque de cloretos e sulfatos, a prevenção das reações álcali-agregado e a elevada resistência à compressão em idades mais avançadas (SNIC, 2019).

3.2 TEORIA DO EMPACOTAMENTO

Define-se a teoria do empacotamento como o uso de frações de partículas de tamanhos e formas diferentes, em que as partículas menores preenchem os vazios gerados entre as partículas maiores, de modo que esse processo se repete para tamanhos cada vez menores, gerando assim um sistema onde diminui significativamente estes vazios. No caso do concreto, tem-se que “quanto menor o volume de vazios entre as partículas, menor o volume de água necessário para afastar o sistema e permitir a fluidez” (DAMINELLI; PILEGGI; JOHN, 2017).

Nesse contexto, com a redução do cimento, a porosidade é minimizada e conseqüentemente, a resistência e a durabilidade do concreto se mantém ou até mesmo aumentará, obtendo uma maior eficiência na sua produção, visto que esses parâmetros são diretamente influenciados pelo fator água/cimento (a/c) (LONDERO, 2016).

O primeiro estudo acerca do fenômeno de empacotamento foi atribuído a Kepler em 1611, e desde então vem sendo desenvolvido estudos envolvendo empacotamento de partículas em diversas áreas (RIVA, 2010). No início do século XX, tem-se buscado estudos para obtenção de curvas granulométricas ideais para o uso de concretos, em que pesquisadores como

Füller e Thompson, Adreasen e Andersen, Funk e Dinger se destacam diante desses estudos (LONDERO, 2016).

Apresentam-se duas abordagens relacionadas aos estudos teóricos e experimentais acerca do empacotamento de partículas, sendo elas: a discreta, a qual considera as partículas individualmente; e a contínua, a qual trata as partículas como distribuições contínuas. De modo que, existem diversas teorias e modelos baseados em expressões matemáticas, entre estes o modelo de Furnas (abordagem discreta) e o de Andreasen (abordagem contínua) se ressaltam e apresentam maior visibilidade diante dos estudos. Ainda sobre, após uma análise comparativa entre os dois modelos, provou-se que ambos convergem matematicamente para uma mesma abordagem, conhecida como modelo de Alfred ou Andreasen modificado, sendo assim um aperfeiçoamento dos modelos anteriores (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

3.2.1 Modelo de Furnas

Para obter uma alta compactação com fluidez para as indústrias de argamassa e concreto, Furnas propôs um modelo matemático (FURNAS, 1931 *apud* SARKAR, 2016). Este modelo, ele provou que as proporções das partículas envolvidas em uma distribuição de máxima densidade, ou seja, quando o ocorre o empacotamento máximo em que os vazios existentes entre as partículas maiores são totalmente preenchidos pelas menores, formam uma progressão geométrica expressa pela Equação 1 (OLIVEIRA, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right) \quad (1)$$

Onde:

CPFT é a porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p é o diâmetro da partícula;

D_s é o diâmetro da menor partícula;

D_L é o diâmetro da maior partícula;

r é a razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

Porém, a distribuição de Furnas apresenta pouca eficiência, visto que para empacotamento máximo não é natural, além de apresentar fraco desempenho e ser economicamente inviável (BANERJEE, 1998 *apud* SILVA; SEGADÃES; DEVEZAS, 2004).

3.2.2 Modelo de Andreasen e Andersen

Neste modelo, Andreasen e Adersen propôs um método simples de cálculo para a distribuição contínua do tamanho das partículas, baseado em uma condição de semelhança, em que as variações de tamanho e os arranjos de embalagem serão exatamente semelhantes em qualquer ampliação na distribuição (SARKAR, 2016). Essa condição de similaridade em torno de duas partículas com tamanhos diferentes é expressa em termos de uma lei de potências pela equação 2 (OLIVEIRA, 2013).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P}{D_L} \right)^q \quad (2)$$

Onde:

q é o modulo ou coeficiente de distribuição.

Observa-se que esse modelo não apresenta um limite mínimo do tamanho da partícula, podendo ser levado em conta partículas infinitamente pequenas, o que não se enquadra com a realidade (LONDERO, 2016). “É praticamente impossível obter partículas dessa faixa infinitesimal e manter um padrão de distribuição” (SARKAR, 2016). O que segundo o mesmo autor, esse fato impediu que o modelo de Andreasen obtivesse grande popularidade. E quanto ao coeficiente de distribuição, Andreasen propôs que o valor estivesse entre 0,33 e 0,50 para obter a densidade ótimo de embalagem.

Para Oliveira (2013), o coeficiente $q = 0,37$ proporciona o máximo empacotamento teoricamente possível, em que isso só ocorre quando D_S é igual a zero, o que na prática não se aplica. Logo, em sistemas para condições reais, é necessário utilizar o menor D_S possível afim de maximizar o empacotamento.

3.2.3 Modelo de Alfred

Após uma extensa análise comparativa entre os modelos de Furnas e Adreansen, a fim de solucionar as inviabilidades dos modelos anteriores, foi introduzido o conceito do tamanho mínimo de partículas (D_S) na equação de Andreasen e uma revisão matemática na equação de Furnas. Assim, a Equação 3 sugerida por Dinger e Funk, corresponde a expressão matemática do modelo de Alfred (VANDERLEI, 2004).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (3)$$

Verificou-se através de simulações computacionais a influência do coeficiente de distribuição, q , no empacotamento de partículas, em que valores menores ou iguais a 0,37 favorecem completamente para o empacotamento máximo para uma distribuição infinita, enquanto para valores acima de 0,37, favorecem para a existência de porosidade (DINGER E FUNK, 1993, *apud* VANDERLEI, 2004).

Ainda segundo Vanderlei (2004), para atingir uma melhor fluidez o valor de q não deve exceder aproximadamente de 0,30, sendo assim, utilizando valores próximos de 0,30 se obtém uma mistura que necessita de vibração para melhorar seu adensamento, e para menores que 0,25 a mistura se torna autoadensável. Concluiu-se que, o efeito de reduzir os valores do coeficiente de distribuição significa um aumento na quantidade de finos que influencia na interação entre as partículas, formando um líquido viscoso quando misturado com água.

3.3 ADIÇÕES MINERAIS

A produção de concreto tem evoluído ao longo desses anos, de modo que sua modernização está diretamente relacionada a adição de mais componentes na sua estruturação, como minerais, aditivos químicos, fibras etc. O desenvolvimento desses concretos é resultado de uma nova ciência do concreto e dos aditivos, como também do uso de aparatos científicos sofisticados para observar a microestrutura e a nanoestrutura do concreto (AÏTCIN, 2000).

Visto isso, fatores econômicos e ambientais têm influenciado na utilização de adições minerais, sendo estas em complemento ou substituição parcial ao cimento para a produção de concretos com propriedades e características melhoradas. Tais fatores podem ser relacionados a reciclagem dos subprodutos industriais, a redução de emissões perigosas lançadas na atmosfera durante a produção do cimento, a preservação das matérias primas e a economia de energia, resultando assim em concretos ecologicamente corretos (FERRARIS; OBLA; HILL, 2001 *apud* CASTRO; PANDOLFELLI, 2009).

Conceitua-se adições minerais como materiais silicosos insolúveis finamente moídos, com origem natural ou de subprodutos industriais, estas adições são acrescentadas ao concreto provocando efeitos químicos e físicos a microestrutura do material (METHA; MONTEIRO, 2014 *apud* SCHAMALZ, 2018).

As adições são classificadas em: material pozolânico, que consiste em materiais silicosos ou sílicoaluminosos, possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícia, porém através de reações químicas com o hidróxido de cálcio, na presença de umidade e temperaturas ambientes, formam compostos com propriedades cimentantes, como exemplo desse tipo de

adição é a sílica ativa e o metacaulim; material cimentante, diferentemente da classificação anterior, este não necessita de hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, no entanto a presença do hidróxido ou a gipsita acelera a sua hidratação, a exemplo são as escórias granulada de alto forno; e o fíler, que não possui atividade química, mas tem efeito físico de empacotamento granulométrico e pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento, exemplos desse tipo de ação são os calcários, pó de quartzo e o pó de pedra (ABNT, 2014; DAL MOLIN, 2011 *apud* SCHAMALZ, 2018).

Os benefícios do uso das adições minerais, tanto no estado fresco quanto endurecido, são evidentes para as várias propriedades do concreto, podendo variar em função da quantidade utilizada, das condições de cura, e da sua composição química, mineralógica e granulométrica. No entanto, vale ressaltar que os mecanismos pelos quais as adições minerais influenciam dependem mais do tamanho, forma e textura das partículas do que da sua composição química. Visto isso, as adições agem no objetivo de formar um concreto menos impermeável, ou seja, com a maior capacidade de impedir a infiltração de água nos poros capilares (FONSECA, 2010).

As adições minerais mais utilizadas em obras da construção civil, a fim de substituir parcialmente o cimento Portland são: metacaulim, a sílica ativa e a escória de alto forno (PRUDÊNCIO JR; MATOS, 2018). Sendo que, a sílica ativa e o metacaulim provoca uma aceleração no processo de hidratação das partículas de cimento, devido as suas micropartículas atuarem como pontos heterogêneos de nucleação, em que os primeiros hidratos podem precipitar e diminuir o período de dormência, conseqüentemente, acelera o processo de hidratação (KADRI *et al*, 2011 *apud* PRUDÊNCIO JR; MATOS, 2018).

Sabe-se então, que o uso de adições minerais em geral proporciona melhores características técnicas em materiais cimentícios, visto que modificam a estrutura interna desses materiais. Pode-se citar dos fatores positivos, o aumento da resistência do concreto no estado endurecido, como também o aumento da durabilidade, como a exemplo a redução da porosidade capilar, diminuição de fissuras de origem térmica e resistência a ataques por agentes agressivos. Além desses benefícios técnicos, também pode ser mencionados fatores ambientais, uma vez que reduz a quantidade de material cimentício, o consumo energético e as emissões de CO₂ na atmosfera (FONSECA, 2010).

3.4 DURABILIDADE

O conceito de durabilidade, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), consiste na capacidade da estrutura resistir as influências ambientais previstas e definidas no início da elaboração do projeto.

Para a NBR 15575 (ABNT, 2021), define-se como a “capacidade da edificação ou de seus sistemas desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas no manual de uso, operação e manutenção”. Sendo o termo comumente utilizado com o aspecto qualitativo, para expressar a condição em que a edificação ou seus sistemas mantêm seu desempenho requerido durante a vida útil, a qual se refere ao período em que estes se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos.

A partir de uma análise realista, nenhum material é propriamente durável, visto que com as interações ambientais, ocorrem mudanças na microestrutura com o tempo e, conseqüentemente, nas suas propriedades. Sendo o concreto o material estrutural mais utilizado, sua microestrutura é heterogênea, como também altamente complexa, sendo assim é fundamental ter como base os elementos essenciais da sua microestrutura para que se possa analisar os fatores de influência nas suas propriedades, tais como: resistência, elasticidade, retração, fluência, fissuração e durabilidade (METHA; MONTEIRO, 2014).

Ainda segundo Metha e Monteiro (2014), define-se macroestrutura como a estrutura de um material visível a olho nu, sendo o concreto considerado como bifásico, constituído de partículas de agregado dispersas em meio ligante (pasta de cimento). E microestrutura é a estrutura fina de um material visível em nível microscópico, em que as duas fases não são distribuídas de maneira homogênea entre elas.

A norma NBR 6118 (ABNT, 2018) associa os mecanismos de envelhecimento e deterioração em relação ao concreto, à armadura, como também da estrutura propriamente dita. Sendo os mecanismos preponderantes de deterioração relativos ao concreto: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado. Já os relativos à armadura: despassivação por carbonatação e despassivação por ação de cloretos. Os relativos à estrutura como um todo, são todos relacionados as ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência, relaxação e todas as ações que atuam sobre a estrutura. O Quadro 1 apresenta os respectivos conceitos desses mecanismos de acordo com norma.

Quadro 1 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração.

Deterioradores	Tipos e conceito
Do concreto	<ul style="list-style-type: none"> - Lixiviação, é o mecanismo responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras. - Expansão por sulfato, é a expansão por ação de águas ou solos contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias com a pasta de cimento hidratado. Reação álcali-agregado, é a expansão por ação das reações entre os álcalis do concreto e agregados reativos.
Da armadura	<ul style="list-style-type: none"> - Despassivação por carbonatação, é a ação do gás carbônico da atmosfera sobre o aço da armadura. - Despassivação por ação de cloretos, consiste na ruptura local da camada de passivação, causada por elevado teor de íon-cloro.
Da estrutura propriamente dita	<ul style="list-style-type: none"> - Ações mecânicas; - Movimentações de origem térmica; - Impactos; - Ações cíclicas; - Retração; - Fluência; - Relaxação, etc.

Fonte: Autoria própria, 2022.

A presença de água é um fator determinante para a ocorrência dessas deteriorações, principalmente as relacionadas ao concreto e à armadura, em que quanto mais a água penetra nos sólidos, maior será a velocidade de degradação da estrutura, implicando na sua durabilidade e vida útil (SCHMALZ, 2018).

Para Neville (2016), a durabilidade decorre tanto de fatores externos quanto internos. Estes constituem em ações físicas, mecânicas ou químicas, de modo que, as causas físicas incluem efeitos da alta temperatura, da diferença de coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento endurecida. Já as mecânicas incluem danos por impacto, abrasão, erosão ou cavitação, e os químicos incluem reações álcali-sílica e álcali-carbonato, em que o ataque químico externo ocorre, principalmente, por meio de íons agressivos, seja eles cloretos, sulfatos ou dióxido de carbono, bem como por vários líquidos e gases industriais ou naturais.

Além disso, para o mesmo autor, os processos de deterioração não ocorrem de uma única causa, logo, é comum que este processo seja influenciado por diversos fatores, sendo em algumas situações, difícil atribuir a um fator específico. Porém, a maioria das influências negativas para com a durabilidade das estruturas, está relacionado ao transporte de fluidos, seja a água pura ou com íons, o gás carbônico ou o oxigênio, essa característica é denominada de permeabilidade do concreto.

A permeabilidade dos concretos ou das argamassas comparadas a pasta de cimento é bem maior, isso está relacionada as microfissuras presentes na zona de transição na interface entre o agregado e a pasta de cimento, pois com a incorporação de agregado à pasta ou argamassa aumenta consideravelmente a sua permeabilidade. Portanto, quanto maior a

dimensão do agregado, maior será o coeficiente de permeabilidade. É possível reduzir a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade com a redução da relação água/cimento, o consumo adequado de cimento e, uma cura e adensamento adequado. Além disso, a dimensão e a granulometria dos agregados são relevantes para a microfissuração na zona de transição, a qual é a principal causa de alta permeabilidade do concreto e representa uma região de contato com as partículas de agregado graúdo (METHA; MONTEIRO, 2014).

3.4.1 Efeitos dos íons de cloreto

Dentre as ações de deterioração, a da armadura pode ser vista como umas das mais prejudiciais, de modo que as manifestações patológicas decorrentes deste tipo de ação afetam diretamente no Estado Limite Último (ELU) da estrutura, podendo causar a sua ruptura total, assim como ao Estado Limite de Serviço (ELS), prejudicando sua durabilidade e vida útil.

“Dentre as ações existentes que provocam falhas e redução da vida útil de estruturas de concreto armado, a corrosão da armadura pela ação de íons cloretos pode ser a mais deletéria”. Diversas são as fontes de íon de cloretos, como água de amassamento contaminada, sais de degelo, agregados contaminados, aceleradores de pega à base de cloretos, no entanto, a principal origem está no ambiente marinho (PINTO, 2019).

Visto isso, nos projetos das estruturas de concreto, a agressividade ambiental deve ser classificada de acordo com a Tabela 1, determinada pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente par efeito de projeto	Risco de deterioração da estrututa
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito forte	Industrial	Elevado
		Respingos de maré	

Fonte: ABNT NBR 6118, 2014.

É possível verificar que ambientes marinhos possuem alta classe de agressividade para as estruturas de concreto. Dessa forma, para Neville (2016), o concreto exposto à água do mar está sujeito a várias ações químicas e físicas, entre elas ataques químicos e corrosão das armaduras induzida por cloretos. Essas ações estão relacionadas ao fato dessa água muitos sais

dissolvidos, sendo a salinidade total típica de 3,5%. Em alguns lugares específicos possuem outros valores diferentes, podendo ter porcentagem maior ou menor comparada a salinidade típica. Segundo o mesmo autor, os íons cloretos chegam até o concreto através do ar/vento, permeabilidade, bem como pela difusão.

A presença de íons cloreto, dependendo da relação Cl^-/OH^- , pode destruir a camada protetora do aço, mesmo com valores de pH superiores a 11,5. Sabe-se que quando essa relação é mais alta do que 0,6, o aço não está mais protegido contra a corrosão. Para dosagens de concreto, o teor limite de cloreto para se iniciar a corrosão está ente 0,6 e 0,9 kg de Cl^- por m^3 de concreto.

Para Hino (2019), o valor crítico do teor de cloreto presente em uma estrutura de concreto armado, necessita de uma análise da solução contendo o íon e do ambiente de exposição. Em geral, o valor aceito é de 0,4% em relação a massa de cimento, a Figura 4 mostra o limite tolerado em diferentes países.

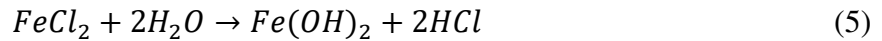
Figura 4 - Teor crítico admitido por diferentes países.

Norma	País	Ano	Teor de cloretos recomendado
ABNT NBR 12655	Brasil	2015	$\leq 0,15\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado exposto a cloretos (condição de serviço da estrutura);
			$\leq 0,30\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura;
			$\leq 0,40\%$ em relação à massa de cimento, para concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura);
			$\leq 0,05\%$ para concreto protendido
ACI 318S-05	EUA	2014	$\leq 0,15\%$ da massa de cimento (ambiente com Cl^-)
			$\leq 0,3\%$ da massa de cimento (ambiente normal)
			$\leq 1\%$ da massa de cimento (ambiente seco)
			$\leq 0,06\%$ da massa de cimento (concreto protendido)
EN 206-1	Portugal	2007	0,4% da massa de cimento
BS 8110:1	Inglaterra	1985	
JSCE-SP2	Japão	1986	$\leq 0,6 \text{ kg/m}^3$ de concreto

Fonte: Figueiredo, 2011 *apud* Hino, 2019.

As manifestações patológicas em concretos resultantes da corrosão da armadura, se manifestam na forma de expansão, fissuração e lascamento do concreto de cobrimento, como também a perda de aderência entre o aço e concreto, podendo a estrutura vir a colapso (METHA; MONTEIRO, 2014).

Para que ocorra a corrosão, a camada passivadora deve ser penetrada, “os íons cloreto ativam a superfície do aço para a formação de um ânodo, com a camada de passivação sendo o cátodo”, em que o processo das reações é compreendido pelas equações 4 e 5.



Nessas reações anódica e catódica, os íons ferrosos positivamente carregados, Fe^{++} , no ânodo passam para a solução, enquanto os elétrons livres negativamente carregados, e^{-} , passam pelo aço até o cátodo, onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e reagem com a água e o oxigênio, formando íons hidroxila $(OH)^{-}$. Estes, reagem com íons ferrosos, formando hidróxido ferroso, o qual é convertido pela oxidação posterior em hidróxido férrico, comumente conhecido como ferrugem, com isso, se inicia o processo de corrosão. As Equações 5,6, 7 e 8, demonstram esse processo, assim como a Figura 5 representa de forma esquematizada (NEVILLE, 2016).

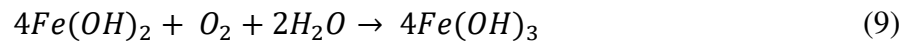
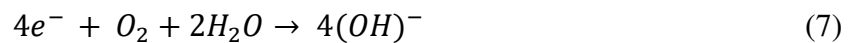
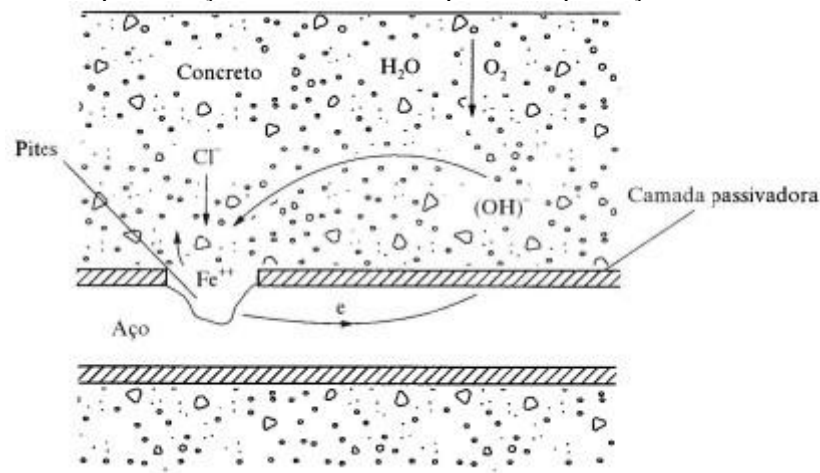


Figura 5 - Esquematização da corrosão eletroquímica na presença de cloretos.



Fonte: Neville, 2016.

Visto isso, a patologia decorrente da presença de íons de cloreto se caracteriza por a corrosão da armadura, no caso, dos vergalhões utilizados nas estruturas de concreto armado. E ocorre na presença de umidade ou no contato com água.

Existem dois tipos de corrosão, a oxidação e a própria corrosão, estas consistem nos respectivos processos: oxidação superficial, sem a necessidade do contato com a água, de modo que o aço sofre uma reação formando uma película de óxido de ferro. Como se trata de um

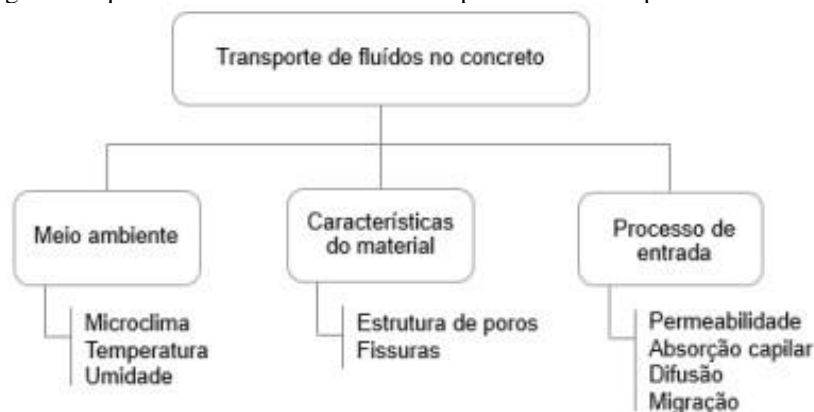
efeito superficial, não altera a seção da barra, como também não compromete a resistência da armadura, podendo ser utilizada normalmente; e o outro, é um processo mais agressivo, formando ferrugem nas barras e alterando a seção, conseqüentemente, afeta negativamente a sua resistência e a sua utilização (PITELLI; MARCO, 2019).

3.5 DIFUSÃO

Um dos fatores determinantes para a durabilidade dos concretos, argamassas e outros compostos cimentícios, é o transporte de fluidos na matriz porosa, de modo que substâncias agressivas as composições destes materiais podem ser transportadas pelos fatores apresentados na Figura 6. Estes podem ser intrínsecos ou extrínsecos ao material, podendo ocorrer interações de natureza química ou física com o fluído (BREKAILO, 2019).

É importante salientar que, na prática estes mecanismos podem ocorrer em conjunto e, é comum adotar um mecanismo como o que prevalece sobre os outros a fim de simplificar o processo de intervenção (MEDEIROS, 2008).

Figura 6 - Diagrama esquemático das condicionantes do processo de transportes de fluidos no concreto.



Fonte: Brekailo, 2019.

Segundo Medeiros (2008), os íons de cloreto como cristal sólido pode não oferecer risco elevado para as estruturas, ou seja, para que ocorra contaminação do concreto, este íon precisa estar dissolvido em água. No entanto, no estado sólido, ainda pode se depositar na superfície do concreto e através de uma chuva, se dissolver e ser transportado para o interior da matriz estrutural, pelos mecanismos de absorção capilar ou difusão.

“A difusão representa o movimento de íons que ocorre devido a uma diferença de potencial químico, ou seja, um gradiente de concentração que age como força motriz do fenômeno”. Existem dois estados que descrevem teoricamente este fenômeno de transporte,

sendo o estado estacionário e o não estacionário, estes são baseados de acordo com as leis de Fick (BREKAILO, 2019).

3.5.1 Difusão em estado estacionário

O ensaio de difusão de cloretos pelo método do estado estacionário foi estudado pela primeira vez em 1945 por Gordon, segundo Geiker et al. (1995) *apud* Medeiros (2008).

A difusão consiste num processo que depende da variação da quantidade de um elemento transportado ao longo do tempo. Visto isso, muitos materiais sofrem por processos e reações do transporte de fluídos que influenciam nas suas características, sendo assim, necessário ter conhecimento da velocidade em que ocorre a difusão. Este processo consiste na taxa de transferência de massa, expressa como fluxo difusional (J), este fluxo compreende na massa (M) que se difunde perpendicularmente a uma área unitária e de seção transversal de um sólido ao longo do tempo (t), expresso pela Equação 10 (CALLISTER; 2002; BREKAILO, 2019). Dessa forma, se o fluxo difusional não ocorrer variações em função do tempo, ou seja, fluxo constante, tem-se que a difusão atingiu a condição de estado estacionário.

$$J = \frac{M}{At} \quad (10)$$

Matematicamente, essa teoria é expressa pela Equação 11, a qual representa a primeira Lei de Fick. Esta relaciona o fluxo difusional com o gradiente de concentração (dC/dx), definido como um ponto particular da curva resultante da concentração (C) em função da posição no interior do sólido, e a constante de proporcionalidade, D_s , que representa o coeficiente de difusão em estado estacionário.

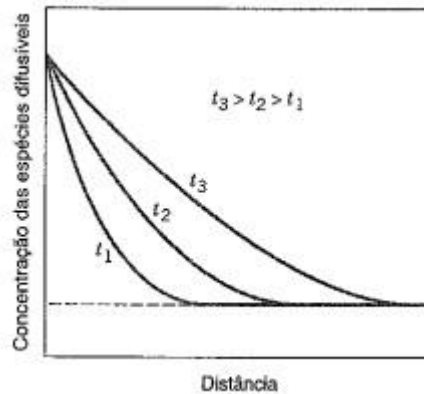
$$J = -D_s \frac{dC}{dx} \quad (11)$$

O sinal negativo é justificado pelo fato de a difusão ocorrer da direção do meio mais concentrado para o menos concentrado (CALLISTER, 2002; BREKAILO, 2019).

3.5.2 Difusão em estado não estacionário

A difusão no estado não estacionário representa a maioria das situações práticas, em que diferentemente da difusão em estado estacionário, o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em um ponto particular no interior do sólido variam ao longo do tempo, de modo a resultar um acúmulo ou esgotamento líquido do componente que se encontra em difusão, ilustrado na Figura 7 (CALLISTER, 2002).

Figura 7 - Perfis de concentração para três diferentes instantes de tempo.



Fonte: Callister, 2002.

Quando o fluxo é variável com o tempo e a profundidade de penetração, tem-se que a teoria é expressa pela Equação 12, conhecida como a segunda lei de Fick, em que D consiste no coeficiente de difusão no estado não estacionário (MENDES, 2009).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (12)$$

Para as condições em que, antes da difusão todos os átomos presentes no sólido estão distribuídos uniformemente, mantendo a concentração C_0 , assim como o valor de x na superfície é zero aumentando com a distância para dentro do sólido, e o tempo é zero para o instante imediatamente anterior ao início do processo de difusão, expressas pelas Equações 13 e 14, tem-se a Equação final 15 (CALLISTER, 2002).

$$t = 0, C = C_0 \text{ em } 0 \leq x \leq \infty \quad (13)$$

$$t > 0, C = C_s \text{ em } x = 0 \quad (14)$$

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ns}t}}\right) \quad (15)$$

Onde:

C_x é a concentração do íon a uma profundidade x , após decorrido tempo;

D_{ns} é o coeficiente de difusão em estado não estacionário;

X é a distância da superfície exposta;

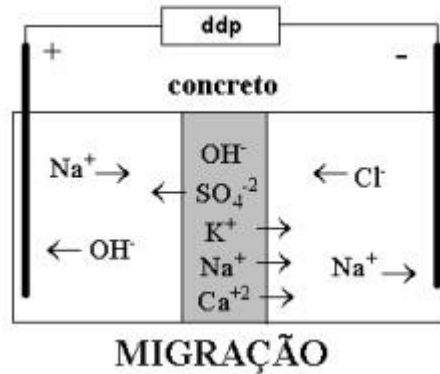
Erf é a função erro de Gauss.

3.5.3 Ensaio de migração de cloretos

O fenômeno da migração consiste no fluxo de elementos iônicos, como por exemplo cloretos e sulfatos, que ocorre por ter como força motriz uma diferença de potencial originada,

geralmente, por um eletrodo positivo e outro negativo. De modo que, os íons se movimentam em direção ao eletrodo de carga oposta (BREKAILO, 2019). Este processo pode ser verificado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema do processo de migração.

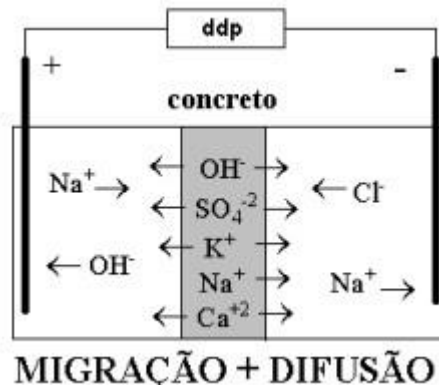


Fonte: Andrade, 1993 *apud* Medeiros, 2008.

O ensaio de migração, por ser realizado com uma redução de tempo comparado ao ensaio de difusão, é feito com o objetivo de produzir informações qualitativa sobre o coeficiente de difusão, de modo que o método acelerado resulte em medidas da resistência à penetração de cloretos de um material. (MEDEIROS, 2008). Com base nisso, de acordo com Mendes (2009), muitos autores têm desenvolvido estudos a partir desse procedimento de migração, correlacionando os resultados com métodos ditos como de difusão.

Embora, quando se reproduz as condições apresentadas na Figura 8, em que é aplicado um Diferencial de Potencial (DDP), tem-se que as forças de difusão também atuam no transporte dos íons, ou seja, o processo real ocorre os dois tipos de transporte simultaneamente, como mostra a Figura 9 (MEDEIROS, 2008).

Figura 9 - Processo real no sistema de migração de íons.



Fonte: Andrade, 1993 *apud* Medeiros, 2008.

Considerando a migração em condições de fluxo não estacionário, a proposta de avaliação de Tang e Nilsson (1992) se destaca por ser um método de ensaio prático e rápido. Esses autores, desenvolveram o procedimento do ensaio de migração a partir da profundidade

de penetração de cloretos por medida calorimétrica, em que o fluxo de íons é proporcional a sua força motriz, composta de parcelas de origem elétrica e química (MENDES, 2009).

A Nordtest Method - NT Build 492 (1999) apresenta o procedimento para determinação do coeficiente de migração de cloretos em concreto, argamassa ou materiais de reparo à base de cimento, com base nas condições do estado não estacionário. Esta norma é aplicável as amostras moldadas tanto em laboratório como em estruturas de campo. Visto isso, o coeficiente de migração de cloreto é medido da resistência do material testado à penetração de cloreto, conforme a Equação 16.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \times \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (16)$$

Onde:

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \times \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

Uma vez que, a concentração de cloreto na qual a cor muda (c_d) for 0,07 N para concreto e a concentração de cloreto na solução do católito (c_0) for 2 N, a expressão admite o valor de 1,28, como mostra na Equação 17.

$$\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2 \times 0,07}{2} \right) = 1,28 \quad (17)$$

Logo, a o coeficiente de migração pode ser calculado pela equação simplificada, demonstrada pela Equação 18.

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2)t} \times \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \quad (18)$$

Em que:

D_{nssm} = coeficiente de migração em estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U = valor absoluto da tensão aplicada (V);

L = espessura do corpo de prova (mm);

x_d = valor médio das profundidades de penetração de cloreto (mm);

t = duração do teste (h);

z = valor absoluto da valência do íon, para cloreto $z = 1$;

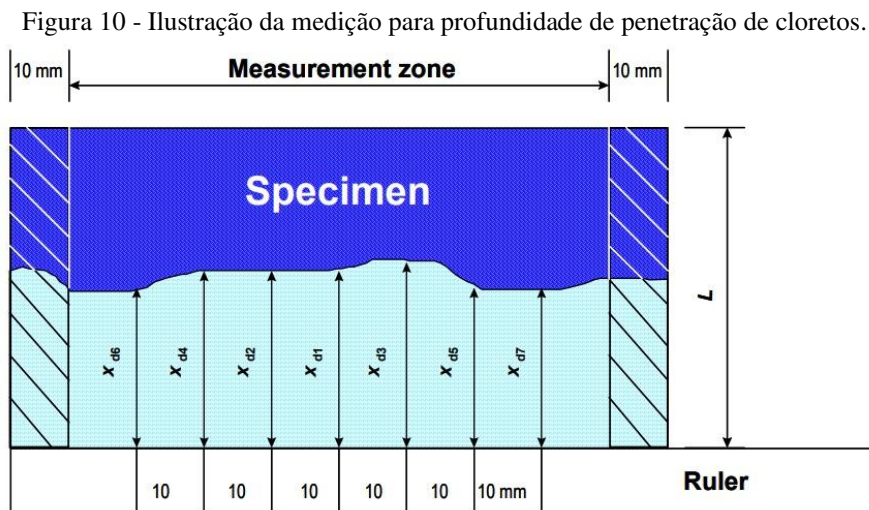
R = constante dos gases, (J/(K.mol));

T = valor médio das temperaturas inicial e final (°C);

E = potencial elétrico (V).

Mendes (2009), ressalta que a norma NT BUILD 492:1999 prescreve o ensaio com base na proposta dos autores Tang e Nilsson.

O ensaio requer três amostras de corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 100 mm e espessura de 50 mm, o método é realizado com a aplicação de um potencial elétrico externo colocado axialmente através da amostra, fazendo com que os íons cloreto migrem para esta, e após uma certa duração do teste, a amostra é dividida axialmente para ser posta uma solução de nitrato de prata em uma das seções cortadas. Posteriormente, a profundidade de penetração de cloreto pode ser medida a partir da precipitação visível de cloreto de prata branca, Figura 10, e assim ser calculado o coeficiente de migração (NT BUILD 492, 1999).



Fonte: NT Build 492, 1999.

Para se ter uma classificação qualitativa sobre o concreto analisado por meio do ensaio proposto, Gjorv (2001) *apud* Mendes (2009), propõe que seja agrupado em cinco classes de resistência a penetração de cloretos, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 - Classes de resistência à penetração de cloretos.

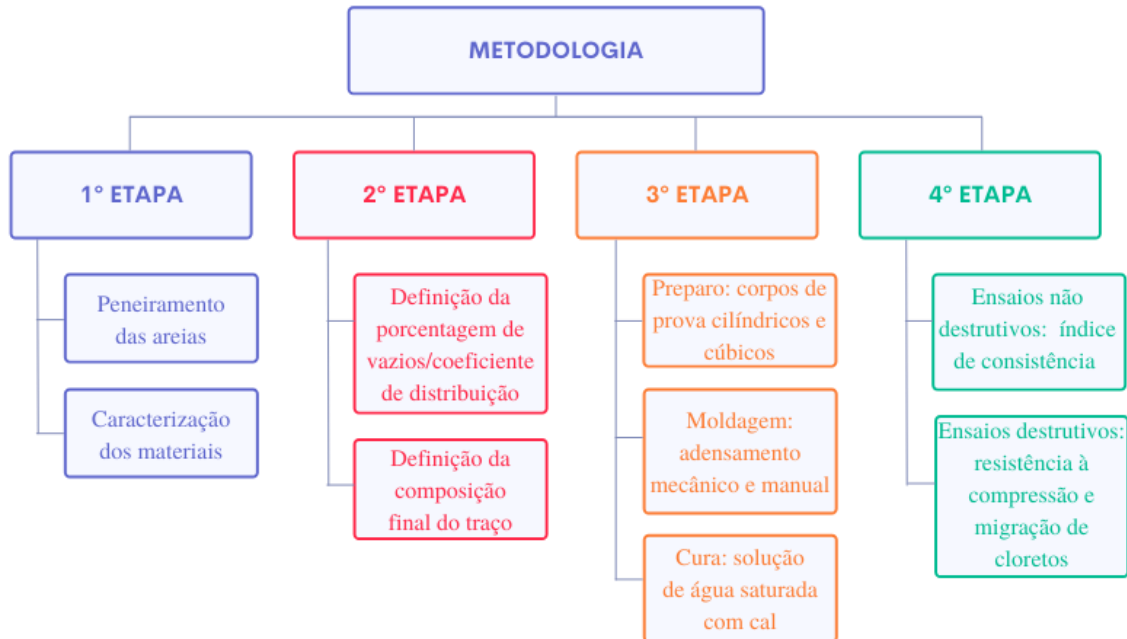
Coeficiente de difusão em regime não estacionário (D_{ns})	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} \leq 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ultra elevada

Fonte: Gjorv, 2001 *apud* Mendes, 2009.

4 METODOLOGIA

Este Capítulo descreve um programa experimental com abordagem quantitativa, dividindo-o em quatro etapas, Figura 12, incluindo todos os objetivos propostos e conforme referencial teórico.

Figura 12 - Fluxograma do procedimento do programa experimental.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A primeira etapa abrange os ensaios de caracterização dos materiais granulares utilizados na produção das argamassas de concreto, como o cimento, agregados miúdo e graúdos, e adições minerais, parte desses materiais foram obtidos na região de Cajazeiras-PB, como a areia e a brita, e outra parte obtidos em João Pessoa-PB, como o cimento CP V, o aditivo plastificante, as adições minerais, sendo necessário o recurso de transporte para a entrega desses materiais. Esta etapa foi executada conforme procedimentos normatizados, nos laboratórios de geotecnia, técnicas construtivas e estruturas localizados no Instituto Federal da Paraíba – *Campus Cajazeiras*.

A segunda etapa consiste na determinação e validação dos traços, aplicando o conceito de empacotamento de partículas com e sem adições.

A terceira etapa compreende o preparo e moldagem dos corpos de prova submetidos a determinação do índice de consistência e adensamento conforme a NBR 13276:2016 e NBR 5738:1994, respectivamente. Isto com o uso de betoneira e moldes disponibilizados no laboratório de materiais da construção no IFPB, para o processo de mistura dos materiais. Após

as 24 horas de moldagem, foram desmoldados e colocados no processo de cura submersos em tanque com água saturada com cal.

Por fim, após o processo de cura, foram realizados os ensaios destrutivos e não destrutivos para se obter a resistência e a durabilidade das argamassas de concretos com a redução do cimento frente ao ataque de cloretos. Para isso foram feitos os ensaios de compressão axial dos corpos de prova e migração de cloretos pelo método não estacionário, de acordo com a norma NT BUILD 492. Posteriormente foram feitas as análises e verificações dos resultados, avaliando o comportamento dos corpos de prova estudados, a fim de ter conhecimento sobre a durabilidade destes.

4.1 CACTERIZAÇÃO DO MATERIAIS

4.1.1 Agregados

Para obtenção dos objetivos propostos, a fim de avaliar a durabilidade das argamassas frente ao ataque por íons de cloretos e sob a influência do método de empacotamento de partículas, assim como adições minerais e aditivos, partiu-se inicialmente da caracterização do agregado miúdo, sendo a areia em três faixas granulométricas, como grossa, média e fina, para compor os traços de referência e de empacotamento, com e sem adições. Para isso, foi realizado a separação com peneiras de aberturas de 1,2 mm e 0,6 mm, de modo que, a areia retida na peneira de 1,2 mm foi denominada de areia grossa, a areia passante na 1,2 mm e retida na 0,6 mm foi classificada como areia média, e a passante da peneira 0,6 m foi chamada de areia fina. Essas frações podem ser observadas conforme a Figura 13.

Figura 13 - Faixas do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Vale salientar que, após a separação das três faixas, a areia grossa foi passada na peneira

de obra com abertura de 4 mm, mostrada na Figura 14, para retirada dos seixos presentes na amostra.

Figura 14 - Retirada dos seixos da areia grossa.



Fonte: Autoria própria, 2022

Para determinação da composição granulométrica e do módulo de finura (MF) foram caracterizados conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), através do peneiramento mecânico e utilizando peneiras da série normal e intermediária, com tampa e fundo, para duas amostras diferentes.

Além da granulometria, foi determinada a massa específica para as três faixas de acordo com a norma NBR 16916 (ABNT, 2021), utilizando o cone-tronco até que a areia atingisse a condição de saturada superfície seca, que ocorre quando o agregado desmorona ao retirar o molde. Também foi realizado atendendo as condições de tempo e temperatura conforme a norma para esse ensaio. Este processo pode ser observado na Figura 15.

Figura 15- Processo do ensaio da massa específica do agregado miúdo.



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.1.2 Aglomerante

Para compor os traços, o cimento utilizado foi o CP V ARI, com cerca de 60 MPa para classe de resistência em 28 dias, este é comumente utilizado com o objetivo de obter altas

resistências nas primeiras horas de aplicação, e escolhido na pesquisa devido ao baixo teor de adições na sua fabricação.

O ensaio da massa específica foi realizado conforme a norma NBR 16605 (ABNT, 2017), utilizando o frasco volumétrico de Le Chatelier e a querosene como o líquido reagente. O procedimento foi feito para duas amostras, obedecendo as condições de tempo e temperatura determinados pela norma.

4.1.3 Adições minerais e aditivos

As adições utilizadas nas argamassas confeccionadas, foram o fíler calcário e o metacaulim, em substituição parcial ao cimento. As massas específicas destas foram definidas de acordo com norma NBR 16605 (ABNT, 2017).

O aditivo químico empregado foi o superplastificante ADVA 525, para atingir a consistência desejada com a redução da quantidade de água.

4.1.4 Água de amassamento

Na moldagem das argamassas, foi utilizada a água de abastecimento local, a qual é considerada adequada para uso em concreto, sendo dispensável ser ensaiada para o controle de sua aceitação, de acordo com as condições estabelecidas na norma NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

4.2 DOSAGEM DA ARGAMASSA DO CONCRETO

4.2.1 Empacotamento de partículas

Uma vez caracterizado os materiais constituintes da argamassa quanto as suas granulometrias e massas específicas, foi desenvolvido a dosagem desta com base no modelo de empacotamento de Alfred, também conhecido como Andreassen modificado, visto que este é considerado método mais eficiente, considerando os tamanhos mínimo e máximos dos materiais.

A dosagem das argamassas foi realizada através do Software Q-Mix, desenvolvido por Arruda (2022). O software realiza a otimização das misturas dos agregados, calculando as porcentagens ótimas, em que se considera o modelo de empacotamento A& Modificado. Durante a pesquisa foi encontrado o software EMMA - Elkem Material Mix Analyzer, da Elkem, contudo, este não calcula as porcentagens dos agregados, apenas apresenta o ajuste à

curva do modelo matemático, em que o usuário atribui as porcentagens dos materiais na mistura.

As Figuras 16, 17, 18, 19 e 20 mostram a sequência de utilização do software para a otimização do empacotamento. Vale ressaltar que para obter um bom resultado é necessário selecionar bons agregados, o software retorna o melhor resultado dentre as condições de entrada. A seguir são descritos os passos para utilização da ferramenta desenvolvida:

1º passo: Inserir os resultados do ensaio de granulometria dos agregados.

O usuário insere as informações do agregado, dando um nome a ele, em seguida preenche os resultados da análise granulométrica, Figura 16. A quantidade de agregados é indefinida, Figura 17, ponto importante, visto que usuário pode fazer inúmeras combinações e escolher a que melhor se adequa.

Figura 16 - Inserção dos agregados.

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

Fonte: Arruda, 2022.

Figura 17 – Banco de dados dos agregados.

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		

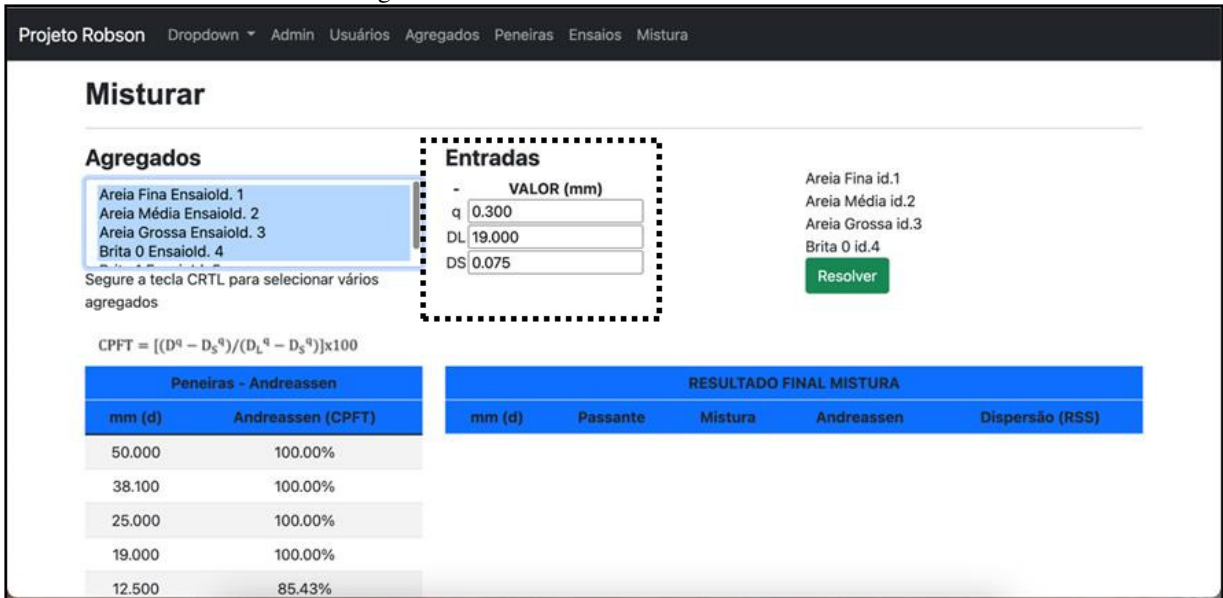
© 2020 - [Projeto Robson](#)

Fonte: Arruda, 2022.

2º passo: Escolha dos parâmetros de entrada.

O software calcula as curvas através do modelo de Alfred. Assim, o usuário deve escolher qual o diâmetro mínimo (D_S) e máximo (D_L), assim como o módulo de distribuição q . Na Figura 18 estão destacados os campos a serem preenchidos.

Figura 18 – Parâmetros de entrada do software.

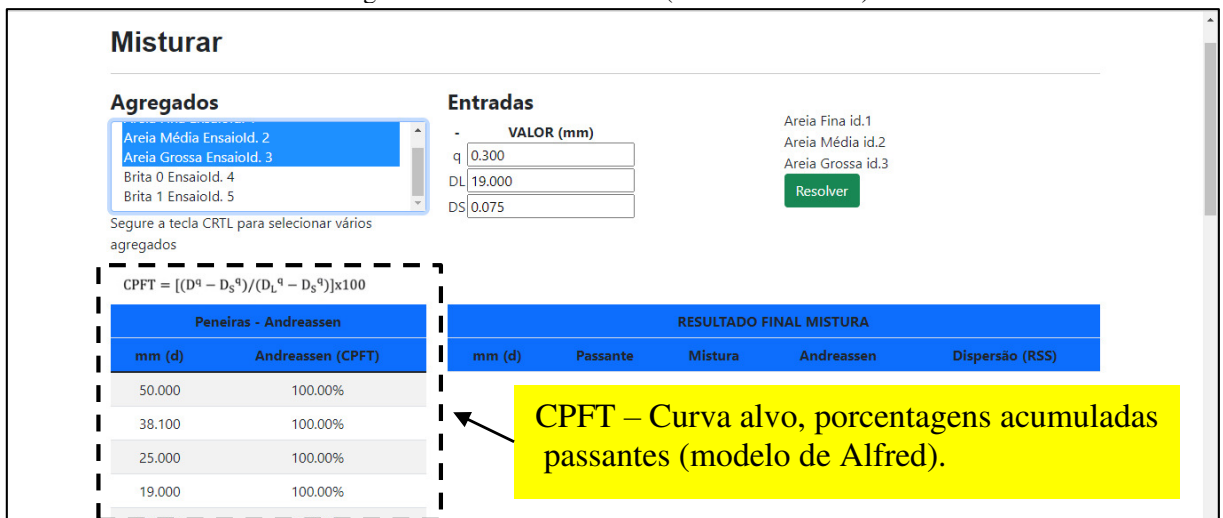


Fonte: Arruda, 2022.

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

Após a escolha dos parâmetros de entrada, o usuário vai identificar que o CPFT (Modelo de Alfred) já está calculado no canto esquerdo da tela, Figura 19, então deve clicar no botão “Resolver”.

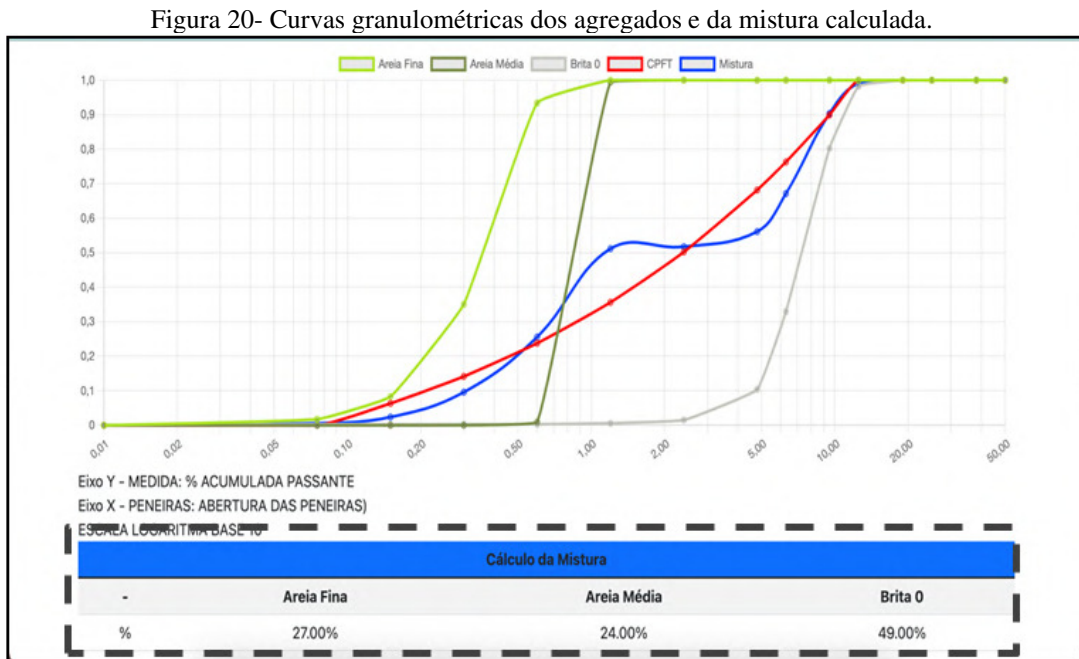
Figura 19 – Cálculo do CPFT (modelo de Alfred).



Fonte: Arruda, 2022.

A solução do problema consiste em uma combinação linear em que o software executa as combinações dos agregados e guarda o valor dos desvios entre curva de cada combinação e a curva do modelo de Alfred (CPFT), com a condição de que a soma dos agregados seja 100%. O cálculo será concluído quando todas as combinações forem testadas e o menor desvio (RSS) determinará a melhor proporção dos agregados. Para o cálculo não consumir muito tempo, o código de programação considerou como possibilidade de resposta números com até uma casa decimal.

A Figura 20 mostra os resultados de uma mistura aleatória em que se escolheu três (3) agregados. O software apresenta na tela (parte superior) uma tabela com as porcentagens acumuladas passantes da mistura resultante e os desvios individuais de cada abertura de peneira, assim como, na parte inferior, as curvas granulométricas. Os desvios individuais podem auxiliar o usuário na identificação dos diâmetros que estão apresentando maior desvio, assim, é possível melhorar o empacotamento da mistura adicionando partículas em classes específicas. Por fim, no canto inferior da tela, Figura 20, tem-se a porcentagem otimizada dos agregados escolhidos para a mistura.



Fonte: Arruda, 2022.

4.2.2 Relação a/c

Com o objetivo de obter um material de argamassa com consumo reduzido de cimento e com pouca permeabilidade, foi definido o teor ideal de água que garantisse tais objetivos. Logo, para a relação entre a massa de água e a massa de finos (somatória do cimento com as adições minerais),

obteve valores variando entre 0,45 e 0,55, respeitando os critérios estabelecidos na NBR 12655 (ABNT, 2015) para concreto armado CA, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ C260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA: Componentes e elementos estruturais de concreto armado.
CP: Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12655, 2015.

Para o consumo de cimento, tendo em vista a classe de agressividade III, foram definidos os valores de 380 kg/m³ e de 154 kg/m³ para os dois traços a serem estudados, de acordo com a Equação 19.

$$Consumo = \frac{p\%}{\left(\frac{1}{\rho_{cimento}} + \frac{a}{f}\right)} \quad (19)$$

Sendo o primeiro dentro do limite estabelecido pela NBR 12655:2015, e o segundo com consumo abaixo deste limite. Vale ressaltar que a composição de agregados para estas argamassas foi praticamente a mesma, variando-se assim a composição da matriz com adições para obter o consumo estipulado.

4.3 PREPARO, MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

A produção das misturas das argamassas foi executada utilizando os materiais em uma betoneira de 150 litros. Preparou-se os materiais de acordo com o peso calculado para a dosagem das argamassas, Figura 21. Para o traço contendo as adições de fíler e metacaulim, realizou-se a mistura com cimento ainda seco em um saco plástico, antes de iniciar o procedimento de moldagem, a fim de homogeneizar os finos e ter um melhor resultado na combinação dos materiais. Para as adições, como a relação água/finos (a/f) foram mantidas constantes, o teor de aditivo foi ajustado durante o procedimento de mistura, adicionando mais dos copos extras separados com a porcentagem prevista para o traço, como também copos extras de água, conforme mostra a Figura 22.

Figura 21 - Preparo dos materiais secos e água.



Fonte: Autoria própria, 2022.

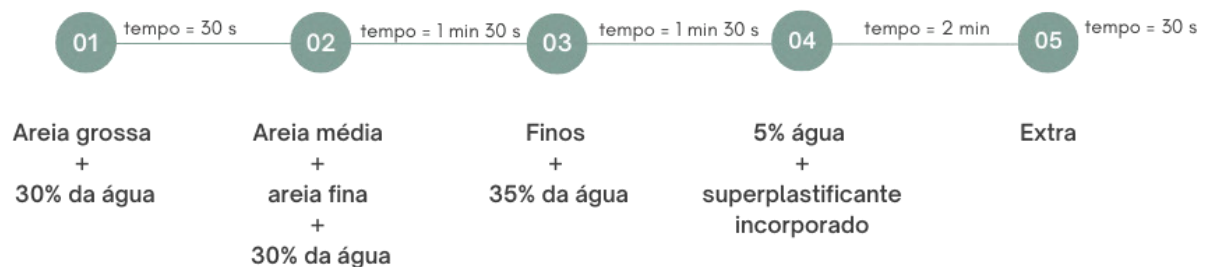
Figura 22 - Preparo dos aditivos e copos extras de água.



Fonte: Autoria própria, 2022.

O procedimento de mistura foi realizado da seguinte forma: primeiramente foi colocado um pouco de água com areia para imprimação da betoneira, posteriormente deu início ao processo colocando a areia grossa e 30% da água; após cerca de 30 segundos, acrescentou-se a areia média, fina e mais 30% da água, deixando homogeneizar por cerca de 1 minuto e 30 segundos; em seguida adicionou-se os finos e mais 35% de água; após isso, foi colocado o restante da água com superplastificante incorporado, prosseguindo para mais dois minutos, garantindo a completa homogeneização. Caso houvesse a necessidade de adicionar mais do aditivo superplastificante, este era adicionado aos poucos dissolvidos em copos extras de água. A Figura 23, ilustra esse processo de maneira esquemática.

Figura 23 -- Fluxograma do procedimento de mistura.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Os copos de prova (CPs) foram moldados em forma metálica com aplicação do adensamento mecânico e manual. Para os CPs cilíndricos (5 x 10) cm o adensamento foi

manual, realizado com auxílio de soquete e de colher de pedreiro, preenchendo com 30 golpes a cada quatro camadas. Para os cilíndricos (10 x 20) cm, o adensamento foi mecânico, também preenchido a cada quatro camadas e adensado com vibrador. A Tabela 3 mostra a quantidade de CPs moldados para cada traço.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova para cada traço.

Tipo	Dimensões (cm)	Quantidade
Cilíndrico	5x10	9
Cilíndrico	10x20	6

Fonte: Autoria própria, 2022.

Após 24 horas os moldes foram desmoldados, identificados e submetidos a cura úmida imersos em solução de água saturada de cal até as idades de 7 e 28 dias.

A quantidade de CPs foi determinada para os ensaios destrutivos, sendo dois dos cilíndricos (5 x 10) cm para o ensaio de resistência à compressão, e o restante dos CPs foram utilizados para os ensaios de durabilidade, sendo este de migração de cloretos.

4.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

4.4.1 Ensaio de Consistência (Flow Table)

Nesta etapa foi feito a aferição do índice de consistência da argamassa no estado fresco, também chamado como flow table, baseada nos parâmetros da norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

Ao término do preparo de cada um dos três traços foi executado o ensaio, em que o molde troncônico foi centralizado na mesa de abatimento, preenchido em três camadas sucessivas de argamassa com alturas aproximadamente iguais e aplicado em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete. Após a retirada do molde, foi acionado a manivela da mesa para índice de consistência, com 30 giros de maneira uniforme e medido com uma régua, em três diâmetros, o espalhamento da argamassa, Figura 24.

Figura 24 - Medição do índice de consistência da argamassa para o traço T2.



Fonte: Autoria própria, 2022.

4.4.2 Ensaio de resistência – compressão axial

No estado endurecido, realizou-se os ensaios de resistência à compressão axial dos corpos de provas cilíndricos, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) nas idades de 7 e 28 dias. A fim de se obter as variações da resistência resultante da redução do cimento com o método de empacotamento de partículas e adições minerais. As Figuras 25 e 26 ilustram os CPs, para ambos os traços, antes e depois do ensaio com 7 dias.

Figura 25 - Antes e depois da ruptura com 7 dias: traço T1.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 26 - Antes e depois da ruptura com 7 dias: traço T2.



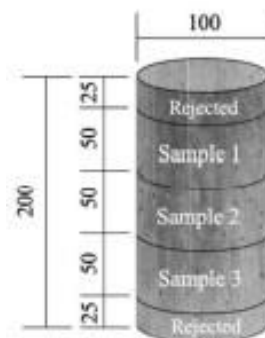
Fonte: Autoria própria, 2022.

4.4.3 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 27, 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 27 - 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 28, a fim de garantir que apenas as faces das superfícies tenham contato com as soluções.

Figura 28 - Impermeabilização e acondicionamento das fatias das amostras.

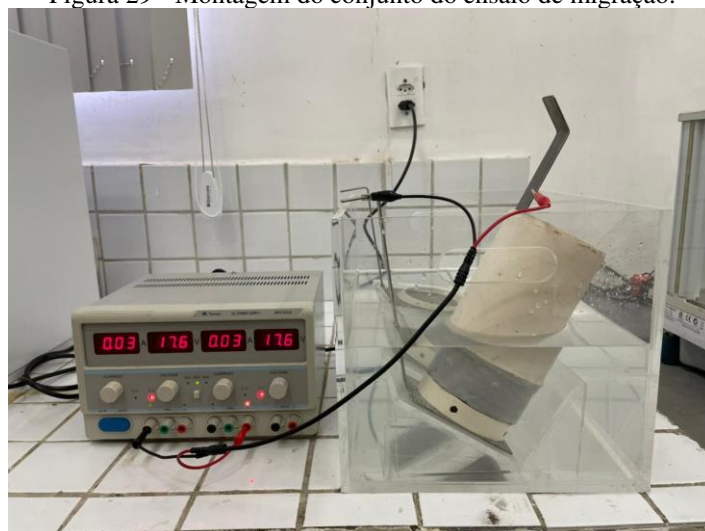


Fonte: Autoria própria, 2022.

Para o procedimento do ensaio, foram preparadas duas soluções diluídas em água. Encheu-se um recipiente plástico com a solução 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 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 29 mostra.

Figura 29 - 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 30 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 30 - 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, conseqüentemente, 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.

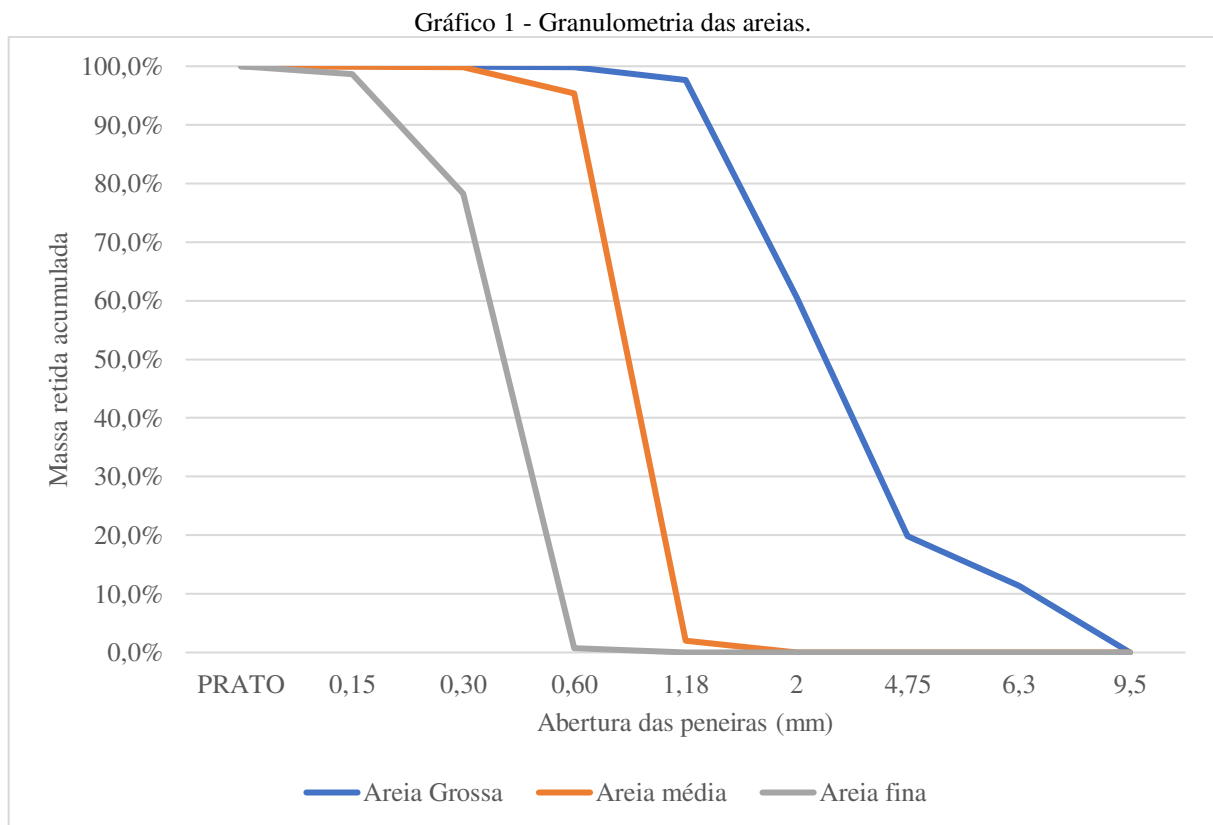
Completado o tempo de ensaio, foram registradas a corrente e a temperatura finais e as amostras foram retiradas do equipamento. Posteriormente, as amostras foram partidas axialmente em duas partes para ser feito a pulverização da solução de nitrato de prata 0,1 M, logo, foi medido a profundidade de penetração de cloreto de prata branca após alguns minutos com ajuda de um paquímetro e uma régua, obtendo sete profundidades para cálculo do coeficiente de migração em estado não estacionário (D_{nssm}).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e as suas respectivas análises. Inicialmente são apresentados: caracterização dos materiais, composição da dosagem dos traços, propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido, tais como índice consistência, resistência à compressão e índice de ligantes, por fim, a migração de cloretos.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A distribuição granulométrica dos materiais granulares é de fundamental importância para a otimização da dosagem com o conceito de empacotamento de partículas. Para a determinação da composição granulométrica de cada faixa de areia utilizada (grossa, média e fina) nos traços da argamassa do concreto, obteve-se os resultados das curvas de massa retida acumulada conforme Gráfico 1.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Com o resultado da composição granulométrica, através da soma das porcentagens retidas acumuladas, tem-se o módulo de finura apresentado na Tabela 4, de modo que aumenta de acordo com a classificação da areia.

Tabela 4 - Módulo de finura das areias.

Módulo de finura	
Fina	1,79
Média	2,97
Grossa	4,89

Fonte: Autoria própria, 2022.

Na Tabela 5, tem-se os valores encontrados da massa específica de duas amostras das areias, em que, normalmente, também há uma proporcionalidade entre a dimensão da partícula e o resultado, onde a massa diminui à medida que a granulometria também diminui.

Tabela 5 - Massa específica do agregado miúdo.

Massa na condição saturada superfície seca - pss (g/cm ³)		
	Amostra I	Amostra II
Fina	2,136	2,181
Média	2,189	2,328
Grossa	2,251	2,238

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para a massa específica do cimento, obteve-se os seguintes resultados exibidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Massa específica do aglomerante.

Massa específica do cimento- ρ (g/cm ³)		
	Amostra I	Amostra II
V ₁ (cm ³)	0,4	1
V ₂ (cm ³)	20,5	21
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,99	3

Fonte: Autoria própria, 2022.

Para as adições, tanto do fíler como do metacaulim, tem-se os valores apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Massa específica da adição – fíler.

Massa específica do fíler - ρ (g/cm ³)		
	Amostra I	Amostra II
V ₀ (cm ³)	0,6	1,0
V _f (cm ³)	21,7	22,2
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,84	2,83

Fonte: Autoria própria, 2022.

Tabela 8 - Massa específica da adição – metacaulim.

Massa específica do metacaulim - ρ (g/cm ³)	
V ₀ (cm ³)	0,6
V _f (cm ³)	23,2
m (g)	60
ρ (g/cm ³)	2,84

Fonte: Autoria própria, 2022.

Nota-se que estes resultados atende as condições da norma NBR 16605:2017, visto que a diferença entre os valores das amostras individuais não superou o valor de 0,02 g/cm³.

5.2 DOSAGEM DOS TRAÇOS FINAIS

Para a composição da dosagem final dos traços, de acordo com os dados obtidos através do software Q-Mix, foram determinadas as proporções adequadas para execução de dois tipos de traço, sendo estes definidos com a diminuição do teor de cimento, nomeados como T1 para o traço somente com o empacotamento dos materiais, e T2 para o traço com empacotamento e adições minerais de fíler e de metacaulim.

Dentre a faixa estabelecida da relação a/f, foram utilizados os valores de 0,45 e 0,47, respectivamente, para T1 e T2, e a porcentagem de 1% do aditivo.

As proporções dos materiais para o traço somente com o empacotamento das partículas e para o traço com empacotamento de partículas e adições são indicadas na Tabelas 9, assim como os seus consumos.

Tabela 9 - Proporção e consumo dos materiais utilizados para o traço com empacotamento das partículas

Dosagem das argamassas			
	Proporção	Consumos (kg/m ³)	
		T1	T2
Fíler Calcário	-	-	165,47
Metacaulim	-	-	60,53
Cimento	-	380	154
Areia Fina	27,98%	444,02	444,02
Areia média	11,89%	188.6871	188.6871
Areia grossa	43,22%	691,6	691,6

Fonte: Autoria própria, 2022.

Tendo em conta T1, foram separados três copos com 48 g do aditivo superplastificante e quatro copos extras com 50 g de água, caso fosse preciso, com isso, foram utilizados os três copos previstos do aditivo, e um copo de 50 g.

Já para T2, foram separados três copos com 30 g do aditivo superplastificante e quatro

copos extras de 50 g de água, caso fosse preciso, com isso, foram utilizados dois dos três copos extras do aditivo, totalizando 0,12 kg de consumo, correspondente a 2% de aditivo, e mais um copo extra de água para dissolver o aditivo.

A variação do aditivo com relação aos dois traços ocorreu devido o resultado da consistência, pois foi observado um espalhamento razoável da pasta para T1 utilizando 1% de aditivo, logo, foi previsto um maior teor de aditivo para T2, a fim de obter uma melhor consistência e, conseqüentemente, melhor trabalhabilidade da argamassa.

A dosagem dos traços foi suficiente para moldar os CPs para o estudo dos ensaios de resistência e de durabilidade das argamassas, assim como para o estudo da trabalhabilidade no ensaio de consistência.

5.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA

Na verificação das características no estado fresco da argamassa de estudo, é possível analisar a capacidade do material se deformar quando aplicadas as cargas na mesa de abatimento, esse parâmetro reflete também na sua trabalhabilidade. Logo, obteve-se os seguintes resultados do preparo dos dois traços estudados expressos na Tabela 10, atendendo as condições da NBR 13276 (ABNT, 2002), em que o IC corresponde à média das três médias dos diâmetros em milímetros e arredonda ao número inteiro mais próximo.

Tabela 10 - Índice de Consistência (IC) para T1 e T2.

Índice de consistência		
	T1	T2
D1 (mm)	191	254
D2 (mm)	187	260
D3 (mm)	210	259
IC (mm)	200	300

Fonte: Autoria própria, 2022.

Observa-se que para o traço T1 o valor do IC foi menor do que o traço T2. Dessa forma, houve um menor espalhamento da argamassa na mesa de abatimento devido a quantidade de água reduzida, tornando mais seco e com menor trabalhabilidade, além disso, através de uma análise visual foi possível observar o início da segregação após o abatimento na mesa. Já para o segundo traço T2, que apresentou uma diminuição do consumo de cimento com uso de adições minerais no traço final, houve um melhor espalhamento na mesa, resultando em uma

argamassa com melhor fluidez e mais trabalhável comparada ao IC do traço anterior.

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

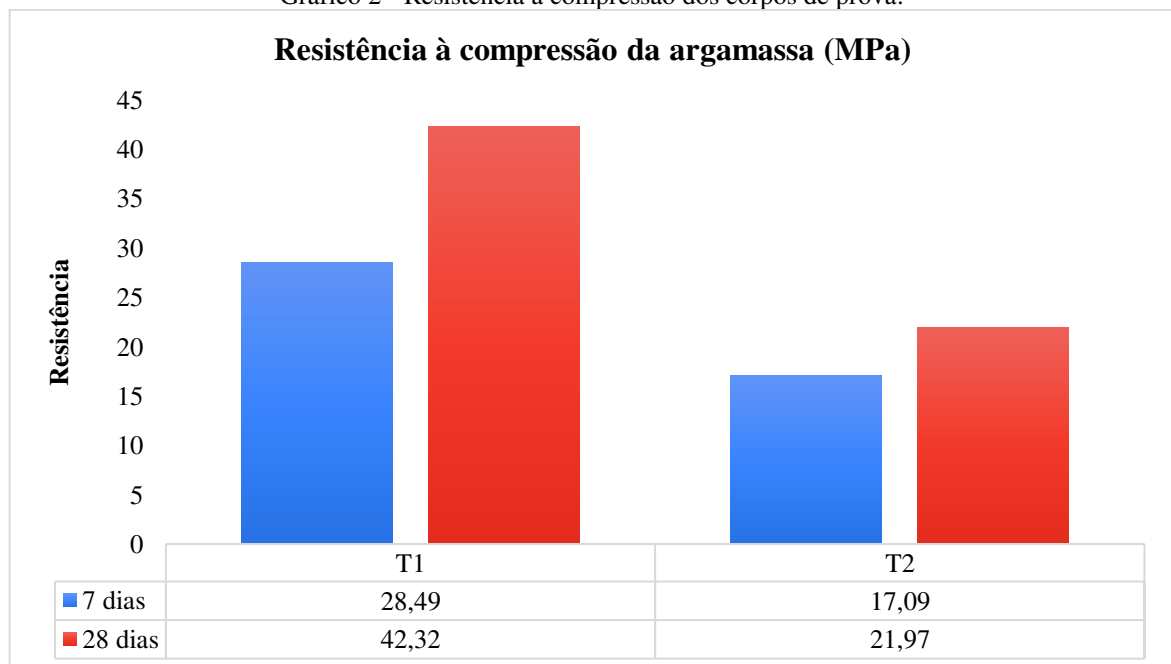
Para resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, são apresentados, respectivamente, os valores das cargas de ruptura em quilograma-força (kgf) e as resistências à compressão (f_c), em megapascals (Mpa), na Tabela 11 e no Gráfico 2.

Tabela 11 - Cargas de ruptura aplicadas na argamassa.

	Carga de ruptura aplicada (kgf)	
	T1	T2
7 dias	5702	3421
28 dias	8471	4398

Fonte: Autoria própria, 2022.

Gráfico 2 - Resistência à compressão dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Percebe-se que os valores mantêm a proporcionalidade do aumento da resistência à medida que aumenta a idade do corpo de prova. Com isso, tem-se o acréscimo de cerca de 33% da resistência à compressão para o traço com base no empacotamento de partículas, T1, e de 22% para o traço com base no empacotamento de partículas com adições minerais, T2.

Além disso, é possível observar também que, a metodologia do uso somente do empacotamento de partículas nas argamassas, em ambas as idades avaliadas, obteve maior resultado do que com as adições, sendo cerca de 40% de diferença para 7 dias e 48% para 28 dias. Isto pode ser atribuído a relação a/f, em que T1 possui um menor fator em relação a T2,

sendo para T1 0,45 e para T2 0,47, favorecendo ao desempenho de uma maior resistência, assim como o consumo de cimento, em que T1 apresenta maior consumo do que T2, provocando maior volume de produtos de hidratação.

As Figuras 31 e 32 mostram o resultado do rompimento dos CPs com 28 dias para ambos os traços. Observa-se que, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), os CPs T1 e T2 apresentaram o tipo E – Cisalhada, sendo este resultado o mais comum para este ensaio, como também confiável.

Figura 31 - Ruptura com 28 dias: traço T1.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 32 - Ruptura com 28 dias: traço T2.



Fonte: Autoria própria, 2022.

5.5 ÍNDICE DE LIGANTES

Para Daminieli, Kemeid, Aguiar e John (2010), há poucos estudos voltados para o uso

eficiente do cimento, sendo assim, estes propuseram indicadores que possibilitam a medição desse parâmetro para materiais cimentícios. De modo geral, define-se a eficiência do concreto em termos da quantidade total de ligante ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) necessária para fornecer 1 MPa de resistência mecânica. Tem-se então que esse indicador pode ser obtido pela Equação 19.

$$IL = \frac{C}{R} \quad (20)$$

Onde:

IL = índice de ligantes ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$);

C = consumo de cimento (kg/m^3)

R = resistência à compressão (MPa)

Visto isso, obteve-se os valores de IL para os traços executados no estudo, apresentados na Tabela 12, considerando as resistências das argamassas obtidas aos 28 dias da idade de cura e o consumo de cimento para T1 e T2.

Tabela 12 - Índice de Ligantes das argamassas com 28 dias.

Índice de ligantes - IL		
Parâmetros	T1	T2
Consumo de aglomerante (kg/m^3)	380	154
Resistência aos 28 dias (MPa)	42,32	21,97
IL ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$)	8,98	7,01

Fonte: Autoria própria, 2022.

Com isso, nota-se que o IL correspondente a T2 é menor do que T1, indicando dessa forma uma maior eficiência do traço com empacotamento e adições minerais na sua composição. Em razão de que este proporciona, por metro cúbico, atingir uma resistência que caracteriza a produção da argamassa como material estrutural com menor consumo de cimento. Este resultado pode ser relacionado ao fator do empacotamento dos finos, em que para T2 houve um melhor refinamento dos poros e uma melhor fluidez com o uso de adições na dosagem do traço em substituição parcial do cimento.

5.6 MIGRAÇÃO DE CLORETOS

Após a conclusão do ensaio de migração de cloretos de acordo com a norma NT Build 492, foram obtidos os resultados para ambos os traços conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de migração para T1 e T2.

Traço	Corrente	Tensão	Temperatura inicial	Temperatura Final	Média T	L	Xd	Dnssm
T1	70	25	28	28,4	28,2	48	23	12,60601
	70	25	27,8	28,6	28,2	48	23,3	12,78216
	70	25	28	28,4	28,2	48	23,2	12,72343
T2	40	35	26,7	28,7	27,7	46,33	22	8,284655
	40	35	27,9	28,9	28,4	48	21,8	8,501523
	40	35	27,6	28,8	28,2	48	21	8,165985

Fonte: Autoria própria, 2022.

Nota-se que para os corpos de prova do traço T2 apresentou médias de profundidades menores do que o traço T1, Figura 33, conseqüentemente, menores valores do coeficiente de migração, mostrando o efeito do uso de adições na substituição parcial do cimento, de modo a ter um melhor resultado com valores cerca de 35% inferior em relação a T2. Com isso, tem-se que o traço com o consumo reduzido de cimento apresenta melhor resistência a penetração de cloretos.

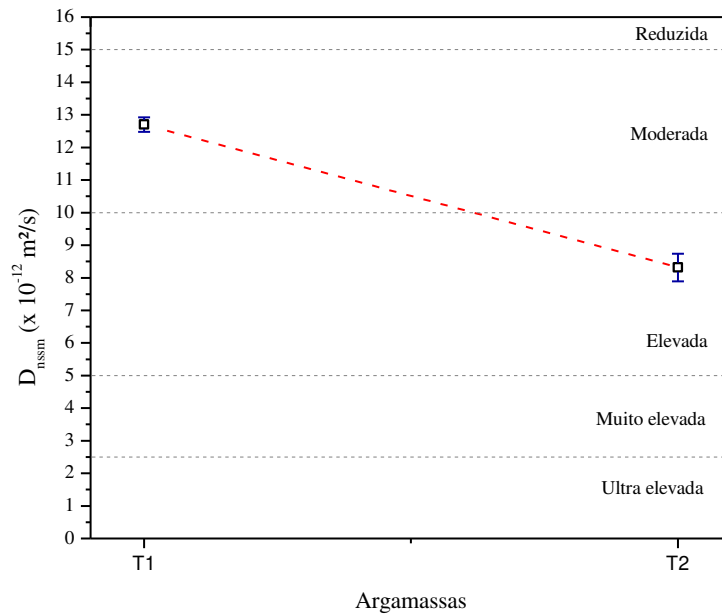
Figura 33 - Profundidades da migração dos íons cloretos nos corpos prova das argamassas estudadas T1 e T2, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Tendo em vista os valores obtidos, e de acordo com a literatura, qualifica-se as argamassas T1 e T2 com resistência moderada e elevada à penetração de cloretos, respectivamente, Figura 34.

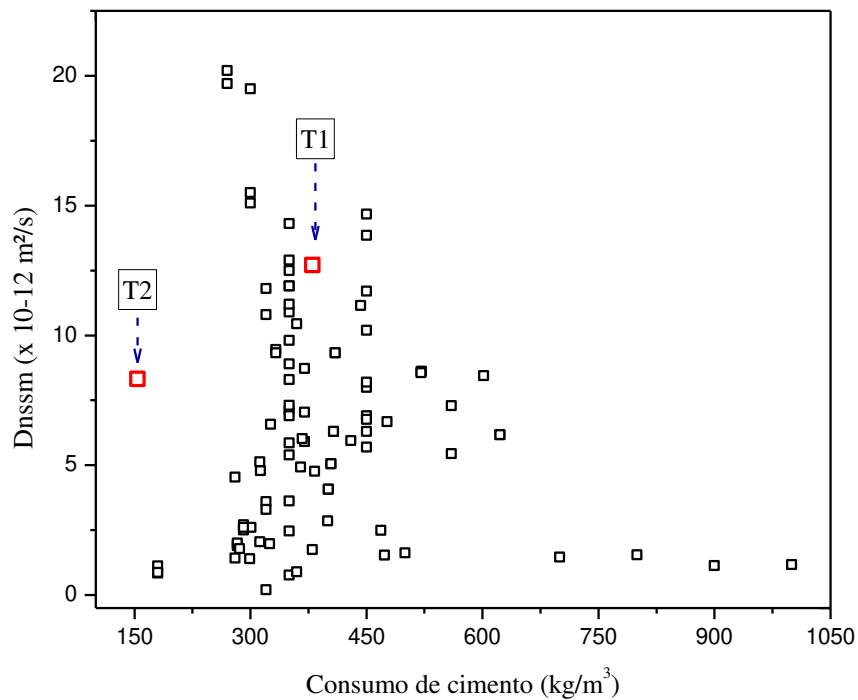
Figura 34 - Classificação das argamassas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

A Figura 35 apresenta a relação entre os coeficientes de migração e o consumo de cimento dos concretos e argamassas estudadas com os da literatura (BADOGIANNIS *et al.*, 2015; MIN *et al.*, 2021; SIDERIS *et al.*, 2018; KIM *et al.*, 2019; GUIGNONE *et al.*, 2019; SZCZESNIAK *et al.*, 2020; VALCUENDE *et al.*, 2020; SELL *et al.*, 2020; SERDAR *et al.*, 2020; CHATZOPOULOS *et al.*, 2021; DIAS *et al.*, 2021; PINTO *et al.*, 2021; RISDANARENI *et al.*, 2021; HODUL *et al.*, 2020).

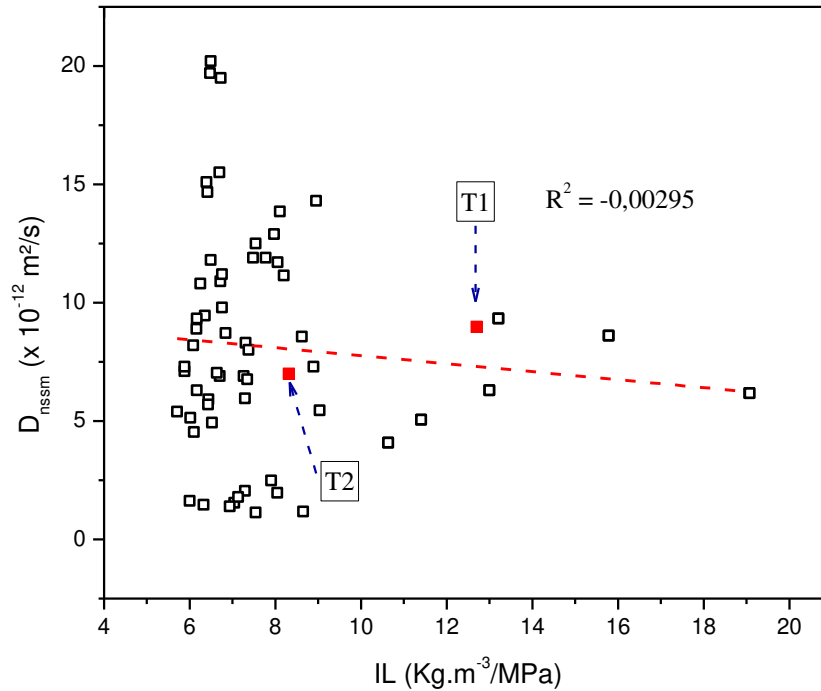
Figura 35 - Relação do coeficiente de migração com o consumo de cimentos de concretos e argamassas.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Esta relação, considera que há concentração de concretos/argamassas entre 200 e 500 kg/m³ com variados valores de coeficiente, assim, torna-se mais coerente relacionar o coeficiente de migração com o índice de ligante, Figura 36.

Figura 36 - Relação do coeficiente de migração com o índice de ligantes de concretos e argamassas.

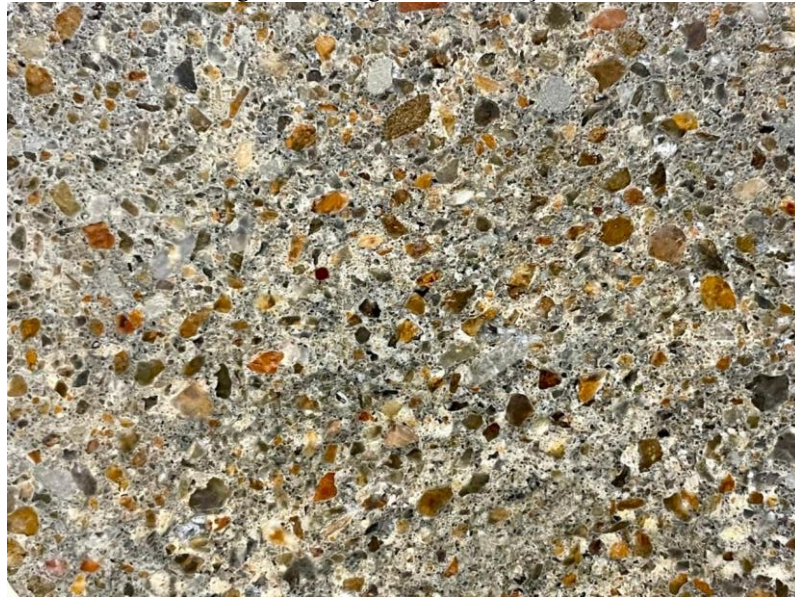


Fonte: Autoria própria, 2022.

Os dados da literatura mostram que não há correlação entre o índice de ligante e o coeficiente de migração em argamassas e concretos. Esse comportamento pode ser explicado pela utilização de adições de minerais de diferentes tipos e teores, visto que estas podem diminuir a migração de cloretos nas matrizes cimentícias, através da fixação destes, produzindo sal de Friedel (FIGUEIREDO *et al.*, 2014).

As Figuras 37 e 38 mostram a macroestrutura das argamassas cortadas após o ensaio de migração. Vê-se a distribuição de populações de partículas de diferentes classes de tamanho, responsáveis pelo menor volume de pasta para alcançar trabalhabilidade desejada.

Figura 37 - Argamassa do traço T1.



Fonte: Autorial própria, 2022.

Figura 38 - Argamassa do traço T2.



Fonte: Autorial própria, 2022.

6 CONCLUSÃO

A produção de materiais eco eficientes na indústria da construção civil tem ganhado maior relevância nos últimos anos na área acadêmica, com o desenvolvimento de estudos voltados para este tema. Tendo como objetivo obter não só os benefícios econômicos para o PIB interno do país, mas também diminuir os impactos ambientais causados pelas emissões de CO₂ devido à produção do cimento, o qual é um dos principais constituintes da matriz granular dos concretos e argamassas.

Com isso, as dosagens de argamassas/concretos são modificadas através do uso das novas tecnologias e técnicas. Estas utilizam da implantação de modelos de empacotamento e programas computacionais que garantem a eficiência na durabilidade e resistência mecânica no uso desse material, aliada a sustentabilidade. Logo, o modelo de Alfred e o software Q-Mix, utilizados para este estudo, permitiram a correta seleção dos materiais e a otimização das misturas, viabilizando a redução do teor de cimento com resultados satisfatórios nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas.

Visto isso, a partir da análise dos resultados obtidos, verificou-se o comportamento do concreto na fase da argamassa, em que o uso do quociente de distribuição de 0,35 para o empacotamento dos agregados, diminuiu o volume de vazios entre as partículas e, conseqüentemente diminuiu o volume pasta, minimizando assim a porosidade da argamassa e melhorando a sua durabilidade.

Para isso, o uso das adições de fíler e matacaulim, assim como o uso de aditivo superplastificante, viabilizou a execução dos traços sem a perda sistemática da trabalhabilidade. Obteve-se IC de 200 mm para T1 e 300 mm para T2, em que para o segundo a argamassa apresentou melhor espalhamento.

Quanto a resistência à compressão, apresentou-se resultados satisfatórios, com valores acima de 20 MPa. Embora T1 tenha apresentado maiores valores de resistência à compressão, T2 apresentou melhor eficiência, visto que resultou em um menor índice de ligante sendo de 7,01 kg/m³.MPa. O bom desempenho para T2 pode ser atribuído ao refinamento dos poros com o aumento do teor de materiais finos. Vale ressaltar a importância do estudo da durabilidade dos materiais, assim como a eficiência dos ligantes nas misturas, visto que somente o aumento da resistência mecânica não garante padrões de desempenho superiores aos materiais cimentícios.

O ensaio de migração de cloretos evidencia bons resultados quanto ao comportamento das argamassas com um consumo reduzido de cimento, de modo que os resultados se encontram na faixa de moderada e elevada resistência à penetração dos íons de cloreto, dificultando o processo de deterioração precoce da estrutura e atendendo as condições em que estão inseridas e classificadas na NBR 6118:2014. O traço com adições, T2, teve maior resistência à penetração de cloretos em relação ao traço T1, pois possui valores significativamente menores para o coeficiente de migração. Além disso, é observado que a resistência mecânica não necessariamente implica em maior durabilidade, assim como não há correlação entre o índice de ligantes.

De maneira geral, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, possibilitando atingir os objetivos propostos, de maneira que o estudo da durabilidade dos materiais frente ao ataque de agentes agressivos se mostra um grande potencial de aplicação em obras, com base no conceito de empacotamento de partículas, a fim de minimizar os problemas tanto ambientais quanto técnicos. Embora que, para Cândido (2018), a dosagem desses concretos ecológicos possui dificuldade na sua produção, isso por questões relativas ao custo dos aditivos e adições, da dificuldade de mistura, como também pela falta de conhecimento sobre o tema.

Sendo assim, com o objetivo de aprofundar os conhecimentos e desenvolver materiais com baixo teor de cimento, sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar os teores críticos de cloretos em materiais com elevadas substituições do cimento;
- Avaliar a microestrutura da matriz cimentícia exposta aos íons cloreto, para avaliação da fixação de cloretos e possível redução da porosidade;
- Realizar ensaios de monitoramento eletroquímico para identificação do tempo de despassivação das armaduras em corpos de prova de argamassa/concretos dosados com baixo teor de cimento.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P.C. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. **Cement and Concrete Research**. Canadá, v. 30, n. 9, pág. 1349-1359, 10 jul. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3). Acesso em: 12 dez. 2022.
- ARRUDA, R. **Dosagem e desempenho de concretos com elevadas substituições de cimento por filer de resíduos cerâmicos frente a corrosão de armaduras**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 19916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 15900-1**: Água de amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro. 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 12665**: Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro. 2015.
- 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>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BALBINO, Thiago Gabriel Ferreira. **Avaliação da durabilidade de argamassas e pastas de cimentos do tipo Portland preparados com um clínquer contendo resíduo de bauxita como matéria-prima.** Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012. 118 f. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/878>. Acesso em: 03 mar. 2022.

BREKAILO, Fernanda. **Aplicação dos ensaios de migração e de difusão natural para cálculo do coeficiente de difusão de íons sulfatos no estado estacionário e não estacionário no concreto.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2020. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3017>. Acesso em: 05 mar. 2022.

CALLISTER JR, Willian D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.

CANDIDO, Taíssa. **Desempenho de concretos com baixo consumo de ligante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/15324>. Acesso em: 10 mar. 2022.

CASTRO, A.; FERREIRA, F. Efeito do empacotamento de partículas na durabilidade de concretos de alto desempenho. **Rev. Ing. Constr.**, Santiago, v. 31, n. 2, pág. 91-104, ago. 2016. Disponível em: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732016000200003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 07 nov. 2021.

CASTRO, A. L. de; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica.** 2009, v. 55, n. 333, pp. 18-32. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132009000100003>. Acesso em: 24 dez. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO-CBIC. Resultados do PIB Brasil e da construção no 1º trimestre surpreendem. **Agência CBIC**, Brasília, DF, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://cbic.org.br/resultados-do-pib-brasil-e-da-construcao-no-1o-trimestre-surpreendem/>. Acesso em: 07 nov. 2021.

CHATZOPOULOS, A., SIDERIS K. K., TASSOS C. Production of concretes using slag aggregates: Contribution of increasing the durability and sustainability of constructions, **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, 2021, e00711, ISSN 2214-5095. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00711>. Acesso em: 22 mar. 2022.

DAMINELI, Bruno Luís. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes:** controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Doi:10.11606/T.3.2013.tde-19092014-103459. Acesso em: 11 nov. 2021.

DAMINELI, B.L; PILEGGI, R. G; JOHN, V. M. Influência do empacotamento e dispersão de partículas no consumo de cimento de concretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 2017, v.10, n. 5, p. 998-1024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1983->

41952017000500004. Acesso em: 04 mar. 2022.

DAMINELI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, n. 32, p. 555-562, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>. Acesso em: 10 mar. 2022.

DIAS, L. V., SOARES, S. M., SALVADOR FILHO, J. A., Ferreira, F. G. S. Avaliação da migração de cloretos em compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com pó de vidro. **Revista ALCONPAT**, pp. 61-75, 2021, 11 (2). Disponível em: <https://doi.org/10.21041/ra.v11i2.512>. Acesso em: 22 mar. 2022.

FIGUEIREDO, C. P., SANTOS, F. B., CASCUDO, O., CARASEK, H., CACHIM, P., & VELOSA, A. The role of metakaolin in the protection of concrete against the deleterious action of chlorides O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 7(4), 685–708, 2014.

FONSECA, G. C. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ISMS-8ALHAQ>. Acesso em: 04 mar. 2022.

GUIGNONE, G. C.; VIEIRA, G. L.; ZULCÃO, R.; MION, G.; BAPTISTA, G. Analysis of the chloride diffusion coefficients by different test methods in concrete mixtures containing metakaolin and high-slag blast-furnace cement. **Revista Matéria**, v. 24, n. 04, 2019, ISSN 1517-7076. Disponível em: 10.1590/S1517-707620190004.0837. Acesso em: 22 mar. 2022.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. Dosagem dos concretos de cimento Portland. *In*: ISAIA, G.C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, Ipsis, v.1, pp. 415-452, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2021.

HINO JR, José Roberto. **Penetração de cloreto em concretos de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia) - Universidade Federal do Paraná. 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/62088>. Acesso em: 05 mar. 2022.

HODUL, J.; ŽIŽKOVÁ, N.; BORG, R.P. The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products. **Buildings**, 2020, 10, 146. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings10090146>. Acesso em: 22 mar. 2022.

KIM, S.S.; QUDOOS, A.; JAKHRANI, S.H.; LEE, J.B.; KIM, H.G. Influence of Coarse Aggregates and Silica Fume on the Mechanical Properties, Durability, and Microstructure of Concrete. **Materials**, 2019, 12, 3324. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12203324>. Acesso em: 22 mar 2022.

LONDERO, C. **Dosagem de concreto ecológico com base em empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016, 168 f. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/43120>. Acesso em: 24 dez. 2021.

LOPES, Herbert Medeiros Torres; PEÇANHA, Ana Carolina Corsi; ALESSANDRA, Lorenzetti de Castro. Considerações sobre a eficiência de misturas de concreto de cimento Portland com base no conceito de empacotamento de partículas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, 2020, v. 25, n. 01. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200001.0874>. Acesso em: 7 nov. 2021.

MIN, K.-S.; PARK, K.-M.; LEE, B.-C.; ROH, Y.-S. Chloride Diffusion by Build Orientation of Cementitious Material-Based Binder Jetting 3D Printing Mortar. **Materials**, 2021, 14, 7452. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14237452>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: 10.11606/T.3.2008.tde-20072009-174802. Acesso em: 05 mar. 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto** - microestrutura, propriedades e materiais. 2ª edição. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto. 2014, 782p.

MENDES, Marcus V. A. S. **Evaluation of the mass transport containing mineral admixtures**. 2009. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/1353>. Acesso em: 05 mar. 2022.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N.H. Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 83-93, 2014, ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.070>. Acesso em: 22 mar. 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016.

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

OLIVEIRA, Caroline Oliveira e. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2013, 141 f. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/88851>. Acesso em: 03 mar. 2022.

PEDROSO, Fábio Luís. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo**, [s. l.], ed. 53, p. 14-19, 2009. Disponível em: http://ibracon.org.br/Site_revista/Concreto_Construcoes/index.php. Acesso em: 7 nov. 2021.

PINTO, Sabrina Requião. **Durabilidade de matrizes cimentícias de cimento supersulfatado e de cimentos portland**: ataque por sulfatos, carbonatação e penetração de cloretos. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil) -

Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2019. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/60741>. Acesso em: 04 mar. 2022.

PINTO, S. A.; MACHADO, S. L.; RIBEIRO, D. V. Correlation between diffusion coefficient values of chloride ions obtained through column and ion migration tests in cementitious matrices with varying contents of silica fume and mortar. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, v. 15, n. 03, e15307, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000300007>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PITELLI, Gustavo; De Marco, Gerson. Patologias em estruturas de concreto armado. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, 2019, v.1, n. 000184. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/patologias-em-estruturas-de-concreto-armado> Acessado em: 05 mar. 2022.

PRUDÊNCIO JR, Luiz; MATOS, Paulo; RIBEIRO, André; KIOURANIS, Alexis; VASCONCELOS, Alex. Influência de adições minerais nas propriedades da argamassa. *In: Congresso Brasileiro do Concreto, L.*, 2018, Foz do Iguaçu-PR. **Anais: IBRACON**, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332098384_Influencia_de_adicoes_minerais_nas_propriedades_da_argamassa. Acesso em: 04 mar. 2022.

RIVA, R. D. D. **Efeitos das propriedades físicas dos grãos da fração areia de solos arenosos e de agentes de cimentação no comportamento de sistemas empacotados**. 2010. 180 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/821>. Acesso em: 14 dez. 2021.

RISDANARENI, P.; VAN DEN HEEDE, P.; WANG, J.; DE BELIE, N. The Durability of Mortar Containing Alkali Activated Fly Ash-Based Lightweight Aggregate. **Materials**, 2021, 14, 3741. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma14133741>. Acesso em: 22 mar. 2022.

RUNCI, A.; SERDAR, M. Chloride-Induced Corrosion of Steel in Alkali-Activated Mortars Based on Different Precursors. **Materials**, 2020, 13, 5244. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13225244>. Acesso em: 22 mar. 2022.

SARKAR, R. Particle size distribution for refractory castables: a review. **InterCeram: International ceramic review**, v. 65, n. 3, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/303825708>. Acesso em: 30 dez. 2021.

SCHMALZ, Rosana. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosilica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9675>. Acesso em: 03 mar. 2022.

SELL JR, F. K.; WALLY, G. B.; TEIXEIRA, F. R.; MAGAALHÃES, F. C. Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol. 14, no. 4, e14407, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000400007>. Acesso em: 22 mar. 2022.

SIDERIS, K. K.; TASSOS, Ch.; CHATZOPOULOS, A.; MANITA, P. Mechanical characteristics and durability of self compacting concretes produced with ladle furnace slag. **Construction and Building Materials**, v. 170, p. 660-667, 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.091>. Acesso em: 22 mar. 2022.

SILVA, A. P.; SEGADÃES, A. M.; DEVEZAS, T. C. Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. **Cerâmica**, São Paulo, v. 50, p. 345-354, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000400010>. Acesso em: 30 dez. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO-SNIC. **Relatório Anual 2020**, São Paulo, p. 1-52, 2020. Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: jan. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO-SNIC. **Relatório Anual 2019**, São Paulo, p. 1-44, 2019. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em: out. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDUSTRIA DO CIMENTO-SNIC. **Roadmap Tecnológico do Cimento**: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050. Rio de Janeiro: SNIC, 2019, 64 p. Disponível em: <http://snic.org.br/noticias-ver.php?id=28>. Acesso em: 24 nov. 2021.

SZCZEŚNIAK, A.; ZYCHOWICZ, J.; STOLARSKI, A. Influence of Fly Ash Additive on the Properties of Concrete with Slag Cement. **Materials**, 2020, 13, 3265. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13153265>. Acesso em: 22 mar. 2022.

VALCUENDE, M.; CALABUIG, R.; MARTÍNEZ-IBERNÓN, A.; SOTO, J. Influence of Hydrated Lime on the Chloride-Induced Reinforcement Corrosion in Eco-Efficient Concretes Made with High-Volume Fly Ash. **Materials**. 2020, 13, 5135. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13225135>. Acesso em: 22 mar. 2022.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos**: dosagem e propriedades mecânicas. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004. Disponível em: [doi:10.11606/T.18.2004.tde-23082006-095043](https://doi.org/10.11606/T.18.2004.tde-23082006-095043). Acesso em: 03 mar. 2022.

VILASBOAS, José Marcílio Ladeia. **Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2013, 321f. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/19678>. Acesso em 03 mar. 2022.

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega do TCC

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

Documento assinado eletronicamente por:

- Maria Luíza de Carvalho Coutinho, ALUNO (201712200033) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS, em 29/04/2022 15:32:20.

Este documento foi armazenado no SUAP em 29/04/2022. 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: 502424

Código de Autenticação: 36822b5dc7

