

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

IZADORA VIDAL COELHO

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

Cajazeiras-PB
2022

IZADORA VIDAL COELHO

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

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

Cajazeiras-PB
2022

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

C672d Coelho, Izadora Vidal

Durabilidade de argamassas com baixo consumo de cimento frente ao ataque de íons sulfato/ Izadora Vidal Coelho. – Cajazeiras/PB: IFPB, 2022.

72f.: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. Construção civil. 2. Cimento. 3. Consumo. 4. Meio ambiente. 5. Durabilidade. 5. Sulfato.

I. Coelho, Izadora Vidal. II. Título.

CDU: 691.32 C672d


IZADORA VIDAL COELHO

**DURABILIDADE DA ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO
FRENTE AO ATAQUE DE ÍONS SULFATO**

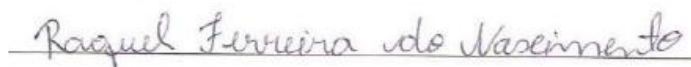
Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 26 de agosto de 2022.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ROBSON ARRUDA DOS SANTOS
Data: 20/09/2022 20:56:49-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

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



Prof.^a. Me. Raquel Ferreira do Nascimento – IFPB - *Campus* Cajazeiras
Examinadora

Documento assinado digitalmente
 GASTAO COELHO DE AQUINO FILHO
Data: 20/09/2022 17:08:35-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Me. Gastão Coelho de Aquino Filho – IFPB - *Campus* Cajazeiras
Examinador

“Existem um monte de pequenas razões, para as grandes coisas acontecerem em nossas vidas.”

(How I Met Your Mother).

AGRADECIMENTOS

Pela certeza que nunca estive sozinha, em primeiro lugar, agradeço a Deus por traçar todas as linhas de coincidências da minha vida. Você é o meu propósito.

Aos meus pais, Maria e Izidro, agradeço por acreditarem em mim, e por me concederem a oportunidade de ir em busca dos meus sonhos. É tudo por vocês.

Aos meus sobrinhos, Lucas Breno e Mabelly, chão e céu, vocês não imaginam, mas são os meus refúgios.

Aos meus amigos, Iarley, Kael e Jocicleudo, vocês fizeram este caminho ser mais leve. Obrigada por tudo e por tanto, sentirei saudades.

A Abreu Filho e sua família, obrigada por terem me ajudado a não desistir. Vocês acreditaram e me incentivaram, mesmo quando eu já não tinha mais forças para acreditar que conseguiria.

À Maria Luiza, agradeço por todo o apoio dado durante a execução desse projeto, eu não saberia a sensação de tocar o céu, se você não tivesse acreditado -e me ajudado a acreditar- que tudo daria certo. Nós conseguimos.

A minha melhor amiga, Ana Clara, eu agradeço por compartilhar esse sonho comigo, o caminho não seria o mesmo sem você. Sonhamos e realizamos juntas, obrigada.

À Clara, você sabe da sua importância na minha trajetória. Obrigada por caminhar e tropeçar ao meu lado, você faz parte da minha história.

Ao meu orientador, Robson Arruda, agradeço por todo o ensinamento, paciência, apoio e dedicação concedida durante a realização desse trabalho. Você foi mais que um orientador, obrigada.

Aos meus colegas de turma, sou grata a cada um, por todo conhecimento e alegria compartilhada durante o curso.

A todos os professores que fizeram parte deste processo, sou grata por todos os ensinamentos e desafios impostos.

Ao professor Daniel Torres, agradeço por toda a ajuda e disponibilidade cedida durante o processo de execução do trabalho.

RESUMO

Sabe-se que o meio ambiente é um alvo frequente da construção civil, sendo impactado negativamente de diversas formas, dentre elas, pode-se citar o alto consumo de cimento, material responsável por grandes emissões de CO₂ na atmosfera. Adições como o filler calcário, metacaulim (MK) e aditivos superplastificantes podem ser usados em benefício da sustentabilidade, na redução do consumo de cimento, podendo manter ou melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade da argamassa/concreto. O presente trabalho tem como finalidade analisar a influência do empacotamento de partículas no desempenho de argamassas com baixo teor cimentício, quando submetidas ao ataque de sulfato. Para tal, foi realizado um estudo experimental com quatro traços distintos de argamassa, imersos em solução de sulfato de sódio e em cura convencional, por até 42 dias. Foram definidos os traços RCE, RSE, T1 e T2, sendo que em T1 e T2 parte do cimento foi substituída por filler calcário e metacaulim. As argamassas RCE e RSE apresentaram melhores resultados de resistência mecânica, e mais eficientes quanto à resistência aos íons sulfato. Tratando-se a eficiência dos ligantes, as argamassas dosadas com empacotamento de partículas e adições resultaram nos menores índices de ligante, ou seja, necessitaram de menos cimento para produzir um 1 Mpa de resistência. Todas as argamassas obtiveram expansão menor que 0,03%, classificadas como resistentes, contudo, as argamassas com adições, devido ao teor de alumina do metacaulim, tiveram desempenho inferior com relação às expansões. Por fim, com a dosagem adequada de argamassa, é possível obter resultados favoráveis para a durabilidade mesmo com baixo consumo de cimento.

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

ABSTRACT

It is known that the environment is a frequent target of civil construction, being negatively impacted in several ways, among them, we can mention the high consumption of cement, a material responsible for large CO₂ emissions into the atmosphere. Additions such as limestone filler, metakaolin (MK) and superplasticizer additives can be used for the benefit of sustainability, in reducing cement consumption, and can maintain or improve the mechanical properties and durability of the mortar/concrete. The present work aims to analyze the influence of particle packing on the performance of mortars with low cement content, when subjected to sulfate attack. For this, an experimental study was carried out with four different mixture designs of mortar, immersed in sodium sulfate solution and in conventional curing, for up to 42 days. The mortars RCE, RSE, T1 and T2 were defined, and in T1 and T2 part of the cement was replaced by limestone filler and metakaolin. The RCE and RSE mortars showed better results in terms of mechanical strength, and more efficient in terms of resistance to sulfate ions. Regarding the efficiency of the binders, the mortars dosed with particle packing and additions resulted in the lowest binder indexes, that is, they required less cement to produce a 1 MPa of strength. All mortars had expansion lower than 0.03%, classified as resistant, however, mortars with additions, due to the alumina content of metakaolin, had lower performance in relation to expansions. Finally, with the proper dosage of mortar, it is possible to obtain favorable results for durability even with low cement consumption.

Keywords: mortar; packaging; durability; sulfates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho.	23
Figura 2 - Causas físicas da deterioração do concreto.....	24
Figura 3 - Esquema das causas físicas de deterioração.	26
Figura 4 - Esquema das causas químicas de deterioração.	26
Figura 5 - Ataque por sulfatos em estruturas de concreto.	27
Figura 6 - Esquema de uma estrutura marinha mostrando os processos de transportes atuantes.	29
Figura 7 - Resumo das etapas e procedimentos seguidos.....	38
Figura 8 - Granulometria a laser do metacaulim	40
Figura 9 - Curva granulométrica do fíler calcário e Cimento CPV.....	41
Figura 10 - Faixas granulométricas dos agregados	42
Figura 11 - Ensaio de granulometria	42
Figura 12 - Processo do ensaio da massa específica do agregado miúdo.....	43
Figura 13 - Inserção dos resultados da análise granulométrica	44
Figura 14 - Inserção dos resultados da análise granulométrica	44
Figura 15 - Parâmetros de entrada do software	45
Figura 16 - Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).....	45
Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada	46
Figura 18 - Sequência da inserção dos materiais da mistura na betoneira	47
Figura 19 - Corpos de prova produzidos	48
Figura 20 - Cura em solução de sulfato.....	48
Figura 21 - Medição do índice de consistência da argamassa para o traço T2.....	49
Figura 22 - Ruptura dos corpos de prova T1 submetido à cura normal com 28 dias	50
Figura 23 - Ruptura dos corpos de prova T2 submetido à cura normal com 28 dias	50
Figura 24 - Medição dos corpos de prova prismáticos	51
Figura 25 - Granulometria das areias	52
Figura 26 - Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cal.....	56
Figura 27 - Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos ao sulfato.....	56
Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova RCE submetido à cura com sulfato com 28 dias.....	57
Figura 29 - Ruptura dos corpos de prova T1 submetido à cura com sulfato com 28 dias.....	57
Figura 30 - Índice de ligante das argamassas	58

Figura 31 - Resultados obtidos em relação à literatura.....	59
Figura 32 - Expansão média, em porcentagem, das argamassas devido ao ataque do sulfato. 59	
Figura 33 - Expansão média, em porcentagem, das argamassas submetidas à água saturada com cal.	60
Figura 34 - Expansão das argamassas na cura com sulfato em relação a cura de referência	60
Figura 35 - Argamassa atacada pelo sulfato.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer.....	19
Tabela 2 - Cálculo das emissões de CO2 por tonelada de clínquer.....	22
Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental.....	25
Tabela 4 - Eficiência do consumo de cimento em CAAs com adições minerais	31
Tabela 5 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado.....	39
Tabela 6 - Composição química do metacaulim utilizado.....	39
Tabela 7 - Composição química do fíler.	40
Tabela 8 - Módulo de finura das areias	52
Tabela 9 - Massa específica do agregado miúdo.....	53
Tabela 10 - Massa específica do cimento.....	53
Tabela 11 - Massa específica do fíler.....	53
Tabela 12 - Massa específica do metacaulim	53
Tabela 13 - Proporção e consumo dos materiais utilizados para o traço com empacotamento de partículas.....	54
Tabela 14 - Índice de consistência (IC) para T1 e T2.	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Medidas para redução das emissões de gases de efeito estufa	21
--	----

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

IC – Índice de Consistência

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

PIB - Produto Interno Bruto

WBCSD - World Business Council for Sustainable Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1	ESTRUTURA DO CONCRETO	18
3.2	FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUA RELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE CO ₂	20
3.3	DURABILIDADE	22
3.3.1	<i>Grau de Agressividade.....</i>	24
3.3.2	<i>Efeito do Íons Sulfato no Concreto</i>	26
3.4	POROSIDADE E PERMEABILIDADE	28
3.5	ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO.....	30
3.6	FORMAS DE REDUZIR O CONSUMO DE CIMENTO	32
3.7	ADIÇÕES MINERAIS	33
3.7.1	<i>Efeito das Adições Minerais na Argamassa do Concreto.....</i>	34
3.8	EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS.....	35
3.8.1	<i>Método de Furnas</i>	35
3.8.2	<i>Método de Andreasen & Andersen.....</i>	36
3.8.3	<i>Método de Alfred.....</i>	37
4	METODOLOGIA	38
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	38
4.1.1	<i>Cimento</i>	39
4.1.2	<i>Adições Minerais e Aditivos.....</i>	39
4.1.3	<i>Agregados</i>	41
4.2	DOSAGEM DA ARGAMASSA DO CONCRETO.....	43

4.2.1	<i>Empacotamento de Partículas</i>	43
4.2.2	<i>Determinação da Relação a/c</i>	46
4.3	PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA.....	47
4.4	ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS	49
4.4.1	<i>Ensaio de Consistência (Flow Table)</i>	49
4.4.2	<i>Ensaio de Resistência (Compressão Axial)</i>	49
4.4.3	<i>Expansão Geométrica</i>	51
5	RESULTADOS E ANÁLISES	52
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	52
5.2	DOSAGEM DOS TRAÇOS	54
5.3	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA	54
5.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	55
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Composto por cimento, agregados graúdos e miúdos e água, o concreto assume, atualmente, o posto de material mais consumido nas construções (KLEE, 2009). Segundo CSI (2016), estima-se que, anualmente, esse consumo pode chegar à 25 bilhões de toneladas, o que corresponde, aproximadamente, a 10 bilhões de metros cúbicos de concreto, no mundo.

Sabendo disso, pode-se justificar esse consumo através das inúmeras funções do concreto, as quais o tornam de grande importância para a humanidade. Essa importância pode ser observada pela vasta presença em diversos tipos de instalações humanas, desde calçadas simples até grandes rodovias; de passarelas a pontes; de residências unifamiliares a arranha-céus.

Ademais, o custo relativamente baixo comparado a outros materiais construtivos, a facilidade na produção e a liberdade para escolher a forma, permitem a maximização no uso do concreto e, também, da argamassa, tornando-os alvos de inúmeras pesquisas e estudos acerca do assunto. Nas diversas fases das suas vidas úteis, o comportamento do concreto e da argamassa é analisado macroscopicamente e microscopicamente, a fim de obter resultados sustentáveis e suscetíveis à melhoria da sua resistência e durabilidade diante a influência de alguns fatores externos, além da maximização do seu uso com baixo consumo de cimento (Smith e Hashemi, 2012).

Visando a aplicação consciente dos recursos naturais disponíveis, é necessário que haja estudos acerca desse tema, para que esses recursos escassos sejam gerenciados de forma correta, de modo que reduza os resíduos causados por esses materiais e, ainda, aumente a durabilidade dos produtos fabricados.

Por muito tempo, a durabilidade do concreto e argamassa foi correlacionada à sua resistência, mas, devido ao avanço da tecnologia do concreto e do cimento, foi possível obter, nos últimos tempos, resistências suficientemente boas mesmo em misturas em que a relação água/cimento foi alta. Para Aïtcin (2000), a permeabilidade aos agentes agressivos é o principal fator para desencadear as agressões no concreto e argamassa, prejudicando as suas durabilidades.

Em vista disso, antigamente, acreditava-se que esses elementos eram materiais que possuíam a vida útil ilimitada e, por isso, a sua durabilidade não era o principal ponto a ser avaliado. Porém, ao decorrer do tempo, a vida útil e a durabilidade do concreto e argamassa passaram a ser discutidos com mais frequência na construção civil, devido à degradação dos

materiais frente a agentes agressivos, principalmente, dos íons sulfato e íons cloreto, os quais podem estar presentes nos materiais e/ou no ambiente onde estão inseridos.

Sendo assim, é imprescindível que haja um entendimento da forma de como o sulfato atua nos materiais cimentícios, bem como da capacidade dos materiais de impedirem a sua penetração, com o intuito de diminuir as patologias decorrentes, assim, aumentar a vida útil e durabilidade das edificações.

Dessa forma, este trabalho analisa a durabilidade das argamassas, utilizando o método de dosagem do empacotamento de partículas diante do ataque de íons sulfato. Assim, o estudo justifica-se pela necessidade de maximizar o uso de argamassa, a partir de uma dosagem com baixo teor cimentício e com agregados em quantidades otimizadas, com o intuito de amenizar os impactos ambientais causados pela produção desses materiais e pelo uso dos recursos naturais.

Por fim, este trabalho está dividido em seis capítulos, organizados da seguinte maneira: o primeiro, Capítulo 1, apresenta a introdução do trabalho, onde contextualiza e apresenta o tema a ser abordado, assim como justifica e delimita a pesquisa realizada. Em seguida, no Capítulo 2, apresentam-se os objetivos gerais e específicos. O Capítulo 3 corresponde à revisão de literatura, abordando um embasamento teórico para a execução experimental da pesquisa. O Capítulo 4, visando atingir os objetivos propostos, descreve os materiais e métodos empregados na execução dos procedimentos efetuados no estudo. Por conseguinte, o Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e as suas respectivas análises e discussões acerca da produção. O Capítulo 6 finaliza expondo as conclusões obtidas durante o trabalho e sugere melhorias para futuros trabalhos. 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, quando submetida ao ataque do íon sulfato de sódio anidro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar os resultados do objetivo geral, alguns objetivos específicos foram determinados, dentre eles:

- Avaliar a dosagem através do empacotamento de partículas utilizando o software Q-MIX;
- Investigar o desempenho das argamassas estudadas com menor consumo de cimento e submetidas às condições de exposição pelo agente agressivo, sulfato.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTRUTURA DO CONCRETO

De acordo com Petrucci (2005), o concreto é definido como o material composto pela mistura de água, agregado miúdo e graúdo, aglomerante e, se necessário, aditivos. Ao seguir uma determinada proporção de cada elemento, as propriedades e características do concreto podem variar e, assim, modificar a sua qualidade, resistência e durabilidade, como afirma a Associação Brasileira de Cimento Portland (2012).

O cimento Portland é o aglomerante mais utilizado na fabricação do concreto. Ao envolver os agregados, o cimento influencia diretamente no desempenho, durabilidade e qualidade do concreto, como assegura Isaia (2004). Além disso, Mehta e Monteiro (2014) discorre que o cimento é um composto pulverizado e, quando hidratado, adquire propriedades ligantes, uma vez que há reações químicas entre o composto e a água.

Neville (2016) salienta que, quando ocorre a mistura do cimento com a água, este passa a ser chamado de “pasta de cimento”, entretanto, os elementos que compõem essa pasta só podem ser visualizados através de um microscópio. Já quando há a mistura dos agregados miúdos e graúdos, a composição resulta no concreto.

Ademais, segundo Petrucci (2005), com o intuito de aprimorar as propriedades dos aglomerantes, pode-se, eventualmente, adicionar minerais aos concretos. Ainda, para modificar e aperfeiçoar alguma(s) característica(s) do concreto no seu estado fresco ou endurecido, é viável a utilização de aditivos químicos, em quantidades pré-estabelecidas.

Em suma, o concreto envolve as partículas de agregados por intermédio de uma matriz porosa de pasta de cimento, mantendo uma zona de transição entre elas, como afirma Isaia (2004). Assim, faz-se necessário estudar as três fases das particularidades do concreto: fase agregado, pasta de cimento e a zona de transição.

Na fase agregado, Mehta e Monteiro (2014) evidencia que as características físicas destes agregados – forma, textura e volume - se sobressaem sob a sua composição química e/ou mineralógica, sendo responsáveis por ocupar cerca de 70 a 90% do volume líquido de concreto, além de estarem diretamente relacionados à massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade do concreto. É importante ressaltar que, todas as propriedades citadas, influenciam na trabalhabilidade e na relação água/aglomerante do efeito do concreto.

Ademais, a NBR 7211 (2005) determina que os agregados que forem utilizados no concreto, devem ser compostos por grãos de minerais estáveis, compactos, duros e limpos. Pois,

conforme ressalta Souza e Ripper (1998), esses agregados influenciam na redução da retração, além de aumentar a resistência aos esforços mecânicos e, com isso, o desempenho estrutural e a durabilidade do concreto podem ser afetados.

Paralelo a isso, Mehta e Monteiro (2014) enfatiza que o cimento Portland resulta da junção da moagem de clínquer com sulfato de cálcio, onde, é sabido que o clínquer é constituído por reações heterogêneas de diversos minerais, submetidas à alta temperatura de alguns compostos como o óxido de cálcio e sílica, além de alumina e óxido de ferro.

Sabendo disso, os compostos hidratados são originados no momento em que entram em contato com a água, gerando uma reação química denominada hidratação do cimento, como mostra Prudêncio Junior (2011). Os principais componentes presentes no cimento Portland, segundo Isaia (2004), são os compostos de cálcio, os quais representam, aproximadamente, 80% em massa. A tabela 1, mostra as notações abreviadas dos compostos encontrados no cimento.

Tabela 1 - Principais compostos do clínquer.

Nome do composto	Fórmula	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Adaptado de Neville, 2016.

Dessa forma, conforme Ribeiro et.al (2014), os produtos da reação entre os agregados e o clínquer podem gerar a desintegração do concreto, além de influenciarem na velocidade de hidratação. Portanto, percebe-se que há diversas interferências e formas de atuação do clínquer no processo de hidratação, diante das propriedades do concreto e argamassa.

Mehta e Monteiro (2014) salientam sobre o aparecimento de alguns cristais acirculares de um sulfoaluminato de cálcio hidratado, após ocorrer a hidratação do cimento Portland. Ainda, os autores defendem que alguns cristais compostos de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) – e fibrilares de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) precipitam-se e ocupam os espaços vazios e, por fim, após um tempo, a quantidade de sulfato dissolvido e a etringita se reduzem e se convertem para monossulfato (C4ASH18).

Por fim, a zona de transição compõe a última fase da estrutura interna do concreto. Para Paulon (2005), devido a formação de cristais de grandes dimensões, a zona de transição equivale a região de maior porosidade, o qual se estende para fora da superfície do agregado e se une à massa da microestrutura da pasta.

Nesta fase, Paulon (2005) evidencia que alguns cristais lamelares causam uma preferência em relação à superfície do agregado e, com isso, propagações intercristalinas das fissuras são provocadas. Por conseguinte, quando ocorre a submissão do concreto a ações mecânicas, as tensões se concentram em uma só região, fragilizando-o.

Na zona de transição, pode-se observar, também, a sua influência em torno da durabilidade das estruturas de concreto. Segundo Mehta e Araújo (2014), as microfissuras presentes na interface com o aço e agregado graúdo são umas das causas para que o concreto seja mais permeável que a pasta de cimento, como exemplo da variação de permeabilidade do concreto, é possível citar os rompimentos que são causados nos elementos de concreto protendido e armado por corrosão de armadura.

3.2 FABRICAÇÃO DO CIMENTO E SUA RELAÇÃO COM A PRODUÇÃO DE CO₂

A produção e o consumo de cimento ocasionam um impacto elevado na emissão de dióxido de carbono, correspondendo a liberação quase total dos gases de efeito estufa. Segundo dados divulgados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2014), só no Brasil, em 2014, a indústria de cimento foi responsável por quase 30% das emissões de CO₂, decorrentes da sua fabricação. Além do mais, a fabricação de cimento ocupa, em média, 3% do consumo total de energia industrial do mundo (WORRELL *et. al*, 2001).

As matérias-primas utilizadas com mais frequência na produção de cimento, são o gesso, calcário e a argila. Para formar o clínquer do cimento Portland, as matérias-primas passam por um processo de britagem, moagem e mistura, obtendo, assim, um composto denominado de “farinha”.

Ao levar o material para ser queimado em fornos especiais de alta temperatura, é esperado que haja uma troca de calor entre a farinha e os gases aquecidos, induzindo a calcinação e, por fim, a clinquerização para a produção do clínquer. Portanto, pode-se resumir o processo produtivo do clínquer como uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais, modificadas através do calor (WORRELL *et. al*, 2001; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em suma, de acordo com o ABDI (2012), a produção de cimentos com a menor composição de clínquer são os mais alternativos para reduzir as emissões de gases, neste segmento. Em 2013, segundo dados divulgados pelo World Business Council for Sustainable Development (2009), em relação à utilização do clínquer, o Brasil apresentava uma taxa de 67%, sendo considerada uma das mais baixas, comparada ao restante do mundo.

A redução dessa taxa está relacionada com a disponibilidade de materiais cujas propriedades permitem sua utilização como substitutos parciais do clínquer. Esses materiais são caracterizados pelas cinzas de termoelétricas e escória de alto-forno siderúrgico. Ainda, é importante ressaltar que o tipo de adição depende de cada tipo de cimento produzido (ABDI, 2012).

O processo de fabricação do clínquer pode ser por via úmida ou seca, no entanto, o predomínio dos fornos é por via seca. Como caracteriza Mehta e Monteiro (2014), na via úmida há a moagem e mistura dos materiais, onde são formados uma espécie de lama com até 40% de água. Na via seca, por sua vez, há a preparação da matéria-prima, fabricação de clínquer e cimento (WORRELL et. al, 2001).

Sabendo disso, atualmente, as indústrias de cimento brasileiras utilizam os fornos via seca, devido à alta utilização de substitutos ao clínquer, colaborando, assim, para uma menor emissão de carbono quando comparada à média internacional (World Business Council for Sustainable Development, 2009).

No entanto, apesar do bom desempenho brasileiro quanto às taxas de emissão de carbono pelas indústrias cimentícias, acredita-se, ainda, que esse número pode ser reduzido exponencialmente, com a implementação de medidas já mencionadas. Assim, a seguir, o Quadro 1 apresenta alternativas que devem se tornar viáveis ao decorrer do tempo.

Quadro 1 - Medidas para redução das emissões de gases de efeito estufa.

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO	BARREIRAS	P&D	INVESTIMENTO NECESSÁRIO
Eficiência de fornos	Alto	<ul style="list-style-type: none"> » Troca do tipo de forno é viável somente para novas plantas 	Nulo	Muito alto
Reaproveitamento de calor dos fornos (na etapa de preaquecimento e para a cogeração de energia)	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> » Reaproveitamento do calor em outras etapas depende do equipamento existente; » Cogeração de energia é utilizada apenas no Japão, devido aos elevados custos de energia 	Nulo	Alto/muito alto
Combustíveis alternativos (coprocessamento de resíduos, biomassa e gás natural)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> » Morosidade no processo de licenciamento pelos órgãos ambientais para coprocessamento; » Oferta de combustíveis alternativos pode ser escassa ou de difícil acesso; » Poder calorífico do combustível pode não ser alto o suficiente se comparado ao seu custo 	Baixo (depende do combustível)	Baixo/médio (depende da disponibilidade do combustível)
Cimento com adições	Alto	<ul style="list-style-type: none"> » Oferta de materiais adicionais pode ser restrita 	Baixo	Baixo/médio (depende da disponibilidade de materiais)
Novos tipos de cimento (Novacem, Calera, Calix e Geopolímeros)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> » Produzidos em pequena escala; » Não há comprovação de que são viáveis economicamente; » Utilização não foi testada no longo prazo; » Necessidade de requalificar os usuários de cimento; » Geopolímeros possuem limitações de desempenho e apresentam custo mais elevado 	Muito alto	Muito alto
Captura e armazenamento de carbono (CCS)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> » Nova tecnologia de baixa maturidade, alto risco de investimento, escala produtiva baixa ou inexistente 	Muito alto	Muito alto

Fonte: Adaptado de ABDI (2012) e WBCSD (2009).

Por fim, percebe-se que as medidas mostradas são alternativas viáveis para a mitigação das emissões de carbono ao longo prazo. Como mostra o WBCSD (2009), os nichos de mercados devem ser ocupados pelos cimentos que não utilizam clínquer, incentivando para inovações de materiais adotados que resultem em menor quantidade de emissão carbônica.

A Tabela 2 apresenta os cálculos das emissões de CO₂ por tonelada de clínquer, a partir de dados da WBCSD (2009). Até 2050, a emissão por dióxido de carbono poderia ser reduzida em até 43%, em relação ao ano de 2013, caso houvesse uma melhoria na fabricação de cimentos, através de elementos sustentáveis.

Tabela 2 - Cálculo das emissões de CO₂ por tonelada de clínquer.

Ano	2012	2015	2020	2025	2030	2050
Teor de clínquer	0,77	0,76	0,74	0,735	0,73	0,71
kg CO ₂ /t cimento	750	660	620	590	560	420
kg CO ₂ /t clínquer	974,03	868,42	837,84	802,72	767,12	591,55

Fonte: WBCSD/IEA, 2009.

3.3 DURABILIDADE

Para qualificar as estruturas de concreto, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece que as estruturas devem satisfazer alguns requisitos mínimos para que sejam consideradas de qualidade. Estas devem apresentar resistência à ruptura, desempenho em serviço – a capacidade de não apresentar danos consideráveis ao uso da estrutura, quando submetida a algumas situações -, e, por fim, a capacidade de resistir às influências ambientais (durabilidade).

As estruturas de concreto podem sofrer variações de acordo com as condições expostas pelo ambiente os quais se encontram, podendo sofrer alterações significativas e, assim, comprometer a sua funcionalidade e estabilidade.

Sendo assim, Mehta e Monteiro (2014) definem a durabilidade como sendo a capacidade do concreto de resistir a qualquer processo de deterioração, como o ataque químico, ação de intempéries e abrasão. Ainda, afirmam que há uma estreita relação entre durabilidade e resistência, sendo que a durabilidade se trata da vida útil de algum material sob dadas condições ambientais.

Enquanto isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) designa a durabilidade como sendo a capacidade da estrutura de suportar possíveis intempéries previstas e definidas no projeto estrutural. No intuito de conservar a segurança e estabilidade das estruturas de concreto durante a sua vida útil, é necessário que sejam construídas e projetadas seguindo as diretrizes da norma.

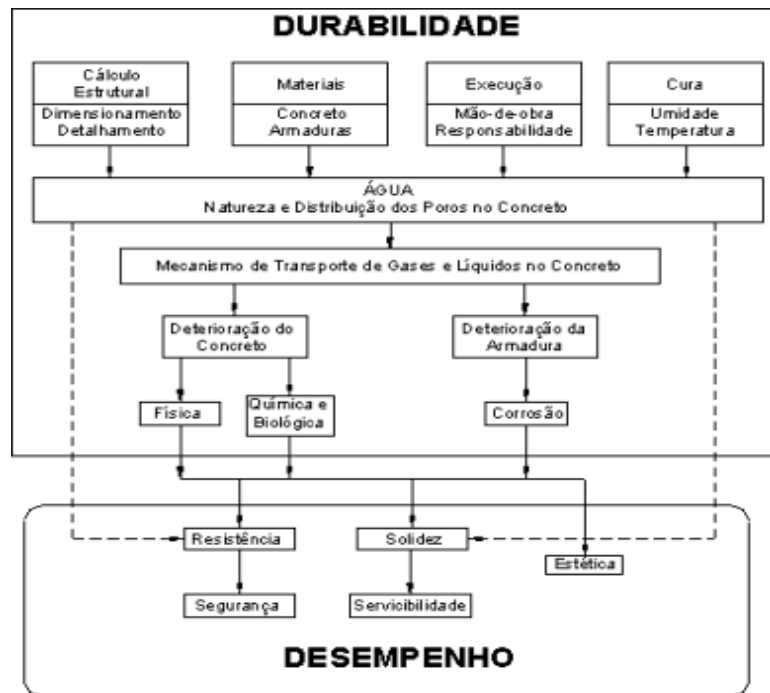
Tendo isso em vista, o comportamento de alguns elementos – estruturais, ou não - podem influenciar na vida útil de uma estrutura. Geralmente, ocorrências nas juntas, drenos e aparelhos de apoio necessitam de manutenções constantes para que a estrutura não seja prejudicada e, muitas vezes, pela falta dessas manutenções, esses elementos possuem a vida útil menor que a do concreto.

Dentro dessa temática, Helene (2011) compôs a regra dos “4C” para definir os fatores da durabilidade do concreto, são eles:

- Traço ou composição do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto;
- Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Alguns fatores interferem no processo de caracterização da durabilidade do concreto. Segundo Souza e Ripper (1998), ao entrar em contato com a massa, a umidade, temperatura, salinidade e agentes químicos e/ou biológicos podem reagir com os componentes existentes no concreto e modificar a sua microestrutura, reduzindo, assim, a sua resistência e durabilidade, a Figura 1 mostra os parâmetros relacionados com os critérios para a obtenção de uma construção durável.

Figura 1 - Inter-relacionamento entre conceitos de durabilidade e desempenho.



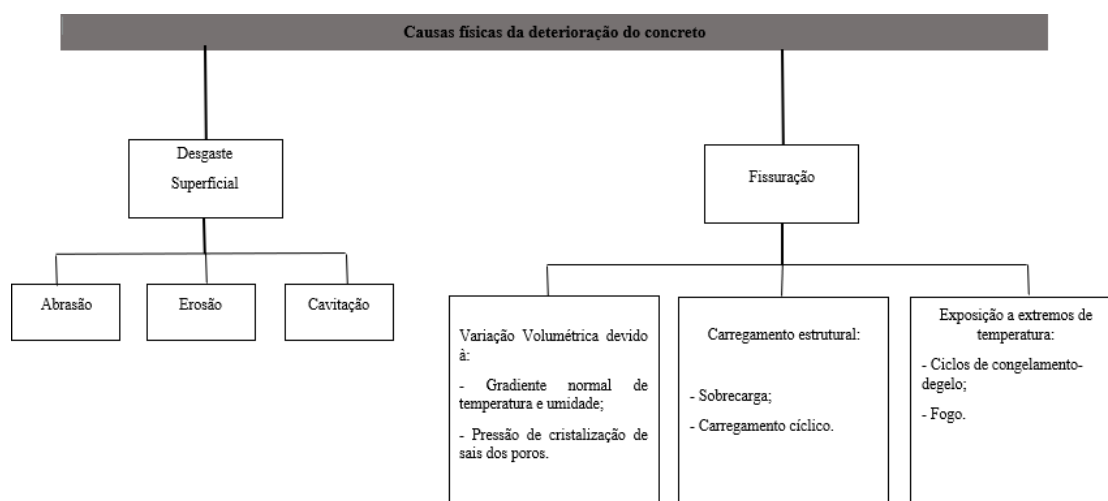
Fonte: Adaptado de Souza e Ripper, 1998.

Em suma, é comum construções apresentarem manifestações patológicas consideráveis. Em muitos casos, assim como indaga Helene (2011), a estrutura pode chegar ao colapso, devido a essas patologias não terem sido, adequadamente, tratadas, além disso, ainda pode haver manifestações e comprometimentos com o aspecto estético da edificação.

Logo, os responsáveis técnicos deverão estar preparados para proceder com algum eventual impasse ocasionado pela má qualidade do desempenho da estrutura, conforme Souza e Ripper (1998), devem respeitar os pontos de vista técnico, econômico e socioambiental da melhor opção escolhida.

Ainda, segundo Souza e Ripper (1998), devido à corrosão das armaduras sob efeito de sulfato ou cloreto encontrado no ambiente, ação do frio ou calor (também por tipo de ambiente) e agressividade química, algumas normas estabelecem critérios que permitem aos responsáveis individualizar modelos duráveis, classificando-os de acordo com a classe de exposição das estruturas a esses eventos, em função da deterioração, assim como resume a Figura 2.

Figura 2 - Causas físicas da deterioração do concreto.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014.

3.3.1 Grau de Agressividade

A NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica o grau de agressividade das estruturas de concreto, de acordo com o ambiente ao qual ela foi inserida. De forma geral, os fatores envolvidos neste processo, podem afetar a durabilidade do sistema. Ainda, segundo a norma, através dessa classificação, pode-se verificar qual deve ser a relação adequada de água/cimento, assim como é possível verificar a classe necessária do concreto para que o sistema seja capaz de resistir às condições ambientais as quais estarão expostos.

Segundo Rebmann (2011), a durabilidade de um elemento pode variar de acordo com as condições de agressividade impostas pelo ambiente. Fatores físicos e químicos podem interferir na durabilidade e vida útil da estrutura, dependendo do ambiente aos quais se encontram, acarretando em mudanças nas suas características.

Ademais, a NBR 6118 (ABNT, 2014) impõe que a agressividade ambiental dos projetos de estruturas, deve ser classificada de acordo com a Tabela 3. Podendo ser avaliada, ainda, conforme as condições de exposição da estrutura ou de suas partes.

Tabela 3 - Classes de agressividade ambiental.

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural e Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana ^{a, b} e Marinha ^a	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a e Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito Forte	Industrial ^{a, c} e Respingos de Maré	Elevado
^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com			
^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.			
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.			

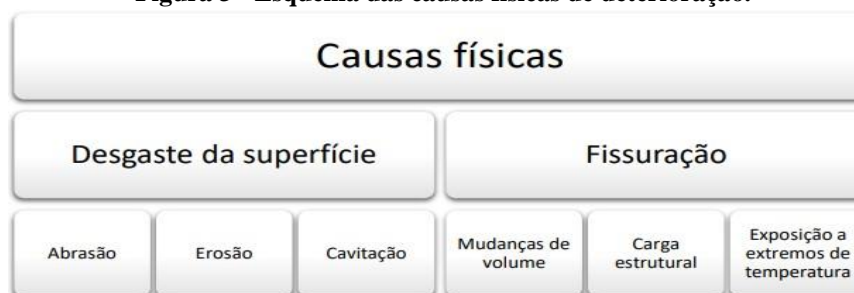
Fonte: NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT 2014).

A norma ainda complementa, no seu item 6, que a agressividade ambiental está diretamente relacionada às ações físicas e químicas que atuam sobre as estruturas de concreto, independente de algumas ações e intempéries previstas no dimensionamento dessas estruturas.

Sendo assim, Mehta e Monteiro (2014) dividiram as causas de deterioração em físicas e químicas. As causas físicas, ainda, são subdivididas em dois grupos, o primeiro trata-se de um desgaste superficial (perda de massa), onde encontram-se os fenômenos de abrasão, erosão e cavitação. O segundo, por sua vez, corresponde à fissuração, acarretadas pelas mudanças de volume – temperatura, umidade e pressão de cristalização de sais nos poros -, carregamento estrutural e a exposição a variações de temperaturas.

A seguir, a Figura 3 apresenta uma classificação para as causas físicas de deterioração do concreto, de acordo com Mehta e Monteiro (2014):

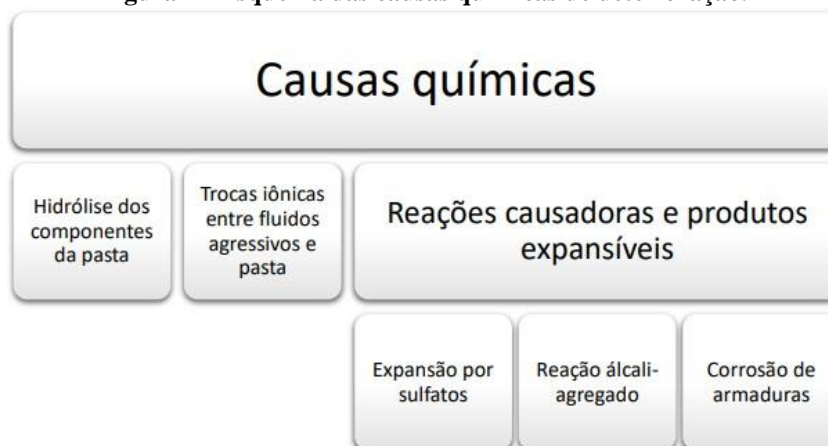
Figura 3 - Esquema das causas físicas de deterioração.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014.

De maneira análoga, Mehta e Monteiro (2014) subdividiram as causas químicas em três categorias. A primeira compõe a hidrólise dos componentes de pasta por água mole. A segunda trata-se das reações de troca de cátions entre os fluídos agressivos e a pasta de cimento. Por fim, a terceira categoria das causas químicas remete às reações envolvendo a formação de produtos expansivos, tais quais a expansão causada por ataque de sulfatos. Abaixo, a Figura 4 resume a representação dos tipos de causas químicas.

Figura 4 - Esquema das causas químicas de deterioração.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2014.

Conforme Costa (2004), as consequências do produto dessas reações se mantêm, apesar da variação do tipo de agente agressor. O destacamento do concreto, fissuras e descoloramento são as consequências mais comuns, além disso, em todos os casos, estes virão acompanhados de perda de resistência.

3.3.2 Efeito do Íons Sulfato no Concreto

À priori, sabe-se que os íons sulfato pode ser extremamente prejudiciais às estruturas de concreto. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que não é raro encontrar concentrações

significativas de sulfato na natureza, pois, estão presentes nos solos, agregados, águas subterrâneas e na água do mar.

Ademais, Filho (1994) explana que os estudos sobre o comportamento do concreto em contato com o sulfato têm crescido exponencialmente nos últimos anos, devido aos seus elementos terem propriedades expansivas, podendo provocar, assim, uma grande deterioração do material.

Por conseguinte, conforme Filho (1994), em contato com a água, ocorre uma reação entre os compostos de cimento e os íons sulfatos, apresentando, assim, duas manifestações distintas – expansão do concreto e perda progressiva de resistência, rigidez e massa.

No entanto, Bertolini (2010) explica que o ataque de sulfato pode ser reduzido quando há o emprego de cimento com adições pozolânicas e, ainda, pela diminuição da relação água/cimento. Quando há a presença de sulfatos nesses ambientes, a baixa permeabilidade do concreto ajuda a combater a sua penetração.

Corroborando com o exposto, Ribeiro *et al.* (2014) cita que os íons sulfatos presentes nos ambientes, podem penetrar no concreto e reagir com componentes do cimento, produzindo produtos expansivos. Por conseguinte, o fechamento das juntas de expansão, deformações, fissurações e desagregação do concreto são comuns nesses casos, como exemplifica a Figura 5.

Figura 5 - Ataque por sulfatos em estruturas de concreto.



Fonte: S A Soluções de Engenharia, 2016.

Segundo Ribeiro *et al.* (2014), a estrutura do concreto pode ser atacada em três fases:

- Quando há a penetração dos íons sulfato na matriz do cimento;
- Quando a reação dos sulfatos com o hidróxido de cálcio é efetivada, formando gesso ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);
- Quando ocorre a reação do gesso com os aluminatos, ocasionando compostos expansivos, como a etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

Ainda, para o autor supracitado, o concreto fissurado é mais suscetível à penetração de água, devido ao aumento da permeabilidade. Sendo assim, ao deteriorar o elemento estrutural, pode haver perda de massa e diminuição da resistência, devido à reação com os produtos de hidratação do cimento.

Em relação às manifestações patológicas, Mattos (2015) evidencia que as principais alterações decorrentes do ataque, além da desagregação e fissuração do concreto, se dão por meio de uma coloração esbranquiçada ou marrom do concreto, pode-se verificar ainda a ocorrência de amolecimento da pasta do concreto endurecido, em casos de formação de taumasita.

Segundo Ribeiro et al. (2014), entre todas as reações de ataque do sulfato, a etringita é a mais perigosa, devido os seus efeitos expansivos serem mais agressivos, que podem ser desencadeados pelo aumento da absorção de água da etringita pouco cristalina ou pela adição de cristais de etringita. Já o sulfato de magnésio, apresenta um efeito menos favorável, pois ataca os silicatos hidratados de cálcio existentes na matriz do cimento.

A etringita acarreta problemas quando é formada tardiamente, sendo afetada pelos sulfatos dos agregados, nas fases minerais do clínquer contendo SO_3 , ou por íons encontrados através de meios já citados (CENTURIONE, KIHARA, BATTAGIN, 2003).

Algumas alternativas são viáveis e vêm sendo estudadas para diminuir o ataque de íons sulfato nas estruturas de concreto. Centirone et al. (2003) cita que, materiais cimentícios suplementares, tais como cimentos com escória ou pozolana, tem significativa contribuição sobre a capacidade do concreto resistir à penetração de íons sulfato, pois apresentam baixo teor em aluminato de cálcio (C_3A) e baixa disponibilidade de $Ca(OH)_2$.

3.4 POROSIDADE E PERMEABILIDADE

A porosidade e permeabilidade são aspectos importantes para um concreto de qualidade, além de estarem correlacionadas. Mehta e Monteiro (2014) definem a permeabilidade como a capacidade de escoamento do fluido através de um sólido, determinando o seu grau pelo tamanho e continuidade dos poros na estrutura do sólido.

O fator água/cimento é primordial para definir a densidade, porosidade, permeabilidade e outras características do concreto. Sendo assim, de acordo com Souza e Ripper (1998), a água – em sua forma líquida – é o principal elemento para definir a durabilidade das estruturas de concreto armado.

Recena (2015) induz que muitos poros no concreto levam a uma maior penetração de

água do meio externo, podendo assim levar, em solução, agentes agressivos que reduzem a durabilidade do concreto. Com isso, fica evidente que a permeabilidade e porosidade estão, também, relacionadas com a resistência do concreto a ataques químicos.

Ademais, Neville (2016) explana sobre as diferenças entre os conceitos de porosidade e permeabilidade. Para ele, a porosidade trata-se sobre a medida da proporção do volume total de concreto ocupada por poros, se os poros estiverem interligados, a permeabilidade será maior, e vice-versa.

Ainda, o autor citado acima, afirma que a difusão, permeabilidade e absorção por sucção capilar são as principais maneiras de transporte de massa pelo concreto. Sendo assim, também chamada de escoamento, a permeabilidade define-se como o movimento que ocorre devido ao diferencial de pressão, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - Esquema de uma estrutura marinha mostrando os processos de transportes atuantes.



Fonte: CLARKE, 1986.

A relação entre água/cimento e o grau de hidratação da pasta são os dois principais fatores da porosidade, como afirmam Araújo, Rodrigues e Freitas (2000). Em relação ao primeiro fator, tem-se que a estrutura da pasta é estabelecida através do fator a/c, sendo assim, quanto menor essa relação, mais os grãos de cimento estarão próximos, diminuindo a porosidade da pasta.

Enquanto isso, os autores Araújo, Rodrigues e Freitas (2000) explicam que o segundo fator se trata sobre a expansão das partículas nas reações de hidratação, onde há uma redução da porosidade à medida em que a hidratação evolui, devido os produtos formados ocuparem um maior volume, em relação à ocupação inicial do cimento. Tendo isso em vista, constata-se

que há uma redução da porosidade do concreto, quando a relação a/c é diminuída, além da evolução da hidratação (idade do concreto).

Em suma, Neville (2016) defende que a água pura ou com a presença de íons sulfatos e cloretos, são os principais fluídos que se deslocam para o interior do concreto. Dessa forma, a porosidade e permeabilidade são fatores indispensáveis para que a durabilidade dessas estruturas de concreto não seja afetada. Por fim, com o intuito de proporcionar uma maior vida útil à estrutura, todos esses fatores devem ser levados em consideração.

3.5 ARGAMASSA COM BAIXO CONSUMO DE CIMENTO

Reutilizar resíduos e subprodutos industriais são opções convenientes para produzir concretos menos degradantes ao meio ambiente, com o intuito de amenizar o uso de cimento na fabricação do concreto (POPEK; SADOWSKI, 2017).

Sabendo disso, como cita Wongkeo et al. (2014) em sua obra, essa redução do consumo de cimento em concretos pode ser realizada de diversas formas, dentre elas, com a utilização de materiais cimentícios suplementares (SCMs) que sejam sustentáveis e não causem impactos elevados para o meio ambiente, como as adições minerais, incluindo os resíduos de outras indústrias ou pozolanas naturais – sílica ativa, cinza volante, metacaulim e pó dolomítico.

Para Juenger e Siddique (2015), essa prática resulta em concreto com menores custos e com menores impactos ambientais, além de apresentarem propriedades mecânicas e durabilidade iguais e/ou superiores aos concretos de resistência mecânica intermediária.

Rebmann (2016) explana sobre a possibilidade de haver um controle significativo ou mitigação do impacto ambiental causado pela fabricação do cimento, se houver uma redução do seu consumo. Sendo assim, para ele, a redução do cimento relaciona-se com questões técnico-ambientais, uma vez que o seu consumo induz a um maior gasto energético que, por consequência, afeta o meio ambiente.

Para mostrar a eficiência do consumo de cimento na resistência à compressão axial de concretos produzidos com adições minerais, Pelisser et. al. (2018) elaborou uma tabela com os índices obtidos em trabalhos anteriores (Tabela 4). Ademais, mostra a quantidade de cimento utilizada para cada megapascal de resistência obtido e, por conseguinte, o concreto que utilizar menos quantidade de cimento por megapascal de resistência, é o concreto com a maior eficiência. Os cálculos foram feitos a partir da fórmula abaixo:

$$\text{quant. cimento} = \frac{\text{consumo de cimento } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)}{\text{resistência à compressão (MPa)}} \quad (1)$$

Tabela 4 - Eficiência do consumo de cimento em CAAs com adições minerais.

Referência	Consumo de cimento (kg/m ³)	Materiais cimentícios suplementares (kg/m ³)	Resistência à compressão (MPa)	Eficiência do consumo de cimento (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹)
Sukumar <i>et al.</i> , 2008	250	275 (FA)	39,6	6,3
Yazıcı, 2008	180	360,0 (FA) + 60,0 (SF)	54	3,3
Sahmaran <i>et al.</i> , 2009	250	250 (FA)	40,8	6,2
Gesoglu <i>et al.</i> , 2009	180	202,5 (FA) + 67,5 (SF)	44,9	4
Guneyisi <i>et al.</i> , 2010	180	202,5 (FA) + 67,5 (SF)	37,4	4,8
Liu, 2010	437	80 (FA)	69,7	6,2
Corinaldesi e Moriconi, 2011	440	100 (FA)	45	9,7
Vejmelkova <i>et al.</i> , 2011	364	243 (MK)	67,7	5,3
Uysal e Sumer, 2011	357	193 (FA)	67,5	5,2
Madandoust e Mousavi, 2012	348	20 (MK)	36	9,7
Sebaibi <i>et al.</i> , 2013	357	40 (FA)	50	7,1
Nepomuceno <i>et al.</i> , 2014	472	92 (FA)	56,8	8,3
Zhao <i>et al.</i> , 2015	276	184 (FA)	56	4,9
Singh e Singh, 2016	430	185 (FA)	33	13
Long <i>et al.</i> , 2017	152	168 (FA)	24,6	6,2
Pelisser, Vieira e Bernardini (2018)	472	52 (MK)	67,2	7
	240	26,7 (FA) +26,7 (MK)	28,6	8,4

* FA= cinzas volantes; SF= sílica ativa e MK=metacaulim

Fonte: Adaptado de Pelisser, Vieira e Bernardini, 2018.

Na produção dos concretos autodescendentes com baixo consumo de cimento, o uso do metacaulim mostra-se muito eficaz. Sfikas et al. (2014) concluiu que as partículas do metacaulim contribuem para um melhor empacotamento, devido à finura das suas partículas serem inferiores às partículas do cimento.

Além disso, ao substituir o cimento por metacaulim na produção dos concretos autodescendentes, pode haver uma redução considerável no coeficiente de migração de sulfato e cloreto e provocar, ainda, um aumento da resistência à penetração de sulfato na sua superfície (BADOGIANNIS et al., 2015).

Corroborando com esta afirmação, Kannan e Ganesan (2014) afirmam que, para até 36% de substituição do cimento por metacaulim, a durabilidade não é afetada, podendo colaborar, assim, para uma melhoria na permeabilidade.

Conforme Badogiannis et al. (2015), considerando as baixas emissões de CO₂ durante a produção de concreto com o metacaulim, percebe-se que, além de colaborar para a boa durabilidade do concreto, o metacaulim também é considerado um material sustentável e ecologicamente correto. No entanto, o MK possui um alto custo, em relação ao cimento convencional, isso ocorre pela sua baixa escala de produção atual (BADOGIANNIS et al., 2015).

3.6 FORMAS DE REDUZIR O CONSUMO DE CIMENTO

As adições minerais no concreto para reduzir o consumo de cimento e torná-lo mais sustentável, vêm sendo discutidas por diversos autores. Sabe-se que, ao associar alguns fatores à produção do concreto com baixo consumo de cimento, pode-se permanecer com as mesmas propriedades de trabalhabilidade, durabilidade e eficiência (UYSAL & YILMAZ, 2011). Para isso, esses fatores devem passar por:

- Dispersão de partículas: ao entrarem em contato com um líquido tão polar quanto a água, as partículas de cimento tendem a aglomerar, devido às forças de atração de van der Waals – atração interpartículas -, as forças eletrostáticas e ligações envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assim, as estruturas das partículas aglomeradas podem gerar uma maior retenção de água, implicando numa rede aberta de canais entre as partículas (vazios), causando indisponibilidade de água capaz de hidratar a superfície das partículas de cimento (AITCIN et al., 1994). Portanto, dispersar as partículas é uma medida essencial para o bom funcionamento do empacotamento. Isso pode ser obtido através do uso de aditivos dispersantes, que sejam compatíveis com o cimento utilizado

(REBMANN, 2016).

- Empacotamento de partículas: o comportamento das partículas depende das suas propriedades e das interações entre elas, essas partículas podem ser grãos de agregados, minerais, solos, moléculas, entre outros (STROEVEN; STROEVEN, 1999). Sendo assim, em relação ao concreto, a fluidez inicial também depende de propriedades físicas como a forma, granulometria e a textura das partículas. A distribuição de tamanho das partículas promove o empacotamento e, ainda, durante o estado fresco, define as propriedades reológicas do material durante a mistura (Bonen; Sarkar, 2016).
- Escolha dos finos e agregados: para obter os resultados esperados na mistura, sem a necessidade de aumentar a quantidade de água, é preciso conhecer a morfologia dos grãos antes da sua utilização (REBMANN, 2016). Além do mais, deve-se proceder da mesma forma com os agregados, a fim de reduzir o consumo de pasta que garante a mobilidade dos grãos (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011).
- Mistura adequada: o tipo do aparelho misturador e a sequência com que ocorre a mistura do concreto, podem afetar a sua reologia (WALLEVIK; WALLEVIK, 2011). Para reduzir o consumo de água e cimento, é viável a utilização de materiais que possuem a capacidade de homogeneização e dispersão de partículas, além do lançamento do aditivo em momentos apropriados da mistura (CASTRO, 2009).
- Tipos de cimento: a escolha do cimento influencia, diretamente, na qualidade do concreto. Diante disso, é indispensável a escolha de um cimento que agregue propriedades de durabilidade, resistência e trabalhabilidade ao concreto.

3.7 ADIÇÕES MINERAIS

Como cita Stroeven (1999), a utilização de adições minerais em substituição ou complemento ao cimento vem sendo cada vez mais frequente na produção de concretos. Além de oferecerem um maior conforto ambiental, as adições minerais corroboram para a redução de emissão de CO₂ na atmosfera, já que os seus subprodutos são sustentáveis (FERRARIS et al., 2001).

Uma das formas de obter um concreto mais ecológico e com alta durabilidade, é incorporando adições minerais como o metacaulim, sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, etc., na sua composição. Quando utilizada em substituição ao cimento, essas adições modificam as características físicas e mecânicas do concreto e, ainda, melhoram a ação ligante do cimento, produzindo um concreto menos poroso. Ademais, a durabilidade diante o ataque

de agentes agressivos, tais como íons sulfato e cloreto, também aumenta (DUVAL; KADRI, 1998).

Para Aitcin *et. al* (1994), nas primeiras idades, a adição mineral pode ser apresentada apenas como um material fino, sem efeito aglomerante, devido às suas reações químicas não ocorrerem como as reações de hidratação do cimento. Corroborando com os fatos mencionados, Mehta e Monteiro (2014) denotam sobre o “efeito fíler”, o qual corresponde aos poros associados à reação pozolânica, podendo ser citado, ainda, sobre a eficácia da reação de hidratação no preenchimento dos espaços capilares, pois, de acordo com os autores, aumenta a resistência e reduz a permeabilidade do concreto.

Segundo Lawrence e Ringot (2003), quando há a presença de adições minerais em materiais à base de cimento, são observados três efeitos físicos diante a hidratação do material cimentício, são eles:

- Efeito de diluição do cimento: inversamente proporcional à taxa de substituição, este efeito equivale ao aumento da relação a/c;
- Efeito da distribuição granulométrica: genericamente, depende da granulometria e da quantidade de adição mineral utilizada. É relacionado com a modificação da porosidade inicial do sistema;
- Nucleação heterogênea: catalisa o processo de nucleação dos hidratos, através da redução da barreira de energia. É conduzido pela ativação química da hidratação do cimento.

3.7.1 *Efeito das Adições Minerais na Argamassa do Concreto*

Ao introduzir adições minerais em argamassas ou concretos, algumas propriedades podem ser modificadas. Dentre elas, pode-se citar a melhoria nas propriedades mecânicas e a trabalhabilidade do concreto, enquanto a porosidade e permeabilidade são reduzidas. Com isso, essas modificações colaboram para um crescente desempenho do concreto, aumentando a sua durabilidade (FERRARIS *et al.*, 2001).

Em suma, conforme Mehta e Monteiro (2014), as adições minerais influenciam nas seguintes propriedades:

- A) Trabalhabilidade: ao introduzir partículas divididas na argamassa, o volume e tamanho dos vazios se reduzem, colaborando, assim, para uma melhoria da trabalhabilidade.
- B) Durabilidade à fissuração térmica: as adições minerais reduzem a temperatura máxima de um elemento da argamassa do concreto em proporção à quantidade de cimento, o

qual só é atingida após três dias do seu lançamento.

- C) Durabilidade ao ataque químico: a reação pozolânica em argamassas com presença de adições minerais, colabora para a redução da permeabilidade e teor de hidróxido de cálcio, melhorando, assim, a resistência das estruturas frente ao ataque de agentes agressivos da natureza e, por conseguinte, aumentando a sua durabilidade.
- D) Produção de argamassa do concreto com alta resistência e desempenho: com a utilização de adições minerais nas argamassas, tais como a cinza volante e metacaulim, é possível obter argamassas de alta resistência e bom desempenho, tanto quanto os produzidos com material cimentício.

3.8 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Há alguns anos, como ressalta Castro e Pandolfelli (2009), o empacotamento das partículas vem sendo tema de estudos nas diferentes áreas da engenharia, devido à utilização frequente de materiais formados por partículas de formas e tamanhos distintos, tais como grãos de agregados, minerais, metais, moléculas e etc. Nesse sentido, conclui-se que o comportamento desses materiais depende das suas propriedades e as interações entre elas (Stroeven; Stroeven, 1999).

Em suma, o empacotamento de partículas é conceitualizado pela constante procura por partículas de proporções ideais, de maneira que os fragmentos menores preencham os vazios maiores (Castro; Pandolfelli, 2009).

Além de uma boa densidade, os grãos precisam apresentar uma trabalhabilidade adequada, para facilitar o manuseio e adensamento do concreto. No entanto, algumas medidas mitigadoras precisam ser tomadas durante a mistura, já que o aparecimento de vazios pode estar relacionado a quantidade de água utilizada para obter a trabalhabilidade do material, causando uma diminuição significativa da densidade (Vanderlei, 2004).

Sabendo disso, alguns modelos de empacotamento surgiram ao decorrer do tempo, com a finalidade de calcular a densidade de empacotamento das partículas e otimizar as misturas granulares de concretos.

3.8.1 Método de Furnas

Este método avalia, individualmente, cada componente da mistura, sendo conhecida, assim, por ser um modelo com uma abordagem discreta. Utilizando diversas proporções de tamanhos e granulometria variadas, o método de Furnas indaga para a obtenção de resultados

com alta compactação de fluidez das partículas, porém, considerando diâmetros infinitos. Sabendo disso, na prática, esse método é impossível de ser utilizado (SARKAR, 2016).

A seguir, a Equação 1 representa o método de Furnas:

$$CPFT (\%) = 100 \left(\frac{D^{logr} - D_S^{logr}}{D_L^{logr} - D_S^{logr}} \right) \quad (1)$$

Onde,

CPFT – Porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (mm);

DL – Diâmetro da maior partícula (mm);

DS – Diâmetro da menor partícula (mm);

r – Razão entre o volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas.

Para Henche e Mazer (2010), a equação do método de Furnas indica o volume aparente de misturas com dois materiais, conhecidas como misturas binárias.

3.8.2 Método de Andreasen & Andersen

O método de Andreasen & Andersen considerava as partículas como distribuições contínuas, neste modelo, haviam porções com partículas de diferentes tamanhos. Para Vanderlei (2004), é um modelo de fácil aplicação, pois, não exige o fator de forma das partículas, sendo necessário apenas apresentarem formas similares.

De acordo com Silva (2004), para representar o seu modelo, Andreasen formulou uma equação (Equação 2) ao qual condiciona o empacotamento perfeito como sendo expresso por uma lei de potência.

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

Onde,

CPFT – Percentual acumulado de finos menor que “D” em volume;

q – Constante designada por módulo de distribuição granulométrica;

D – Tamanho da partícula;

DL – Maior tamanho de partícula de distribuição.

Através de simulações realizadas por meios computacionais, Vanderlei (2004) analisou que o empacotamento para distribuições infinitas pode ser vantajoso se os valores de “q” não

ultrapassarem 0,37, caso contrário, verifica-se sempre a presença de uma porosidade residual.

Além disso, para a mistura apresentar uma capacidade de escoamento adequada, o valor de “q” precisa ser inferior a 0,30. Utilizar valores próximos de 0,30 no coeficiente de distribuição favorece o uso de elementos vibratórios para fins de melhoria ao adensamento no concreto. No entanto, se o número for inferior a 0,25, resulta em misturas autoadensáveis (VANDERLEI, 2004).

3.8.3 Método de Alfred

Oliveira et al. (2000) realizou uma análise comparativa entre os modelos de Furnas e Andreasen, após alguns estudos, concluiu que, apesar de diferentes, ambos convergem, matematicamente, para uma mesma equação – Modelo de Alfred.

O modelo de Andreasen não representa a realidade, pois considera as partículas infinitamente pequenas. Com isso, buscando solucionar esse impasse, o modelo de Alfred (Equação 3) foi desenvolvido para aprimorar os modelos anteriores, acrescentando-se do diâmetro da menor partícula. Sendo assim, quando o tamanho da menor partícula tende a zero, o modelo de Alfred aproxima-se do de Andreasen, sendo conhecido, no entanto, como um modelo de adaptação ao de Andreasen (Oliveira; Studart; Pileggi; Pandolfelli, 2000).

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

Onde,

CPFT – Porcentagem volumétrica das partículas menores que o diâmetro DP;

DL – Diâmetro da maior partícula;

Ds – Diâmetro da menor partícula;

r – Razão entre a diferença de volume de partículas entre duas malhas de peneiras consecutivas;

q – Coeficiente de distribuição.

4 METODOLOGIA

Com o intuito de abranger os objetivos e fundamentação teórica proposta, a metodologia utilizada neste trabalho fundamentou-se em compreender o comportamento de argamassas com baixos teores de cimento, através da incorporação de metacaulim, focando na análise dos indicativos de durabilidade.

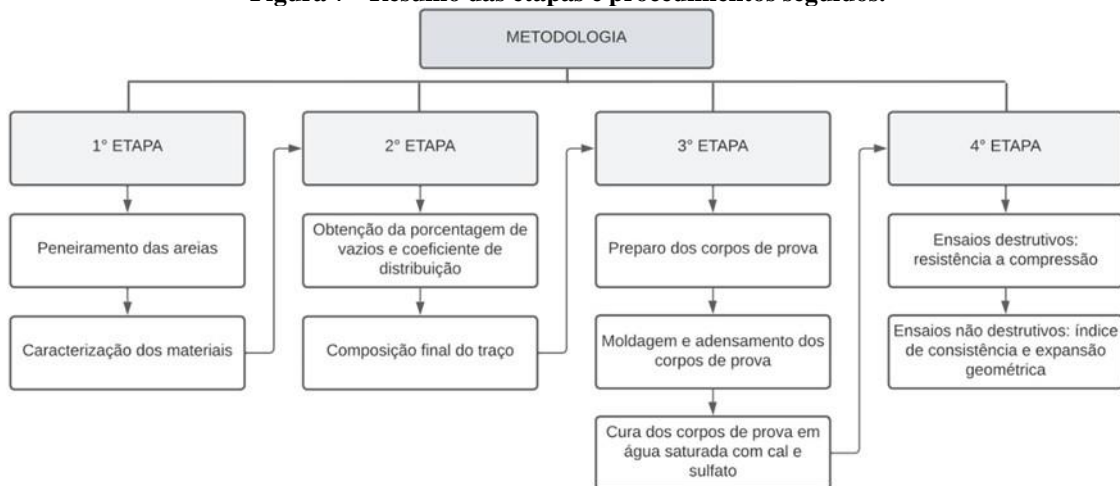
As argamassas foram submetidas ao ataque de íons sulfato e à maximização da argamassa, de forma combinada e individual, verificando, assim, a influência desses ataques na deterioração das argamassas.

Este trabalho qualifica-se sob um programa experimental de abordagem quantitativa, o qual foi dividido nas seguintes etapas:

1. Caracterização dos materiais;
2. Composição do traço;
3. Dosagem, preparo, moldagem e cura da argamassa;
4. Ensaio destrutivos e não destrutivos.

A seguir, a Figura 7 apresenta o fluxograma do planejamento experimental desta pesquisa.

Figura 7 - Resumo das etapas e procedimentos seguidos.



Fonte: Autor, 2022.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Diante do exposto, os materiais utilizados na pesquisa foram selecionados de modo que produzissem argamassas capazes de fluir sem a apresentação de exsudação e segregação. Sendo

assim, buscou-se prezar pela qualidade, sempre analisando as características físicas e químicas de cada material.

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CP V-ARI), especificado pela NBR 5733/1991. Este cimento constitui-se de, no mínimo, 95% de clínquer, não possuindo adições pozolânicas na sua composição. Dessa forma, a composição presente no cimento não interferiu nas alterações agregadas pelas adições minerais, facilitando, assim, a análise da influência causada pelas adições minerais, na produção da argamassa. A Tabela 5 apresenta a composição do Cimento CP V-ARI.

Tabela 5 - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado.

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

Fonte: Autor (2022).

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

4.1.2 Adições Minerais e Aditivos

- Metacaulim

Objetivando promover o refinamento de poros por meio do empacotamento nos níveis abaixo da granulometria do cimento, foi utilizada, como adição mineral, a metacaulinita vermelha. Nesta especificação, o metacaulim possui massa específica de, aproximadamente, 2,57 g/cm³.

De acordo com a fabricante Metacaulim do Brasil Ltda., a metacaulim possui uma área superficial específica (BET) mínima de, aproximadamente, 300.000 cm²/g. A composição química foi obtida através de ensaio de FRX, apresentada da Tabela 6, e a análise granulométrica apresentada na Figura 8.

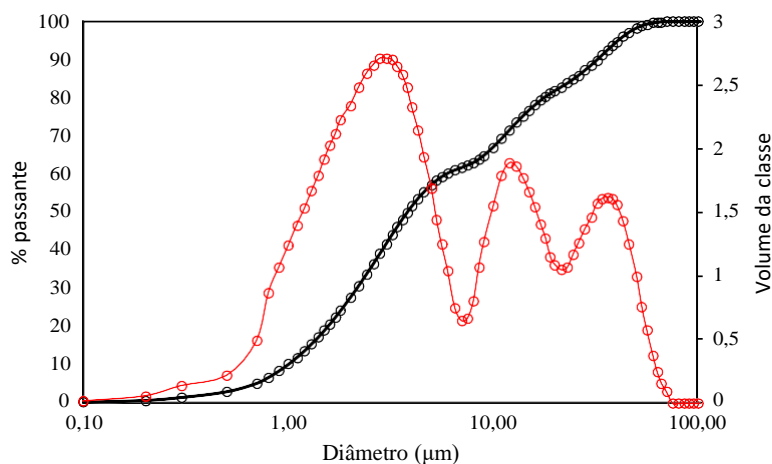
Tabela 6 - Composição química do metacaulim utilizado.

Óxidos (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Outros
53,65	31,79	9,90	1,17	0,65	0,2	1,84	0,6

Fonte: Autor (2022).

Figura 8 - Granulometria a laser do metacaulim.



Fonte: Autor, 2022.

- Fíler

Para a pesquisa, utilizou-se um fíler calcário, o qual pode ser utilizado na produção de plásticos, tintas, fritas cerâmicas, esmaltes e etc. Determinada conforme a ABNT NBR NM 23:2000, a massa específica do fíler utilizado foi de 2,84g/cm³. Foi realizado ensaio de granulometria a laser, no equipamento CILAS 1090 SECO, Faixa: 0.10 μm - 500.00 μm / 100 Classes. O fíler apresentou diâmetro médio de 14,90 μm. A Figura 9 apresenta o resultado do ensaio. Nota-se a finura do material, bem próxima ao cimento. Este material tem, portanto, potencial para atuar na substituição de cimento, como sugerido em ensaios por Bentz (2005).

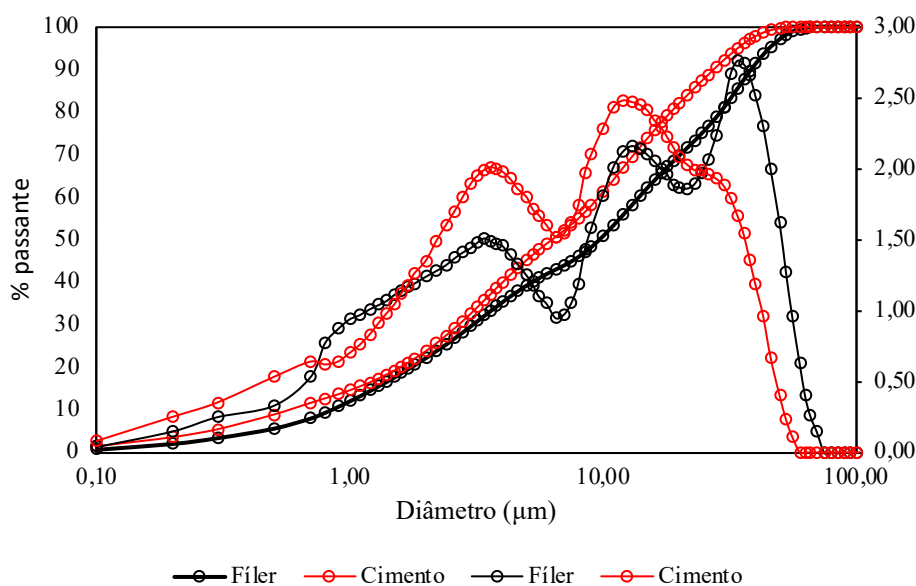
A composição química foi obtida através de ensaio de FRX, apresentada da Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química do fíler.

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

Fonte: Autor, 2022.

Figura 9 - Curva granulométrica do filler calcário e Cimento CPV.



Fonte: Autor (2022)

- Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado foi o ADVA 585, no intuito de reduzir o uso de água, de modo que a proporção água/cimento permaneça proporcional. Este aditivo, segundo informações do fabricante, apresenta naftaleno sulfonado na sua composição, obtendo massa específica equivalente a $1,075 \text{ g/cm}^3$.

Ademais, com a utilização dos aditivos desta classe, a argamassa pode apresentar uma maior trabalhabilidade, sem alterar a relação água/cimento. Sendo assim, Helene (2011) mostra que o uso de aditivos superplastificantes permitem, de maneira alternativa, uma economia de cimento, mantendo a consistência, a relação a/c e a resistência à compressão.

4.1.3 Agregados

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

Sendo assim, denominou-se de areia 1 (areia grossa) a fração que ficou retida na peneira de 1,2mm, já a areia 2 (areia média) equivale à passante pela 1,2mm e retida na 0,6mm. Por último,

chama-se areia 3 (areia fina) aquela que passante pela peneira de 0,6mm. As frações de areia que compõem o traço podem ser verificadas na Figura 10. Para determinar a composição granulométrica das faixas de areias utilizadas, foi-se seguida as normas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 10 - Faixas granulométricas dos agregados.



Fonte: Autor, 2022.

Com o intuito de obter uma caracterização mais detalhada dos diâmetros das partículas de areia, estas foram submetidas a peneiras de série intermediária e normal, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Ensaio de granulometria.



Fonte: Autor, 2022.

Para determinar a massa específica das areias, conforme especifica a NBR NM 52 (ABNT, 2009), foi-se utilizado um molde de tronco de cone para achar o exato momento em que o agregado iria apresentar-se saturado e seco, desmoldando-se após a retirada do molde, como exemplificado na Figura 12.

Figura 12 - Processo do ensaio da massa específica do agregado miúdo.



Fonte: Autor, 2022.

4.2 DOSAGEM DA ARGAMASSA DO CONCRETO

4.2.1 *Empacotamento de Partículas*

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

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

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

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

O usuário deve inserir as informações dos resultados obtidos através do ensaio de granulometria, nomeando o agregado e preenchendo os resultados da análise granulométrica, assim como mostra a Figura 13. Posteriormente, a quantidade de agregados é definida (Figura 14), flexibilizando os resultados de acordo com as combinações feitas pelo usuário.

Figura 13 - Inserção dos resultados da análise granulométrica.

Gerenciamento de Ensaios

Agregado:

ABERTURA PANEIRAS	MASSA RETIDA (g)	% RETIDA	% ACUMULADA RETIDA	% ACUMULADA PASSANTE
50.000	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
38.100	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
25.000	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
19.000	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
12.500	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
9.500	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
6.300	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
4.800	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
2.400	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
1.200	<input type="text" value="0.00"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="0.00%"/>	<input type="text" value="100.00%"/>
0.600	<input type="text" value="65.80"/>	<input type="text" value="6.60%"/>	<input type="text" value="6.60%"/>	<input type="text" value="93.40%"/>

Fonte: Arruda, 2022.

Figura 14 - Definição da quantidade de 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.

Pelo método de Alfred, o software calcula as curvas. Para isso, é necessário que o usuário escolha o Diâmetro Mínimo (DS), o Diâmetro Máximo (DI) e o Módulo de Distribuição (q) a serem utilizados. A Figura 15 destaca os campos a serem preenchidos.

Figura 15 - Parâmetros de entrada do software.

The screenshot shows the 'Misturar' interface with the following elements:

- Project Name:** Projeto Robson
- Navigation:** Dropdown, Admin, Usuários, Agregados, Peneiras, Ensaios, Mistura
- Section:** Misturar
- Agregados (Selected):**
 - Areia Fina Ensaio id. 1
 - Areia Média Ensaio id. 2
 - Areia Grossa Ensaio id. 3
 - Brita 0 Ensaio id. 4
- Entradas (Input Parameters):**
 - VALOR (mm)
 - q: 0.300
 - DL: 19.000
 - DS: 0.075
- Output Labels:**
 - Areia Fina id.1
 - Areia Média id.2
 - Areia Grossa id.3
 - Brita 0 id.4
- Action:** Resolver button
- Equation:** $CPFT = [(D^q - D_s^q)/(D_L^q - D_s^q)] \times 100$
- Tables:**

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

Fonte: Arruda, 2022.

3º passo: Execução e obtenção das porcentagens otimizadas.

Após escolher os parâmetros de entrada, o CPFT (modelo de Alfred) já estará calculado no canto esquerdo da tela (Figura 16), em seguida, o usuário deve clicar no botão “resolver”.

Figura 16 - Cálculo de CPFT (modelo de Alfred).

The screenshot shows the 'Misturar' interface with the following elements:

- Section:** Misturar
- Agregados (Selected):**
 - Areia Média Ensaio id. 2
 - Areia Grossa Ensaio id. 3
 - Brita 0 Ensaio id. 4
 - Brita 1 Ensaio id. 5
- Entradas (Input Parameters):**
 - VALOR (mm)
 - q: 0.300
 - DL: 19.000
 - DS: 0.075
- Output Labels:**
 - Areia Fina id.1
 - Areia Média id.2
 - Areia Grossa id.3
- Action:** Resolver button
- Equation:** $CPFT = [(D^q - D_s^q)/(D_L^q - D_s^q)] \times 100$
- Tables:**

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

Fonte: Arruda, 2022.

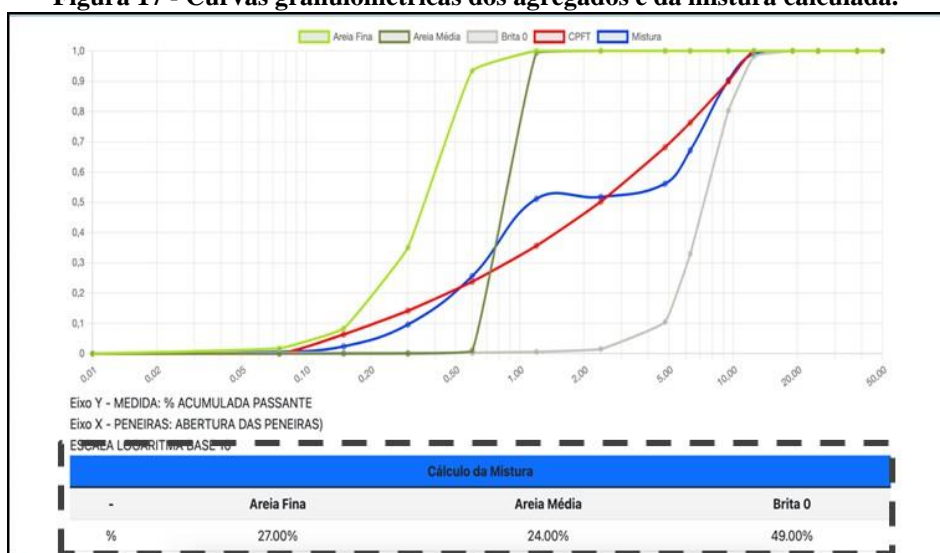
É válido ressaltar que é necessário selecionar bons agregados para que se obtenham bons resultados, pois, é através das condições de entrada que o software calcula e retorna o melhor resultado.

Para um experimento qualquer, foram selecionados três (3) agregados para uma mistura aleatória, a Figura 17 mostra os resultados do procedimento. Na parte superior da tela, há uma tabela que mostra as porcentagens acumuladas passantes da mistura resultante e os respectivos desvios individuais de cada abertura de peneira. Através dos desvios individuais, o empacotamento da

mistura pode apresentar um melhor aspecto, ao adicionar partículas em classes específicas. Isso pode ocorrer devido ao auxílio que os desvios individuais geram na identificação dos diâmetros que estão apresentando maior desvio.

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

Figura 17 - Curvas granulométricas dos agregados e da mistura calculada.



Fonte: Arruda, 2022.

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

4.2.2 Determinação da Relação a/c

Mehta e Monteiro (2014) ressaltaram sobre as formas de se obter um concreto com alto desempenho e baixo consumo de cimento, dentre elas, ponderaram a utilização do valor entre a água e cimento em 0,4 ou menos, de forma que houvesse pouca ou nenhuma permeabilidade.

Sabendo disso, utilizou-se a Equação 4 para determinar o consumo de cimento adequado, visando a obtenção de valores que estivessem de acordo com os limites estabelecidos pela NBR 12655 (ABNT, 2015). A norma denomina como Classe de Agressividade III, todos os valores iguais ou superiores a 320, assim como também denomina como Classe de Agressividade IV, todos os valores iguais ou superiores a 360.

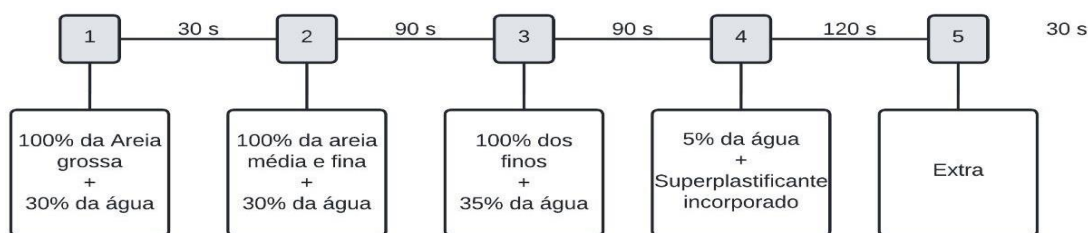
$$Consumo = \frac{p\%}{\left(\frac{1}{\rho_{cimento}} + \frac{a}{f}\right)} \quad (4)$$

Para os dois traços estudados, foram determinados para o consumo de cimento, os valores de 380, 266 e 154 kg/m³, onde, o primeiro permaneceu dentro dos limites estabelecidos pela norma e com Classe de Agressividade III, e o segundo com o consumo inferior ao limite.

4.3 PREPARO, CURA E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

À priori, para a produção das argamassas, foi-se pesado os materiais referentes ao volume total necessário do traço, para uma betoneira de 150L. Após a pesagem, a parte interna da betoneira foi umedecida e, posteriormente, iniciou-se o procedimento de mistura. Para garantir uma melhor ligação entre os materiais e a homogeneização adequada destes, utilizou-se uma sequência de inserção dos materiais na betoneira, como presente na Figura 18.

Figura 18 - Sequência da inserção dos materiais da mistura na betoneira.



Fonte: Autor, 2022.

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

Ao finalizar a mistura, devido a particularidade dos testes, foram moldados, para cada traço, 6 corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, 9 corpos de prova cilíndricos de 5x10cm e 6 corpos de prova prismáticos de 4x4x16cm, como mostra a Figura 19. Por fim, em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 1994), foi realizado o adensamento manual em todos, exceto nos corpos de prova cilíndricos de 10x20cm, o qual foi adensado com vibrador mecânico.

Figura 19 - Corpos de prova produzidos.

Fonte: Autor, 2022.

Depois de 24 horas da moldagem, as argamassas foram desmoldadas, identificadas e, posteriormente, divididas entre a imersão em solução de cal e solução contendo sulfato de sódio. A Figura 21 mostra os corpos de prova imersos em solução de cal.

A solução de sulfato de sódio, como apresentada na Figura 20, foi preparada no dia anterior a imersão dos CP's, sendo preparada de acordo com a NBR 13583 (ABNT, 2014), o qual reforça que, seriam utilizadas 100g de sulfato a cada 1L de água, sendo trocada a cada 20 dias. Além disso, de forma a preservar a concentração de sulfato constante, o recipiente foi mantido fechado.

Figura 20 - Cura em solução de sulfato.

Fonte: Autor, 2022.

4.4 ENSAIOS DESTRUTIVOS E NÃO DESTRUTIVOS

4.4.1 Ensaio de Consistência (Flow Table)

Realizado de acordo com os parâmetros da NBR 13276 (ABNT, 2016), o ensaio de consistência serviu para verificar o índice de consistência da argamassa no estado fresco, esse ensaio também é conhecido como “flow table”.

O ensaio foi executado com o auxílio de um molde troncocônico. Após ser inserido e centralizado sobre uma mesa de abatimento, foi-se preenchendo com argamassa em três camadas consecutivas, com alturas relativamente iguais. Para o adensamento, foram aplicados golpes com soquete em cada camada, divididos entre quinze, dez e cinco golpes, respectivamente.

Em seguida, acionou-se a manivela da mesa para obter o índice de consistência, logo após retirar o molde. Aplicou-se, com a manivela, trinta giros uniformes, os quais foram medidos o espalhamento da argamassa – com uma régua – em três diâmetros, como encontra-se representado na Figura 21.

Figura 21 - Medição do índice de consistência da argamassa para o traço T2.



Fonte: Autor, 2022.

4.4.2 Ensaio de Resistência (Compressão Axial)

O ensaio de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), com o intuito de explorar as possíveis variações de resistência dos traços confeccionados. Os corpos de prova em solução de cal e sulfato foram rompidos nas idades de 7 e 28 dias, como é possível observar nas Figuras 22 e 23.

Todos os corpos de prova rompidos foram submetidos, anteriormente, à retificação em

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

Figura 22 - Ruptura dos corpos de prova T1 submetido à cura normal com 7 dias.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 23 - Ruptura dos corpos de prova T2 submetido à cura com sulfato com 28 dias.



Fonte: Autor, 2022.

4.4.3 Expansão Geométrica

Para o ensaio de expansão geométrica, foram utilizadas as peças prismáticas, as quais foram verificadas aos 14, 28 e 42 dias, após a exposição de cura final (Figura 24).

Figura 24 - Medição dos corpos de prova prismáticos.



Fonte: Autor, 2022

Este ensaio foi realizado com o intuito de analisar a ação do sulfato na argamassa, verificando a variação nas dimensões dos CP's, com a utilização de um paquímetro, onde foi posicionado no mesmo ponto, em todas as barras. Para neutralizar a temperatura, os CP's foram retirados da solução de sulfato e colocados sobre a banca por 10 minutos.

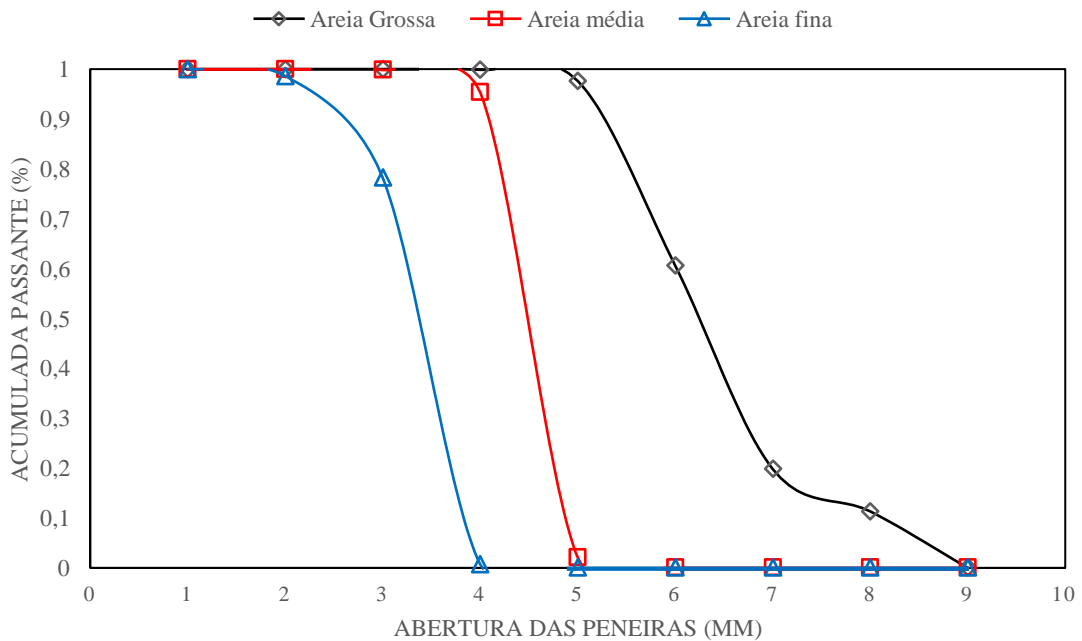
Baseando-se na NBR 13583 (ABNT, 2014), o resultado do ensaio fundamenta-se através do aumento ou redução da expansão da argamassa devido ao ataque do sulfato de sódio, comparado à expansão da argamassa que foi submetida ao processo de cura normal. Além disso, o resultado corresponde à diferença entre a expansão média das barras submetidas ao sulfato e as barras curadas em solução de cal.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para otimizar a dosagem pela definição do empacotamento de partículas, é necessário que haja a distribuição granulométrica adequadas dos agregados. A Figura 25 apresenta os resultados das curvas de massa retida acumulada, obtidas pela composição granulométrica de cada faixa de areia utilizada (fina, média e grossa) nos traços da argamassa do concreto.

Figura 25 - Granulometria das areias.



Fonte: Autor, 2022.

A soma das porcentagens retidas acumuladas resulta no módulo de finura, composto pelos resultados da composição granulométrica obtida, assim como mostrado na Tabela 8, de modo que varia de acordo com a classificação da areia.

Tabela 8 - Módulo de finura das areias.

<u>Módulo de Finura</u>	
Fina	1,79
Média	2,97
Grossa	4,89

Fonte: Autor, 2022.

A seguir, a Tabela 9 apresenta os valores encontrados das massas específicas de duas amostras de areia. Ainda, os valores são suscetíveis a uma proporcionalidade entre a dimensão da partícula e o seu resultado, podendo-se notar a diminuição da massa à medida em que a granulometria também diminui.

Tabela 9 - Massa específica do agregado miúdo.

Massa na Condição Saturada Superfície Seca (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
Fina	2,14	2,18
Média	2,19	2,33
Grossa	2,25	2,24

Fonte: Autor, 2022.

Abaixo, a Tabela 10 exibe os resultados obtidos da massa específica do cimento.

Tabela 10 - Massa específica do cimento.

Massa Específica do Cimento (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
V1 (cm ³)	0,4	1
V2 (cm ³)	20,5	21
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,99	3

Fonte: Autor, 2022.

Por fim, para as adições minerais do fíler e metacaulim, os valores obtidos foram apresentados nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11 - Massa específica do fíler.

Massa Específica do Fíler (g/cm³)		
	Amostra 1	Amostra 2
V1 (cm ³)	0,6	1
V2 (cm ³)	21,7	22,2
m (g)	60	60
ρ (g/cm ³)	2,84	2,83

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 12 - Massa específica do metacaulim.

Massa específica do Metacaulim (g/cm³)	
V0 (cm ³)	0,6
Vf (cm ³)	23,2
m (g)	60
ρ (g/cm ³)	2,84

Fonte: Autor, 2022.

Portanto, os resultados adquiridos obedecem às condições da NBR 16605:2017, tendo em vista que a diferença entre os valores das amostras individuais não ultrapassou 0,02 g/cm³.

5.2 DOSAGEM DOS TRAÇOS

Com o auxílio do software Q-Mix, foi possível obter os dados para compor a dosagem final dos traços. Sendo assim, para a execução de quatro diferentes tipos de traços, foram determinadas as proporções adequadas para essas composições. Os traços foram subdivididos em RCE, RSE, T1 e T2, classificados de acordo com a diminuição do teor de cimento, sendo denominado de RCE o traço composto somente com o empacotamento dos materiais, RSE o traço sem empacotamento dos agregados, T1 e T2 os traços com o empacotamento e adições de fíler e metacaulim. A Tabela 13 apresenta os consumos dos materiais utilizados para todos os traços.

Tabela 13 - Proporção e consumo dos materiais utilizados para o traço com empacotamento de partículas.

	RSE (kg/m ³)	RCE (kg/m ³)	T1 (kg/m ³)	T2 (kg/m ³)
Cimento	380	380	154	266
Fíler	-	-	165,47	53,47
Metacaulim	-	-	60,53	60,53
Areia fina	-	444,02	444,02	444,02
Areia média	-	188,69	188,69	188,69
Areia Grossa	-	691,6	691,6	691,6
Areia comercial	855,52	-		

Fonte: Autor, 2022.

Para a relação água/finos, foram utilizados os valores de 0,45 para RSE e RCE, e 0,47 para os traços T1 e T2. Houve uma variação na quantidade utilizada de aditivo em relação aos dois traços com adições, com a utilização de 1,5% do aditivo no traço T1, já foi observado uma consistência razoável, enquanto no traço T2 precisou adicionar uma maior quantidade de aditivo para chegar ao aspecto adequado de consistência e trabalhabilidade, 1,9%.

5.3 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA

Para analisar as características no estado fresco da argamassa estudada, verificou-se a capacidade de deformação do material quando aplicadas cargas na mesa de abatimento, podendo refletir, ainda, sobre a sua trabalhabilidade. Por fim, seguindo as condições impostas pela NBR 13276 (ABNT, 2016), foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 14,

sabendo que o índice de consistência (IC) consiste na média obtida pelas três outras médias dos diâmetros (em mm).

Tabela 14 - Índice de consistência (IC) para T1 e T2.

Índice de Consistência				
	RSE	RCE	T1	T2
D1 (mm)	283	191	254	278
D2 (mm)	298	187	260	285
D3 (mm)	295	210	259	288
IC (mm)	292	196	258	284

Fonte: Autor, 2022.

Logo, percebe-se que o índice de consistência foi menor para o RCE, devido a maior área específica da areia fina. Além disso, após o abatimento na mesa, foi possível analisar o início da segregação através de uma observação visual.

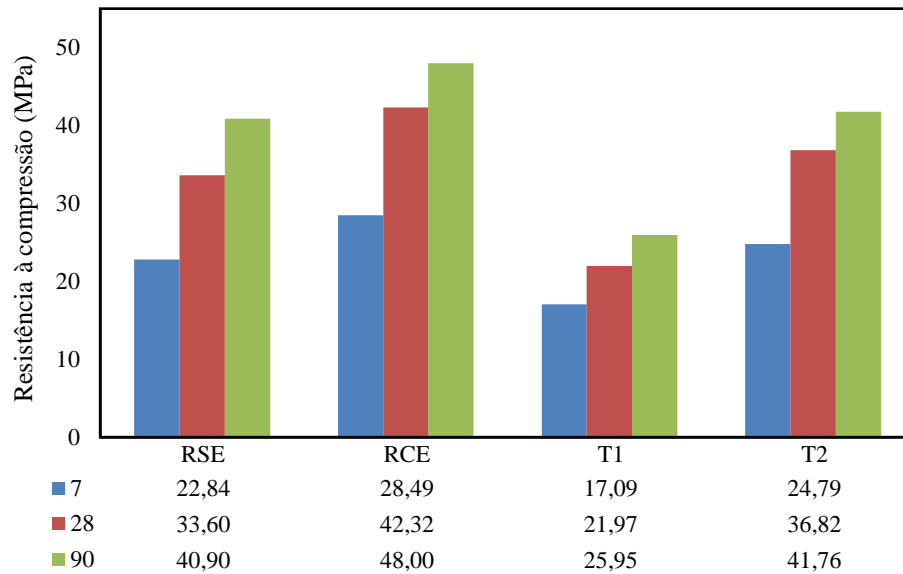
Ao utilizar as adições minerais nos traços T1 e T2, por sua vez, apresentaram espalhamentos maiores, assim como maior coesão da mistura, resultando, assim, numa argamassa mais fluida e com uma melhor trabalhabilidade, quando comparada ao índice de consistência do RCE.

A melhoria da trabalhabilidade dos traços T1 e T2 podem ser explicadas pela otimização do empacotamento, que pode reduzir a viscosidade plástica da mistura em um nível adequado, mesmo com baixo teor de água a alto teor de fíler (PROSKE et al., 2013). El Barrak et al. (2009) demonstra que dependendo do fator a/c, o fíler calcário possui mais ação como agente lubrificante, visto que sua menor massa específica resulta maiores espaços entre as partículas, facilitando o escoamento, também descrito por Filho et al. (2020).

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

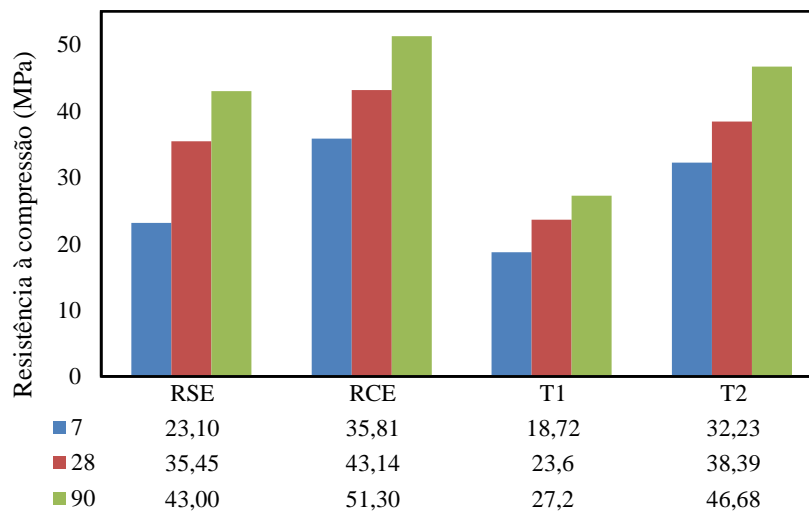
Seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018), obteve-se, para os ensaios de resistência à compressão, os resultados expostos nas Figuras 26 e 27, os quais foram realizados nas idades de 7 e 28 dias, e ficaram submetidos à cura em sulfato e cal, respectivamente.

Figura 26 - Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos à cal.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 27 - Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos ao sulfato.



Fonte: Autor, 2022.

Ao analisar os resultados alcançados, é perceptível notar que houve um aumento da resistência à medida em que aumenta a idade do corpo de prova. Tal comportamento se deve ao resultado da reação do sulfato com os produtos hidratados do cimento, onde ocorrerá a formação do monossulfoaluminato, acomodados nos poros da matriz cimentícia, com uma expansão insignificante, como visto em alguns concretos do estudo de Bezerra et al. (2020).

O traço com empacotamento de partículas, nas idades avaliadas, obteve um resultado superior ao obtido pelo traço com adições. Contudo, o traço T2 apresenta desempenho próximo ao concreto de referencia (RCE), pela ação de refinamento dos poros causada pelo filer calcário

e ação pozolânica do metacaulim. Há estudos na literatura que relatam melhorias no desempenho mecânico de concretos até certos valores de filler calcário na mistura, visto que este reage com as fases de alumina do cimento e produz carboaluminatos, que contribuem para a resistência por meio da produção de mais hidratos e preenchimento dos poros (AMIR, HOOTON, 2014).

De acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), os CP's estudados apresentaram a ruptura do Tipo Cisalhada (Tipo E), esse é o resultado mais comum para o ensaio de compressão axial e o tipo de rompimento esperado para este ensaio, como é possível observar nas Figuras 28 e 29, as quais mostram os resultados da ruptura dos corpos de provas RCE e T1 submetidos ao sulfato com 28 dias.

Figura 28 - Ruptura dos corpos de prova RCE submetido à cura com sulfato com 28 dias.



Fonte: Autor, 2022.

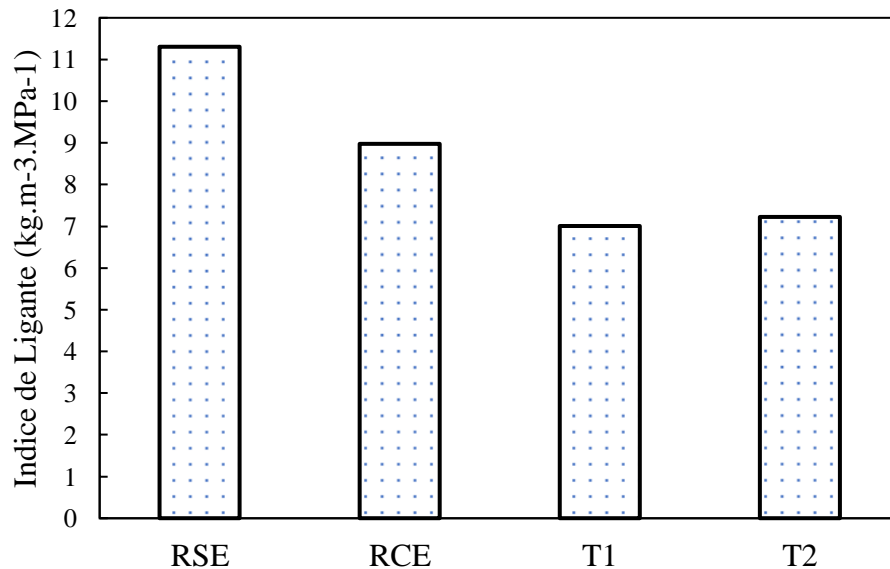
Figura 29 - Ruptura dos corpos de prova T1 submetido à cura com sulfato com 28 dias.



Fonte: Autor, 2022.

Com relação a eficiência do ligante, Damineli et. al. (2010) discorrem que há poucos estudos que se atentam para o uso eficiente do cimento. Assim, estes propuseram um indicador que possibilita a medição desse parâmetro para argamassas e concretos, definido como a eficiência do concreto/argamassa em termos da quantidade total de ligante (kg.m^{-3}) necessária para fornecer 1 MPa de resistência mecânica, denominado de Índice de Ligante (IL). A Figura 30 apresenta os índices de ligante das argamassas estudadas.

Figura 30 - Índice de ligante das argamassas.

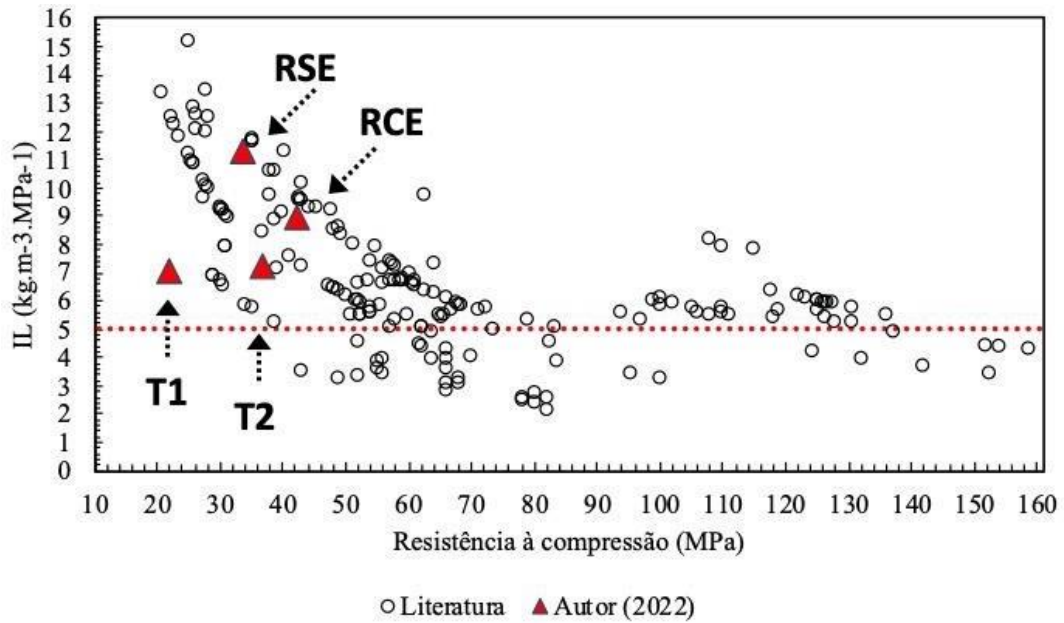


Fonte: Autor, 2022.

Verifica-se a diminuição do IL com dosagem através do empacotamento de partículas. O traço de referência sem empacotamento RSE obteve IL de $11,31 \text{ kg.m}^{-3}.\text{Mpa}^{-1}$ e o traço de referência com empacotamento apresentou IL igual a 8,97, ou seja, houve um ganho de 25,95% na eficiência do ligante, assim como visto nos trabalhos de Daminelli et. al. (2017), YOUSUF et. al. (2019), Lopes et. al. (2020) e Santos et. al. (2021).

A Figura 31 apresenta a inserção dos resultados obtidos em relação a diversos trabalhos da literatura.

Figura 31 - Resultados obtidos em relação à literatura.

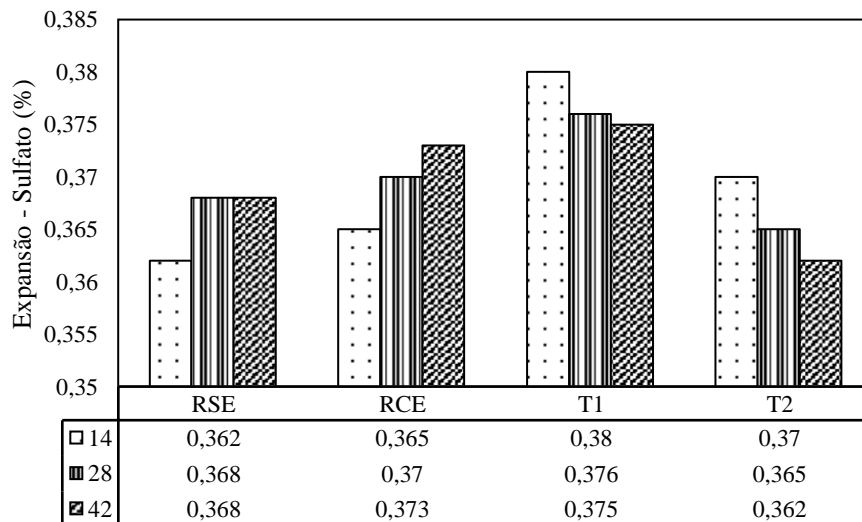


Fonte: Autor, 2022.

Verifica-se que as argamassas T1 e T2 apresentam bom desempenho na classe de resistência abaixo de 50 Mpa, em que se apresentam diversos trabalhos com IL acima de 8 kg.m⁻³.Mpa⁻¹. Vale ressaltar, também, a proximidade do IL de 5 kg.m⁻³.Mpa⁻¹, estabelecido por Daminieli (2010), como limite para concretos com elevada eficiência.

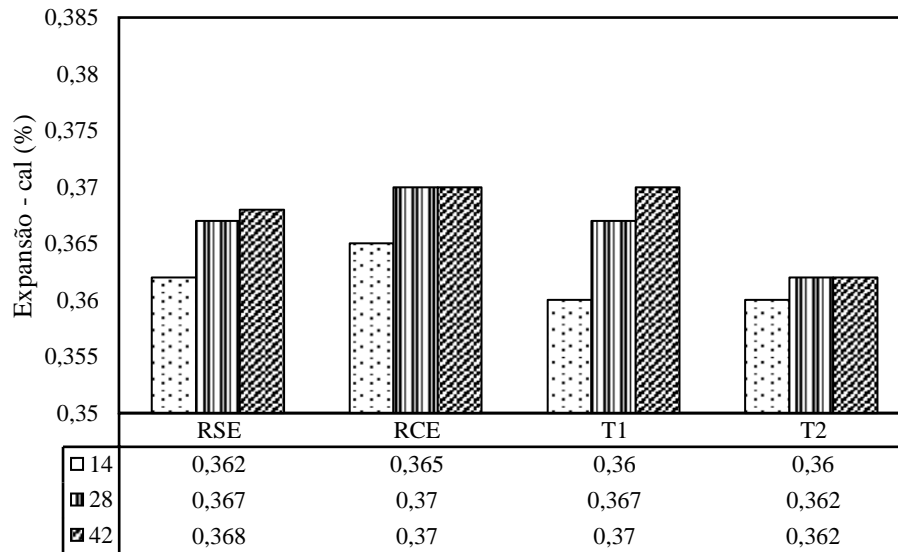
A leitura da expansão geométrica dos corpos de prova moldados foi realizada nas idades de 14, 28 e 42 dias após a moldagem e cura em tanque de água saturada com cal e de íons sulfato. Os resultados correspondem à diferença média obtidas das expansões médias de cura normal e em sulfato, a mistura pode ser observada nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 - Expansão média, em porcentagem, das argamassas devido ao ataque do sulfato.



Fonte: Autor, 2022.

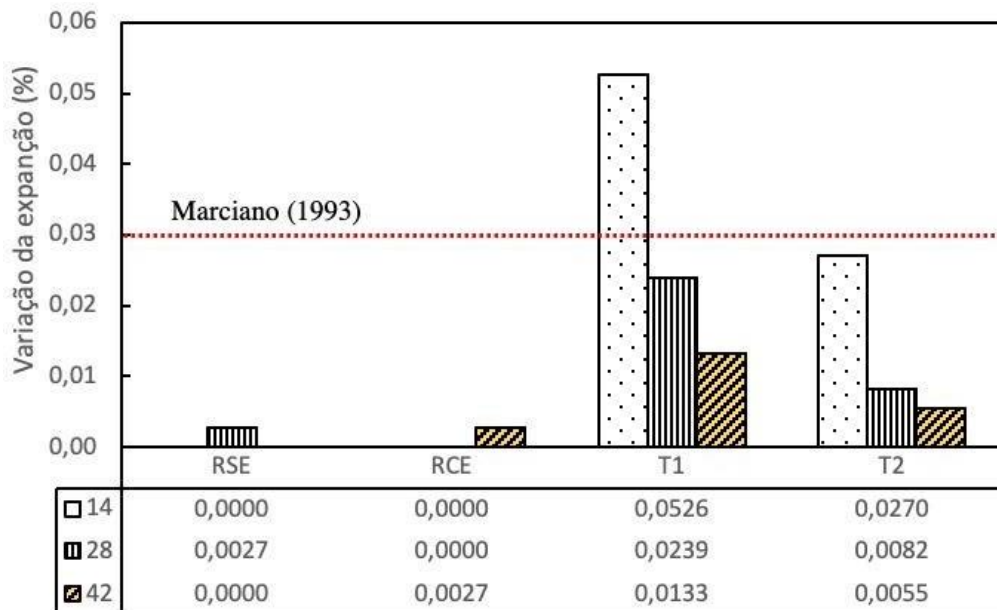
Figura 33 - Expansão média, em porcentagem, das argamassas submetidas à água saturada com cal.



Fonte: Autor, 2022.

A princípio, percebe-se que, à medida em que as idades avançam, as amostras apresentam uma expansão geométrica característica, na cura com cal, principalmente. A partir das variações percentuais apresentadas nos gráficos acima, e dentro das idades analisadas, pode-se constatar uma considerável expansão geométrica para ambos os traços, visto que o cimento utilizado foi um CPV, com baixo teor de C₃A. A Figura 34 apresenta a expansão das argamassas na cura com sulfato em relação a cura de referência, com cal.

Figura 34 - Expansão das argamassas na cura com sulfato em relação a cura de referência.



Fonte: Autor, 2022.

A NBR 13583 não menciona a expansão resultante limite como referência para uma argamassa resistente ao ataque por solução de sulfato de sódio. Assim, os resultados obtidos no ensaio são analisados de forma comparativa, uma argamassa pode ter um bom desempenho, mas sempre em comparação com outra argamassa, como discorre Hoppe Filho et. al. (2015).

Marciano (1993) propôs o valor de 0,030% como expansão resultante limite aos 42 dias, abaixo do qual a argamassa pode ser considerada resistente ao ataque por sulfatos. Na Figura 34, apresenta-se a expansão resultante nas idades de 14, 28 e 42, das argamassas estudadas em comparação ao limite proposto por Marciano (1993), em que fica evidente a influência negativa das adições de metacaulim e filer calcário.

Os traços de referência apresentam pouca variação entre as duas curas, visto que o cimento utilizado não contém pozolana e seu ganho de resistência é acelerado nas primeiras idades. O resultado mais expressivo, dentre as argamassas sem adições, foi aos 42 dias na argamassa de referência com empacotamento (RCE), que pode ser explicado pela porosidade da matriz. A argamassa sem empacotamento apresenta maior porosidade, que absorve melhor as possíveis tensões causadas pela formação dos produtos da reação do sulfato com o C₃A do cimento.

Com relação às argamassas com substituição parcial do cimento Portland por filer calcário e metacaulim, nota-se o aumento da expansão. A utilização de pozolana é uma das formas para mitigar o ataque por sulfato, visto o consumo da portlandita e redução do teor de C₃A no sistema, aumentando o teor de C-S-H e, conseqüentemente, a sua resistência mecânica, resultando em alterações microestruturais que dificultam o ataque por sulfatos, como destaca Hoppe Filho et. Al. (2015). Contudo, ainda segundo Hoppe Filho et. Al. (2015), o metacaulim, por conter em sua composição grandes teores de sílica e de alumina no estado amorfo, quando adicionado na argamassa propicia a formação de compostos como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e aluminato de cálcio hidratado (C-A-H), além de favorecer à conversão da etringita para monossulfoaluminato de cálcio hidratado (AFm). Na presença de íons sulfato, no entanto, observa-se que esta adição mineral favorece a formação de gipsita e etringita, compostos expansivos, conseqüentes da reatividade das formas amorfas como a alumina, e dos aluminatos formados. É devido a essas reações que os traços T1 e T2 apresentam expansão maiores em relação aos traços de referência, assim como, sua variação com as idades, quando se acentua o efeito pozolânico.

Mesmo com os efeitos negativos das adições, as argamassas podem ser consideradas resistentes ao sulfato de sódio, visto que apresentam expansões abaixo de 0,03%, de acordo com Marciano (1993).

Além disso, nas amostras que foram expostas aos íons sulfato, percebeu-se alterações visuais nas suas superfícies, como alteração na coloração e aparecimento de microfissuras, como mostrados na Figura 35.

Figura 35 - Argamassa atacada pelo sulfato.



Fonte: Autor, 2022.

Batista (2013) afirma que essa deterioração decorrida pelo ataque de sulfato, está correlacionada a neoformações, causada pelo entrosamento entre o sulfato e as fases de hidratação, os quais possuem menor coesão e maior volume molecular, minimizando a integridade física do material.

6 CONCLUSÃO

Em função dos resultados apresentados e discutidos acerca do comportamento da argamassa perante o ataque de sulfato, algumas conclusões puderam ser tiradas. Sobre o comportamento do concreto na fase de argamassa, pôde-se verificar que os vazios entre as partículas foram reduzidos, apresentando uma argamassa pouco porosa e com uma maior durabilidade, neste caso, para o empacotamento dos agregados, obteve-se um coeficiente de distribuição granulométrica de 0,35, no modelo de Andreassen Modificado (Alfred).

As adições de fíler e metacaulim, tiveram impacto direto na trabalhabilidade das argamassas, posto que os índices de consistência foram maiores para os traços T1 e T2.

Ademais, quanto a resistência à compressão, os corpos de prova apresentaram resultados satisfatórios, obtendo valores acima de 20 Mpa. Ao comparar todas as argamassas, foi possível observar que o T2 apresentou uma melhor eficiência de todas, apesar de RCE ter apresentado um melhor resultado para a resistência à compressão. O bom desempenho de T2 pode ser correlacionado ao refinamento dos poros diante a adição de materiais finos.

Ao analisar a expansão geométrica dos corpos de prova, concluiu-se que os referidos traços se expandiram e apresentaram resultados dentro do limite preconizado por Marciano (1993). Percebe-se que os resultados da expansão dos CP's curados em sulfato foram maiores em relação aos CP's curados na cal, devido ao aumento de tensões internas no corpo da argamassa, causado pela reação de compostos químicos com o sulfato, causando, assim, a sua expansão, maior nas argamassas com adição de metacaulim.

Por fim, o estudo da durabilidade ao ataque de íons sulfato em concretos/argamassas com baixo consumo de cimento é relevante, visto que a redução deste por diferentes adições pode provocar o aumento das expansões, dependendo do teor de alumina presente nestes materiais. Com isso, em síntese, o trabalho apresentou resultados satisfatórios, atingindo aos objetivos propostos.

Sendo assim, de modo a aprofundar os conhecimentos sobre argamassa com baixo teor de cimento e os seus referidos impactos diante a agentes agressivos, sugere-se para trabalhos futuros:

- Avaliar possíveis teores críticos de sulfato em materiais que contém um índice elevado de substituições do cimento;
- Analisar a resistência e a expansão dos corpos de prova em idades mais avançadas;
- Avaliar o efeito isolado do fíler calcário em diversas proporções, visto sua influência

na cinética das reações de hidratação do cimento.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para a economia de baixo carbono.** Caderno 3: nota técnica cimento. São Paulo, 2012.

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.

ARAÚJO, R. C. L.; RODRIGUES, E. H. V.; FREITAS, E. das G. A. **Materiais de construção.** Rio de Janeiro: Seropédica, Editora Universidade Rural, 2000.

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 CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Indústria brasileira do cimento: Base para a construção do desenvolvimento.** Brasília, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

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 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR NM 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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 NM 13583**: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro. 2017.

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.

BATISTA, D. G. **Investigação da deterioração de concretos de UHEs por reações com os agregados**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013

BENTZ, D. P. (2005). **Replacement of "Coarse" Cement Particles by Inert Fillers in Low W/C Ratio Concretes II: Experimental Validation**. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 1, p. 185-188, jan. 2005.

BERTOLINI, Luca. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BEZERRA, A. V. S.; DIAS, L. S.; DAMASCENO, H. L.; DOS SANTOS, R. A. **Analysis of concrete behavior with addition of vegetable biomass ash subjected to the attack of sulfate ions**. Revista Matéria, v. 25, n. 4, p. 1, 2020.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa**. Brasil. 2. ed. Brasília, 2014.

BONEN, D.; SARKAR, S.L. **The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss.** Cem. Concr. Res. 25, 7 (1995) 1423-1434.

BUTTLER, A.M.; FREITAS, A. A.; SALES, A.; CORDEIRO, J.S. (2000). **Gerenciamento de Lodo de ETAs – Remoção de água através de leitos de secagem e codisposição da fase sólida em matrizes de cimento e resíduos da construção civil.** Relatório de Iniciação Científica PROSAB 2 – Tema 4, 85p., Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

CASTRO, A. L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

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.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. **Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato.** In: Anais do 47º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2003, João Pessoa.

COSTA, R. M. **Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV.** Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

CSI, The Cement Sustainability Initiative. **Getting the Numbers Right (GNR).** 2016b. Disponível em: <https://www.wbcscement.org/GNR-2016/world/GNR-Indicator_59cTGWorld.html>. Acesso em: 10 dez. 2021.

DUVAL, R.; KADRI, E.H. **Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of highperformance concretes.** Cem. Concr. Res. 28, 4 (1998) 533- 547.

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

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

EL BARRAK, M.; MOURET, M.; BASCOUL, A. **self-compacting concrete paste constituents: Hierarchical classification of their influence on flow properties of the paste.** Cement and Concrete Composites, v. 31, p. 12-21, 2009.

FERRARIS, C.F.; OBLA, K.H.; HILL, R. **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete.** Cem. Concr. Res. 31, 2 (2001) 245-255.

FILHO, J.; SINHORELLI, K.; MEDEIROS, G.; AZEVEDO, A.; AZEVEDO, G. **Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim,** 2020.

FILHO, L. C. P. S. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: Análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

T. DE GRAZIA, Mayra; F. M. SANCHEZ, Leandro; C. O. ROMANO, Roberto; G. PILEGGI, Rafael. **Investigation of the use of continuous particle packing models (PPMs) on the fresh and hardened properties of low-cement concrete (LCC) systems.** Construction and Building Materials, v. 195, p. 524–536, 2019.

HELENE, P.; TUTIKIAN, B. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** In: 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.

HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D.J.; MEDEIROS, M. H. F. de; PEREIRA, E.; PORTELA, K. F.. **Ataque de matrizes cimentícias por sulfato de sódio: adições minerais como agentes mitigadores.** Cerâmica 61, 168-177. 2015.

ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005a. vol. 1; 1.600p.

JUENGER, Maria C.g.; SIDDIQUE, Rafat. **Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete.** Cement and Concrete Research, [s.l.], v. 78, p.71-80, dez. 2015. Elsevier BV.

KANNAN, V.; GANESAN, K. **Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin.** Construction and Building Materials, [s.l.], v. 51, p.225-234, jan. 2014. Elsevier BV.

KLEE H. **The cement sustainability initiative.** In: World business council for sustainable development (WBCSD). Washington, 2009.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. **Mineral admixtures in mortars: effect of inert materials on short-term hydration.** Cem. Concr. Res. 33, 12 (2003) 1939-1947.

LOPES, H. M. T.; PEÇANHA, A. C. C.; CASTRO, A. L. **Considerations on the efficiency of Portland cement concrete mixtures based on the particle packing concept.** Revista Materia, v. 25, n. 1, 2020.

MARCIANO, Z. A. N. **Desenvolvimento de um Método Acelerado para Avaliação da Resistência de Argamassas de Cimento Portland Expostas à Solução de Sulfato de Sódio**. 1993. 202p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MATTOS, P. M. F. **Patologia estrutural em duas obras da UFPB e soluções de recuperação e reforço**. 143 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015

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

METACAULIM DO BRASIL (2011). **Especificação técnica**. Disponível em: <<http://www.metacaulim.com.br/tecnica/tecnica.htm>>. Acesso em: 13/02/2022.

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

OLIVEIRA, I.R.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, SP (2000).

PAULON, V. A. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. 1 v.

PELLISSER, Fernando; VIEIRA, Alexandre; BERNARDIN, Adriano Michael. **Efficient self-compacting concrete with low cement consumption**. Journal of Cleaner Production, [s.l.], v. 175, p.324-332, fev. 2018. Elsevier BV.

PEREIRA, T. A. C. **Concreto auto-adensável, de alta resistência, com baixo consumo de cimento Portland e com adições de fibras de lã de rocha ou poliamida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PETRUCCI, E.G.R.: **Concreto de cimento Portland**. 14º. ed. São Paulo: Globo, 2005. 307 p.

POPEK, Mateusz; SADOWSKI, Łukasz. **Selected Physical Properties of Concrete Modified using Mineral Powders**. Procedia Engineering, [s.l.], v. 172, p.891-896, 2017.

PROSKE, T.; HAINER, S.; REZVANI, M.; GRAUBNER, C. A. **Eco-friendly concretes with reduced water and cement contentes – Mix design principles and laboratory tests**. Cement and Concrete Research, v. 51, p. 38-46, 2013.

PRUDÊNCIO JÚNIOR, L.R. ECV 5302- **Materiais de construção civil I. Grupo de tecnologia em materiais e componentes à base de cimento Portland**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RAMEZANIANPOUR, A. M.; HOOTON, R. D. **A study on hydration, compressive strength, and porosity of Portland-limestone cement mixes containing SCMs.** Cement and Concrete Composites, v. 51, p. 1-13, 2014.

REBMANN, M. S. **Durabilidade de concretos estruturais com baixo consumo de cimento Portland e alta resistência.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

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

RECENA, F. A. P.: **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland.** 3º ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. 120 p.

RIBEIRO JÚNIOR, E. **Propriedades dos materiais constituintes do concreto.** Revista Especialize On-line, IPOG, ed. 10, v. 01/2015, dez. 2015.

SARI, M.; PRAT, E.; LABASTIRE, J.F. **High strength selfcompacting concrete: original solutions associating organic and inorganic admixtures.** Cem. Concr. Res. 29, 6 (1999) 813-818.

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.

SFIKAS, Ioannis P.; BADOGIANNIS, Efstratios G.; TREZOS, Konstantinos G. **Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin.** Construction and Building Materials, [s.l.], v. 64, p.121- 129, ago.2014.

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.

SIQUEIRA, L. V. M. **Laboratório de materiais de construção II – 1ª parte – Agregados,** Ensaio Tecnológicos da Disciplina de Materiais de Construção II do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Santa Catarina, 2008.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais.** Porto Alegre: Amgh, 2012. 707 p.1

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas**. São Paulo: Pini, 1998.

STROEVEN, P.; STROEVEN, M. **SPACE system for simulation of aggregated matter application to cement hydration**. Cem. Concr. Res. 29, 8 (1999) 1299-1304.

UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. **Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete**. Cement and Concrete Composites, [s.l.], v. 33, n. 7, p.771-776, ago. 2011.

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>. Acesso em: 03 mar. 2022.

WALLEVIK, O. H.; WALLEVIK, J. E. **Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes**. Cement and Concrete Research, v. 41, p. 1279-1288, 2011.

WONGKEO, Watcharapong et al. **Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume**. Materials & Design, [s.l.], v. 64, p.261-269, dez. 2014. Elsevier BV.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD)/INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Cement Technology: Roadmap 2009 – Carbon emissions reduction up to 2050**, 2009.

WORRELL et al. **Carbon Dioxide Emissions From the Global Cement Industry**. Annual Review Energy and the Environment, v. 26, n. 1, p. 303-29, 2001.

YOUSUF, S.; SANCHEZ, L. F. M.; SHAMMEH, S. A. **The use of particle packing models (PPMs) to design structural low cement concrete as na alternative for construction industry**. Journal of Building Engineering, v. 25, pp.100-114, out. 2019.