

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

MICHEL HENRY BACELAR DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DO POLÍMERO SUPERABSORVENTE EM ARGAMASSAS
AUTOADENSÁVEIS PARA EMPREENDIMENTOS HIDRÁULICOS**

ITAJUBÁ – MG

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA HÍDRICA

MICHEL HENRY BACELAR DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DO POLÍMERO SUPERABSORVENTE EM ARGAMASSAS
AUTOADENSÁVEIS PARA EMPREENDIMENTOS HIDRÁULICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica

Área de concentração: Geração Hidrelétrica

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Valquíria Claret dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Gonçalves

ITAJUBÁ-MG

2022

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Flávia Regina e ao meu pai Carlos Renato, que me incentivaram desde sempre e são minhas maiores inspirações de vida. As minhas companheiras de lar, tia Tânia, Jade, Júlia e Panda que estiveram comigo e me ajudaram todos os dias, principalmente neste momento delicado de Pandemia. À minha namorada Larissa, por todo carinho, conselhos e por sempre me incentivar.

À minha família e amigos que torcem pelo meu sucesso.

Ao Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica e à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI/Itajubá), pelo encorajamento e suporte técnico para a realização do trabalho, mesmo em um momento difícil para as pesquisas científicas no país.

À Prof.^a Dr.^a Valquíria Claret dos Santos, pelas orientações, apoio, conselhos e aprendizados compartilhados. Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Gonçalves por todo suporte e orientações.

A todos que me auxiliaram durante a realização da pesquisa, em especial ao doutorando Lucas Silva, que me passou muitos conhecimentos técnicos durante os procedimentos laboratoriais.

Ao Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila (IGTPAN) por apoiar a pesquisa científica e pelo fornecimento do polímero superabsorvente, material que foi fundamental para este estudo.

RESUMO

SOUZA, M. H. B. **Influência do polímero superabsorvente em argamassas autoadensáveis para empreendimentos hidráulicos.** 2022. p. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – MG, 2021.

O concreto autoadensável (CAA) é um tipo de concreto inovador que não requer vibração para compactação, sendo considerado no ramo da construção civil uma das grandes inovações do setor nas últimas décadas. Em grandes obras de concreto, como barragens e usinas hidrelétricas, um dos problemas está no controle de fissuração de origem térmica, devido ao calor de hidratação que tem origem principalmente durante o processo de cura do concreto. Dentre as alternativas para mitigar manifestações patológicas estão os polímeros superabsorventes (SAP) que mostram-se promissores no ramo da engenharia quando adicionados em compostos cimentícios. Este trabalho tem como objetivo analisar a adição de SAP como elemento de cura interna em argamassas autoadensáveis (AAA), bem como suas características mecânicas, térmicas, tendo em vista a obtenção de uma proporção ideal dos materiais, de forma que sirva de base para execução de concretos autoadensáveis, com foco em estruturas com grande volume. Além disto, este trabalho apresenta uma análise bibliométrica nas bases de dados da Scopus e Web of Science acerca do mesmo do tema, com o objetivo de facilitar a localização de estudos relevantes para futuras pesquisas nessa área. Nesta análise obteve-se os dados de quantidade de publicações, principais autores e periódicos, palavras-chave mais usadas e países que mais publicam além de análises de acoplamento bibliográfico e cocitação. No programa experimental, foram executados ensaios laboratoriais com AAAs com 0; 0,1 e 0,2% de adição de SAP, tanto para CPII-E-32 quanto CPV-ARI e parte das amostras passaram por uma cura submersa, enquanto outra parte passou por uma cura seca. Dentre os resultados obtidos em laboratório, destaca-se a redução de variação de temperatura dos traços com adição de SAP, onde é possível supor uma possível forma de mitigação dos picos de temperatura em peças de concreto com grandes volumes. Em contrapartida, os ensaios de compressão e tração indicaram perdas de resistência das argamassas, com excessão do ensaio de tração feita para CPII-E-32, onde se obteve um acrescimento na resistência com a incorporação do SAP na mistura.

Palavras-chave: argamassa autoadensável, concreto autoadensável, polímero superabsorvente, cura interna, calor de hidratação.

ABSTRACT

SOUZA, M. H. B. **Influence of superabsorbent polymer in self-compacting mortars for hydraulic projects. 2022.** Dissertation (Professional Master in Water Engineering). Federal University of Itajubá, Itajubá – MG, 2021.

Self-compacting concrete (SCC) is an innovative type of concrete that does not require vibration for compaction, being considered in the field of civil construction one of the great innovations of the sector in the last decades. In large concrete works, such as dams and hydroelectric plants, one of the problems is in the control of thermal cracking, due to the heat of hydration that originates mainly during the concrete curing process. Among the alternatives to mitigate pathological manifestations are superabsorbent polymers (SAP) that show promise in the field of engineering when added to cementitious composites. This work aims to analyze the addition of SAP as an internal curing element in self-compacting mortars (AAA), as well as its mechanical and thermal characteristics, in order to obtain an ideal proportion of the materials, so that it serves as a basis for execution of self-compacting concrete, with a focus on structures with large volumes. In addition, this work presents a bibliometric analysis in the Scopus and Web of Science databases on the same topic, in order to facilitate the location of relevant studies for future research in this area. In this analysis, data on the number of publications, main authors and journals, most used keywords and countries that publish the most were obtained, in addition to bibliographic coupling and co-citation analyses. In the experimental program, laboratory tests were performed with AAAs with 0; 0.1 and 0.2% addition of SAP for both CII-E-32 and CPV-ARI and part of the samples underwent a submerged cure, while another part underwent a dry cure. Among the results obtained in the laboratory, the reduction of temperature variation of the traces with the addition of SAP stands out, where it is possible to assume a possible way of mitigating the temperature peaks in concrete pieces with large volumes. On the other hand, the compression and traction tests indicated loss of strength of the mortars, with the exception of the traction test carried out for CII-E-32, where an increase in strength was obtained with the incorporation of SAP in the mixture.

Keywords: self-compacting mortar, self-compacting concrete, superabsorbent polymer, internal curing, heat of hydration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tipos de cura do concreto	18
Figura 2: Diferença de proporção entre o CAA e o concreto convencional.....	22
Figura 3: Amostra de polímeros superabsorventes secos e saturados	28
Figura 4: Acoplamento bibliográfico e cocitação.....	31
Figura 5: Número de publicações ao longo da história	35
Figura 6: Autores com mais publicações.....	35
Figura 7: Palavras-chave mais usadas pelos autores	37
Figura 8: Proporção do número de citações por países	39
Figura 9: Áreas de pesquisa da base <i>Scopus</i>	39
Figura 10: Áreas de pesquisa da base <i>Web of Science</i>	40
Figura 11: Acoplamento bibliográfico de autores (<i>Scopus</i>)	41
Figura 12: Acoplamento bibliográfico de autores (<i>WOS</i>)	41
Figura 13: Acoplamento bibliográfico de documentos (<i>Scopus</i>)	42
Figura 14: Acoplamento bibliográfico de documentos (<i>WOS</i>)	42
Figura 15: Cocitação de autores (<i>Scopus</i>)	43
Figura 16: Cocitação de autores (<i>WOS</i>)	43
Figura 17: Cocitação de referências (<i>Scopus</i>)	44
Figura 18: Cocitação de referências (<i>WOS</i>)	44
Figura 19: Fluxograma do programa experimental do estudo.....	47
Figura 20: Amostra de SAP.....	50
Figura 21: Processo de reciclagem IGTPAN	52
Figura 22: Corpos de prova durante a cura (Esquerda - submersa e direita – seca).....	53
Figura 23: Teste de espalhamento para argamassas	56
Figura 24: Ensaio do funil para argamassas	57
Figura 25: Placa de aquisição de dados térmicos e a interface do LABTRIX	58
Figura 26: Suporte para realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico	61
Figura 27: Interface do Software Sonelastic versão 3.0	62
Figura 28: Ensaio de Espalhamento do traço CPII-F-32, 0% (esquerda), 0,1% (centro) e 0,2% (direita)	66
Figura 29: Ensaio de Espalhamento do traço CPV-ARI, 0% (esquerda), 0,1% (centro) e 0,2% (direita)	66
Figura 30: Ensaio de viscosidade plástica aparente	67
Figura 31: Câmara semi-adiabática adaptada.....	68
Figura 32: Variação de temperatura ao longo do tempo (CPII-F-32)	70
Figura 33: Variação de temperatura ao longo do tempo (CPV-ARI).....	71
Figura 34: Média dos resultados de resistência a compressão para CPII-F-32	72
Figura 35: Média dos resultados de resistência a compressão para CPV-ARI	73
Figura 36: Média dos resultados de resistência a tração para CPII-F-32	75
Figura 37: Média dos resultados de resistência a tração para CPV-ARI.....	76
Figura 38: Média dos Módulos de elasticidade dinâmico do CPII-F-32.....	81
Figura 39: Média dos Módulos de elasticidade dinâmico do CPV-ARI	82
Figura 40: Variância do módulo de elasticidade dinâmico	83
Figura 41: Gráficos de efeitos principais para CPII-F-32 (Compressão e Tração).....	87

Figura 42: Gráficos de efeitos principais para CII-F-32 (Módulo de Elasticidade Dinâmico)	87
Figura 43: Gráficos efeitos principais no CII-F-32 (Calor de Hidratação)	88
Figura 44: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Compressão e Tração)	88
Figura 45: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Módulo de Elasticidade Dinâmico)	89
Figura 46: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Calor de hidratação)	89
Figura 47: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Compressão e Tração)	90
Figura 48: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Módulo de Elasticidade Dinâmico)	91
Figura 49: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Calor de hidratação)	91
Figura 50: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Compressão e Tração)	92
Figura 51: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Compressão e Tração)	92
Figura 52: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Compressão e Tração)	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variações das strings em cada base de dados.....	32
Tabela 2: Strings de busca escolhidas para usar nas bases de dados.....	33
Tabela 3: Quantidade de artigos encontrados nas buscas.....	33
Tabela 4: Artigos mais citados	36
Tabela 5: Periódicos mais relevantes.....	37
Tabela 6: País com mais publicações e países com mais citações	38
Tabela 7: Propriedades do CPII-F-32.....	48
Tabela 8: Propriedades do CPV-ARI	49
Tabela 9: Características físicas e químicas da sílica ativa	49
Tabela 10: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante SILICON NS HIGH 210	50
Tabela 11: Características do Polímero Superabsorvente usado	51
Tabela 12: Traços unitários em massa utilizados na AAA.....	53
Tabela 13: Diferenciação dos traços de argamassa autoadensável.....	54
Tabela 14: Quantidade de CPs usados em cada ensaio no estado fresco	54
Tabela 15: Quantidade de CPs usados em cada ensaio no estado endurecido	59
Tabela 16: Massa específica no estado fresco - CPII.....	63
Tabela 17: Massa específica no estado fresco - CPV	63
Tabela 18: Ensaio de espalhamento - CPII.....	64
Tabela 19: Ensaio de espalhamento - CPV	65
Tabela 20: Viscosidade plástica aparente para o CPII	66
Tabela 21: Viscosidade plástica aparente para o CPV	67
Tabela 22: Captação individual dos termopares no CPII-F-32	68
Tabela 23: Captação individual dos Termopares no CPV-ARI	69
Tabela 24: Médias dos Termopares no CPII-F-32	69
Tabela 25: Médias dos Termopares no CPV-ARI.....	70
Tabela 26: Resultados dos ensaios de resistência à compressão (CPII-F-32).....	71
Tabela 27: Resultados dos ensaios de resistência à compressão (CPV-ARI)	73
Tabela 28: Resultados dos ensaios de resistência à tração - CPII	74
Tabela 29: Resultados dos ensaios de resistência à tração - CPV	76
Tabela 30: Massa específica das AAAs no estado endurecido	78
Tabela 31: Índice de Vazios das AAAs no estado endurecido.....	78
Tabela 32: Absorção das AAAs no estado endurecido	78
Tabela 33: Massa específica das AAAs no estado endurecido - CPV	79
Tabela 34: Índice de Vazios das AAAs no estado endurecido.....	80
Tabela 35: Absorção das AAAs no estado endurecido	80
Tabela 36: Módulo de elasticidade dinâmico do CPII-F-32.....	81
Tabela 37: Módulo de elasticidade dinâmico do CPV-ARI.....	82
Tabela 38: Relação das variáveis e dos ensaios com CPII-F-32	84
Tabela 39: Relação das variáveis e dos ensaios com CPV-ARI.....	85
Tabela 40: Níveis das variáveis de testes	86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AAA = Argamassa autoadensável

ARI = Alta resistência Inicial

a/c = Relação água cimento

ABNT = Associação brasileira de normas técnicas

ASTM = Society for Testing and Materials

CAA = Concreto autoadensável

CCV = Concreto convencional

cm = Centímetro

CNPq = Conselho Nacional de Pesquisa

CP = Corpo de prova

CPII = Cimento Portland Tipo II

CPV = Cimento Portland Tipo V

E = Módulo de elasticidade

Ed = Módulo de elasticidade dinâmico

Fck = Resistência à compressão do concreto

ISO = International organization for standardization

Kg/dm³ = Quilograma por decímetro cúbico

kg/m³ = Quilograma por metro cúbico

L = comprimento

m²/kg = Metro quadrado por quilograma

ME = Massa específica

min = Minuto

mm = Milímetro

MPa = Mega Pascal

MU = Massa unitária

NBR = Norma brasileira

PIB = Produto interno bruto

SAP = Polímero Superabsorvente

SA = Sílica ativa

SF = Slump flow test

SPA = Super Plastificante

UNIFEI = Universidade Federal de Itajubá

μm = Micrômetro

ρ_f = Massa específica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Justificativa	14
1.2. Objetivos	16
1.2.1. Objetivo Geral	16
1.2.2. Objetivos Específicos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Manifestações Patológicas em grandes estruturas de concreto.....	17
2.1.1. Processo de cura	17
2.1.2. Tipos de retração no concreto.....	19
2.2. Concreto autoadensável (AAA) - Definição.....	20
2.2.1. Materiais do CAA.....	22
2.3.1. Aplicações e vantagens do CAA	25
2.3.2. Métodos de dosagem do CAA.....	26
2.4. Polímero Superabsorvente – SAP.....	27
2.4.1. Utilização em compostos cimentícios	28
2.5. Análise bibliométrica.....	29
2.5.1. Metodologia de Pesquisa.....	31
2.5.1.1. Delimitação da Pesquisa	31
2.5.1.2. Definição das palavras-chave	32
2.5.1.3. Pesquisa nas bases de dados	32
2.5.1.4. Formação do banco de dados inicial.....	33
2.5.1.5. Refinamento dos dados.....	33
2.5.1.6. Análise dos dados	34
2.5.2. Resultados da Análise Bibliométrica.....	34
2.5.3. Estado da arte.....	45
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	47
3.1. Materiais	48
3.1.1. Polímero Superabsorvente Potássico (SAP-k)	50
3.2. Métodos	52
3.3. Ensaio no estado fresco	54
3.3.1. Massa específica aparente	55
3.3.2. Índice de consistência - Diâmetro de espalhamento.....	55

3.3.3.	Viscosidade plástica aparente – Funil V.....	56
3.3.4.	Calor de Hidratação.....	58
3.4.	Ensaio no estado endurecido.....	58
3.4.1.	Ensaio de resistência à compressão axial.....	59
3.4.2.	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	59
3.4.3.	Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	60
3.4.4.	Módulo de elasticidade dinâmico (Ed).....	60
4.	RESULTADOS.....	63
4.1.	Propriedades no estado fresco.....	63
4.1.1.	Massa específica.....	63
4.1.2.	Ensaio de espalhamento (Slump flow test).....	64
4.1.3.	Viscosidade plástica aparente – Funil V.....	66
4.1.4.	Calor de Hidratação.....	68
4.2.	Propriedades no estado endurecido.....	71
4.2.1.	Ensaio de resistência à compressão axial.....	71
4.2.2.	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	74
4.2.3.	Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	77
4.2.4.	Módulo de elasticidade dinâmico (Ed).....	80
4.3.	Análise Estatística.....	84
4.3.1.	Planejamento de Experimentos.....	84
4.3.2.	Análise de Variância (ANOVA).....	85
4.3.3.	Gráficos de efeitos principais.....	86
4.3.4.	Gráficos de Pareto.....	90
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
6.	CONCLUSÕES.....	95
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	96
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil passou por adaptações e atualizações nas últimas décadas, onde tem-se observado um crescente avanço em tecnologias voltadas a esta área, seja na inserção de novos materiais ou até mesmo novas técnicas construtivas. Estes fatores, possibilitam uma melhor trabalhabilidade em um tempo menor de execução, o que em muitos casos se reflete em uma economia de custos e mão de obra (EFNARC, 2005).

O concreto autoadensável (CAA) é um exemplo disto, tratando-se um tipo de concreto inovador que não requer vibração para compactação. Uma vez que o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, evoluções em relação a este composto cimentício, impactam significativamente a forma de se elaborar novos projetos de engenharia (OKAMURA; OUCHI, 2003)

Seja a construção civil realizada de forma tradicional ou com as novas tecnologias disponíveis, o uso de diferentes tipos concretos no setor ainda é imprescindível, com um vasto campo de utilização e com as tecnologias atuais, estudos mais detalhados se fazem necessários no intuito de mitigar a ocorrências de manifestações patológicas.

Em obras de grande porte, como são os casos de barragens e usinas hidrelétricas, um dos problemas consiste no controle de fissuração de origem térmica, devido ao calor de hidratação procedente de reações exotérmicas naturais da hidratação do cimento.

São diversas pesquisas que destacam materiais promissores a serem utilizados para controlar tais eventos deletérios, alguns desses materiais, que se apresentam em processo de estudo, são conhecidos como polímeros superabsorventes (SAP) (JUSTS *et al.*, 2015). É um material que está se tornando uma potencial inovação da tecnológica de cura interna e no ramo da hidratação da matriz cimentícia. São materiais com alta capacidade de absorção de água, agindo como reservatórios internos que além de melhorarem a trabalhabilidade, também diminuem a relação água/cimento (HASHOLT *et al.*, 2012).

No decorrer das duas últimas décadas, houve um crescimento no número de estudos propondo a utilização de resíduos de SAPs em diferentes tipos de compostos cimentícios, analisando de que forma eles podem influenciar positivamente na contenção dos efeitos de retração, auxiliar no processo de cura interna e melhorar a trabalhabilidade (SNOECK;

JENSEN; DE BELIE, 2015). Pereira (2016), destaca que tais estudos, levam a crer que as manifestações patológicas comumente encontradas nestes elementos, serão melhor combatidas. Ainda assim, ainda são poucos os estudos no que se refere à influência da adição de SAPs em outros materiais à base de cimento, como em concretos autoadensáveis.

Para a determinação de uma boa proporção de materiais constituintes do concreto autoadensável é necessária atenção especial no estudo e dosagem da argamassa, visto que o concreto autoadensável é composto basicamente pela argamassa mais o agregado graúdo, desta maneira, se torna mais conveniente realizar os ajustes e testes na fase da argamassa do que no CAA.

A partir disto, este trabalho se adequa-se à linha de pesquisa denominada Projeto e Obras Civas, presente no curso do Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica da Universidade Federal de Itajubá. Nele será possível se desenvolver pesquisas em torno do setor da construção civil, com enfoque em empreendimentos hidráulicos. Estes, por se tratarem de obras de grande porte, consomem grandes volumes de concreto, sendo necessário uma atenção ainda maior com a fase de cura.

1.1. Justificativa

Concretos com elevados consumos de cimento como os de alta resistência e os autoadensáveis, são frequentemente afetados por diferentes tipos de retrações. Dentre eles está a autógena, que ocorre quando toda partícula de cimento que se hidrata provoca uma pequena contração na mistura (MECHTCHERINE *et al.*, 2014). Já a retração por secagem que se desenvolve devido à perda excessiva, por evaporação da água livre e em obras de grande porte, é comum se ter uma atenção especial com a retração térmica, esta que tem origem do calor de hidratação liberado das reações exotérmicas no processo de cura (HASHOLT *et al.*, 2012). A ocorrência destas situações pode submeter a peça a esforços internos, que podem levar a estrutura ao colapso. Dessa forma, os métodos convencionais de cura podem não ser suficientes, tendo a necessidade de se recorrer a materiais alternativos, como o SAP (JENSEN; HANSEN, 2002).

Pesquisas que aliam o desenvolvimento do concreto como tecnologia em conjunto com soluções ambientais, são de extrema relevância para o desenvolvimento ecológico e consciente

da construção civil. Estes que estão entre materiais mais utilizados no setor, sendo fundamentais na maioria dos empreendimentos.

O IGTPAN (Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrionitrila), é uma instituição privada de pesquisa que vem nos últimos anos, desenvolvendo parcerias com empresas, outras instituições e universidades para exploração do potencial em torno da PAN (Poliacrionitrila), que a partir dela é produzido o SAP (polímero superabsorvente), que se mostra potencialmente vantajoso quando aliado em diversos setores.

A originalidade deste trabalho se baseia no fato de que o SAP é pouco explorado quanto ao uso em conjunto com concreto e argamassas autoadensáveis, alguns estudos já provaram que ele oferece vantagem na utilização em compósitos cimentícios convencionais, sendo um grande colaborador no combate de retrações, auxiliando no processo de cura. Um exemplo disto é o trabalho de Schröfl, Mechtcherine e Gorges (2012), onde é testada a eficiência de SAPs como agentes de cura interna para mitigar a retração autógena em argamassas.

Em grandes empreendimentos hidráulicos, onde os volumes de concreto e argamassa utilizados são altos, os cuidados quanto aos efeitos da retração precisam ser ainda mais minuciosos. Sendo assim, o SAP empregado em grande escala, como nesse caso, poderá oferecer ainda mais vantagens.

Esta pesquisa se justifica por estudar uma alternativa de controle de retrações, analisando o calor de hidratação em AAAs com adições de SAPs como agente de cura interna, o que poderá garantir uma maior vida útil e diminuir a probabilidade de fissuras, se enquadrando à linha de pesquisa de Projeto e Obras Cíveis do Mestrado Profissional em Engenharia Hídrica.

Para facilitar a obtenção de bons resultados em concretos autoadensáveis é realizado a dosagem de argamassa. No estudo de argamassa é possível determinar se o material aparenta fluidez demasiada, baixa viscosidade, segregação e exsudação, e é na dosagem de argamassa que as proporções de materiais devem ser constituídas de maneira que o CAA não perca trabalhabilidade

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a adição de polímeros superabsorventes (SAP) como elemento de cura interna em argamassas autoadensáveis (AAA), bem como suas características mecânicas, térmicas e sua aplicabilidade em estruturas com grande volume, tendo em vista a produção de concretos autoadensáveis.

1.2.2. Objetivos Específicos

Este estudo contempla os seguintes objetivos específicos:

- Fazer uma revisão bibliográfica e uma análise bibliométrica de modo a formar uma base teórica em relação ao uso de SAP em compostos cimentícios identificando o atual estado das pesquisas em torno do tema.
- Elaborar traços de AAA, utilizando cimentos do tipo II e tipo V, sendo um de referência e mais dois com porcentagens diferentes de SAP para cada tipo de cimento;
- Verificar a influência do SAP no processo de cura submersa e cura seca das AAAs;
- Verificar o comportamento térmico das AAAs com adição de SAP e comparar com o traço de referência;
- Realizar ensaios que permitam a caracterização das propriedades mecânica, físicas das AAAs com SAP, no estado fresco e endurecido;
- Analisar os resultados alcançados através de um planejamento de experimentos (DOE).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manifestações Patológicas em grandes estruturas de concreto

O concreto é o material construtivo mais empregado no mundo, fazendo parte de praticamente todas as construções, desde edificações residenciais e comerciais até grandes obras de infraestrutura como na construção de barragens e de usinas hidrelétricas. Em empreendimentos de grande porte, é exigida uma atenção ainda maior em relação as possíveis manifestações patológicas que podem ter origem tanto durante a parte de execução quanto no decorrer da vida útil da construção (REINHARDT; ASSMANN, 2012).

É um grande desafio para os engenheiros do setor a execução de peças de grandes volumes, uma vez que as manifestações patológicas mais importantes que atualmente incidem sobre essas estruturas são as fissuras por retração.

São variados os motivos pelos os quais ocorrem esses fenômenos, sendo o processo de cura uma etapa fundamental para mitigar os mesmos. A cura do concreto pode ser classificada em dois tipos, a primeira é a cura interna e a segunda a cura externa (WYRZYKOWSKI; LURA; GAWIN, 2011).

2.1.1. Processo de cura

A cura é a etapa para promover a hidratação do cimento e se trata basicamente de um controle da temperatura e da movimentação de umidade. A temperatura deve ser mantida constante ao longo da seção de concreto enquanto as resistências estão aumentando, evitando as fissuras causadas pela retração (BENTZ; LURA; ROBERTS, 2005).

Para assegurar o desenvolvimento das características físicas do concreto ou argamassa endurecidos, como resistência mecânica e durabilidade, é preciso prover condições satisfatórias de temperatura e umidade ao material, principalmente no estado fresco e nas primeiras idades. Este processo, a cura, visa potencializar a hidratação do cimento e reduzir a retração.

A continuidade da cura é muito importante e o seu início deve acontecer imediatamente após a moldagem. Realizar a cura tardiamente não supre a ausência de cura nos primeiros momentos após a moldagem, condenando o concreto a um desempenho limitado. A cura adequada pode reduzir drasticamente a retração do concreto, e quando nenhum tipo de cura é realizado, as consequências podem ser catastróficas (OLAWUYI; BOSHOFF, 2013).

A cura do concreto pode ser classificada em dois tipos principais, a cura externa e a cura interna, e cada uma delas possuem suas respectivas ramificações, como mostra a Figura 1 (RILEM, 2004).

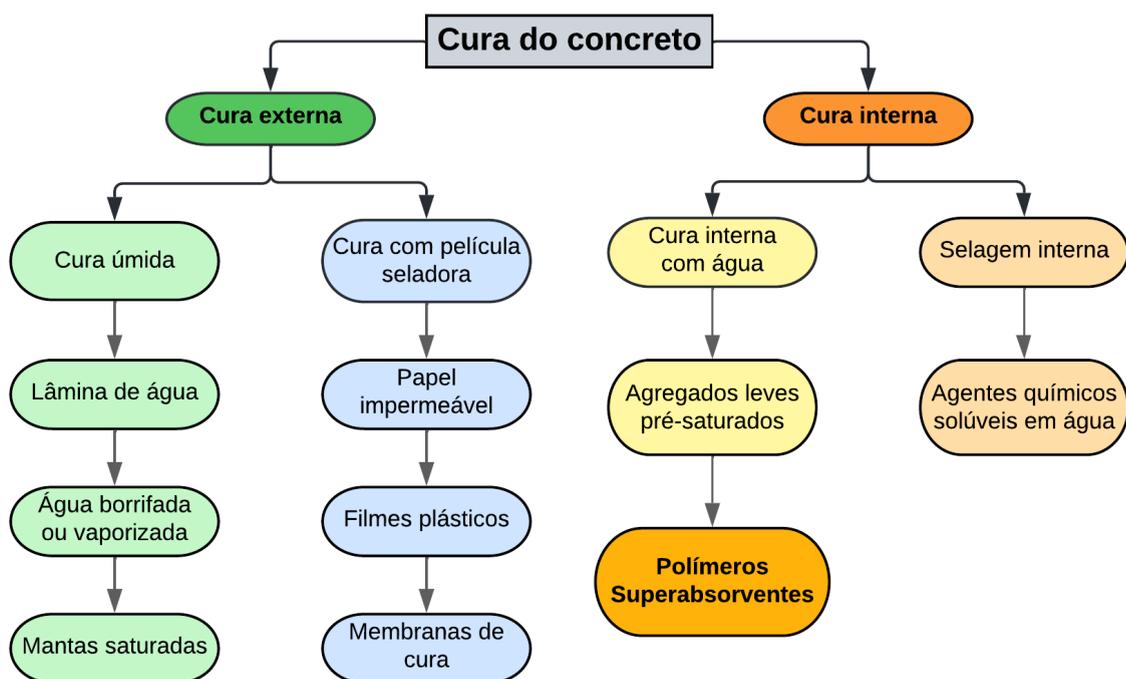


Figura 1: Tipos de cura do concreto
(Fonte: Adaptado de RILEM, 2004)

Podendo ser executada em praticamente todos os tipos de concreto e argamassas, a cura externa é a mais comumente realizada nos canteiros de obra. Este tipo de cura pode ser subdividido em dois tipos: Cura úmida e a cura com película seladora.

A cura interna consiste em adicionar, durante a mistura, materiais que atuarão como agentes de cura por tempo indeterminado. Este agente de cura interna pode ser, por exemplo, um agregado leve em condições especiais de umidade, ou ainda um componente extra à composição do concreto, como os polímeros superabsorventes (SAP) (BENTZ; LURA; ROBERTS, 2005).

2.1.2. Tipos de retração no concreto

A retração do concreto é a diminuição de volume devido à evaporação do excesso de água que não é consumida no processo de hidratação do cimento, sendo uma deformação que independe do carregamento (TAVARES, 2008). Ela pode ser classificada em quatro tipos diferentes, sendo eles: retração por secagem, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação.

A retração autógena, também conhecida como retração química é decorrente da contração de volume que experimenta a água combinada quimicamente com o cimento, para a sua quantificação, não é levado em consideração a perda ou ganho massa, as variações térmicas e nem o esforço ao qual está submetido (CARVALHO, 2002). Os fatores que influenciam no fenômeno da retração autógena são relação A/C, composição do cimento, teor de sílica ativa, finura do cimento, sílica ativa, teor de agregado e a temperatura de exposição (JENSEN, OLE; HANSEN, 2001).

Segundo Fairbairn et al. (2003) e Carvalho (2012), grandes estruturas de concreto, tais como barragens e blocos de fundação, podem estar sujeitas a fissurações em especial nas primeiras idades do cimento Portland devido às tensões térmicas e a indução da retração autógena.

A retração por carbonatação, se difere da retração por secagem pelo fato de que é causada por reação química e não pela perda de água da mistura. A combinação do dióxido de carbono (CO_2) com a água como ácido carbônico, reage com produtos da reação do cimento, principalmente a portlandita (hidróxido de cálcio). Como resultado dessa reação, ocorre liberação de água, resultando em retração da mistura, porém ocorre a diminuição da permeabilidade do concreto (DOMOME, 2010).

A retração por secagem ou retração hidráulica acontece em função da perda de água adsorvida pela mistura para o ambiente, tornando-a assim uma das principais causas de fissuração (DINIZ et al., 2011). Ela está relacionada à hidratação dos compostos anidros do cimento, desta forma, o ambiente sendo mais ou menos seco, tem influência direta na perda de água (HAYSPARK et al., 2005).

A retração térmica ocorre com a variação de temperatura do concreto, surgindo a partir de um fenômeno físico chamado de calor de hidratação. Quando o cimento é hidratado, os

compostos reagem com a água para adquirir estabilidade, o processo é acompanhado pela liberação de energia na forma de calor, ou seja, uma reação exotérmica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A execução de peças de grande volume de concreto é um desafio para os tecnologistas, uma vez que estas apresentam expressivas elevações de temperatura que podem ocasionar efeitos danosos na estrutura. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Nestas estruturas, o calor é gerado pelas reações de hidratação dos materiais cimentícios, principalmente do cimento, ao passo que a elevação de temperatura ocorre porque a taxa de geração de calor é superior à taxa de dissipação do mesmo para o ambiente, em virtude das grandes dimensões dos elementos e das características térmicas do concreto (DOMOME, 2010).

Gomes (2009), explica que as principais reações de hidratação, que geram maior quantidade de calor, geralmente se dão nas horas iniciais da mistura do material cimentício com água, em geral nas primeiras 72h. Durante a fase de hidratação, e endurecimento do concreto, o elemento estrutural também troca calor com o meio, até o ponto em que sua temperatura interna tende a se equilibrar com a temperatura ambiente, sempre iniciando pelas superfícies externas do elemento estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 1994). É nessa fase que o risco de fissuração aumenta, pois, o elemento de concreto que foi comprimido e que se expandiu nas primeiras idades se contrai, muitas vezes de forma desigual, criando gradientes de tensão à tração, ao mesmo tempo em que ainda apresenta pouca resistência à tração para suportar esse tipo de solicitação. A evolução térmica exagerada pode levar a uma taxa de temperatura que ocasiona fissuras destrutivas para as barragens (DINIZ et al., 2011).

2.2. Concreto autoadensável (CAA) - Definição

O Concreto Autoadensável (CAA) teve origem no Japão na década de 80 por Okamura, sendo difundido por toda a Europa na década de 90, devido à necessidade de garantir a durabilidade de elementos de concreto de alta resistência e boa trabalhabilidade para aplicação em estruturas com alta densidade de armaduras e de difícil acesso (OKAMURA e OUCHI, 2003). O CAA é um tipo de concreto inovador que não requer vibração para compactação e seu uso ganhou força devido a ocorrência de erros de concretagem, resultantes da deficiência da mão de obra e má execução da etapa de adensamento (REPETTE, 2008).

A entidade europeia EFNARC (*European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products*), foi fundada em março de 1989 e descreve o CAA como o maior desenvolvimento da construção em estruturas de concreto nas últimas décadas.

No estado fresco, oferece a característica de fluir somente sobre a ação do seu próprio peso, preenchendo completamente a forma, mesmo em locais com espaços pequenos entre armações. Já no estado endurecido possui geralmente as mesmas propriedades de engenharia e durabilidade do concreto vibrado tradicional (EFNARC, 2005).

Segundo a EFNARC (2002) o concreto autoadensável deve ser projetado para atender três propriedades fundamentais:

- Habilidade de preenchimento e fluidez: capacidade do concreto de fluir pelas formas de forma a preenche-la completamente, sem nenhuma intervenção mecânica;
- Habilidade passante: capacidade do concreto de fluir entre os obstáculos, se mantendo homogêneo, mesmo em locais densamente armados, somente do seu próprio peso.
- Resistência à segregação: capacidade do concreto em se manter coeso ao longo do espalhamento, proporcionando um equilíbrio entre o agregado graúdo em suspensão e a água de amassamento no interior da mistura.

O que mais atrai a atenção sobre o uso do CAA é a facilidade de manuseio e aplicação. A capacidade de fluir de modo a preencher as fôrmas se dá apenas pela ação da gravidade e deste modo, é obtida uma redução no tempo de manuseio e adensamento, proporcionando mais produtividade e diminuindo custo final de concretagem (KARAHAN, 2013).

A argamassa autoadensável (AAA) é parte integrante do concreto autoadensável (CAA), sendo necessária atenção especial no estudo e dosagem da argamassa, visto que o CAA é composto basicamente pela argamassa mais o agregado graúdo, desta maneira, se torna mais conveniente realizar os ajustes e testes na fase da argamassa (EFNARC, 2002).

2.2.1. Materiais do CAA

Os materiais empregados na produção do CAA são os mesmos comumente empregados nos concretos convencionais (CCV): cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, e água. Contudo, a composição final da mistura e suas características no estado fresco são diferentes (ASLANI; NEJADI, 2012). No CAA é empregada um percentual maior de materiais finos para se obter as características necessárias no estado fresco e além disto, necessita de adições como aditivos superplastificantes ou modificadores de viscosidade. (GOMES; BARROS, 2009).

O CAA se difere do CCV apenas no estado fresco, pelas propriedades reológicas. Deste modo, é necessária cautela na execução do traço para de se garantir a uniformidade e consistência ideias do CAA, havendo um controle para restringir as variações das características dos materiais empregados (EFNARC, 2005).

A Figura 2, ilustra as diferenças entre as proporções na composição do CAA e do CCV.

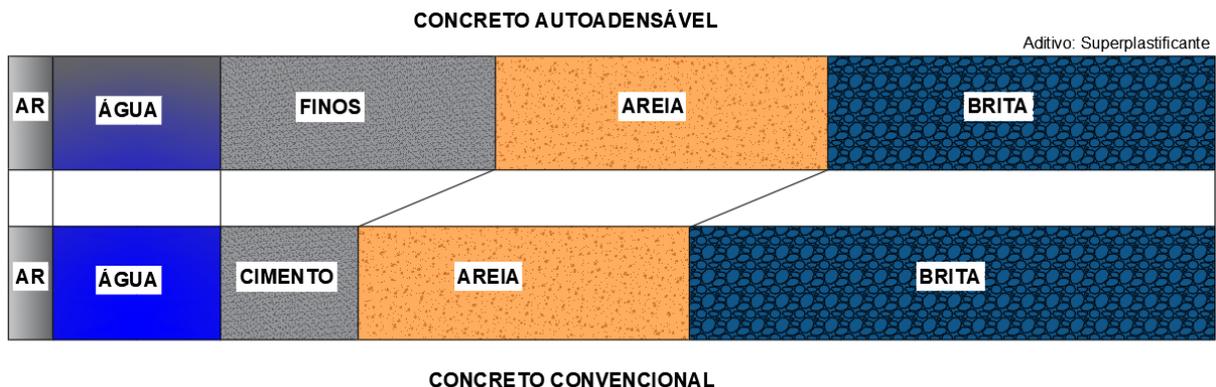


Figura 2: Diferença de proporção entre o CAA e o concreto convencional

Fonte: Adaptado de OKAMURA e OUCHI, 2003

2.2.1.1. Cimento no CAA

Não existe na literatura, nenhuma exigência em relação ao tipo de cimento para a produção de CAA, podendo-se utilizar todos os tipos de cimento. Diversos estudos afirmam que a escolha deve variar de acordo com as necessidades exigidas do concreto, prezando por manter a propriedades reológicas (EFNARC, 2005). É importante no momento da seleção do

concreto, se levar em conta a granulometria e a quantidade de aluminato tricálcio (C₃A). O controle reológico será facilitado se a quantidade de C₃A no cimento for menor, significando um maior o tempo de pega estendido do concreto. Desta forma, é recomendado uso de cimentos com até 10% de C₃A (XAVIER, 2018).

O consumo de cimento recomendado é de 350 a 450 kg/m³. Consumos de cimento abaixo de 350 kg/m³ podem ser adequados somente com a inclusão de outros materiais finos cimentantes, como pozolana e cinza volante. Já consumos com mais de 500 kg/m³ podem causar grandes retrações (EFNARC, 2005; TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2015).

2.2.1.2. Agregados no CAA

No CAA, os agregados possuem propriedades de grande importância durante a execução, sendo as fundamentais: porosidade, granulometria, absorção de água, forma e textura, resistência à compressão, módulo de elasticidade, presença de substâncias deletérias, dentre outras. Essas propriedades estão relacionadas as características do concreto tanto no estado fresco quanto endurecido, tais como: trabalhabilidade, coesão, resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Deste modo, cuidados adicionais devem ser empregados no monitoramento da umidade, absorção de água, classificação e às variações na quantidade de finos (GOMES e BARROS, 2009).

O agregado miúdo é definido como o material granular passante na peneira de malha 4,75 mm e retido na peneira de 0,150 mm, podem ser utilizados tanto as areias naturais, quanto as areias oriundas de processos industriais, sendo que os naturais são mais indicados por apresentarem textura mais lisa e forma mais arredondada, o que proporciona uma melhora de fluidez na mistura e provocam uma maior resistência ao cisalhamento das argamassas (OKAMURA; OUCHI, 2003; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2015).

O agregado graúdo é definido prezando pela garantia da fluidez do CAA e para permitir passagem do concreto por regiões estreitas, é preciso que o seu teor e tamanho sejam reduzidos. Geralmente são utilizados agregados graúdos com dimensão máxima entre 16mm e 20mm (EFNARC, 2002).

Gomes e Barros (2009), recomendam que o volume de agregado graúdo que varie entre 28 % e 35 %, em relação ao do concreto, com 750 a 920 kg/m³ de consumo e é recomendado

um volume entre 40% e 50% de agregados miúdos em relação ao do volume de concreto, com cerca de 710 a 900 kg/m³ de consumo.

2.2.1.3. *Adições no CAA*

De acordo com Tutikian e Dal Molin (2015) adições são indispensáveis para satisfazer a demanda de finos que o concreto autoadensável exige, podendo no estado fresco melhorar a trabalhabilidade, coesão e aumentar a resistência à segregação. Já no estado endurecido, as adições podem proporcionar uma melhora nas propriedades mecânicas, tornando a mistura mais densa com o preenchimento dos vazios.

As adições minerais são definidas como materiais silicosos empregados em substituição ao cimento na produção de concreto, cujos teores usuais de substituição encontrados na literatura para o CAA são da ordem de 30%, com a finalidade de reduzir os custos, melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo, em determinados casos, melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

2.2.1.4. *Aditivos no CAA*

Os aditivos podem ser definidos em dois tipos, os superplastificantes (SPA) e os modificadores de viscosidade (MVA), eles são componentes que adicionados em pequenas quantidades aos concretos e alteram algumas de suas propriedades, com o intuito de melhorá-las ou adequá-las (EFNARC, 2005).

Os SPAs são compostos em sua maior parte de policarboxilatos, lignosulfonatos ou sulfonatos, que elevam o índice de consistência do concreto mantendo a quantidade de água de amassamento ou que diminui o consumo de água para uma determinada consistência. Enquanto que os MVAs são a base de polissacarídeos ou de base orgânicas, que melhoram a coesão da massa no estado fresco, podendo substituir os componentes finos do concreto (EFNARC, 2005).

2.3.1. Aplicações e vantagens do CAA

O CAA é uma nova tecnologia que representa uma grande evolução no setor da construção civil, pois ele proporciona uma mudança na forma de se trabalhar com concreto. O seu uso traz muitas vantagens principalmente econômicas, técnicas e cronológicas de curto e de longo prazo (TUTIKIAN, 2008). Ele pode ser utilizado tanto na indústria de pré-moldados quanto ser moldado in loco, sendo dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto e depois levado por caminhão betoneira para as construções. Seu lançamento pode ser feito através de bombeado, guas ou somente espalhamento, sendo assim, o CAA é tão versátil quanto o CVV (BORJA, 2011).

O CAA proporciona agilidade no bombeamento, diminuindo o tempo construção mais rápidos e facilidade de fluxo em torno do reforço congestionado. A resistência à fluidez e à segregação do CAA assegura uma elevada taxa de homogeneidade, poucos vazios e resistência uniforme do concreto, oferecendo um melhor acabamento e durabilidade da estrutura. O CAA é comumente executado com relação água-cimento baixa, fornecendo alta resistência inicial e desmoldagem mais rápida que (EFNARC, 2002).

A eliminação de equipamentos de adensamento evita a poluição sonora nos locais de construção e onde o concreto está sendo bombeado, reduzindo a exposição dos trabalhadores ao ruído e vibração (EFNARC, 2002). O CAA se mostra uma solução muito vantajosa por promover um aprimoramento de desempenho que aliados aos benefícios de saúde e segurança, provoca um grande interesse na construção de concreto pré-moldado e diversos outros elementos estruturais, como nos casos de obras de grande porte (pontes e barragens).

Um exemplo está na construção da ponte Akashi Kaikyo, no Japão, onde se utilizou nos seus blocos de ancoragem aproximadamente 500.000 metros cúbicos de CAA, com rendimento de execução de 1900 metros cúbicos por dia. O uso do CAA reduziu o prazo de entrega da obra em pelo menos três meses (OKAMURA, 1997).

Tutikian (2008), descreve as principais vantagens no uso do CAA, sendo elas:

- Economia de tempo e de custos: Acelera a construção, reduz a mão de obra, exigindo até três vezes menos funcionários no canteiro, elimina o uso de equipamento para vibração e a partir disso diminui o custo total de concretagem;

- Estético: Permite uma diversidade de dimensões de formas, mesmo sendo densamente armadas e melhora o acabamento final da superfície;
- Segurança: Aumento de segurança no canteiro de obras, em decorrência da redução de mão de obra, que se reflete em um menor número de funcionários em posições arriscadas durante a execução;
- Ambiental: Permite a utilização de resíduos industriais, como a cinza volante.

2.3.2. Métodos de dosagem do CAA

Diferentes métodos ou recomendações internacionais e nacionais para dosagem do CAA foram publicados conforme os estudos foram evoluindo. Sendo assim, não existe um método padrão para o desenvolvimento do traço para CAA e muitas instituições acadêmicas, empresas de concreto usinado e pré-moldados desenvolveram seus próprios métodos de proporção de misturas (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Os projetos de mistura ou traço geralmente usam o volume como base, devido à importância da necessidade de preencher os espaços vazios. Alguns métodos tentam ajustar os constituintes disponíveis a um conjunto de classificação otimizado. Outro método é avaliar e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta e, em seguida, das frações da argamassa. Isso antes da adição do agregado graúdo e de toda a mistura CAA misturada (EFNARC, 2005).

EFNARC (2005), menciona alguns métodos básicos para o desenvolvimento de traços para CAA que são mais utilizados em trabalhos acadêmicos, sendo eles:

- Okamura H and Ozawa K. Self-compacting high performance concrete. International Workshop on High Performance Concrete. American Concrete Institute; Detroit. 1994;
- Ouchi M, Hibino M, Ozawa K, and Okamura H. *A rational mix-design method for killing in self-compacting concrete. Proceedings of Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction. Taipei, Taiwan, 1998;*
- Domone P, Chai H and Jin J. *Optimum mix proportioning of self-compacting concrete. Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction, Dundee, September 1999. Thomas Telford; London;*

- Billberg, P. *Self-compacting concrete for civil engineering structures - the Swedish Experience. Report no 2:99. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm, 1999;*
- Su N, Hsu K-C and Chai H-W. *A simple mix design method for self-compacting concrete Cement and Concrete Research, 31, 2001;*
- Gomes P.C.C, Gettu R, Agullo L, Bernard C. *Mixture proportioning of high strength, Self-Compacting Concrete: Performance and Quality of concrete structures. Third CANMET/ACI, Conf. (Recefi, Brazil), 2002;*

Levando em conta que o CAA é composto basicamente por argamassa e agregado graúdo, é importante se dar uma atenção ainda maior no estudo referente a dosagem de argamassa para se determinar a proporção ideal o concreto autoadensável em questão. Devido a isto, torna-se mais adequado fazer os ajustes e testes na fase da argamassa, que posteriormente irá integrar o CAA.

Através do estudo da argamassa é possível determinar se o material apresenta as características exigidas como: fluidez, coesão, resistência à segregação e exsudação. A etapa de dosagem da argamassa é crucial, tendo em mente que as proporções de materiais devem ser constituídas de maneira que o CAA não perca trabalhabilidade.

Desta forma, este estudo avalia a influência da adição de polímeros superabsorventes em argamassas autoadensáveis, onde foi empregado o método proposto por Tutikian (2004) e o mesmo é explicado melhor no capítulo de metodologia.

2.4. Polímero Superabsorvente – SAP

A palavra “polímero” vem da junção das palavras gregas poli (muitas) e mero (partes), então, um polímero é uma macromolécula que é composta por milhares de unidades de repetição denominadas meros, ligados por ligação covalente. Para a formação dos polímeros, precisa-se que pequenas moléculas se liguem entre si para formar uma longa cadeia polimérica (SANTOS, 2016). Algumas amostras de SAP em estado seco são mostradas na Figura 3.



Figura 3: Amostra de polímeros superabsorventes secos e saturados

Fonte: Autor, 2022

Existe no mercado uma grande quantidade de tipos de polímeros, os quais são derivados de diferentes compostos químicos. Dentre os diferentes tipos, encontram-se os polímeros superabsorventes, que constituem uma classe de polímero que possuem grande afinidade com a água. Eles foram desenvolvidos inicialmente no início da década de 1980 para a indústria de higiene, mais precisamente para fraldas descartáveis (SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012).

A capacidade das partículas de SAP de absorver grandes quantidades de líquido sem dissolver permitiu amplas aplicações industriais em todo o mundo. Atualmente, essa propriedade particular desse tipo de polímero também começou a atrair a atenção de produtos do mercado agrícola e do ramo construção civil, no que tange o uso de SAP em compósitos à base de cimento, devido a várias vantagens obtidas por meio das partículas superabsorventes (AL-HUBBOUBI *et al.*, 2018).

2.4.1. Utilização em compostos cimentícios

Na construção civil, os SAPs foram apresentados como aliados da cura interna de pastas de cimento no controle da retração em 2001 (JENSEN, O.M.; HANSEN, 2001). Considerando seu potencial de uso para o setor, muito tem se pesquisado e desenvolvido atualmente, podendo ser empregado em diferentes vertentes de modo a auxiliar na diminuição de ocorrência de manifestações patológicas.

Jensen e Lura (2006), explicam em seu trabalho que cura interna consiste em adicionar, durante a mistura, materiais que atuarão como agentes de cura por tempo indeterminado. Este agente de cura interna pode ser, por exemplo, um agregado leve em condições especiais de umidade, ou ainda um componente extra à composição do concreto, como o próprio SAP.

Snoeck *et al.* (2012) afirma que adicionar SAP aos materiais à base de cimento, formará inclusões cheias de água que gradualmente liberam água durante o processo de hidratação do cimento. Este método fornece umidade adicional ao concreto, tornando o cimento hidratado de forma mais eficiente e reduzindo a retração autógena. O SAP é misturado ao concreto e então absorve parte da água de mistura. Durante o processo de hidratação, a água absorvida pelo SAP pode ser liberada, promovendo a hidratação e reduzindo o encolhimento autógeno do concreto.

Atualmente, pesquisadores de todo o mundo estão estudando as possibilidades e limitações do uso do SAP a fim de solucionar manifestações patológicas encontradas no setor. Os autores também acreditam que os compósitos à base de cimento modificados por SAP são muito promissores e serão amplamente usados em todo o mundo em um futuro próximo. No capítulo seguinte, de análise bibliométrica, encontra-se uma revisão sistemática dos principais artigos publicados em relação ao tema.

2.5. Análise bibliométrica

A execução de uma análise bibliométrica, na qual se originou o artigo Souza (2022), teve como o objetivo de ampliar o embasamento teórico em torno do tema sobre o uso de SAPs em compostos à base de cimento, de modo a facilitar localização de artigos relevantes para a pesquisa de novos autores nesse setor. A partir desta pesquisa pretende-se identificar a quantidade de publicações ao longo da história, os autores e periódicos mais relevantes, países com maior quantidade de citações e de publicações, as palavras-chave utilizadas com mais frequência, os segmentos de linhas de pesquisa e executar análises de acoplamento bibliográfico e cocitação, a partir dos resultados, sendo possível através disso, apontar futuras tendências dentro do estado científico presente.

Para se identificar os trabalhos mais importantes de modo mais simples, é necessário que o pesquisador defina a tática que será utilizada em sua pesquisa bibliográfica. Uma das táticas é o uso de técnicas de bibliometria, que começaram a ser desenvolvidas no início deste

século como uma forma de entender e analisar quantitativamente dos dados obtidos de produções científicas (TREINTA *et al.*, 1983) (GRÁCIO, 2016).

A bibliografia é a forma do pesquisador de expor a afinidade existente entre sua pesquisa e outros trabalhos (SANDISON, 1989). Da mesma forma, é se faz necessário salientar a importância do referencial bibliográfico, sendo crucial que faça parte de um âmbito representativo para o assunto, garantindo qualidade, abrangência e significância à pesquisa. A seleção de artigos deve refletir o cenário científico atual de uma pesquisa sendo a análise quantitativa destes dados uma maneira de obter um embasamento confiável (TREINTA *et al.*, 2014) (GARFIELD, 2001).

São encontradas na literatura algumas definições para bibliometria (VANTI, 2002), que é uma perspectiva quantitativa e estatística de artigos localizados para a fundamentação teórica em uma pesquisa, os quais são utilizados para mapear o cenário científico atual de um tema. Desta forma, em posse dos dados obtidos em bases confiáveis, pode-se usar de métodos como o acoplamento bibliográfico e cocitação para agrupar artigos associados dentro do tema em questão.

O acoplamento bibliográfico relaciona estudos nos quais os autores citam um ou mais artigos em conjunto, sendo esta técnica direcionada ao passado, ou seja, retrospectiva. Em contrapartida, a análise de cocitação reconhece quais artigos ou autores são citados em comum nos mesmos artigos, sendo uma análise voltada para o futuro (GARFIELD, 2001) (GRÁCIO, 2016). A Figura 4 representa os dois tipos de análise de referências, de forma a facilitar o entendimento das suas diferenças.

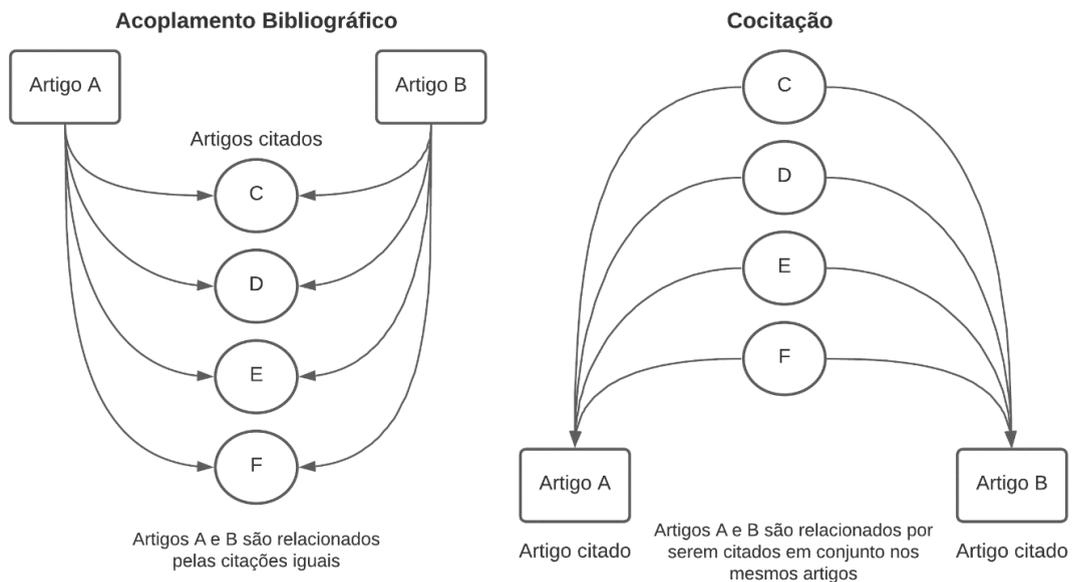


Figura 4: Acoplamento bibliográfico e cocitação

Fonte: Adaptado de Treinta *et al.* (2014)

2.5.1. Metodologia de Pesquisa

A metodologia utilizada para a execução da análise bibliométrica tem como base a utilizada por Treinta *et al.* (2014), com algumas modificações. As etapas para a execução da pesquisa de artigos são apresentadas neste subcapítulo.

2.5.1.1. Delimitação da Pesquisa

A delimitação da pesquisa é dada, primeiramente, através da escolha das bases de dados a serem usadas para a análise. A primeira base escolhida foi a *Scopus*, dado ao grande volume de artigos relacionados a engenharia presente em seu acervo. A outra base foi escolhida levando em conta o *Journal Citation Report (JCR)*, que avalia as revistas mais importantes de cada área de conhecimento, sendo a *Web of Science (WoS)* sua origem, o que evidencia sua importância entre as bases de dados.

A partir da escolha das bases de dados, a delimitação da pesquisa é finalmente definida com área de conhecimento a ser abordada

2.5.1.2. Definição das palavras-chave

Após delimitar quais bases serão utilizadas e também definir a esfera de conhecimento da pesquisa, escolhe-se as palavras-chave a serem utilizadas na busca de referências. Treinta *et al.* (2014) salienta a importância da transcrição correta das palavras durante as buscas nos bancos de dados, pois podem ocorrer variações. Analisando as bases escolhidas, através de diversas tentativas de combinações, as palavras-chave determinadas, em inglês, são: “concrete”, “paste”, “mortar”, “superabsorbent” e “polymer”.

2.5.1.3. Pesquisa nas bases de dados

Com o objetivo de obter uma maior quantidade de publicações, foram realizadas diversas formas diferentes de simulações de buscas nas bases de dados supracitadas. Para isso formou-se strings de busca onde as palavras-chave foram escritas de maneiras diversas, sendo algumas vezes separadas ou colocadas entre aspas. Optou-se por fracionar o termo “superabsorbent polymer” para “superabsorbent” e “polymer”, devido a quantidade de artigos com a expressão separada ser maior do que com os dois termos em conjunto. Utilizou-se dos conectivos de adição “AND” e condição “OR” afim de ligar termos escolhidos. Além disso, foi feita uma filtragem com o objetivo de chegar na quantidade de artigos disponíveis, excluindo os outros tipos de documentos. Esse processo é explanado na Tabela 1, onde é possível observar que a última string utilizada obteve um número maior de documentos.

Tabela 1: Variações das strings em cada base de dados

Strings de Busca (Palavras-chave)	Nº de artigos	
	Scopus	WOS
(concrete* AND "superabsorbent polymers")	246	270
(concrete* AND superabsorbent AND polymer*)	247	338
((concrete* OR mortar*) AND "superabsorbent polymers")	294	280
((concrete* OR mortar*) AND superabsorbent AND polymer*)	295	353
((concrete* OR paste*) AND "superabsorbent polymers")	297	283
((concrete* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)	299	359
((concrete* OR mortar* OR paste*) AND "superabsorbent polymers")	341	288
((concrete* OR mortar* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)	343	369

Fonte: Autor, 2022

É importante mencionar que para as bases filtrarem os artigos de modo a buscar somente nos títulos, resumos e palavras-chave, é preciso fazer uso de elementos que são colocados antes das strings e são fornecidos pelas próprias bases. Sendo o da *Scopus* o “TITLE-ABS-KEY” e o da *Web of Science* o “TOPIC:”. As strings de busca escolhidas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Strings de busca escolhidas para usar nas bases de dados

Scopus	TITLE-ABS-KEY ((concrete* OR mortar* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)
Web of Science	TOPIC: ((concrete* OR mortar* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)

Fonte: Autor, 2022

2.5.1.4. Formação do banco de dados inicial

Nas buscas feitas nas duas bases de dados encontrou-se, como resultados mais expressivos, 712 artigos no total em um período de 1997 a 2021, sendo 343 da base *Scopus* e 369 da base *Web of Science*, como mostra a Tabela 3. Os documentos foram extraídos no formato *BibTex*, contendo informações técnicas, como título, autor, periódico, país de publicação, citações, área de conhecimento, referentes aos artigos.

Tabela 3: Quantidade de artigos encontrados nas buscas

Base	String de busca	Nº de artigos
Scopus	TITLE-ABS-KEY ((concrete* OR mortar* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)	343
Web of Science	TOPIC: ((concrete* OR mortar* OR paste*) AND superabsorbent AND polymer*)	369

Fonte: Autor, 2022

2.5.1.5. Refinamento dos dados

Um refinamento se torna necessário visto que a extração dos arquivos nas bases expõem artigos com informações ausentes relacionadas aos autores, o país de origem, o periódico ou ano de publicação. Para isso, é realizada uma filtragem prévia, em que se cruzam as referências dos artigos recolhidos de cada base de modo a descartar aqueles com dados ausentes. Para este

propósito foi utilizado o software *Mendeley*TM. Na base *Scopus*, do total de 343 artigos, 3 foram descartados e na base *Web of Science*, do total de 369 artigos, 3 foram descartados. Após esta fase, foram gerados dois novos arquivos *BibTex* com os artigos remanescentes.

2.5.1.6. Análise dos dados

A análise dos dados das amostras obtidos após o refinamento, é feita com o auxílio do software *RStudio*TM, nele os dados das publicações como, autores, anos das publicações, países de origem, número de citações, número de publicações e informações dos periódicos são compilados e organizados de modo a facilitar na extração dos dados mais relevantes. Este diagnóstico é feito separadamente, primeiro para a base de dados da *Scopus* e posteriormente para a *Web of Science*.

Em seguida, o programa *Excel*TM foi usado para mesclar os resultados das duas bases e excluir os dados repetidos, tendo como critério preservar a que tiver o número mais significativo para a análise. Exemplificando, se um autor foi listado entre os mais relevantes das duas bases, o resultado com menor número de publicações foi eliminado. Essa adaptação foi feita para não ocorrerem repetições nas listas dos principais resultados.

2.5.2. Resultados da Análise Bibliométrica

Baseada na análise feita no software *Rstudio*TM, obteve-se tanto as informações da base de dados *Scopus* quanto os da *Web of Science* e os mesmos são exibidos ao longo deste capítulo. Através da análise do número de artigos publicados na área ao longo da história, observa-se um aumento do número de publicações em ambas bases de dados, conforme mostra a Figura 5. Essa evolução, mostra um cenário promissor para publicações relacionadas ao assunto, sendo os últimos 5 anos responsáveis por mais de 70% das publicações ao longo da história. O ápice de publicações se encontra no ano de 2020, onde a *Scopus* e *WOS* registraram 72 e 93 publicações, respectivamente. Em 2021, apesar das pesquisas terem sido executadas em 20 de maio, ambas bases de dados possuem mais de 30 artigos fichados, apontando que este ano deve atingir números altos assim como o ano passado.

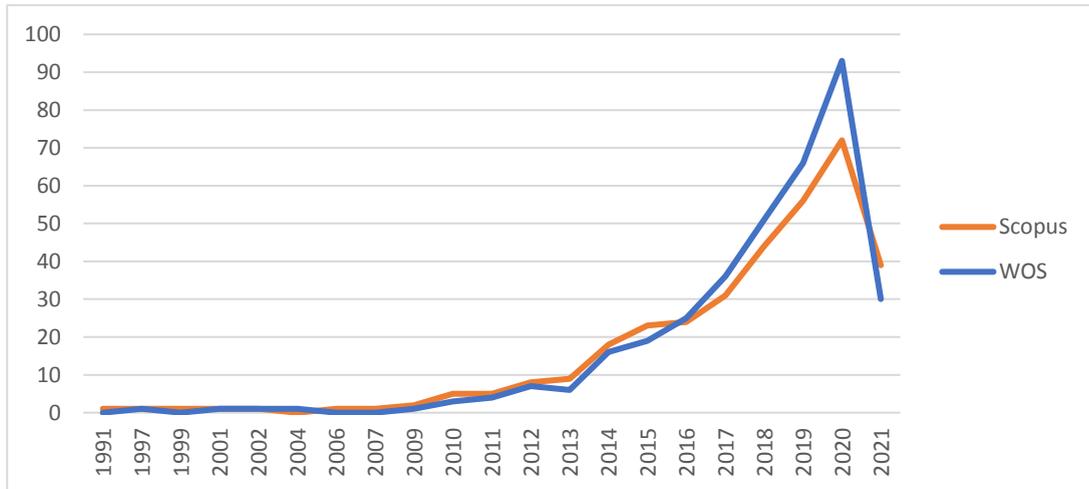


Figura 5: Número de publicações ao longo da história

Fonte: Autor, 2022

A Figura 6 mostra a lista com os autores com mais publicações na área. Como forma de destaque, foi aderido um asterisco, significando que os autores apareceram entre os mais produtivos em ambos resultados das bases de dados, sendo mantido aquele mais significativo, essa marcação foi adotada também nas análises seguintes. Essa lista permite saber quais autores servem como base para a realização de futuros trabalhos, já que os mesmos possuem grande interesse acerca do tema. De Belie e Snoeck D. aparecem em destaque como os que mais publicam artigos relacionados ao tema. Em terceiro, Liu J. contabiliza 21 artigos publicados e os autores na sequência possuem menos de 20 artigos cada.



Figura 6: Autores com mais publicações

Fonte: Autor, 2022

Em paralelo à análise de autores, a lista dos artigos que possuem mais citações (

Tabela 4) mostra um contraponto permitindo que se destaquem autores mais reconhecidos pela sua relevância entre outros pesquisadores. Os artigos estão listados com o nome do autor principal, ano de publicação e abreviação dos periódicos e, através disto, pode-se ver que dos quinze artigos mais citados, destacam-se, primeiramente os de Jensen OM., por serem os precursores do tema em questão. É importante frisar a relevância de Snoek dentre os autores, pois além de ser o segundo autor mais produtivo, possui quatro artigos entre os quinze mais citados. Mechtcherine V. é outro autor que possui mais de um artigo entre os mais citados.

Tabela 4: Artigos mais citados

Artigo	Total de citações
JENSEN OM, 2001, CEM CONCR RES	641
JENSEN OM, 2002, CEM CONCR RES	373
SCHRFL C, 2012, CEM CONCR RES	221
SNOECK D, 2014, J INTELL MATER SYST STRUCT	207
JUSTS J, 2015, CEM CONCR RES	190
WANG JY, 2014, CONSTR BUILD MATER	176
PLANK J, 2015, CEM CONCR RES	167
SNOECK D, 2015, CEM CONCR RES	139
SNOECK D, 2014, CONSTR BUILD MATER	138
SNOECK D, 2012, CEM CONCR RES	135
HASHOLT MT, 2012, CONSTR BUILD MATER	126
ESTEVEZ LP, 2011, THERMOCHIM ACTA	116
MECHTCHERINE V, 2015, CEM CONCR RES	113
MECHTCHERINE V, 2014, MATER STRUCT	108
LEE HXD, 2010, ADV APPL CERAM	105

Fonte: Autor, 2022

O Figura 7 apresenta as 15 palavras-chaves que são usadas com mais frequência pelos autores para definir seus artigos e nota-se que a maior parte dos autores correlacionam suas publicações ao concreto do que a argamassa. Essas palavras-chave também expõem os tópicos mais correlacionados com o emprego de SAP em compostos cimentícios, como cura em geral, retração, esforço de compressão, cura interna e a retração autógena. Com isso, pode-se entender que estes termos são úteis e complementares ao se tratar destes polímeros neste cenário.

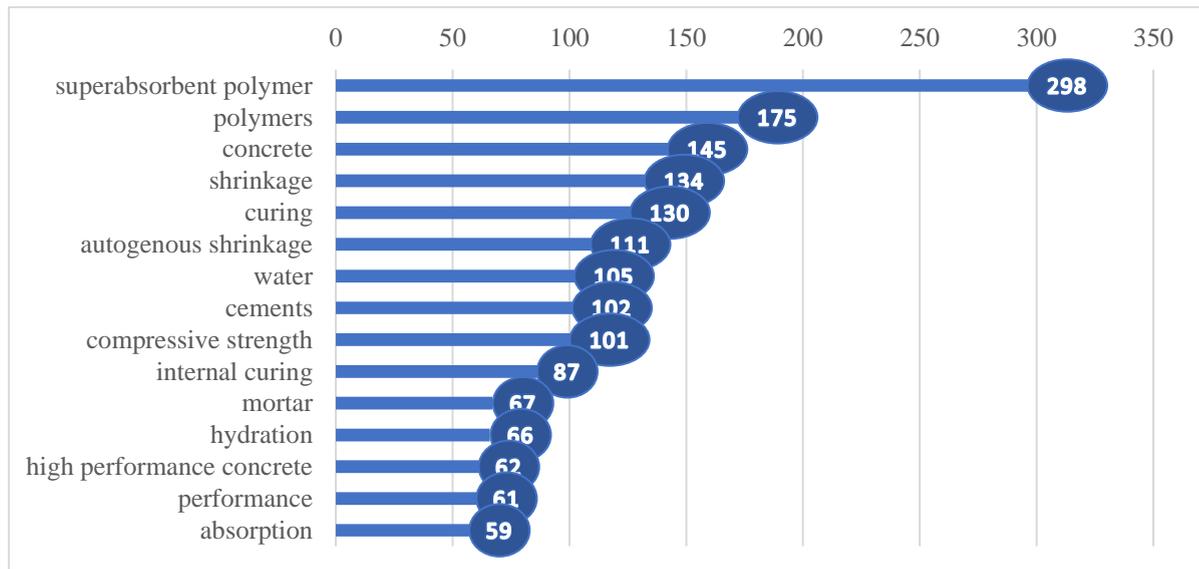


Figura 7: Palavras-chave mais usadas pelos autores

Fonte: Autor, 2022

A Tabela 5 exibe os periódicos com maior relevância em torno do tema, sendo medido através do volume de publicações feitas ao longo dos anos. Eles servirão como ponto de partida para busca de artigos e uma forma de exibir as vertentes de maior destaque em torno do tema, ou seja, que possuem uma grande quantidade de publicações, sendo possível observar as carências e definir novos alvos para publicações de trabalhos futuros. Vale destacar a grande dominância do periódico *Construction and Building Materials* em relação aos outros, com 106 artigos publicados, em adição, o mesmo possui três artigos entre os mais citados, sendo o *Cement and Concrete Research* o que possui maior destaque neste quesito, responsável por oito artigos entre os mais relevantes.

Tabela 5: Periódicos mais relevantes

Periódico	Artigos
CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS	106
CEMENT AND CONCRETE RESEARCH	34
CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES	27
MATERIALS	23
MATERIALS AND STRUCTURES	22
JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING	10
JOURNAL OF BUILDING MATERIALS	9
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY	8
ACI MATERIALS JOURNAL	7
ADVANCES IN MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING	6

Fonte: Autor, 2022

A comparação dos países com mais artigos publicados e com mais citações de seus artigos é mostrada na

Tabela 6. É notória a relevância da China e da Bélgica para este tema, pois eles não estão somente entre os três países que mais publicam como estão entre os três mais citados, ou seja, estes artigos são colocados pela comunidade científica como de qualidade. Nota-se que o Brasil, Holanda, Japão e Índia estão entre os países com maior número de publicação, mas não mostram essa relevância quanto ao número de citações, sendo que o Brasil está em 18º em número de citações. O oposto acontece com a Irã, África do Sul, Letônia e Polônia que são mais citadas mesmo com um número menor de artigos publicados. É importante destacar a Dinamarca, que salta para o segundo lugar quanto ao número de citações, isso acontece devido aos trabalhos de Jensen OM., que está entre os precursores neste campo.

Tabela 6: País com mais publicações e países com mais citações

Publicações	Citações
China	Belgium
Belgium	Denmark
USA	China
South Korea	Germany
Switzerland	Switzerland
Germany	USA
Denmark	South Korea
Portugal	United Kingdom
United Kingdom	Portugal
Brazil	Canada
Canada	Iran
Netherlands	South Africa
Japan	Latvia
Singapore	Singapore
India	Poland

Fonte: Autor, 2022

A Figura 8 deixa mais clara a proporção do número de citação por países dos 10 países analisados, evidenciando a dominância da Dinamarca, Bélgica e China no cenário.

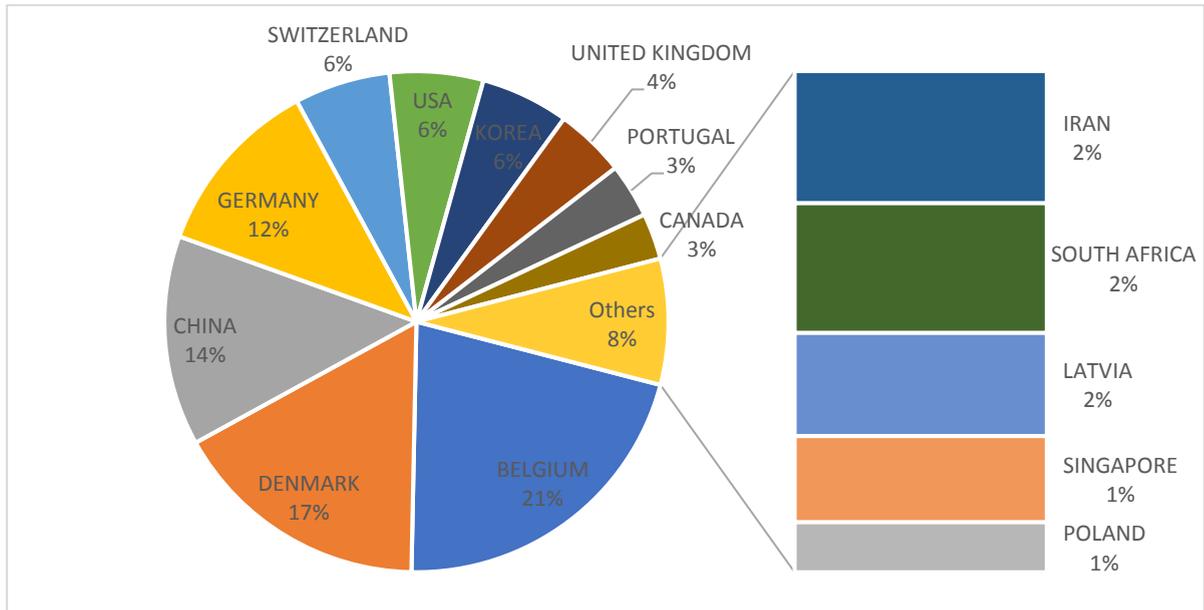


Figura 8: Proporção do número de citações por países

Fonte: Autor, 2022

A Figura 9 e Figura 10, extraídas nos sites das bases de dados da Scopus e Web o Science, respectivamente, mostram que o setor da construção e engenharia estão entre as áreas de pesquisa de maior interesse sobre o tema, quando se trata da utilização de SAPs em materiais a base de compósitos cimentícios. Ainda assim, estes dados exibem que as pesquisas possuem uma abrangência multidisciplinar, sendo explorada por diversas áreas de atuação.

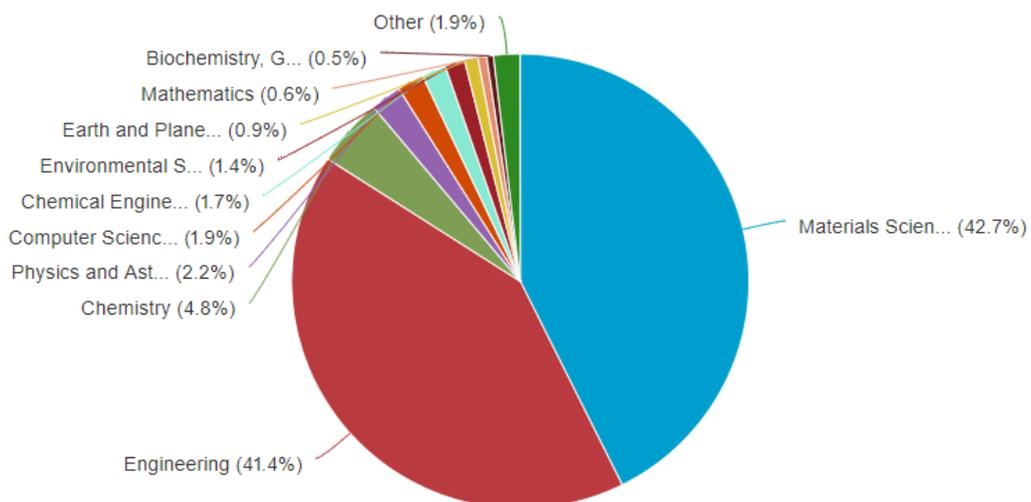


Figura 9: Áreas de pesquisa da base Scopus

Fonte: Scopus, 2022

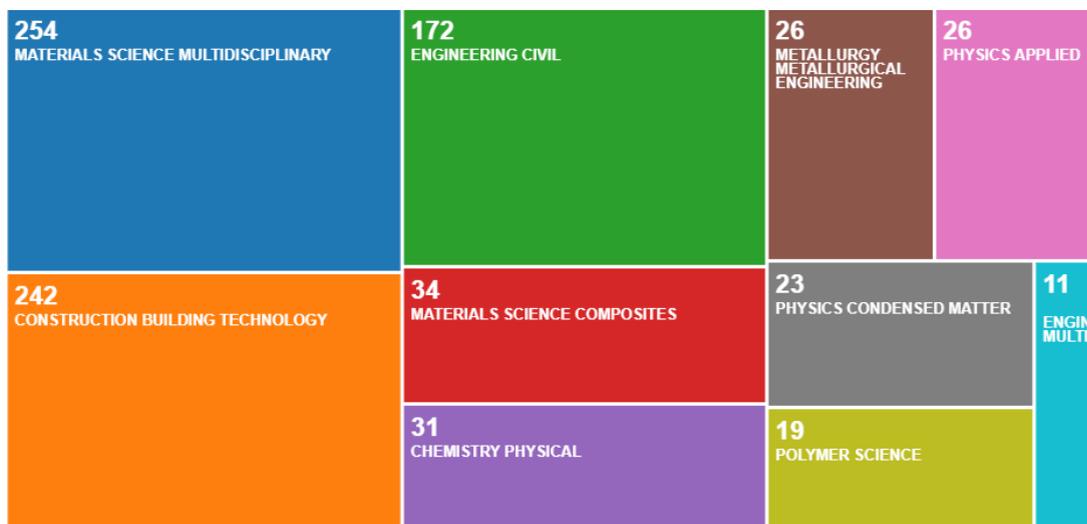


Figura 10: Áreas de pesquisa da base *Web of Science*

Fonte: Web of Science, 2022

Os acoplamentos bibliográficos por autores e documentos foi realizado através do software *VOSviewer* com os dados das bases *Scopus* e *Web of Science*. Para análise, foram considerados os tamanhos, a proximidade entre os círculos, ligações e as cores.

Quanto maior a proximidade com os vizinhos e o tamanho dos círculos, maior sua importância em relação aqueles do mesmo grupo, que é diferenciado por meio das cores. Deste modo, as figuras seguintes apresentem um agrupamento quanto ao grau de semelhança de citações feitas nos artigos.

Nos acoplamentos relacionados aos autores presentes na Figura 11

Figura 11: Acoplamento bibliográfico de autores (*Scopus*)

Fonte: VOSviewer, 2021

e Figura 12, é possível identificar os nomes de alguns dos autores com maior número de publicações (Tabela 4), sendo, De Belie e Snoeck em um grupo, Wyrzykowski e Lura em outro grupo e Liu e Yang em um terceiro grupo e todas estas duplas têm relevância dentro deles, a partir das ligações e dos grupos, é possível identificar outros autores com artigos semelhantes, com o mesmo enfoque. É importante destacar o posicionamento de Jensen nas figuras, sendo que o autor aparece entre os grupos, por estabelecer uma relação com mais de uma vertente.

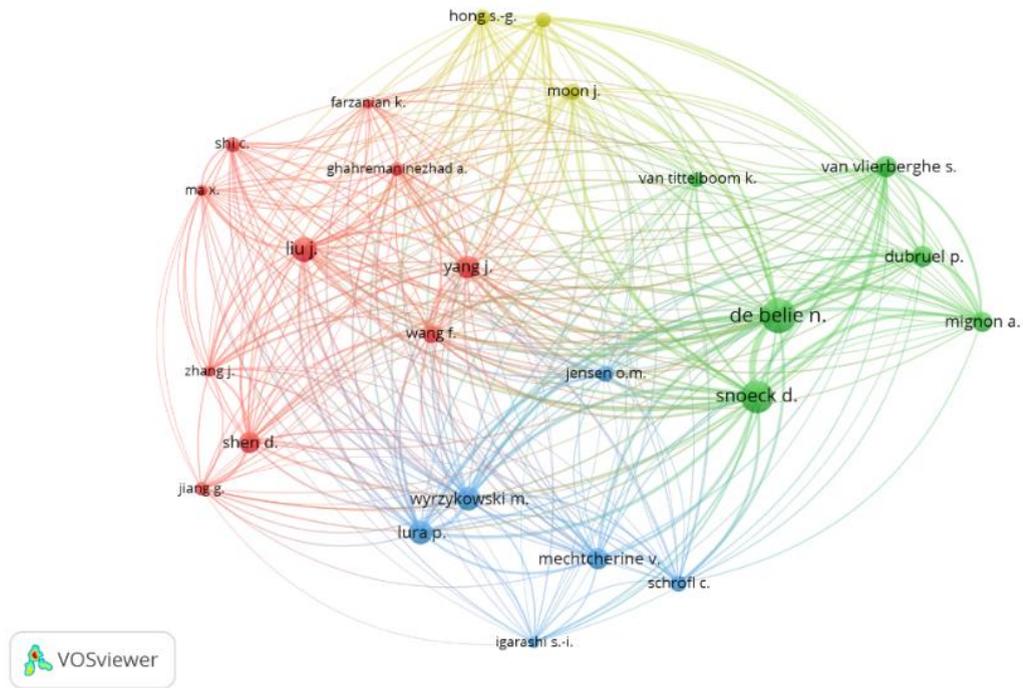


Figura 11: Acoplamento bibliográfico de autores (*Scopus*)

Fonte: VOSviewer, 2021

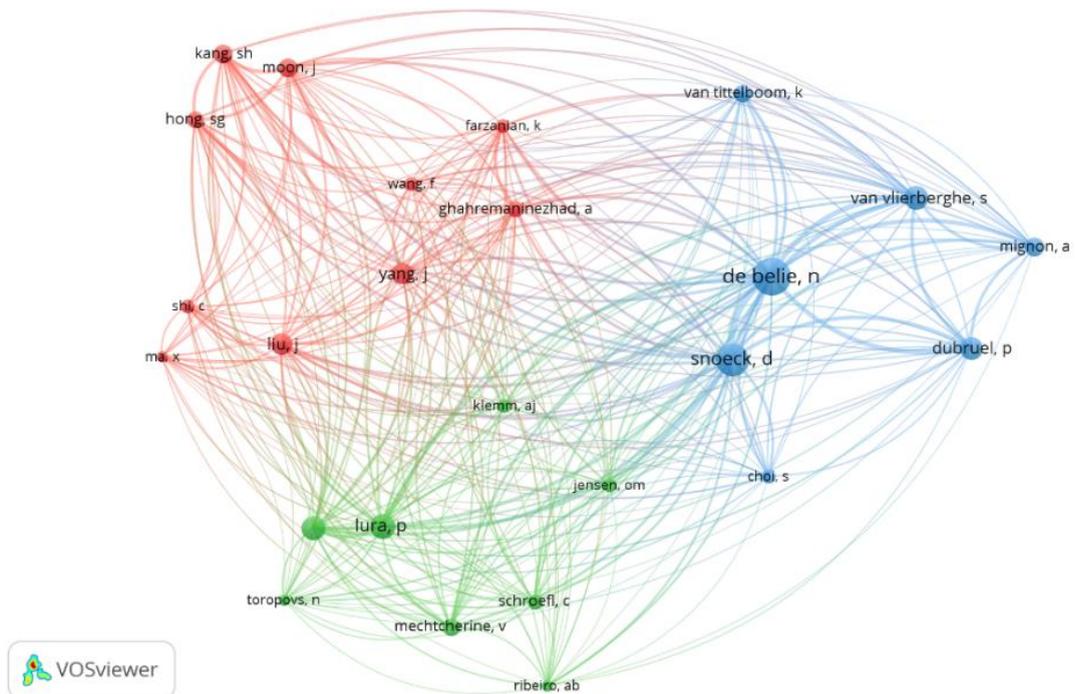


Figura 12: Acoplamento bibliográfico de autores (*WOS*)

Fonte: VOSviewer, 2021

Nos acoplamentos realizados com os documentos, mostram-se semelhanças nos resultados das duas bases de dados que são mostrados na Figura 13 e Figura 14: Acoplamento bibliográfico de documentos (Scopus)

Fonte: VOSviewer, 2021 e Figura 14. Nota-se que grande parte dos trabalhos mais citados estão presentes em ambas análises. Nas duas figuras também são ilustrados que os documentos estão divididos em 3 grandes grupos, assim como mostrado no acoplamento de autores.

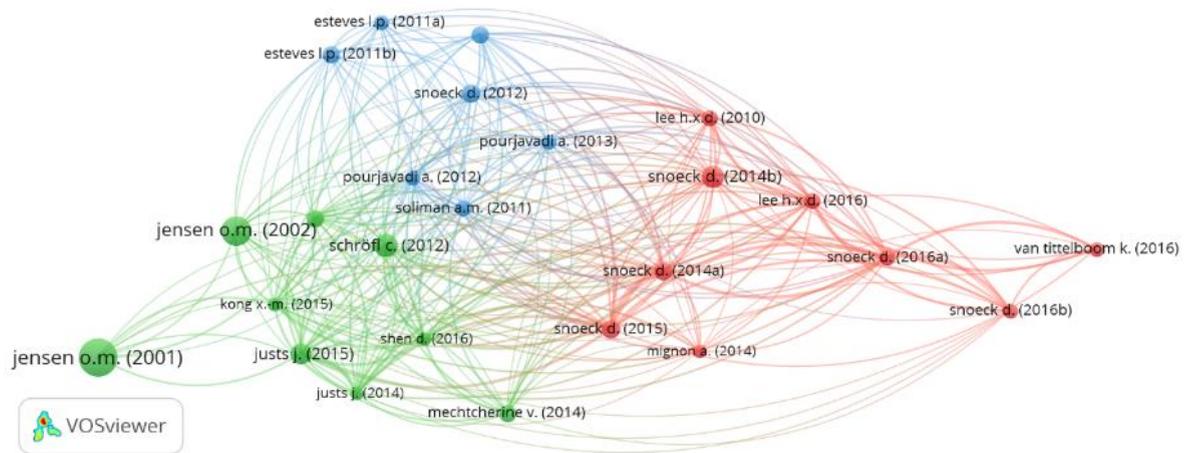


Figura 13: Acoplamento bibliográfico de documentos (Scopus)

Fonte: VOSviewer, 2021

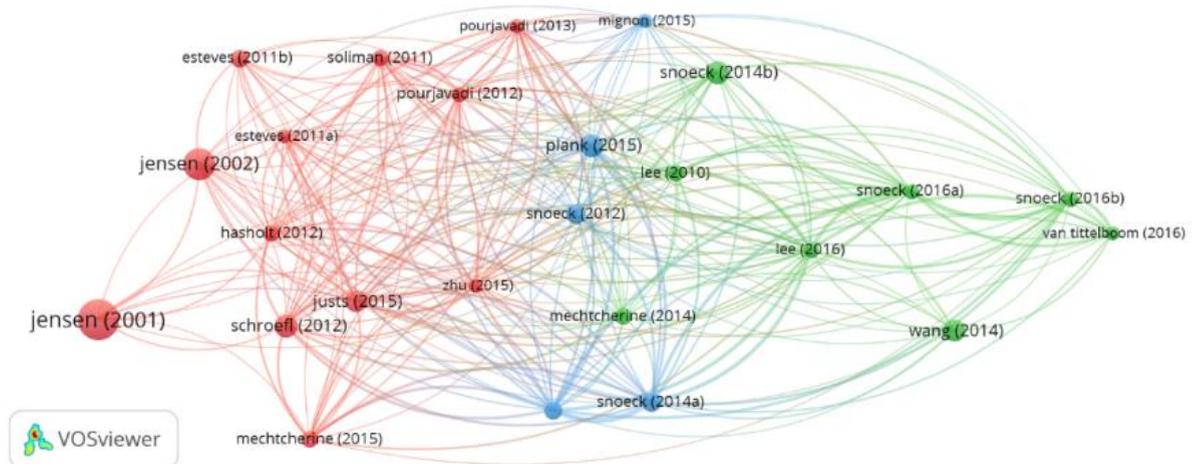


Figura 14: Acoplamento bibliográfico de documentos (WOS)

Fonte: VOSviewer, 2021

A cocitação é a correlação entre dois artigos que foram citados em conjunto em um terceiro artigo. A Figura 15 e Figura 16 mostram a análise de cocitação feita entre autores e as Figura 17

e Figura 18 mostram a análise de cocitação feita entre referências para as duas bases de dados. Nas quatro figuras também se identificam autores e trabalhos referentes a Figura 6 e

Tabela 4. Então dentro dos grupos de diferentes cores, encontra-se aqueles com maior relevância, ou seja, o autor ou artigo que é mais citado com outros.

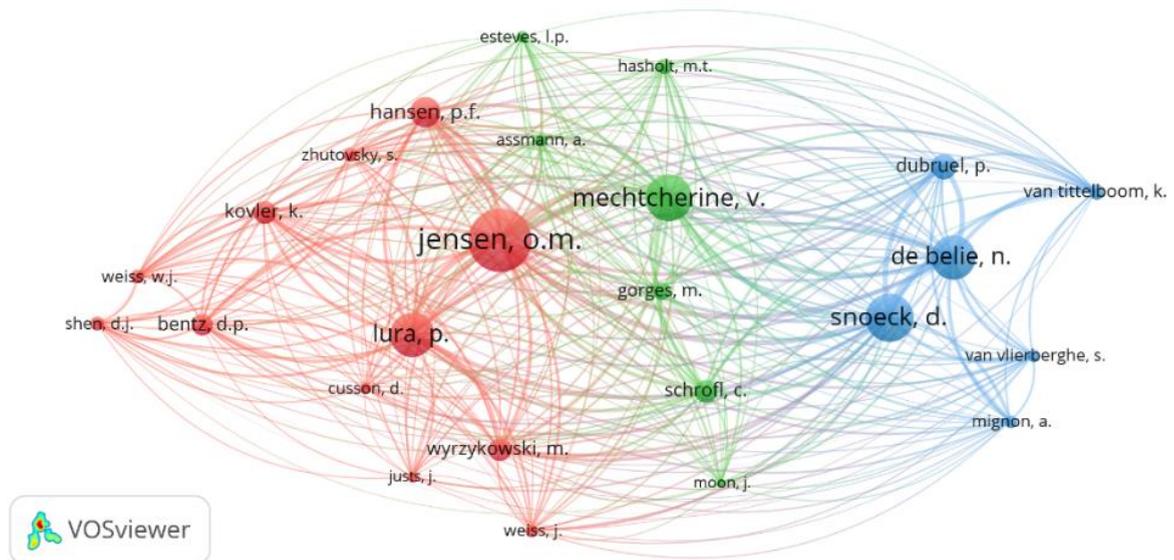


Figura 15: Cocitação de autores (*Scopus*)

Fonte: VOSviewer, 2021

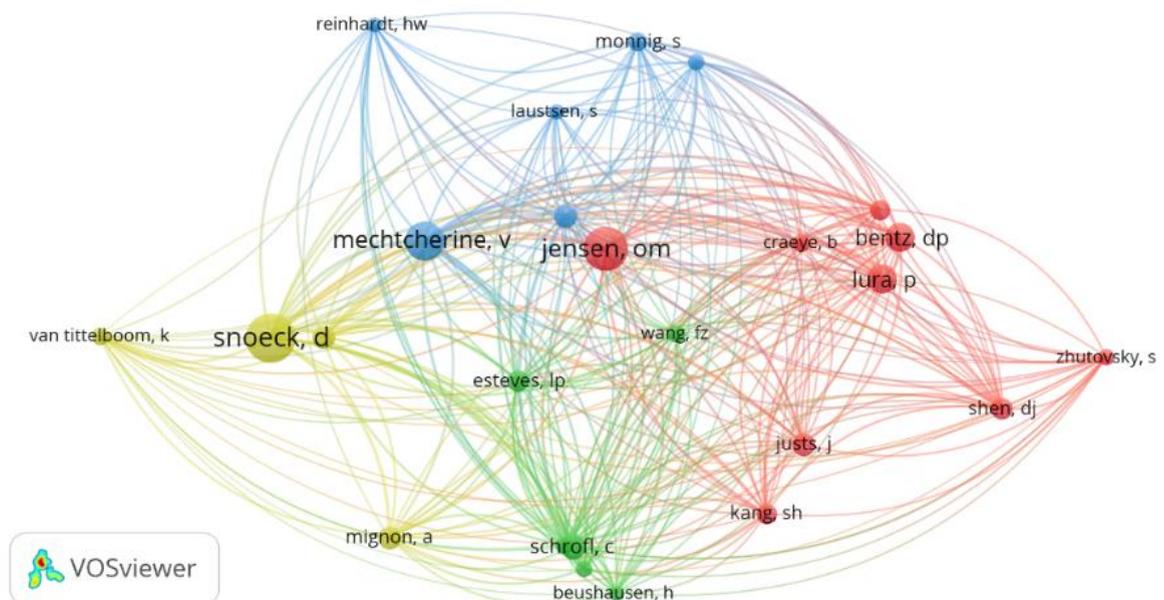


Figura 16: Cocitação de autores (*WOS*)

Fonte: VOSviewer, 2021

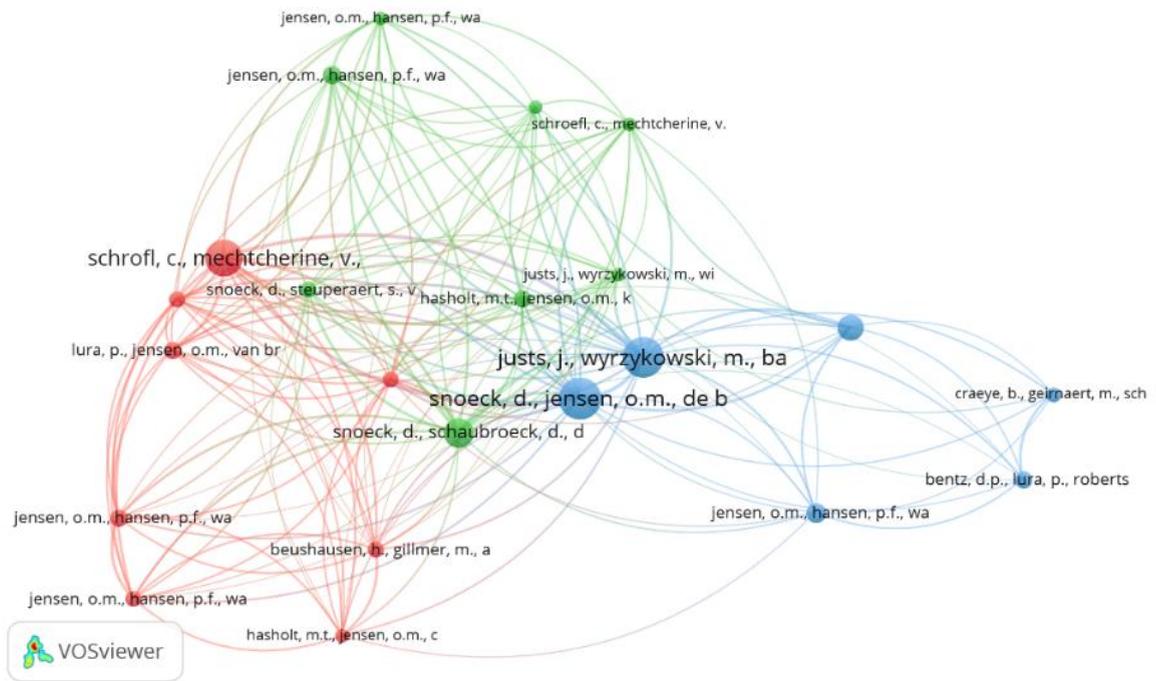


Figura 17: Cocitação de referências (*Scopus*)

Fonte: VOSviewer, 2021

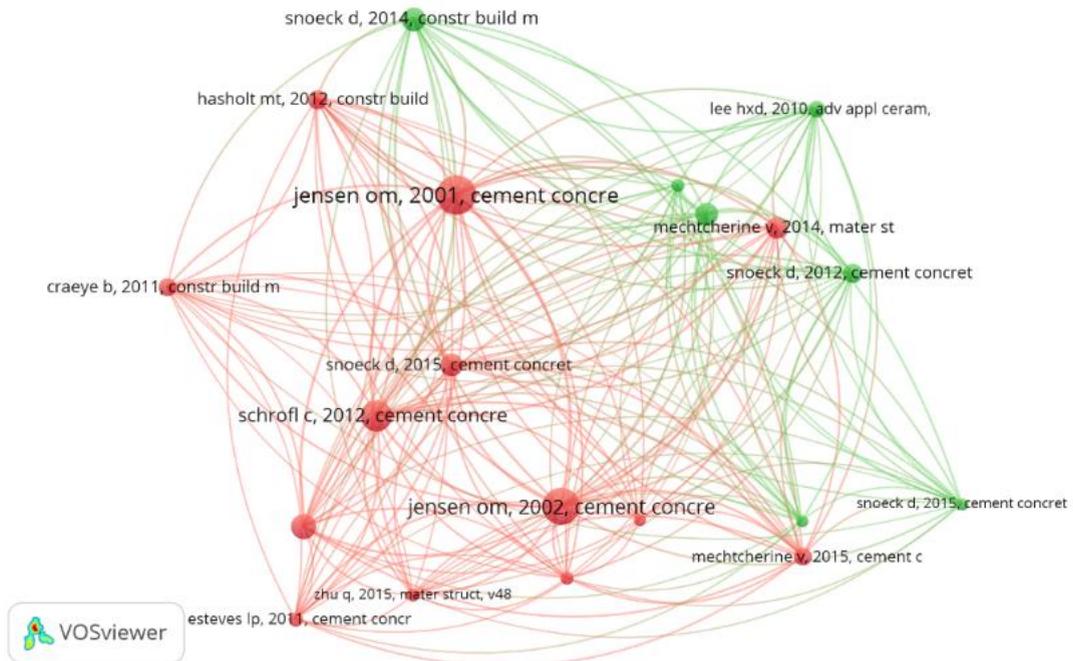


Figura 18: Cocitação de referências (*WOS*)

Fonte: VOSviewer, 2021

2.5.3. Estado da arte

Através das correlações feitas entre os autores e documentos, foi possível observar com maior clareza a afinidade entre eles. Ao fazer uma análise mais profunda dos artigos com maior destaque ao longo deste estudo, foi possível observar os trabalhos de Jensen e Hansen (2001, 2002) são os pontos de partida para a grande maioria dos artigos relacionados ao tema. O primeiro artigo se trata da conceituação e fundamentação teórica acerca do uso dos SAPs em materiais a base de cimento, até então pouco explorados na época. O segundo artigo descreve as observações experimentais em torno do assunto, onde os mesmos descrevem que a utilização do polímero permite uma formação controlada de inclusões de macroporos cheios de água no concreto, prevenindo a retração autógena.

Além destes, Jensen publicou outros trabalhos com autores relevantes, como por exemplo em Snoeck, Jensen; De Belie (2015), onde foram estudadas as reações de pastas de cimento Portland com adição de SAPs e comparadas a pastas onde foram adicionados materiais complementares como cinzas volantes e aglutinantes com escória de alto-forno. O experimento foi bem-sucedido mostrando uma melhora na taxa de retração nas pastas onde os polímeros foram adicionados como agentes de cura interna.

De Belie e Snoeck contribuíram significativamente para o tema, sendo eles o primeiro segundo autores com maior número de publicações, respectivamente, além de possuírem quatro artigos entre os mais citados na área. Dentre os artigos mais citados, Snoeck *et al.* (2014), mostra um estudo da combinação dos SAPs com microfibras onde foi provada a eficiência do polímero agindo como selante em trincas, impedindo a passagem de umidade e auxiliando na auto cura de argamassas. Em um estudo semelhante, Snoeck *et al.* (2012) medem a penetração de água em materiais a base de cimento com SAPs, através de uma radiografia de nêutrons. Nesta pesquisa, foi constatado que a absorção capilar em uma rachadura e a permeabilidade são reduzidas em amostras contendo partículas de SAP.

Em Schröfl, Mechtcherine e Gorges (2012), foi apontado nas análises como o terceiro artigo mais citado em torno do tema. Nele é feita uma relação entre a estrutura molecular e a eficiência de SAPs como agentes de cura interna para mitigar a retração autógena em argamassas. Foi comprovado que o SAP neutralizou a retração autógena no período mais crítico da hidratação do cimento, ou seja, no momento onde é gerado maior calor.

Justs *et al.* (2015) é listado na Tabela 4 como o quinto artigo com maior número de citações na área, neste trabalho é testada a influência dos SAPs em concretos de ultra-alto desempenho. Mostrou-se válida esta combinação, visto que a mesma resultou em um retardo do pico de hidratação principal, diminuindo a retração autógena e a umidade relativa das amostras.

Hasholt *et al.* (2012) apresenta um estudo sobre o possível comprometimento que ocorre na capacidade de compressão ao utilizar SAPs como agente de cura interna para mitigar a retração autógena. O experimento, no entanto, se mostra inconclusivo devido a diferença entre a relação água/cimento da pasta de referência e a pasta com adição de SAP, tornando a comparação inviável.

Em Lee, Wong e Buenfeld (2010), investiga o potencial dos SAPs na vedação de fissuras em concreto. O estudo mostra que a capacidade de expansão dos polímeros está ligada a alcalinidade e do conteúdo iônico da solução. Ainda assim, foi constatado que a taxa de fluxo através de uma fenda foi reduzida substancialmente, usando uma quantidade baixíssima de SAP.

Mechtcherine *et al.* (2014) avalia os efeitos da cura interna usando SAPs para mitigar o encolhimento autógeno, além de apurar outras propriedades em relação a uma granulometria fina em concretos de alto desempenho. Os resultados foram consistentes, mostrando que o concreto teve uma diminuição considerável na retração autógena. Em Mechtcherine, Secrieru e Schröfl (2015), estuda-se os efeitos dos SAPs nas propriedades reologias de argamassas de cimento, onde foi mostrado que isso depende da proporção de água com aglutinante, da dosagem de superplastificante e da dosagem de sílica ativa.

Esteves (2011) investiga o uso de SAPs em conjunto de sílica ativa em pastas de cimento, onde fez-se análises por difração de raios X (DXR), térmica diferencial (DTA) e por meio da técnica termogravimétrica (TGA). Neste experimento, foi possível observar a atividade de cura interna promovida por esta adição, que é traduzida pela hidratação intensificada dos reagentes do cimento.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico deste trabalho consiste na elaboração dos traços de referência de argamassa autoadensável para o CII e CPV sem adição de SAP, ajustes dos traços de AAA com adições de SAP, execução dos ensaios no estado fresco, espera do tempo de cura (seca e úmida) e execução dos ensaios no estado endurecido. Tais etapas são mostradas na Figura 19, por meio de um fluxograma.

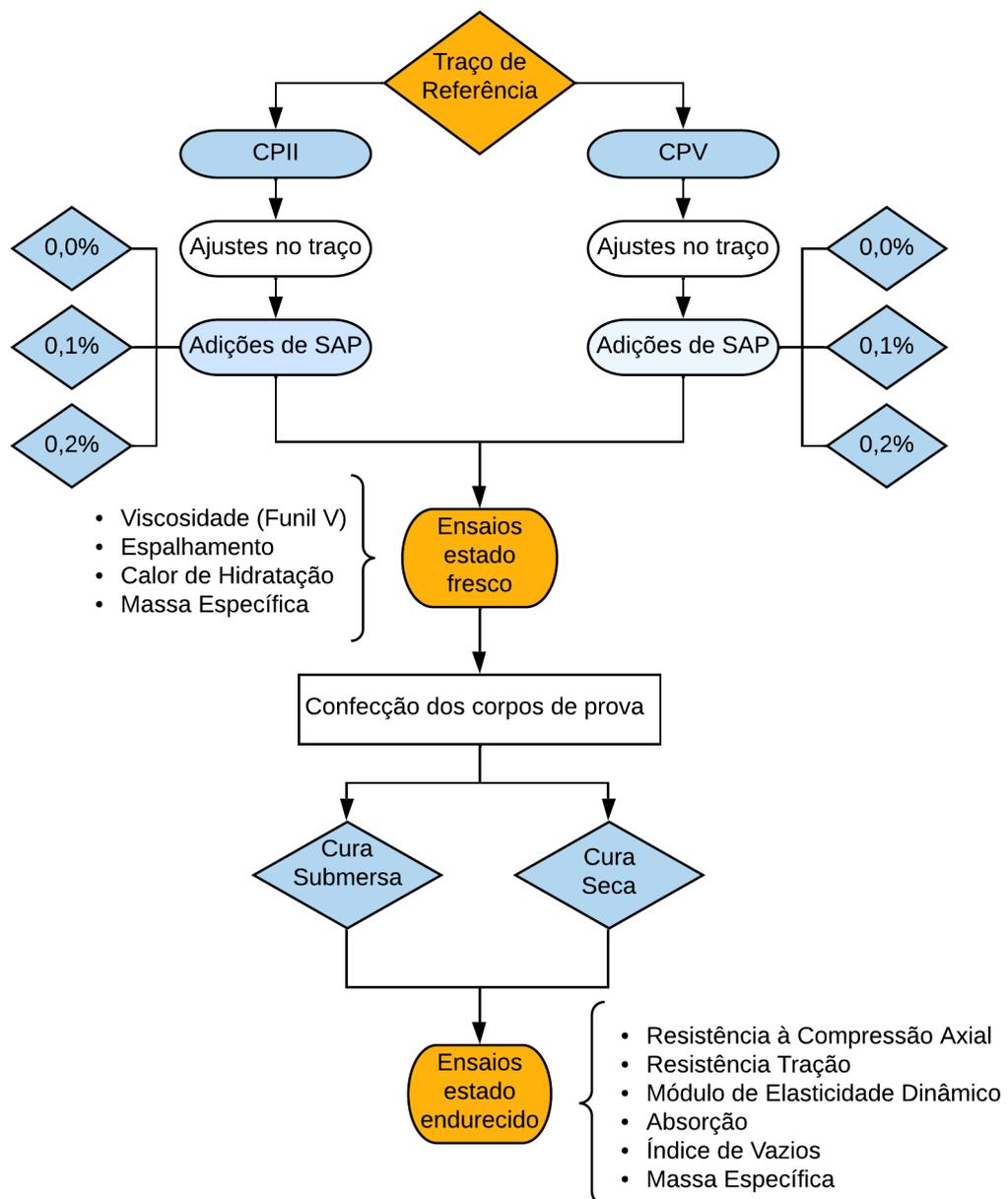


Figura 19: Fluxograma do programa experimental do estudo

Fonte: Autor, 2022

3.1. Materiais

Os materiais para produção das argamassas autoadensáveis com adição de polímero superabsorvente são:

- Cimento Portland de tipo II (CPII-F-32);
- Cimento Portland de tipo V (CPV-ARI);
- Sílica ativa (SA);
- Areia natural quartzosa de diâmetro máximo de 600 μm ;
- Areia natural quartzosa de diâmetro entre 600 μm e 4,8 mm;
- Aditivo superplastificante (SPA);
- Polímero superabsorvente (SAP).

O Cimento Portland de tipo II empregado foi do Grupo Votorantim Cimentos, marca ITAU e do tipo CPII-F-32. As propriedades e características do cimento utilizado neste trabalho são mostradas na Tabela 7 e foram fornecidas pelo site do fabricante.

Tabela 7: Propriedades do CPII-F-32

Norma ABNT NBR	Valor	Unidade
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)	2,99	Kg/dm ³
Tempo de Pega (ABNT NBR 65:2003)	Início	170 min
	Fim	241 min
Resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997)	1 dia	- MPa
	3 dias	25 MPa
	7 dias	31 MPa
	28 dias	39 MPa

Fonte: Adaptado de VOTORANTIMCIMENTOS, 2021.

O Cimento Portland de tipo V de alta resistência inicial empregado foi do Grupo Intercement, marca CAUÊ e do tipo CPV-ARI Estrutura. As propriedades e características do cimento utilizado neste trabalho são mostradas na e foram fornecidas pelo site do fabricante (Tabela 8).

Tabela 8: Propriedades do CPV-ARI

Norma ABNT NBR		Valor	Unidade
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)		3,04	Kg/dm ³
Tempo de Pega (ABNT NBR 65:2003)	Início	142	min
	Fim	220	min
Resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997)	1 dia	27	MPa
	3 dias	37	MPa
	7 dias	42	MPa
	28 dias	48	MPa

Fonte: Adaptado de BRASILINTERCEMENT, 2021

A sílica ativa usada nos traços como agregado neste estudo foi fornecida pela empresa Tecnosil. Trata-se um pó fino pulverizado proveniente da fabricação do silício metálico ou ferro silício. O alto teor de SiO₂ no formato amorfo (não cristalino), em conjunto com uma alta finura, confere altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, garantindo melhor desempenho em concretos e argamassas. A Sílica Ativa possui partículas no formato esférico, vítreas, com diâmetro médio menor do que 1 µm e área superficial específica entre 15 e 25 m²/kg, apresentando altíssima superfície específica e uma massa específica aparentemente baixa (Grupo Tecnosil, 2021). Na Tabela 9 são mostrados os valores das propriedades da sílica ativa empregada.

Tabela 9: Características físicas e químicas da sílica ativa

Características Físicas e químicas	
Massa Específica - kg/m ³	2.220
Teor de SiO ₂ - %	> 90
Superfície Específica - m ² /kg	~ 19.000
Formato da partícula	Esférico
Massa unitária	
Não Densificado - kg/m ³	< 350
Densificado - kg/m ³	> 350

Fonte: Adaptado de Grupo Tecnosil, 2021.

A areia empregada é proveniente do município de Itajubá-MG e foi dividida em uma porção muito fina (passante da peneira de 600 µm) e outra porção (retida na peneira de 600 µm e de diâmetro máximo de 4,8 mm). Esta divisão foi feita de modo a auxiliar na dosagem final nos traços das argamassas.

Utilizou-se como água de amassamento, a água potável proveniente da rede pública de abastecimento do município de Itajubá-MG.

O aditivo superplastificante (SPA) utilizado nos traços foi o SILICON NS HIGH 210, fornecido e fabricado pela empresa Tecnosil. Conforme a empresa, este SPA é um aditivo orgânico à base de policarboxilatos de última geração e proporciona um alto poder de dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água e ganho de resistência mecânica (Grupo Tecnosil, 2018). A Tabela 10 mostra os valores referentes as características deste superplastificante.

Tabela 10: Características físicas e químicas do aditivo superplastificante SILICON NS HIGH 210

Propriedades físicas e químicas	Valores
pH	3,5 a 5,5
Aspecto físico	Líquido
Forma	Líquida
Cor	Mel e castanho
Odor	Característico
Densidade relativa - g/cm ³	1,06 à 1,10
Solubilidade	Solúvel em água
Dosagem	De 0,2 a 2,0 % no peso de cimento

Fonte: Adaptado de Grupo Tecnosil, 2020.

3.1.1. Polímero Superabsorvente Potássico (SAP-k)

O Polímero Superabsorvente Potássico (SAP-k) é um polímero desenvolvido pelo Instituto Granado de Tecnologia da Poliácrlonitrila (IGTPAN) e sua principal característica é reter água. O SAP-k reticulado tem capacidade de absorver 300 vezes seu peso em água (Figura 20)



Figura 20: Amostra de SAP

Fonte: Autor, 2021

Ao entrar em contato com água, se transforma em uma substância gelatinosa, conhecida como HIDROGEL. Após liberar toda sua água, o SAP-k retorna ao seu estado original (granular) com capacidade ativa média de 3 a 5 anos, capazes de absorver novas irrigações ou águas pluviais sem modificar sua estrutura (IGTPAN, 2021). A Tabela 11 mostra as características do SAP-k utilizado nos experimentos.

Tabela 11: Características do Polímero Superabsorvente usado

Aparência	Granular amarelado
Tamanho de partícula (mm)	0,6 - 2,5
Densidade relativa (g/cm ³)	1,1
pH concentração 1 g/L	7 - 9
Solubilidade em água	Insolúvel
Absorção (g água/g SAP)	200 - 400
Tempo (min) para alcançar 60% de absorção	10
Estabilidade aos raios UV	Alta resistência aos raios UV
Estabilidade média produto em solo (anos)	3 - 5
Residual de Acrilamida (ppm)	< 1,0
Residual de Ácido acrílico (ppm)	< 1,0
Concentração de Potássio (%)	>20%
Concentração de Nitrogênio (%)	>10%

Fonte: Adaptado de IGTPAN, 2021

O SAP-k fornecido pelo IGTPAN, é obtido através de um processo de reciclagem química da Poliacrilonitrila, esta que é comumente utilizada para aplicações têxteis devido a suas características similares a lã. Ela possui características especiais como: baixa densidade, estabilidade térmica, alta resistência e módulo de elasticidade, estabilidade a degradação por raios UV. A Figura 21 mostra o processo de reciclagem IGTPAN para a produção do SAP.

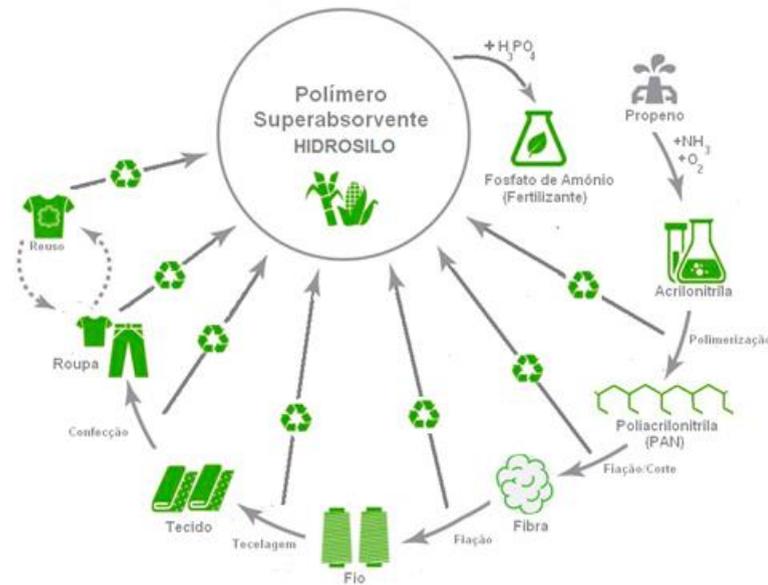


Figura 21: Processo de reciclagem IGTPAN

Fonte: IGTPAN, 2021

3.2. Métodos

Nesta pesquisa, para se alcançar os traços de referência de AAA adequados (CPII-F-32 e CPV-ARI) e executar as adições de Polímero Superabsorvente (SAP), tomou-se como base o traço desenvolvido por Silva (2019), no qual utilizou o método de dosagem proposto por Tutikian (2004), e parte do método prático e experimental de Helene e Terzian (1992).

O programa experimental se divide em duas partes, sendo a primeira, um ajuste do traço proposto por Silva (2019), de modo a obter os traços de referência, fazendo as devidas adequações para que sejam empregados ao estudo. Iniciando com uma relação a/c de 0,50 e com 1,5% de superplastificante em relação ao peso de cimento, até se obter a consistência apropriada.

A segunda etapa, em posse dos traços de referência, elaborou-se os traços com as adições de SAP, observando o comportamento da argamassa e fazendo as devidas correções para que as mesmas continuem com características autoadensáveis.

Na execução dos traços, primeiro foram adicionados os agregados secos (cimento, sílica ativa, areia fina, areia grossa e SAP), sendo estes misturados seguida. Após isto foi adicionada a água de amassamento e por último o SPA. Na sequência, foram feitas as adições devidas, de modo a alcançar as propriedades. Deste modo, chegou-se aos traços mostrados na Tabela 12.

Tabela 12: Traços unitários em massa utilizados na AAA

Traços	Cimento	Sílica	Areia fina	Areia grossa	SPA	a/c	SAP
CPII-F-32 REF	1,00	0,10	1,5	1,3	2,3%	0,6	0,00
CPII-F-32 0,1%	1,00	0,10	1,6	1,4	2,7%	0,7	0,01
CPII-F-32 0,2%	1,00	0,10	1,6	1,4	2,4%	0,6	0,02
CPV-ARI REF	1,00	0,06	1,5	1,3	1,7%	0,5	0,00
CPV-ARI 0,1%	1,00	0,06	1,6	1,4	2,0%	0,6	0,01
CPV-ARI 0,2%	1,00	0,06	1,6	1,4	2,1%	0,6	0,02

Fonte: Autor, 2022

Após esta etapa, executou-se os ensaios no estado fresco e em seguida a moldagem dos corpos de prova. A desmoldagem foi feita 24 horas depois e a partir disto, metade dos corpos de provas foram submersos em água potável para a cura e a outra metade, separados para passar por uma cura seca, ambas de 28 dias (Figura 22). Desta forma, tem-se um total de 12 (doze) traços, se diferenciando pela porcentagem de SAP (0; 0,1; 0,2), tipo de cura (seca ou submersa) e o tipo de cimento (CPII-F-32 e CPV-ARI), conforme é mostrado na Tabela 13.



Figura 22: Corpos de prova durante a cura (Esquerda - submersa e direita – seca)

Fonte: Autor, 2022

Tabela 13: Diferenciação dos traços de argamassa autoadensável

Traço	% SAP	Tipo de Cura	Tipo de Cimento
1	0	submersa	CPII-F-32
2	0	seca	CPV-ARI
3	0,1	sub	CPII-F-32
4	0,1	seca	CPV-ARI
5	0,2	sub	CPII-F-32
6	0,2	seca	CPV-ARI
7	0	sub	CPII-F-32
8	0	seca	CPV-ARI
9	0,1	sub	CPII-F-32
10	0,1	seca	CPV-ARI
11	0,2	sub	CPII-F-32
12	0,2	seca	CPV-ARI

Fonte: Autor, 2022

3.3. Ensaio no estado fresco

Os ensaios no estado fresco foram os primeiros a serem realizados, eles serviram para garantir e comprovar o desempenho autoadensável da argamassa, além de exibir os valores em relação a massas específicas dos corpos de prova recém preenchidos e obter os dados térmicos do início da cura das argamassas. A Tabela 14 mostra a quantidade de corpos de prova utilizados em cada ensaio, para cada porcentagem de SAP e tipos de cimento, assim como a norma ou método utilizado na execução.

Tabela 14: Quantidade de CPs usados em cada ensaio no estado fresco

Ensaio no estado fresco	Norma / Método	Nº Corpos de Prova Ø 5 x 10 cm					
		CPII-F-32			CPV-ARI		
		0%	0,10%	0,20%	0%	0,10%	0,20%
Massa específica aparente	NBR 9833:2009	3	3	3	3	3	3
Índice de consistência	Okamura e Ouchi (1999)	Não utilizam corpos de prova					
Viscosidade plástica aparente							
Calor de Hidratação	NBR 12006:1990	3	3	3	3	3	3

Fonte: Autor, 2022

3.3.1. Massa específica aparente

De acordo com a NBR 9833:2009, massa específica é a massa da unidade de volume da argamassa fresca adensada, incluindo o volume de ar aprisionado e incorporado.

Para a realização deste ensaio, os cilindros metálicos (\varnothing 5 cm e altura 10 cm) foram preenchidos totalmente com as argamassas e anotou-se a massa, já descontando a massa do próprio cilindro vazio. Em seguida, para se obter o valor de massa específica aparente, usou-se a equação seguinte:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{(V \times 1000)}$$

Sendo:

ρ_{ap} : massa específica aparente do concreto (kg/m³);

m: massa de concreto (kg);

V: volume do cilindro (dm³);

3.3.2. Índice de consistência - Diâmetro de espalhamento

Para se obter o diâmetro de espalhamento é feito o ensaio de índice de consistência. Tal procedimento viabiliza analisar a capacidade de escoamento da argamassa somente pela ação do próprio peso e sua habilidade de preenchimento. Consiste no preenchimento de um tronco de cone (Figura 23) sem adensamento, o qual é suspenso verticalmente e, após a argamassa parar de se movimentar, são medidos dois diâmetros ortogonais.

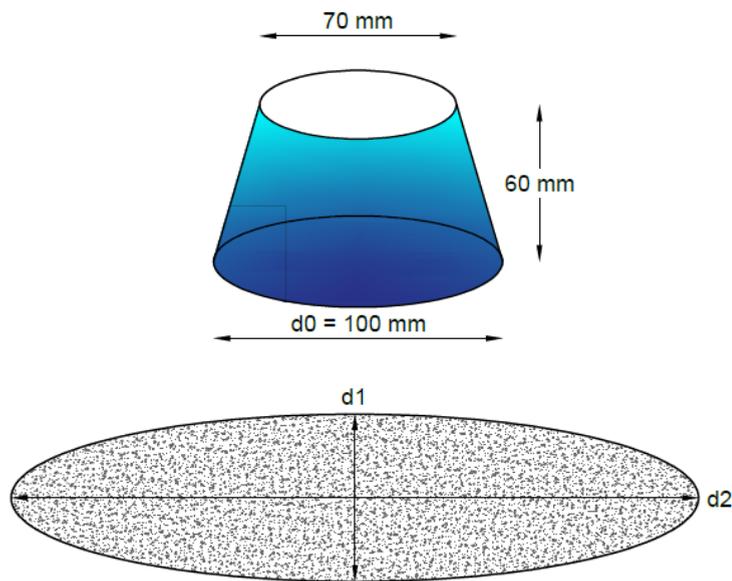


Figura 23: Teste de espalhamento para argamassas

Fonte: Adaptado de OKAMURA e OUCHI, 2003

Utilizando método de dosagem proposto por Okamura e Ouchi (2003), a partir das duas medidas perpendiculares obtidas pelo ensaio de espalhamento para argamassas pode-se calcular o índice de espalhamento relativo para argamassas (G_m) a partir da equação a seguir:

$$G_m = \frac{(d_1 \times d_2 - d_0^2)}{d_0^2}$$

Em que:

G_m : Índice de espalhamento relativo para argamassas.

d_1 : primeiro diâmetro do espalhamento obtido com o mini cone para argamassas.

d_2 : segundo diâmetro do espalhamento obtido com o mini cone para argamassas.

d_0^2 : diâmetro da base do mini cone para argamassas.

Tomou-se como valor ideal um $G_m = 5$, colocando como limites os valores de 3 até 7 que equivalem a diâmetros de espalhamento iguais a 200 até 280.

3.3.3. Viscosidade plástica aparente – Funil V

Para se determinar a dosagem de argamassa seguindo o método de Okamura e Ouchi (2003), será realizado o ensaio do Funil V, de seção retangular. O ensaio consiste em medir o

tempo necessário para que a argamassa possa escoar pelo funil resistindo à segregação. Preenche-se o funil por completo sem o adensamento da argamassa e abre-se a portinhola inferior. Com o auxílio de um cronômetro, mede-se o tempo de escoamento da argamassa até que a luz seja visível através da parte superior do equipamento. A Figura 24 apresenta as dimensões do Funil-V a ser utilizado para medir o tempo de escoamento relativo para argamassas.

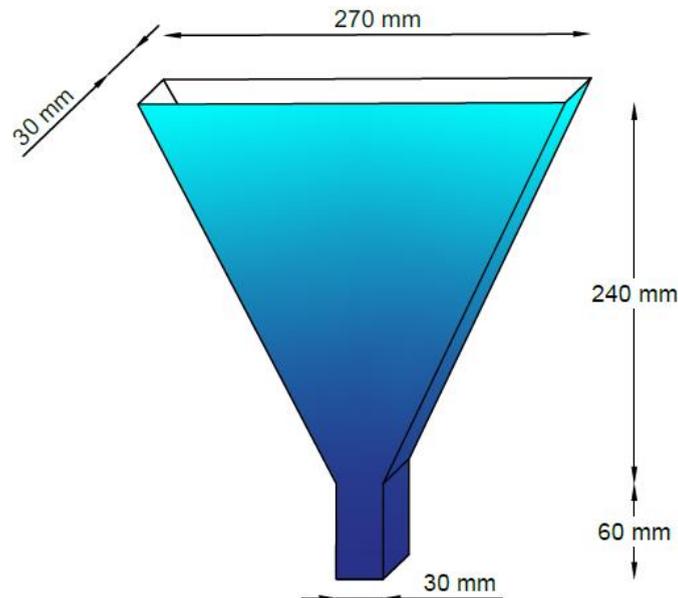


Figura 24: Ensaio do funil para argamassas

Fonte : Adaptado de OKAMURA e OUCHI, 2003

Após cronometrar o tempo de escoamento do funil-V para argamassas é possível determinar o tempo relativo de escoamento para argamassas (R_m), utilizando método de dosagem proposto por Okamura e Ouchi (1999), por meio da equação a seguir:

$$R_m = \frac{10}{\text{Tempo de escoamento (seg)}}$$

Em que:

R_m : Tempo relativo de escoamento para argamassas.

De acordo com Takada et al. (2000), argamassas com valores de $G_m = 5$ e $R_m = 1$ são classificadas como aceitáveis para obter concretos com características autoadensáveis. Edamatsu et al. (1999) obtiveram valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm, e de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos

tempos de fluxo de 5 a 10 segundos. Domone e Jin (1999) sugerem G_m maior que 8, equivalentes a diâmetros de espalhamento maior que 300 mm e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo (t) de 2 a 10 segundos. Alto valor de G_m indica maior deformabilidade, e menor valor de R_m indica maior viscosidade.

3.3.4. Calor de Hidratação

O objetivo deste ensaio é medir o calor de hidratação dos traços de argamassa por meio de um calorímetro semi-adiabático, seguindo a NBR 12006 (1990) Cimento – Determinação do Calor de Hidratação pelo Método da Garrafa de Langavant.

Para a execução do ensaio, foi usado uma placa de aquisição de dados térmicos da marca National Instruments, modelo cDAQ – 9171. Em conjunto, usou um Termopar do tipo K e para capturar os sinais emitidos pela placa, o *software* LABTRIX (Figura 25).



Figura 25: Placa de aquisição de dados térmicos e a interface do LABTRIX

Fonte: Autor, 2022

O tempo de análise para cada um dos traços foi de duas horas, começando a ser medido logo após o termino de confecção dos mesmos.

3.4. Ensaio no estado endurecido

Os ensaios executados foram: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, absorção, índice de vazios, massa específica, módulo de elasticidade

dinâmico. A quantidade de corpos de prova utilizada e a norma ou método adotado são mostrados na Tabela 15

Tabela 15: Quantidade de CPs usados em cada ensaio no estado endurecido

Ensaio no estado endurecido	Norma / Método	N° Corpos de Prova Ø 5 x 10 cm					
		CPII-F-32			CPV-ARI		
		0%	0,10%	0,20%	0%	0,10%	0,20%
Resistência à Compressão Axial	NBR 5739:2007	6	6	6	6	6	6
Resistência à Tração	NBR 7222:2011	6	6	6	6	6	6
Módulo de Elasticidade Dinâmico	ASTM 1876-01	6	6	6	6	6	6
Absorção de Água, Índice Vazios e Massa Específica	NBR 9778:2005	6	6	6	6	6	6
Observação: a quantidade mostrada é referente a somatória de CPs de cura seca e submersa (3 de cada)							

Fonte: Autor, 2022

3.4.1. Ensaio de resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão axial para argamassas foi realizada utilizando a máquina INSTRON 8801, com corpos-de-prova cilíndricos moldados com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Os corpos-de-prova devem ser mantidos em processo de cura úmida até a idade do ensaio. Antes da execução do ensaio, devem ser preparadas as bases dos corpos-de-prova. Em sequência, aplica-se carga de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s até a ruptura do corpo de prova (ABNT NBR 5739:2007).

3.4.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

De acordo com a NBR 7222:2011, mediante ao ensaio de tração por compressão axial, são coletados resultados de resistência à tração de forma indireta. Nele, também são usados os corpos de prova cilíndricos moldados com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O ensaio consiste em posicionar um corpo de prova na posição horizontal apoiada por duas chapas de madeira sobre o prato da máquina de compressão. Aplica-se a carga de maneira contínua, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura do corpo de prova.

3.4.3. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Seguindo a norma NBR 9778:2005, realizou-se o ensaio no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). As medidas da massa foram coletadas através de uma balança SHIMADZU, modelo UX6200H com precisão de 0,01 g. Foram produzidos 3 corpos de provas para cada traço das argamassas autoadensáveis que foram ensaiados aos 28 dias. Para os ensaios, os corpos de prova de 150cm³ são colocados primeiramente na estufa onde à temperatura de (105 ± 5)°C por um período de 72 horas, sendo registradas as suas massas em estado seco após isto. Para se obter a massa submersa, as amostras devem permanecer submersas em água à uma temperatura de (23 ± 5) por 72 horas, sendo pesadas de forma hidrostática. Em seguida as amostras devem ser retiradas da água e enxugadas com um pano úmido, de modo a obter a massa saturada das mesmas.

A absorção de água é calculada através da seguinte expressão:

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100$$

Onde:

M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado

M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa

O índice de vazios é calculado pela expressão abaixo:

$$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100$$

Onde:

M_i = massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água

A massa específica real (ρ_r) é calculada pela expressão seguinte:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

3.4.4. Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi executado no Laboratório de Materiais para Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Onde utilizou o

equipamento Sonelastic para a realização da Técnica de Excitação por Impulso (TEI), na seguinte configuração:

- Software Sonelastic versão 3.0;
- Suporte ajustável para barras;
- Cilindros SA-BC;
- Captador acústico direcional CA-DP;
- Pulsador manual.

Baseado na ASTM E1876 (2015) os corpos de prova foram submetidos à Técnica de Excitação por Impulso (TEI). Inicialmente, registrou-se os comprimentos, diâmetros e as massas dos corpos de prova que, na sequência, foram apoiados sobre um suporte ajustável, Figura 3.13. Em seguida, por meio de um impulsor manual, cada corpo de prova recebeu leves batidas provocando respostas acústicas as quais foram detectadas por um captador acústico. Estas respostas acústicas foram processadas pelo software *Sonelastic*® versão 3.0 para o cálculo dos módulos de elasticidade e do amortecimento de cada corpo de prova.

Foram feitos 3 corpos de provas para cada traço das argamassas autoadensáveis que foram ensaiados aos 28 dias. A Figura 26 e a Figura 26 mostram o equipamento durante a execução do ensaio e a interface do Software Sonelastic versão 3.0, respectivamente.

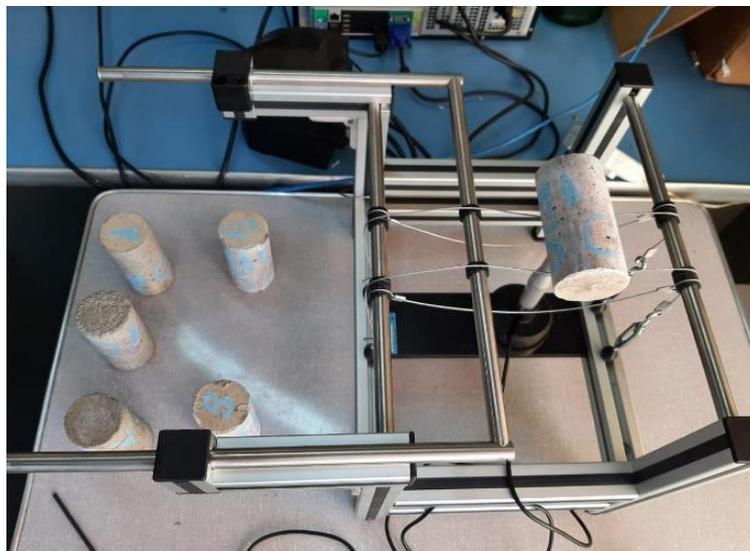


Figura 26: Suporte para realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico

Fonte: Autor, 2021

4. RESULTADOS

As análises realizadas neste trabalho são do tipo quantitativa, com avaliação dos dados numéricos, a fim de compreender seus comportamentos e eventuais tendências. O primeiro e segundo subcapítulos mostram os resultados obtidos para as argamassas no estado fresco e estado endurecido, respectivamente. O subcapítulo 3 exibe os resultados obtidos através de análises estatísticas referentes ao programa experimental executado

4.1. Propriedades no estado fresco

A apresentação dos resultados no estado fresco das AAAs é realizada nesta etapa. Para isso, são feitas subdivisões para melhor organização das análises.

4.1.1. Massa específica

Os resultados para os ensaios de massa específica (3 amostras CPs para cada traço), são apresentados na Tabela 16 e Tabela 17, sendo realizados conforme prescreve a ABNT NBR 9833:2009.

Tabela 16: Massa específica no estado fresco - CPII

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Massa específica(g/cm ³)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	2,22	2,17	2,18	2,19
3	0	seca	CPII	2,22	2,17	2,18	2,19
5	0,1	sub	CPII	2,15	2,13	2,11	2,13
7	0,1	seca	CPII	2,15	2,13	2,11	2,13
9	0,2	sub	CPII	2,16	2,12	2,16	2,15
11	0,2	seca	CPII	2,16	2,12	2,16	2,15

Fonte: Autor, 2022

Tabela 17: Massa específica no estado fresco - CPV

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Massa específica(g/cm ³)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	2,21	2,18	2,18	2,19
4	0	seca	CPV	2,21	2,18	2,18	2,19
6	0,1	sub	CPV	2,11	2,11	2,14	2,12
8	0,1	seca	CPV	2,11	2,11	2,14	2,12
10	0,2	sub	CPV	2,17	2,13	2,12	2,14
12	0,2	seca	CPV	2,17	2,13	2,12	2,14

Fonte: Autor, 2022

Após a realização do ensaio, através da comparação dos resultados, foi possível notar que os traços com adição de SAP apresentaram massas específicas menores do que os traços de referência, isso tanto para o Cimento Portland de tipo II quanto para o de tipo V. Isto já era esperado devido ao SAP possuir menor massa específica do que os agregados convencionais, porém, para os dois tipos de cimento houve um leve aumento nos valores de massa específica das argamassas com 0,2% de SAP em relação as com 0,1%. Este leve aumento pode ser explicado devido as propriedades de inchamento do SAP, ou seja, a água adicional incorporada tomou o lugar de espaços vazios elevando novamente esta massa específica. Tais resultados se assemelham com os apresentados em Kumm (2009) onde as massas específicas de pastas de cimento diminuíram com a inclusão de SAP, tanto com a mistura sendo feita com o SAP saturado, seco e úmido. Em Suarez (2015), o mesmo ocorreu onde as massas específicas de microconcretos com diferentes porcentagem de SAP (0,1%; 0,2% e 0,3%) diminuíram conforme foram feitas as adições.

4.1.2. Ensaio de espalhamento (Slump flow test)

Os resultados para o ensaio de espalhamento das AAAs de referência e as com 0,1% e 0,2% de SAP são mostrados na Tabela 18 e Tabela 19, realizados de acordo com o Método de Okamura e Ouchi (2003) e usando os parâmetros citados na metodologia do trabalho. Se baseando nos parâmetros apresentados pelos autores anteriormente citados no capítulo de Matérias e Métodos, tomou-se como valor ideal um $G_m = 5$, colocando como limites os valores de 3 até 7 que equivalem a diâmetros de espalhamento iguais a 200 até 280.

Tabela 18: Ensaio de espalhamento - CPII

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	d1	d2	d0	Gm (3 < Gm < 7)
1	0	sub	CPII	270	265	100	6,2
3	0	seca	CPII	270	265	100	6,2
5	0,1	sub	CPII	265	255	100	5,8
7	0,1	seca	CPII	265	255	100	5,8
9	0,2	sub	CPII	230	225	100	4,2
11	0,2	seca	CPII	230	225	100	4,2

Fonte: Autor, 2022

Tabela 19: Ensaio de espalhamento - CPV

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	d1	d2	d0	Gm (3 < Gm < 7)
2	0	sub	CPV	275	275	100	6,6
4	0	seca	CPV	275	275	100	6,6
6	0,1	sub	CPV	260	270	100	6,0
8	0,1	seca	CPV	260	270	100	6,0
10	0,2	sub	CPV	275	280	100	6,7
12	0,2	seca	CPV	275	280	100	6,7

Fonte: Autor, 2022

Com os resultados apresentados na Tabela 18 e Tabela 19, é possível afirmar que a adição do polímero superabsorvente, altera o comportamento de espalhamento das AAAs no estado fresco. Nota-se que todas as argamassas estão dentro dos limites para serem consideradas autoadensáveis, porém, isto só foi possível devido aos ajustes feitos no traço para que o mesmo alcançasse a consistência desejada. Durante a realização do ensaio, notou-se que o SAP, que tem como característica, absorver grandes quantidades de líquidos, “sugou” parte do volume de água de amassamento disponível, consequentemente diminuindo a capacidade de fluidez dos traços e impedindo que os mesmos obtivessem um diâmetro de espalhamento mínimo (200mm). É importante destacar que as argamassas com CPV-ARI apresentaram diâmetros de espalhamento maiores que as com CII-F-32, isso já era esperado por se tratar de um tipo de cimento mais comumente usados para compósitos cimentícios autoadensáveis e permitir melhor fluidez no traço durante o estado fresco.

Esses resultados convergem com os de Schröfl et al, (2012), onde os autores investigaram a absorvidade do SAP ao adicionar nas misturas diferentes teores e tipos de SAP. Uma vez que o SAP absorve água da mistura, é muito importante compensar essa água (perdida) com a adição de água extra para garantir a trabalhabilidade requerida da mistura em estado fresco.

Na Figura 28 e Figura 29, são mostrados os ensaios de espalhamento dos traços usando CII-F-32 e CPV-ARI, respectivamente. É possível notar pelas figuras que todos os traços, após os ajustes já citados anteriormente, apresentaram boa fluidez e homogeneidade, atendendo os limites para serem considerados autoadensáveis, sem apresentar exsudação ou segregamento.

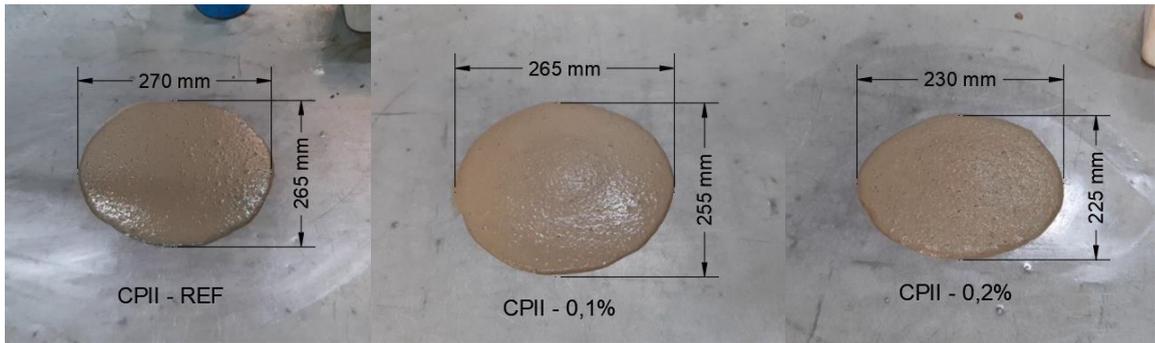


Figura 28: Ensaio de Espalhamento do traço CII-F-32, 0% (esquerda), 0,1% (centro) e 0,2% (direita)

Fonte: Autor, 2021

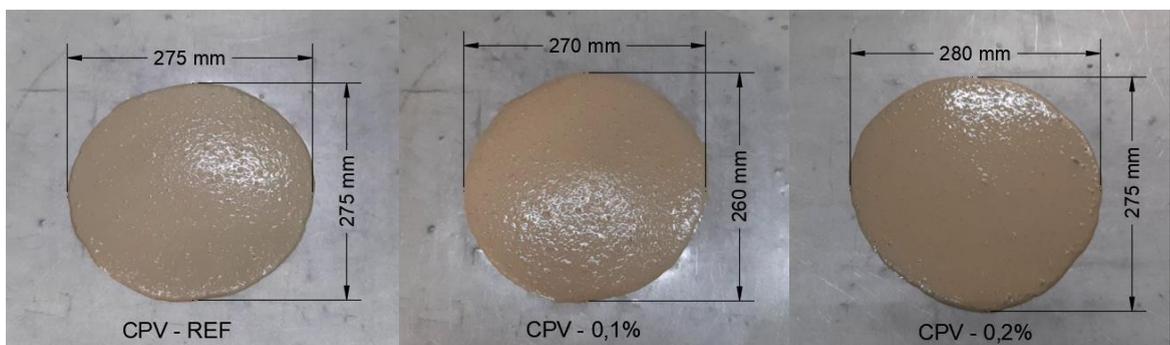


Figura 29: Ensaio de Espalhamento do traço CPV-ARI, 0% (esquerda), 0,1% (centro) e 0,2% (direita)

Fonte: Autor, 2021

4.1.3. Viscosidade plástica aparente – Funil V

Os resultados para os ensaios de Viscosidade plástica aparente das argamassas produzidas com CII-F e CPV-ARI são mostrados na Tabela 20 e Tabela 21, respectivamente, onde foram realizados de acordo com o método de Okamura e Ouchi (2003), adotando-se um valor mínimo para o R_m de 1 e máximo de 2, o que equivale a um tempo de escoamento inferior a 10 segundos, enquanto a Figura 30 mostra durante o procedimento de execução do ensaio.

Tabela 20: Viscosidade plástica aparente para o CII

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Tempo (s)	R_m ($1 < R_m < 2$)
1	0	sub	CII	9	1,1
3	0	seca	CII	9	1,1
5	0,1	sub	CII	9	1,1
7	0,1	seca	CII	9	1,1
9	0,2	sub	CII	10	1,0
11	0,2	seca	CII	10	1,0

Fonte: Autor, 2022

Tabela 21: Viscosidade plástica aparente para o CPV

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Tempo (s)	Rm ($1 < R_m < 2$)
2	0	sub	CPV	8	1,3
4	0	seca	CPV	8	1,3
6	0,1	sub	CPV	7	1,4
8	0,1	seca	CPV	7	1,4
10	0,2	sub	CPV	9	1,1
12	0,2	seca	CPV	9	1,1

Fonte: Autor, 2022

A partir das Tabela 20 e Tabela 21, foi possível notar que as todos os traços se apresentaram dentro dos limites propostos pela metodologia aplicada ($1 < R_m < 2$), tendo um tempo de escoamento menor do que 10 segundos. Isto foi possível também devidos aos ajustes feitos na fase do ensaio de espalhamento, que permitiu que os traços obtivessem, consequentemente, a viscosidade plástica aparente adequada. As argamassas produzidas com CPV-ARI apresentaram tempos de escoamento menores que as com CII-F, isso já era esperado por se tratar de um tipo de cimento mais adequado para compósitos autoadensáveis, por oferecer melhor fluidez no traço durante o estado fresco.



Figura 30: Ensaio de viscosidade plástica aparente

Fonte: Autor, 2021

4.1.4. Calor de Hidratação

O ensaio de calor de hidratação foi aplicado, baseando-se na NBR 12006 (1990), para isso, foi feita uma adaptação de modo a simular as condições de uma câmara semi-adiabática (Figura 31).



Figura 31: Câmara semi-adiabática adaptada

Fonte: Autor, 2021

Os resultados estão descritos na Tabela 22 e Tabela 23, explanando os valores detectados por cada um dos termopares, tanto para os traços com CPII-F-32 (Traços ímpares: 1; 3; 5; 7; 9 e 11) quanto para os com CPV-ARI (Traços pares: 2; 4; 6; 8; 10 e 12). Ao final das tabelas é feita uma comparação para se saber a variação da temperatura durante o experimento, onde é colocada a diferença de valores de temperatura inicial para a temperatura final.

Tabela 22: Captação individual dos termopares no CPII-F-32

n° amostra	Termopar 1			Termopar 2			Termopar 3		
	1 e 3	5 e 7	9 e 11	1 e 3	5 e 7	9 e 11	1 e 3	5 e 7	9 e 11
% de SAP	0,00%	0,10%	0,20%	0,00%	0,10%	0,20%	0,00%	0,10%	0,20%
00:00:00	23,1	23,9	21,7	23,1	23,4	21,5	23,6	23,9	22
00:15:00	24,2	25,2	22,3	23	23,6	20,2	24,2	24,9	22
00:30:00	25,8	25,8	22,8	24,5	24,1	20,6	26	25,6	23,8
00:45:00	26,7	26,5	23,7	25,5	24,6	21,2	27	26,4	24,7
01:00:00	27,4	26,6	23,6	26,1	24,4	20,9	27,8	26,4	25
01:15:00	27,6	27,2	23,6	26,2	25,1	21,1	28,2	26,8	24,8
01:30:00	28,2	27,4	24,4	26,9	25,4	21,7	28,9	27,1	26
01:45:00	28,5	27,1	24,4	27,2	24,9	21,9	29,1	26,9	25,2
02:00:00	28,6	27,3	24,9	27,3	25,4	22	29,3	26,8	26,5
Tf - Ti	5,5	3,4	3,2	4,2	2	0,5	5,7	2,9	4,5

Fonte: Autor, 2021

Tabela 23: Captação individual dos Termopares no CPV-ARI

n° amostra	Termopar 1			Termopar 2			Termopar 3		
	2 e 4	6 e 8	10 e 12	2 e 4	6 e 8	10 e 12	2 e 4	6 e 8	10 e 12
% de SAP	0,00%	0,10%	0,20%	0,00%	0,10%	0,20%	0,00%	0,10%	0,20%
00:00:00	23,3	21,4	22,5	21,9	20,2	21,5	23,6	19,7	20,7
00:15:00	23,5	18,9	18,7	20,8	16,2	16,9	24,1	16,4	16,4
00:30:00	24,4	20,2	19,6	21,5	18,1	18,1	25,7	18,6	17,6
00:45:00	25,3	22	20	22,4	19,8	18,8	26,8	20,3	18,6
01:00:00	25,7	22,9	21,1	22,7	20,5	20	27,2	20,7	19,9
01:15:00	26,8	23,2	21,5	23,7	22	20,2	28,3	22,3	20,2
01:30:00	26,8	23,7	21,3	23,5	22,5	20,1	28,6	22,8	19,8
01:45:00	27	23,8	21,7	23,8	22,5	20,3	28,9	22,7	20,2
02:00:00	27,5	23,8	22,3	24,6	22,4	20,9	29,4	22,7	20,9
Tf - Ti	4,2	2,4	-0,2	2,7	2,2	-0,6	5,8	3	0,2

Fonte: Autor, 2021

A Tabela 24 e Tabela 25 mostram as médias de temperaturas detectadas pelos Termopares, onde é possível notar uma queda na variação das mesmas conforme o aumento da adição de SAP no CPII-F-32 e no CPV-ARI.

Tabela 24: Médias dos Termopares no CPII-F-32

Média dos Termopares			
n° amostra	1 e 3	5 e 7	9 e 11
% de SAP	0,00%	0,10%	0,20%
00:00:00	23,27	23,73	21,73
00:15:00	23,80	24,57	21,50
00:30:00	25,43	25,17	22,40
00:45:00	26,40	25,83	23,20
01:00:00	27,10	25,80	23,17
01:15:00	27,33	26,37	23,17
01:30:00	28,00	26,63	24,03
01:45:00	28,27	26,30	23,83
02:00:00	28,40	26,50	24,47
Tf - Ti	5,13	2,77	2,73

Fonte: Autor, 2021

Tabela 25: Médias dos Termopares no CPV-ARI

Média dos Termopares			
n° amostra	2 e 4	6 e 8	10 e 12
% de SAP	0,00%	0,10%	0,20%
00:00:00	22,93	20,43	21,57
00:15:00	22,80	17,17	17,33
00:30:00	23,87	18,97	18,43
00:45:00	24,83	20,70	19,13
01:00:00	25,20	21,37	20,33
01:15:00	26,27	22,50	20,63
01:30:00	26,30	23,00	20,40
01:45:00	26,57	23,00	20,73
02:00:00	27,17	22,97	21,37
Tf - Ti	4,23	2,53	-0,2

Fonte: Autor, 2021

Esta queda pode ser melhor visualizada nas Figura 32: Variação de temperatura ao longo do tempo (CPII-F-32)

Fonte: Autor, 2022

Figura 33, onde nota-se que os traços com adição de SAP tiveram uma diminuição no seu pico de calor. No caso do CPV, ainda houve uma queda de temperatura nos primeiros minutos. Este controle do calor de hidratação no início do processo de cura é muito importante, pois evita o fenômeno de auto secagem, onde a água é consumida por esse calor, diminuindo a quantidade disponível para a hidratação da matriz cimentícia, o que pode ocasionar em fissuras por retração (MEHTA, MONTEIRO, 2006).

Estes resultados coincidem com os apresentados por Kumm (2009), onde foram medidas as variações de temperatura e a umidade relativa de pastas de cimento. Os traços com adição de SAP apresentaram picos de temperatura menores que os traços de referência, o que favoreceu o processo de cura interna das pastas com o controle do calor de hidratação.

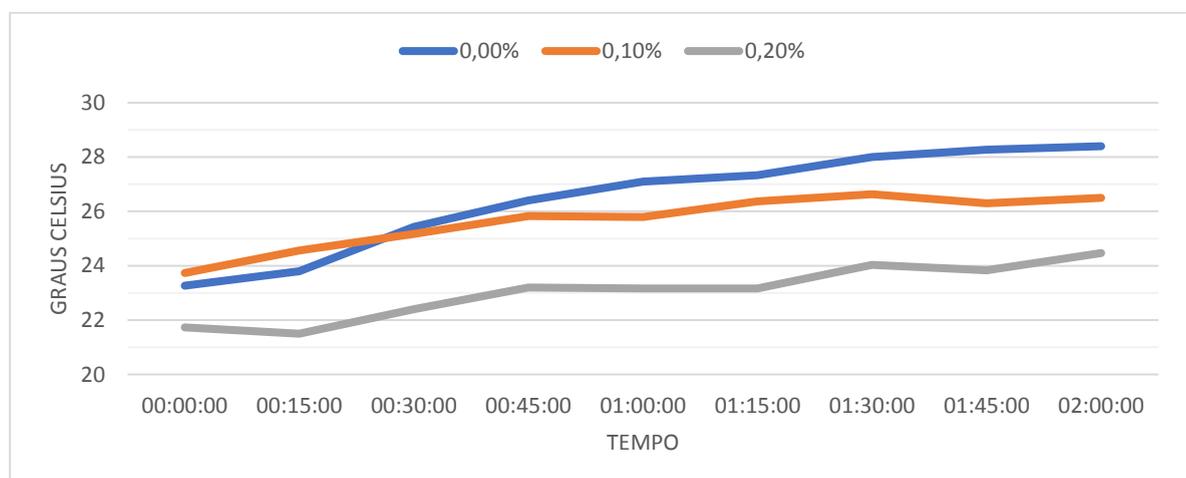


Figura 32: Variação de temperatura ao longo do tempo (CPII-F-32)

Fonte: Autor, 2022

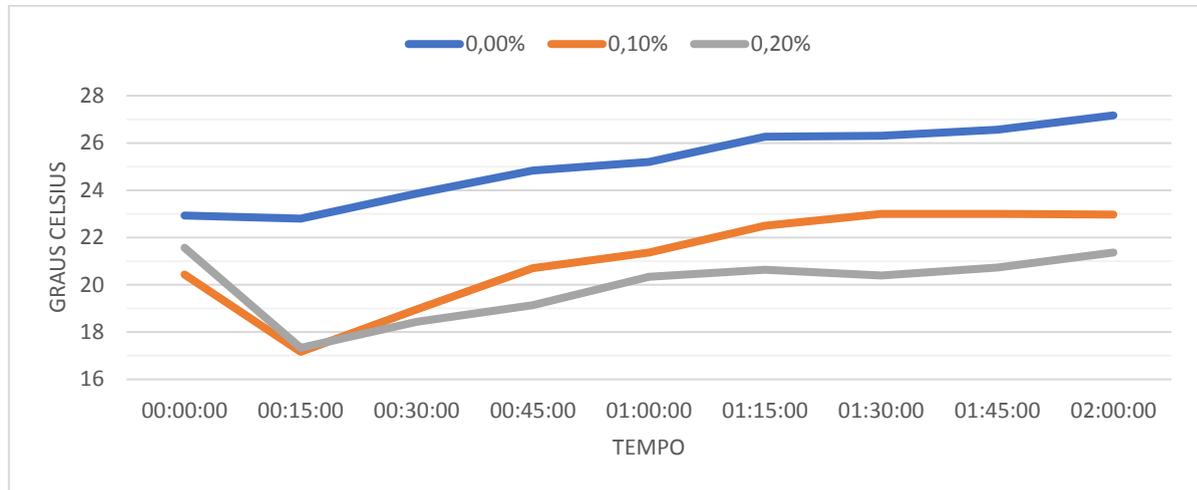


Figura 33: Variação de temperatura ao longo do tempo (CPV-ARI)

Fonte: Autor, 2022

4.2. Propriedades no estado endurecido

Nesta etapa do programa experimental, foram executadas as análises referentes às propriedades no estado endurecido do concreto. Desta forma, foram realizados os ensaios a seguir: resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, índice de vazios, absorção de água e módulo de elasticidade dinâmico.

4.2.1. Ensaio de resistência à compressão axial

Na Tabela 26 são exibidos os resultados do ensaio de resistência à compressão axial referentes aos traços produzidos com cimento tipo II. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

Tabela 26: Resultados dos ensaios de resistência à compressão (CPII-F-32)

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Compressão (MPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	27,54	25,52	29,02	27,36
3	0	seca	CPII	17,71	16,68	17,28	17,23
5	0,1	sub	CPII	31,89	22,67	24,34	26,30
7	0,1	seca	CPII	13,86	14,31	12,44	13,54

9	0,2	sub	CPII	25,37	27,38	25,09	25,95
11	0,2	seca	CPII	19,81	14,74	22,80	19,12

Fonte: Autor, 2022

Observando a Tabela 26 e a Figura 34, nota-se que a adição de SAP teve influência na resistência a compressão dos traços com cimento CPII-F-32, mas com comportamentos distintos entre a cura seca e cura submersa. Para as amostras que passaram por cura submersa, o SAP não comprometeu de forma significativa, reduzindo 3,8% para 0,1% de SAP e 5,15% para 0,2% de SAP, em relação ao traço de referência. Já nas amostras que passaram por uma cura seca, o SAP diminuiu a resistência em 21,42% para as amostras com 0,1% de SAP. Para as amostras com 0,2% de SAP, houve um aumento de resistência de 10,97%. É sabido que o aumento da porosidade ocasiona perdas de resistência e como já foi visto, as adições de SAP proporcionaram isto. Em contra partida, as propriedades e vantagens que o SAP tem, possibilita uma melhor hidratação da matriz cimentícia, o que justifica a baixa perda de resistência nas amostras que passaram por cura submersa e o ganho de resistência das amostras de 0,2% de SAP que passaram por cura seca.

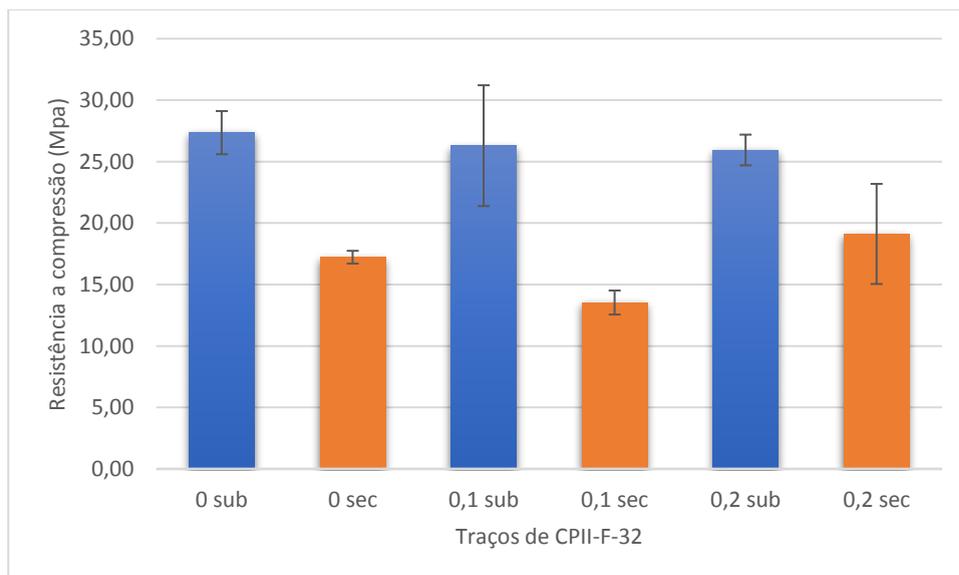


Figura 34: Média dos resultados de resistência a compressão para CII-F-32

Na Tabela 27 são exibidos os resultados do ensaio de resistência à compressão axial referentes aos traços produzidos com cimento tipo V. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

Tabela 27: Resultados dos ensaios de resistência à compressão (CPV-ARI)

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Compressão (MPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	50,91	50,45	50,59	50,65
4	0	seca	CPV	28,67	41,28	40,29	36,75
6	0,1	sub	CPV	29,50	31,05	31,52	30,69
8	0,1	seca	CPV	20,63	21,76	23,48	21,96
10	0,2	sub	CPV	27,36	27,80	38,03	31,06
12	0,2	seca	CPV	20,96	25,97	23,28	23,40

Fonte: Autor, 2022

Observando a Tabela 27 e a Figura 35, nota-se que a adição de SAP teve influência na resistência a compressão dos traços com cimento CPV-ARI. Diferentemente do que ocorreu com as amostras com cimento CII-F-32, no tipo V houve grande perdas de resistência nos traços com adições de SAP. Nas que passaram por cura submersa, as amostras com SAP tiveram uma redução de resistência grande, com redução de 39,41% para 0,1% de SAP e 38,68% para 0,2% de SAP, em relação ao traço de referência. Já nas amostras que passaram por uma cura seca, o SAP diminuiu a resistência em 40,25% para as amostras com 0,1% de SAP e para as amostras com 0,2% de SAP, houve uma redução de resistência de 36,33%. O CPV

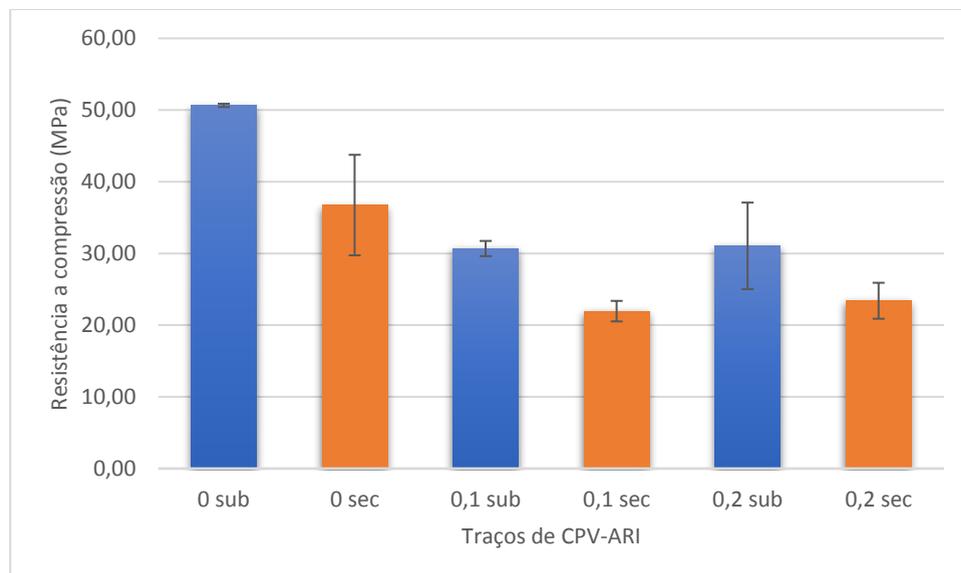


Figura 35: Média dos resultados de resistência a compressão para CPV-ARI

Em um panorama geral, os resultados obtidos com ensaio apontaram uma queda de resistência à compressão dos corpos de prova com adições de SAP (0,1 e 0,2%), porém, os

valores dos corpos de prova com adição de 0,2% de SAP se mostraram melhores do que o de 0,1%, indicando uma possível dosagem ideal para a mistura.

Tais resultados corroboram com o que é mostrado no trabalho de MUTHALVAN *et al.* (2021), onde as amostras de argamassa de cimento com dosagem maior de SAP apresentaram melhores resultados de resistência a compressão do que as com teor menor. Em Suarez (2015), o teor que apresentou os melhores resultados em relação a resistência a compressão, foi o de 0,2% em relação à massa de cimento. Ainda em seu trabalho, é dito que a perda de resistência à compressão, com o emprego do SAP, pode ser atribuída aos efeitos causados pelo SAP na hidratação do cimento. O polímero se expande quando entra em contato com a água. Na fase da hidratação, a água necessária para a cura interna vai sendo puxada do polímero que retorna ao seu tamanho original e deixa vazios na estrutura.

Segundo Schröfl *et al.* (2012), quando se utiliza partículas SAP como uma mistura em materiais à base de cimento, é criada na matriz um número de espaços vazios que pode afetar a resistência do material de forma negativa. Em artigos como o de JENSEN e HANSEN (2002) e PEREIRA e MATOS (2011) também encontraram reduções na resistência à compressão das amostras estudadas contendo polímeros superabsorventes.

4.2.2. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Na Tabela 28 são exibidos os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

Tabela 28: Resultados dos ensaios de resistência à tração - CPII

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Tração (MPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	2,34	3,84	3,10	3,09
3	0	seca	CPII	1,48	1,56	1,99	1,68
5	0,1	sub	CPII	3,84	3,79	3,61	3,75
7	0,1	seca	CPII	2,13	2,00	2,00	2,04
9	0,2	sub	CPII	3,86	3,56	3,86	3,76
11	0,2	seca	CPII	1,98	3,72	2,92	2,87

Fonte: Autor, 2022

Observando a Tabela 28 e a Figura 36, nota-se que a adição de SAP teve influência na resistência a tração dos traços com cimento CII-F-32. Para as amostras que passaram por cura submersa, o SAP promoveu um aumento de 21,36% para amostras de 0,1% e de 21,69% para as amostras com 0,2% de SAP, em relação ao traço de referência. Nas amostras que passaram por uma cura seca, o aumento alcançou porcentagens significativas, elevando a resistência a tração em 21,43% para as amostras com 0,1% de SAP e nas amostras com 0,2% de SAP, houve um aumento de resistência de 70,83%.

Tanto para as amostras que passaram por cura submersa, quanto para as que passaram por cura seca, a porcentagem de 0,2 de SAP obteve valores elevados, mostrando que a dosagem do polímero na mistura é adequada para tal finalidade.

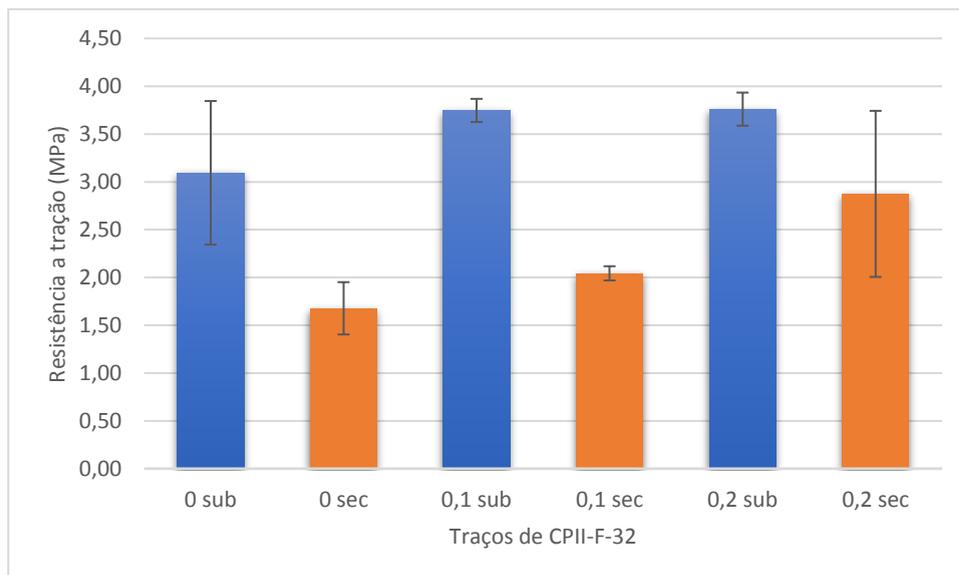


Figura 36: Média dos resultados de resistência a tração para CII-F-32

Fonte: Autor, 2022

Na Tabela 29 são exibidos os resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral referentes aos traços produzidos com cimento tipo V. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

Tabela 29: Resultados dos ensaios de resistência à tração - CPV

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Tração (MPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	3,62	4,58	3,90	4,03
4	0	seca	CPV	4,06	4,11	3,69	3,96
6	0,1	sub	CPV	3,62	3,15	3,20	3,32
8	0,1	seca	CPV	2,35	2,61	2,45	2,47
10	0,2	sub	CPV	2,91	3,88	3,25	3,35
12	0,2	seca	CPV	2,54	2,78	2,82	2,71

Fonte: Autor, 2022

Observando a Tabela 29 e a Figura 37, nota-se que a adição de SAP teve influência na resistência à tração dos traços com cimento CPV-ARI, porém, de forma diferente do que aconteceu com o CPII-F-32. Para as amostras que passaram por cura submersa, as amostras com SAP tiveram uma redução de resistência, onde diminuiu 17,62% para 0,1% de SAP e 16,87% para 0,2% de SAP, em relação ao traço de referência. Já nas amostras que passaram por uma cura seca, o SAP diminuiu a resistência em 37,63% para as amostras com 0,1% de SAP e para as amostras com 0,2% de SAP, houve uma redução de resistência de 31,57%.

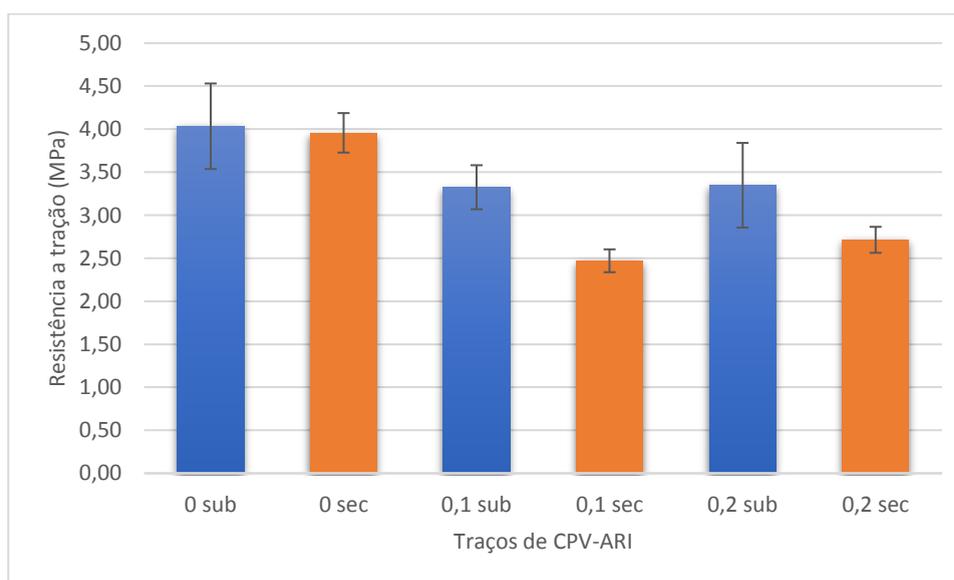


Figura 37: Média dos resultados de resistência a tração para CPV-ARI

Fonte: Autor, 2022

Em resumo, os resultados obtidos com ensaio apontaram uma queda de resistência à tração dos corpos de prova com adições de SAP (0,1 e 0,2%) com traços de CPV-ARI, em

comparação com o traço de referência. Em contrapartida, nos traços de CII-F-32, houve uma melhora na resistência a tração das amostras com SAP, tanto as que passaram por uma cura submersa, quanto as que tiveram uma cura seca.

Ainda assim, é importante destacar que as amostras com maior teor de SAP, ou seja, de 0,2% apresentaram os melhores resultados, seja em comparação a de menor teor, que foi o caso do CPV-ARI ou em comparação ao próprio traço de referência, como foi o caso do CII-F-32.

Os resultados com CPV-ARI corroboram com os apresentados por Suarez (2015), onde foi observada uma redução da resistência à tração com a adição de polímero superabsorvente nos microconcretos, se comparados com a mistura de referência, mas mesmo com o aumento do teor de SAP, não foram observadas grandes quedas na resistência à tração com CPV.

4.2.3. Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

Na Tabela 30 são mostrados os resultados dos ensaios de massa específica real, na Tabela 31 os de índice de vazios e na Tabela 32 os de absorção das argamassas autoadensáveis produzidas com cimento CII-F-32, realizados conforme ABNT NBR 9778:2009. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

No ensaio de massa específica para argamassas no estado endurecido, é possível notar um decréscimo nas amostras com adições de SAP. Nas amostras de 0,1% e 0,2% de SAP que passaram por uma cura submersa, houve uma diminuição média de 4,84% e 3,96%, respectivamente. Já nas amostras que passaram por cura seca, houve um aumento de 0,43% nas amostras de 0,1% de SAP e uma diminuição de 5,15% nas com 0,2%.

Em Mechtcherine et al. (2009) foram executados ensaios para determinar a porosidade e a distribuição dos tamanhos dos poros em concretos de alta resistência. Foram realizados testes para diferentes e para todas consideradas no experimento, os autores notaram uma elevação na porosidade das amostras de concreto com SAP.

Tabela 30: Massa específica das AAAs no estado endurecido

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Massa específica (g/cm ³)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	2,29	2,27	2,26	2,27
3	0	seca	CPII	2,33	2,35	2,31	2,33
5	0,1	sub	CPII	2,14	2,15	2,20	2,16
7	0,1	seca	CPII	2,35	2,32	2,34	2,34
9	0,2	sub	CPII	2,20	2,17	2,18	2,18
11	0,2	seca	CPII	2,30	2,16	2,18	2,21

Fonte: Autor, 2022

Em relação ao índice de vazios, pode se observar nas Tabelas 26 que a adição de SAP ao traço provoca variação. Para as amostras com adição de 0,1% de SAP, houve uma diminuição de 5,85% para cura submersa e um aumento de 19,97% para cura seca. Já nas amostras com adição de 0,2% de SAP, houve uma diminuição de 14,23% para cura submersa e de 21,50% para cura seca.

Tabela 31: Índice de Vazios das AAAs no estado endurecido

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Índice de Vazios			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	5,07	5,21	5,11	5,13
3	0	seca	CPII	7,38	7,46	6,78	7,21
5	0,1	sub	CPII	4,24	4,16	4,60	4,33
7	0,1	seca	CPII	8,94	8,14	8,87	8,65
9	0,2	sub	CPII	4,66	4,43	4,12	4,40
11	0,2	seca	CPII	6,91	5,06	5,02	5,66

Fonte: Autor, 2022

Quanto à absorção, pode se observar nas Tabelas 26 que a adição de SAP ao traço provoca variação. Para as amostras com adição de 0,1% de SAP, houve uma diminuição de 16,27% para cura submersa e um aumento de 21,88% para cura seca. Já nas amostras com adição de 0,2% de SAP, houve um aumento de 14,79% para cura submersa e uma diminuição de 22,65% para cura seca, em comparação ao traço de referência.

Tabela 32: Absorção das AAAs no estado endurecido

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Absorção %			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CPII	5,34	5,50	5,39	5,41
3	0	seca	CPII	7,97	8,06	7,28	7,77

5	0,1	sub	CPII	4,43	4,34	4,82	4,53
7	0,1	seca	CPII	9,82	8,87	9,73	9,47
9	0,2	sub	CPII	4,88	4,63	4,30	4,61
11	0,2	seca	CPII	7,42	5,33	5,28	6,01

Fonte: Autor, 2022

Na Tabela 33 são mostrados os resultados dos ensaios de massa específica real, na Tabela 31 os de índice de vazios e na Tabela 32 os de absorção das argamassas autoadensáveis produzidas com cimento CPV-ARI, realizados conforme ABNT NBR 9778:2009. Para esses ensaios, foram utilizados 3 corpos de provas para cada um dos traços, identificados nas tabelas como Amostras 1, 2 e 3.

No ensaio de massa específica para argamassas no estado endurecido, é possível notar um decréscimo nas amostras com adições de SAP. Nas amostras de 0,1% e 0,2% de SAP que passaram por uma cura submersa, houve uma diminuição média de 5,17% e 3,02%, respectivamente. Já nas amostras que passaram por cura seca, houve uma redução de 3,86% nas amostras de 0,1% de SAP e uma diminuição de 1,29% nas com 0,2%.

LURA et. al, (2012), explicam que, uma vez que o SAP atinge seu tamanho final, ele forma inclusões estáveis cheias de água. Esta água é em seguida aspirada para o interior dos poros capilares menores e consumida pela hidratação do cimento. O SAP acaba na forma de poros vazios na pasta de cimento, o que corrobora com os resultados obtidos de massa específica, uma vez que as amostras com SAP apresentaram valores menores, tanto para o CPII-F-32, quanto para o CPV-ARI.

Tabela 33: Massa específica das AAAs no estado endurecido - CPV

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Massa específica (g/cm ³)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	2,30	2,31	2,35	2,32
4	0	seca	CPV	2,34	2,33	2,33	2,33
6	0,1	sub	CPV	2,26	2,16	2,18	2,20
8	0,1	seca	CPV	2,22	2,25	2,24	2,24
10	0,2	sub	CPV	2,25	2,26	2,25	2,25
12	0,2	seca	CPV	2,30	2,31	2,30	2,30

Fonte: Autor, 2022

Em relação ao índice de vazios, pode se observar nas Tabela 34 que a adição de SAP ao traço provoca variação. Para as amostras com adição de 0,1% de SAP, houve uma diminuição

de 9,56% para cura submersa e uma diminuição de 2,93% para cura seca. Já nas amostras com adição de 0,2% de SAP, houve um aumento de 3,06% para cura submersa e de 11,56% para cura seca.

Tabela 34: Índice de Vazios das AAAs no estado endurecido

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Índice de Vazios			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	5,39	5,47	4,83	5,23
4	0	seca	CPV	6,90	5,18	6,33	6,14
6	0,1	sub	CPV	6,38	4,17	3,63	4,73
8	0,1	seca	CPV	5,50	6,41	5,96	5,96
10	0,2	sub	CPV	5,39	5,72	5,04	5,39
12	0,2	seca	CPV	6,67	6,99	6,88	6,85

Fonte: Autor, 2022

Quanto à absorção, pode se observar nas

Tabela 35 que a adição de SAP ao traço provoca variação. Para as amostras com adição de 0,1% de SAP, houve uma diminuição de 9,78% para cura submersa e de 3,06% para cura seca. Já nas amostras com adição de 0,2% de SAP, houve um aumento de 3,08% para cura submersa e de 12,39% para cura seca, em comparação ao traço de referência.

Tabela 35: Absorção das AAAs no estado endurecido

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Absorção %			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	5,69	5,79	5,07	5,52
4	0	seca	CPV	7,42	5,46	6,76	6,54
6	0,1	sub	CPV	6,81	4,35	3,77	4,98
8	0,1	seca	CPV	5,82	6,84	6,34	6,34
10	0,2	sub	CPV	5,70	6,07	5,31	5,69
12	0,2	seca	CPV	7,15	7,52	7,39	7,35

Fonte: Autor, 2022

4.2.4. Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)

Na Tabela 36 são mostrados os valores dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, conforme a ASTM E1876, 2015.

Tabela 36: Módulo de elasticidade dinâmico do CII-F-32

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Ed (GPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	0	sub	CII	26,84	29,33	24,33	26,83
3	0	seca	CII	19,86	18,18	18,59	18,88
5	0,1	sub	CII	24,55	20,08	22,61	22,41
7	0,1	seca	CII	16,24	14,55	14,19	14,99
9	0,2	sub	CII	25,12	23,00	23,89	24,00
11	0,2	seca	CII	17,72	15,61	19,55	17,63

Fonte: Autor, 2022

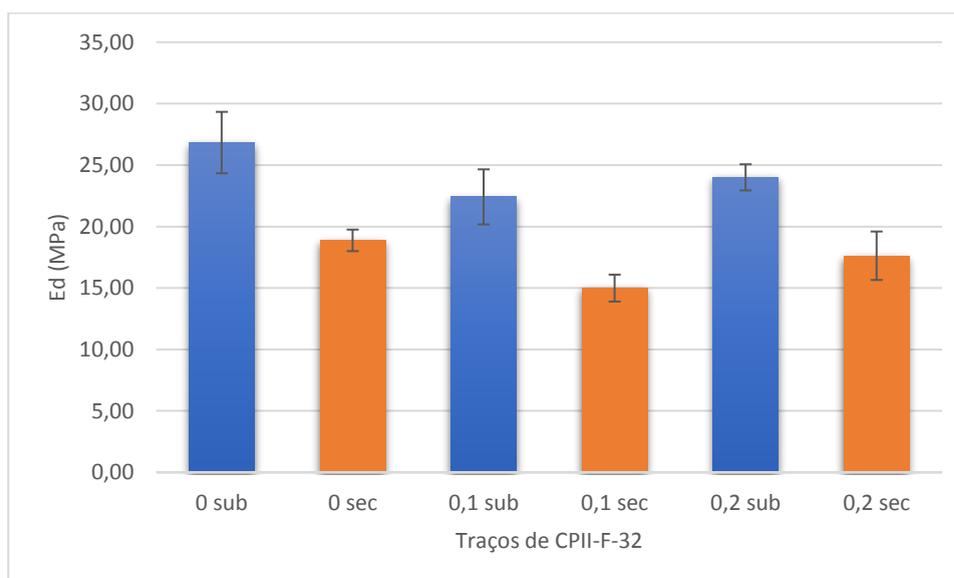


Figura 38: Média dos Módulos de elasticidade dinâmico do CII-F-32

Fonte: Autor, 2022

A partir dos resultados apresentados na Tabela 36 e Figura 38 é possível afirmar que o módulo de elasticidade das argamassas autoadensáveis com CII-F-32 é afetado pela adição de SAP. Tal variação não ocorre de forma linear, mas ela segue um padrão que aparece tanto na cura submersa, quanto na seca. Nas argamassas com adição de 0,1% de SAP, ocorreram reduções do módulo de elasticidade em 16,47% para cura submersa e de 20,60% para cura seca, em relação ao traço de referência. Já nas argamassas com 0,2% de SAP, estas reduções foram menores, sendo de 10,55% para cura submersa e de 6,62% para cura seca. Estes resultados reafirmaram o que foi mostrado em outros ensaios, sendo a porcentagem de 0,2% de SAP a que mais promoveu vantagens nas misturas.

O módulo de elasticidade de compostos cimentícios com incorporação de partículas menos rígidas, como é o caso do polímero superabsorvente, de modo geral é menor se comparado ao concreto convencional em que os agregados são mais rígidos como quartzo, basalto e calcário. As partículas menos rígidas adicionadas no concreto fazem com que a curva tensão-deformação tenha menor inclinação na região elástica, e isso faz com que o produto final tenha menor módulo de elasticidade (HERRERA-SOSA, 2015).

Tabela 37: Módulo de elasticidade dinâmico do CPV-ARI

Traço	% SAP	Cura	Tipo de Cimento	Ed (GPa)			Média
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
2	0	sub	CPV	30,75	32,45	30,66	31,29
4	0	seca	CPV	21,95	27,96	28,67	26,19
6	0,1	sub	CPV	23,07	24,01	24,06	23,71
8	0,1	seca	CPV	21,16	20,34	21,74	21,08
10	0,2	sub	CPV	26,12	26,90	25,24	26,09
12	0,2	seca	CPV	20,12	20,66	20,66	20,48

Fonte: Autor, 2022

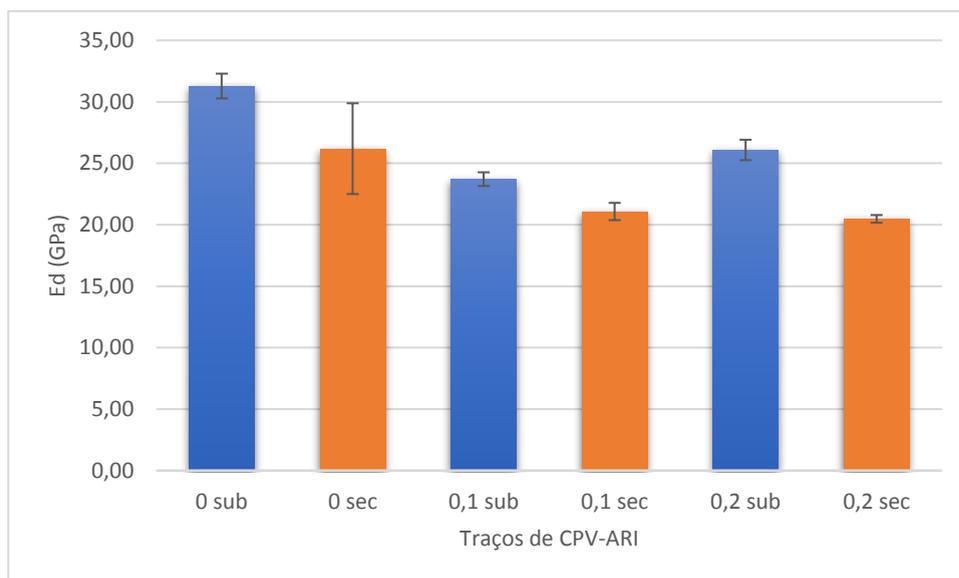


Figura 39: Média dos Módulos de elasticidade dinâmico do CPV-ARI

Fonte: Autor, 2022

Na Tabela 37 e Figura 39 são apresentados os resultados, onde é possível afirmar que o módulo de elasticidade das argamassas autoadensáveis com CPV-ARI é afetado pela adição de

SAP. Nas argamassas que passaram por uma cura submersa, as amostras de 0,2% de SAP obtiveram reduções menores (16,62%) do que as de 0,1% (24,23%), em comparação com o traço de referência. Já nas argamassas que passaram por uma cura seca, as duas porcentagens apresentaram reduções semelhantes, sendo de 19,51% para 0,1% de SAP e de 21,80% para 0,2%. Diferente do que aconteceu para o cimento de tipo II, nos resultados para CPV os valores para os dois tipos de cura não se comportaram da mesma forma, tendo uma melhora para cura submersa com porcentagem de 0,2 que não se repetiu para cura submersa.

De acordo com os resultados obtidos e mostrados na Tabela 36 e Tabela 37 e analisando a Figura 40, onde é mostrada a variação dos valores de módulo de elasticidade dinâmico entre os dois tipos de cura. Nota-se que no CPII-F-32, houve uma queda na diferença de valores com a adição do polímero superabsorvente, indicando que o mesmo pode ter auxiliado no processo de cura seca, fornecendo-as uma hidratação extra devido ao entumescimento das partículas de SAP nas amostras. Em contrapartida, nas amostras de CPV-ARI, ocorreu uma queda maior no traço com 0,1% de SAP e um alta significativa no traço com 0,2% de SAP, mostrando que o SAP teve um comportamento melhor com 0,1% de SAP para este tipo de cimento, quando condicionado à cura seca.

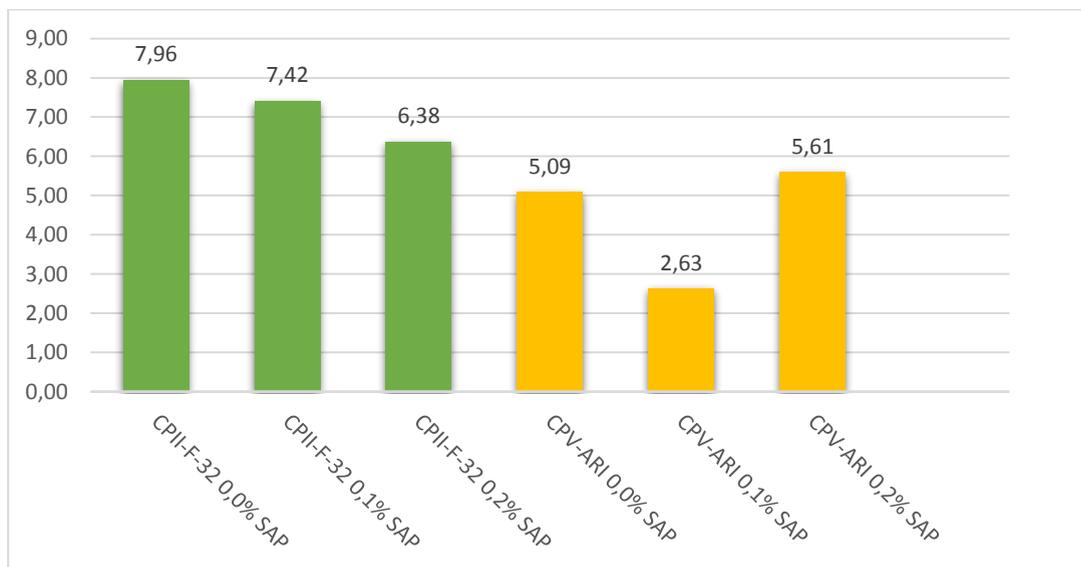


Figura 40: Variância do módulo de elasticidade dinâmico

Fonte: Autor, 2022

4.3. Análise Estatística

4.3.1. Planejamento de Experimentos

Para determinar as variáveis que exerceram maior influência no desempenho da fabricação das argamassas, a análise estatística desta pesquisa foi realizada com base na técnica DOE. Foram dois blocos criados para diferenciação dos tipos de cimento, um CII e outro CPV. Dentro destes blocos foram analisadas duas variáveis, sendo uma delas categórica, que é o tipo de cura (úmida e seca) e a outra uma variável contínua, que se trata da porcentagem de SAP no traço (0%, 0,1% e 0,2%)

Foram considerados sete ensaios para analisar a influência das variáveis, sendo eles: compressão axial, Tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, Massa específica, teor de ar, absorção por imersão e calor de hidratação. A relação destas variáveis, dos ensaios e respectivos valores, está apresentada na Tabela 38 e na Tabela 39.

Tabela 38: Relação das variáveis e dos ensaios com CII-F-32

Variável Contínua	Variável Categórica	Ensaio realizado						
% SAP	Cura	Compressão	Tração	Mód. Elasticidade	Me	Teor de ar	Absorção por imersão	Calor de hidratação
0,00	sub	27,5	2,3	26,8	2,3	5,1	5,3	5,5
0,00	seca	17,7	1,5	19,9	2,3	7,4	8,0	5,5
0,10	sub	31,9	3,8	24,6	2,1	4,2	4,4	3,4
0,10	seca	13,9	2,1	16,2	2,4	8,9	9,8	3,4
0,20	sub	25,4	3,9	25,1	2,2	4,7	4,9	3,2
0,20	seca	19,8	2,0	17,7	2,3	6,9	7,4	3,2
0,00	sub	25,5	3,8	29,3	2,3	5,2	5,5	4,2
0,00	seca	16,7	1,6	18,2	2,4	7,5	8,1	4,2
0,10	sub	22,7	3,8	20,1	2,1	4,2	4,3	2,0
0,10	seca	14,3	2,0	14,6	2,3	8,1	8,9	2,0
0,20	sub	27,4	3,6	23,0	2,2	4,4	4,6	0,5
0,20	seca	14,7	3,7	15,6	2,2	5,1	5,3	0,5
0,00	sub	29,0	3,1	24,3	2,3	5,1	5,4	5,7
0,00	seca	17,3	2,0	18,6	2,3	6,8	7,3	5,7
0,10	sub	24,3	3,6	22,6	2,2	4,6	4,8	2,9
0,10	seca	12,4	2,0	14,2	2,3	8,9	9,7	2,9
0,20	sub	25,1	3,9	23,9	2,2	4,1	4,3	4,5
0,20	seca	22,8	2,9	19,6	2,2	5,0	5,3	4,5

Fonte: Autor, 2022

Tabela 39: Relação das variáveis e dos ensaios com CPV-ARI

Variável Contínua	Variável Categórica	Ensaio realizado						
		% SAP	Cura	Compressão	Tração	Mód. Elasticidade	Me	Teor de ar
0	sub	50,91	3,62	30,75	2,30	5,39	5,69	4,20
0	seca	28,67	4,06	21,95	2,34	6,90	7,42	4,20
0,1	sub	29,50	3,62	23,07	2,26	6,38	6,81	2,40
0,1	seca	20,63	2,35	21,16	2,22	5,50	5,82	2,40
0,2	sub	39,06	2,91	26,12	2,25	5,39	5,70	-0,20
0,2	seca	20,96	2,54	20,12	2,30	6,67	7,15	-0,20
0	sub	50,45	4,58	32,45	2,31	5,47	5,79	2,70
0	seca	41,28	4,11	27,96	2,33	5,18	5,46	2,70
0,1	sub	31,05	3,15	24,01	2,16	4,17	4,35	2,20
0,1	seca	21,98	2,61	20,34	2,25	6,41	6,84	2,20
0,2	sub	27,80	3,88	26,90	2,26	5,72	6,07	-0,60
0,2	seca	25,97	2,78	20,66	2,31	6,99	7,52	-0,60
0	sub	50,59	3,90	30,66	2,35	4,83	5,07	5,80
0	seca	40,29	3,69	28,67	2,33	6,33	6,76	5,80
0,1	sub	31,52	3,20	24,06	2,18	3,63	3,77	3,00
0,1	seca	23,48	2,45	21,74	2,24	5,96	6,34	3,00
0,2	sub	38,03	3,25	25,24	2,25	5,04	5,31	0,20
0,2	seca	23,28	2,82	20,66	2,30	6,88	7,39	0,20

Fonte: Autor, 2022

4.3.2. Análise de Variância (ANOVA)

Nesta etapa, foi utilizada a técnica estatística ANOVA (Análisis of Variance) para comparação dos níveis das variáveis de testes.

A Análise de Variância é uma ferramenta para comparação de vários grupos ou estratos de interesse (MONTGOMERY, 1991). A ANOVA permite investigar a existência de diferenças significativas entre os grupos estudados. A Tabela 40 mostra de maneira mais clara os níveis das variáveis de testes.

Tabela 40: Níveis das variáveis de testes

Bloco	Tipo de variável	Variável utilizada	Níveis
Bloco 1 - CII	Categórica	Tipo de Cura	Cura úmida
			Cura seca
	Contínua	Porcentagem de SAP	0,00%
			0,10%
			0,20%
Bloco 2 - CPV	Categórica	Tipo de Cura	Cura úmida
			Cura seca
	Contínua	Porcentagem de SAP	0,00%
			0,10%
			0,20%

Fonte: Autor, 2022

4.3.3. Gráficos de efeitos principais

4.3.3.1. Efeitos principais no CII-F-32

Na Figura 41 são apresentados os resultados dos gráficos de efeitos principais para os ensaios de compressão (à esquerda) e tração (à direita), realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-E-32 com adições de SAP. Neles é possível notar os efeitos que as variações de adições de SAP apresentaram no traço. Para compressão, nota-se que houve um decréscimo em relação aos valores de resistência para 0,1% de SAP, porém, para o de 0,2% de SAP, houve um leve aumento em comparação ao traço de referência. No gráfico de cura, aconteceu o que já era esperado, tendo as argamassas que passaram por cura seca, menores resistências do que as que com cura submersa.

Já nos gráficos de tração, os resultados foram surpreendentes, visto que as amostras com SAP melhoraram a resistência, sendo a de maior teor de SAP com melhor resultado. Assim como ocorreu na compressão, a cura seca apresentou menor resistência do que a submersa.

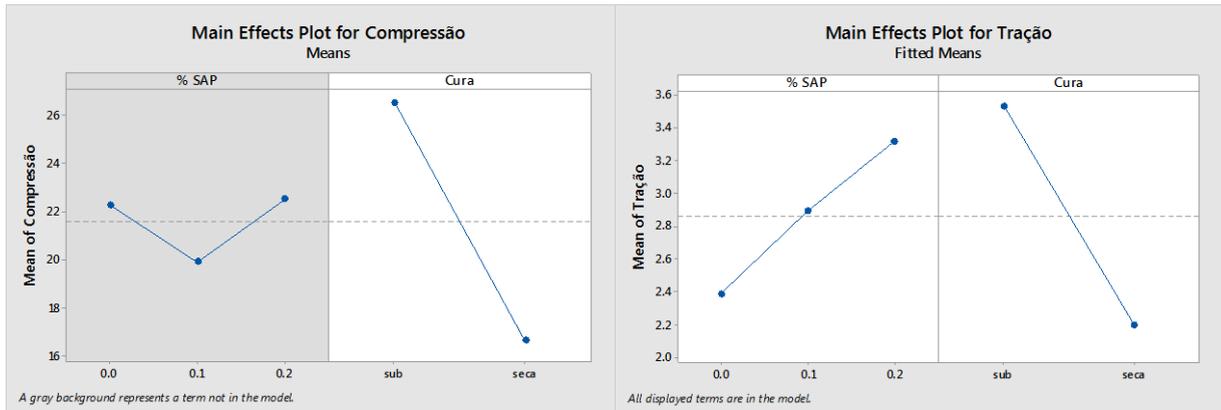


Figura 41: Gráficos de efeitos principais para CII-F-32 (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

Na Figura 42 são apresentados os gráficos de efeitos principais para o módulo de elasticidade dinâmico, realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-E-32 com adições de SAP. É possível observar que ambos os traços com porcentagens de SAP tiveram valores menores que o traço de referência, porém, os valores para o teor de SAP de 0,2% foram melhores.

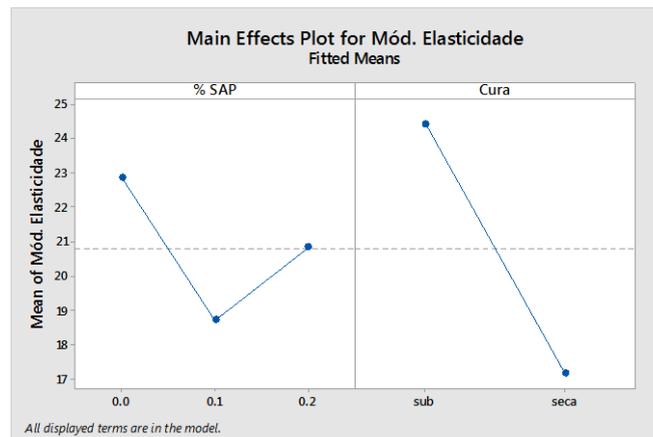


Figura 42: Gráficos de efeitos principais para CII-F-32 (Módulo de Elasticidade Dinâmico)

Fonte: Autor, 2022

Na Figura 43, são mostrados os gráficos de efeitos principais para o Calor de hidratação, realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-E-32 com adições de SAP. Nota-se que a adição de SAP teve grande influência no comportamento térmico, tanto com 0,1 quanto com 0,2 de teor. As adições promoveram uma queda na variação de temperatura das argamassas durante o período medido (120 minutos). A cura não tem influência nesta etapa por se tratar de uma fase com a argamassa no estado fresco.

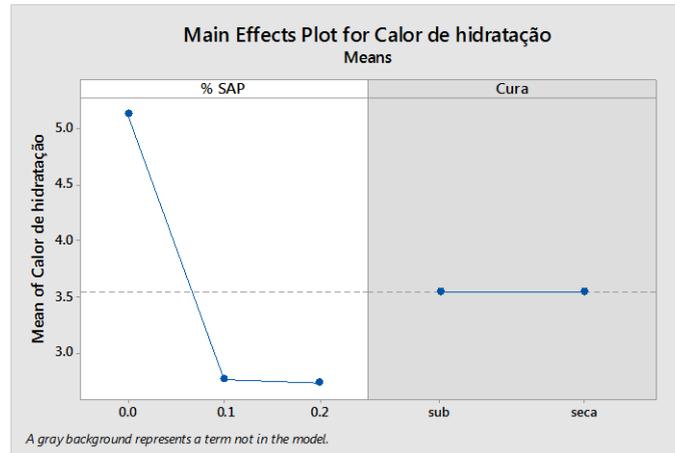


Figura 43: Gráficos efeitos principais no CPII-F-32 (Calor de Hidratação)

Fonte: Autor, 2022

4.3.3.2. Efeitos principais no CPV-ARI

Na Figura 44 são apresentados os resultados dos gráficos de efeitos principais para os ensaios de compressão (à esquerda) e tração (à direita), realizados nas argamassas com cimento do tipo CPV-ARI com adições de SAP. Neles é possível notar os efeitos que as variações de adições de SAP apresentaram no traço. Para compressão, nota-se que houve um grande decréscimo em relação aos valores de resistência, tanto para 0,1% quanto para 0,2% de SAP.

Nos gráficos de tração, os resultados foram semelhantes ao de compressão, visto que as amostras com SAP perderam resistência, sendo a de maior teor de SAP com melhor resultado.

No gráfico de cura, aconteceu o que já era esperado, tendo as argamassas que passaram por cura seca, menores resistências do que as que com cura submersa, porém, a variação foi menor do que a apresentada no cimento de tipo II.

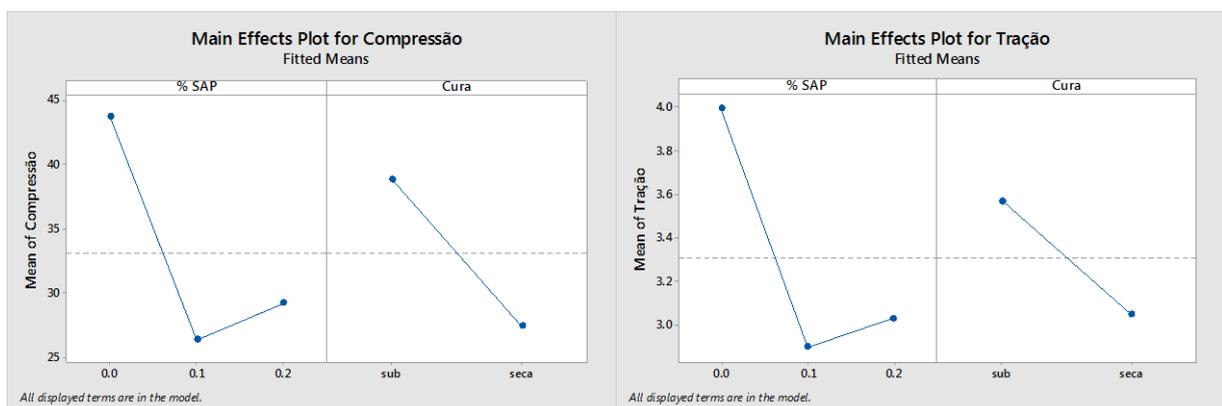


Figura 44: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

Na Figura 45 são apresentados os gráficos de efeitos principais para o módulo de elasticidade dinâmico, realizados nas argamassas com cimento do tipo CPV-ARI com adições de SAP. É possível observar que ambos os traços com porcentagens de SAP tiveram valores menores que o traço de referência, porém, os valores para o teor de SAP de 0,2% foram levemente melhores.

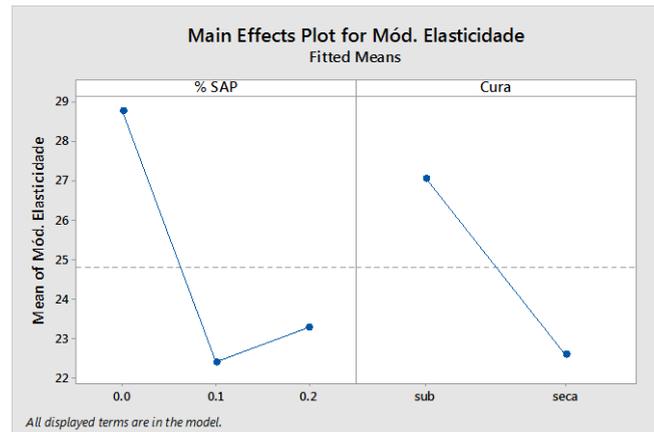


Figura 45: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Módulo de Elasticidade Dinâmico)

Fonte: Autor, 2022

Na Figura 46, são mostrados os gráficos de efeitos principais para o calor de hidratação, realizados nas argamassas com cimento do tipo CPII-ARI com adições de SAP. Nota-se que a adição de SAP teve grande influência no comportamento térmico, principalmente no traço com 0,2 de teor, onde se obteve uma variação de temperatura que não ultrapassou os valores do início de medição. As adições promoveram uma queda na variação de temperatura das argamassas durante o período medido (120 minutos). A cura não tem influência nesta etapa por se tratar de uma fase com a argamassa no estado fresco.

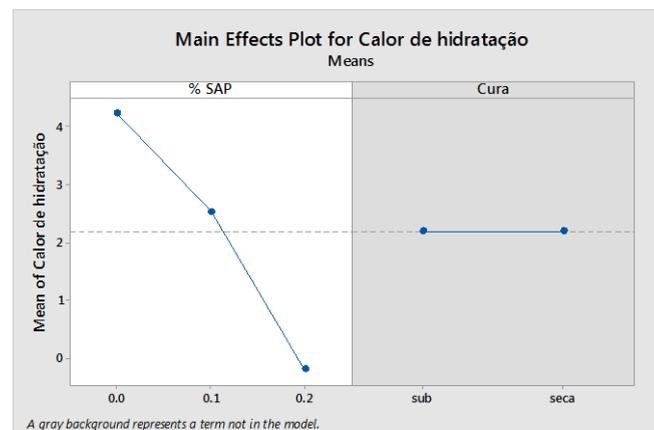


Figura 46: Gráficos de efeitos principais para CPV-ARI (Calor de hidratação)

Fonte: Autor, 2022

4.3.4. Gráficos de Pareto

Os gráficos de Pareto onde mostram os valores absolutos dos efeitos padronizados do efeito mais alto para o mais baixo. O gráfico também possui uma linha de referência para indicar quais efeitos são estatisticamente significativos. Assim, as barras que cruzam a linha de referência têm significância. A linha de referência para significância estatística depende do nível de significância (indicado por α), que neste estudo utilizou-se 95% de confiança, ou seja, $\alpha = 0,05$.

4.3.4.1. Gráficos de Pareto CII-F-32

A Figura 47 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de compressão (à esquerda) e tração (à direita), realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-F-32 com adições de SAP. Neles é possível notar os fatores que apresentaram maior influência aos traços. Como era esperado, os diferentes tipos de cura, têm grande influência no comportamento das argamassas, tanto para compressão, quanto para tração. Com relação a compressão, nota-se que a inclusão de SAP não afetou na resistência das argamassas significativamente, mantendo valores próximos aos do traço de referência. Para a tração, a adição promoveu mudanças significativas nas argamassas, obtendo valores superiores do que o traço de referência.

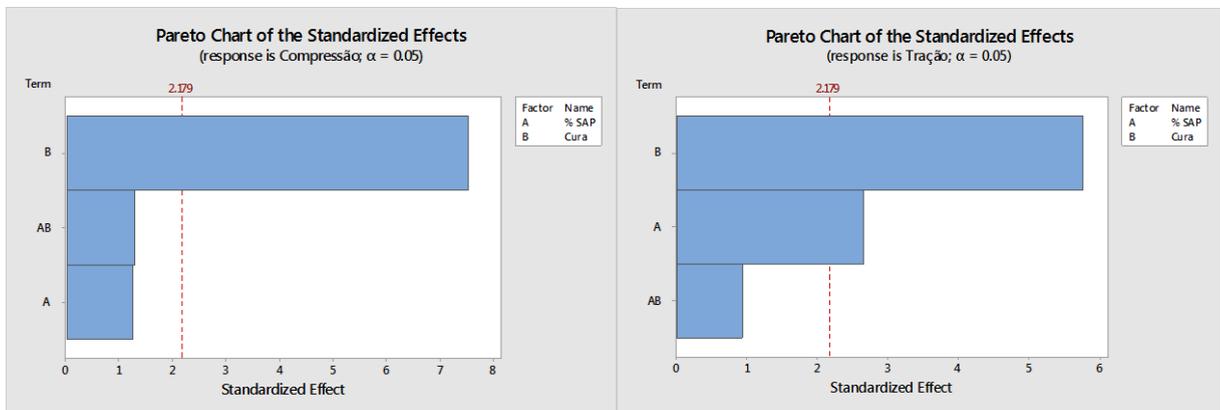


Figura 47: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

A Figura 48 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-F-32 com adições de SAP. Através dele, foi possível notar que ambos os fatores (% de SAP e tipo de

cura) tiveram influência no comportamento da argamassa nesse quesito. Nas argamassas com 0,2% de SAP, as reduções foram de 10,55% para cura submersa e de 6,62% para cura seca, já nas amostras com 0,1% de SAP, as reduções foram de 16,47% para cura submersa e de 20,60% para cura seca.

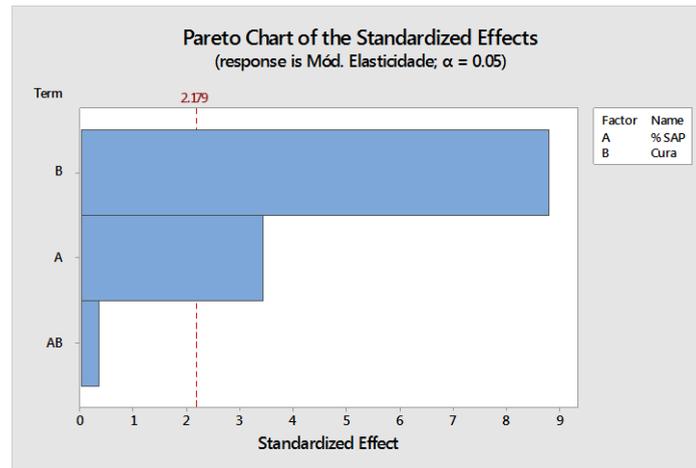


Figura 48: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Módulo de Elasticidade Dinâmico)

Fonte: Autor, 2022

A Figura 49 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de calor de hidratação, realizados nas argamassas com cimento do tipo CII-F-32 com adições de SAP. Nele é mostrado que somente a porcentagem de SAP tem significância para mistura neste quesito, visto que este ensaio é executado na argamassa ainda no estado fresco. O gráfico reafirma que os valores alcançados com as adições de SAP, tem significância nas propriedades térmicas das amostras

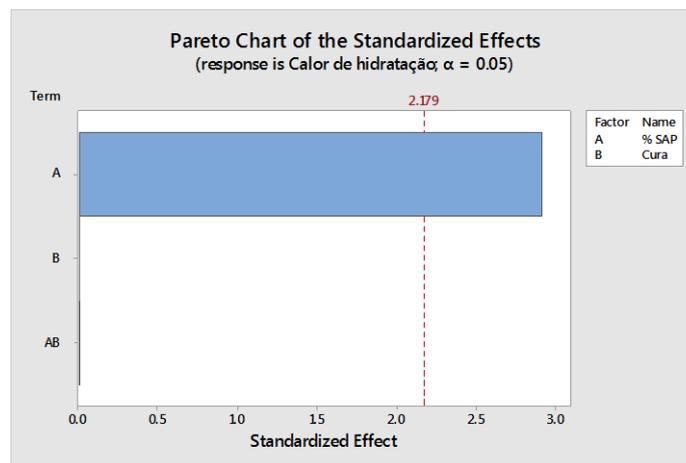


Figura 49: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CII-E-32 (Calor de hidratação)

Fonte: Autor, 2022

4.3.4.2. Gráficos de Pareto CPV-ARI

A Figura 50 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de compressão (à esquerda) e tração (à direita), realizados nas argamassas com cimento do tipo CPV-ARI com adições de SAP. Neles é possível notar os fatores que apresentaram maior influência aos traços. Assim como ocorreu no cimento tipo II, os diferentes tipos de cura, têm grande influência no comportamento das argamassas, tanto para compressão, quanto para tração. Nota-se que a inclusão de SAP afetou na resistência das argamassas significativamente, tanto para compressão, quanto para tração, havendo uma redução significativa em relação ao traço de referência.

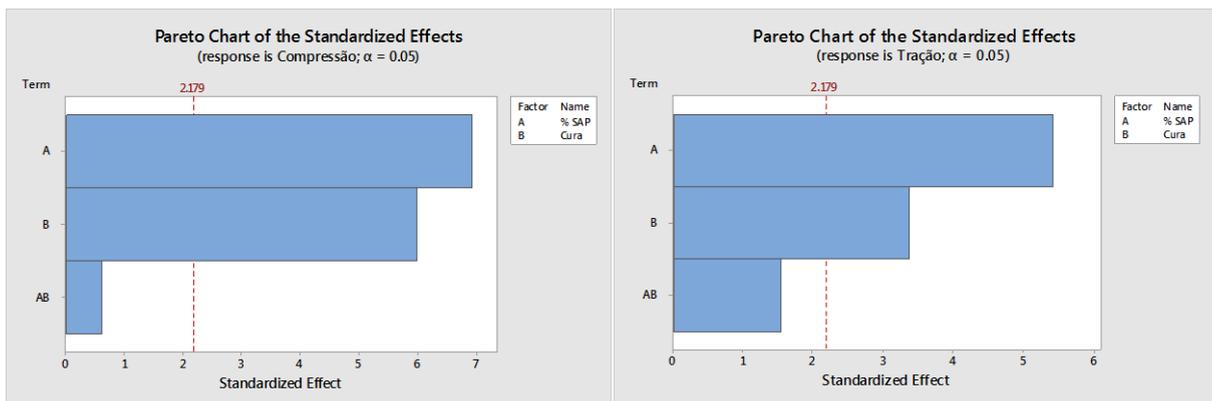


Figura 50: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CPII-E-32 (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

A Figura 51 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, realizados nas argamassas com cimento do tipo CPV-ARI com adições de SAP. Através dele, foi possível notar que ambos os fatores (% de SAP e tipo de cura) tiveram influência no comportamento da argamassa nesse quesito.

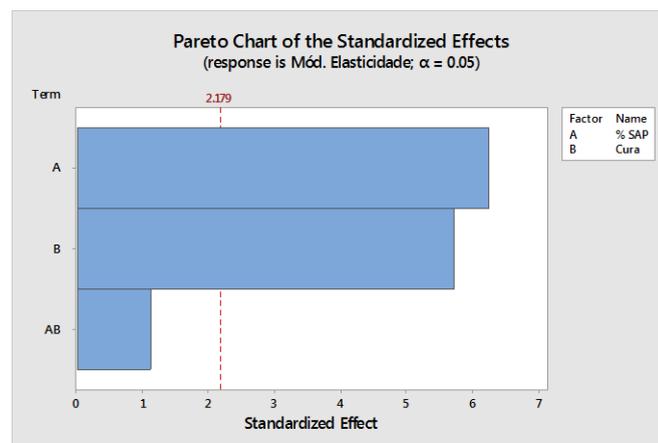


Figura 51: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CPII-E-32 (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

A Figura 52 mostra os gráficos de Pareto para os efeitos padronizados dos resultados dos ensaios de calor de hidratação, realizados nas argamassas com cimento do tipo CPIV-ARI com adições de SAP. Nele é mostrado que somente a porcentagem de SAP tem significância para mistura neste quesito, visto que este ensaio é executado na argamassa ainda no estado fresco. O gráfico reafirma que os valores alcançados com as adições de SAP, tem significância nas propriedades térmicas das amostras.

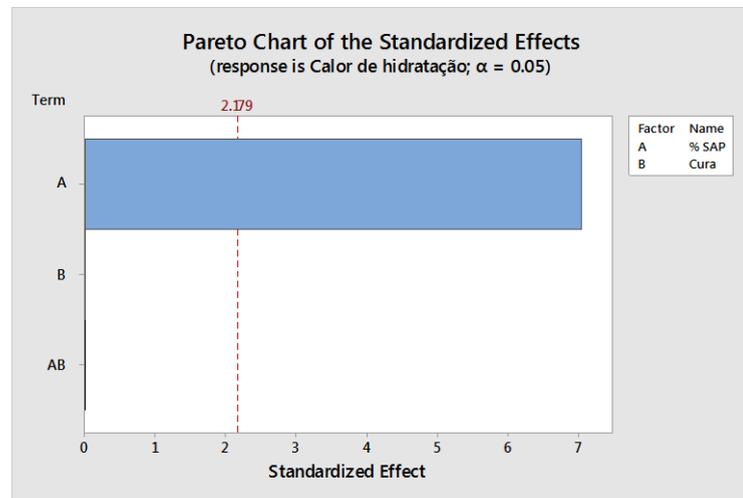


Figura 52: Gráfico de Pareto de efeitos padronizados para CPII-E-32 (Compressão e Tração)

Fonte: Autor, 2022

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi analisada a influência da adição do polímero superabsorvente (SAP) na composição de argamassas autoadensáveis, tanto para traços com cimento CII-F-32 quanto para CPV-ARI. Dentre as variáveis adotadas, está o tipo de cura (submersa e seca), sendo ela considerada uma variável categórica e também foi empregada a variável de porcentagem de adição de SAP nos traços, correspondendo a uma variável contínua.

Com o intuito de se obter um embasamento teórico em torno do tema tratado, foi feita uma análise bibliométrica onde foram levantados os dados em relação a a quantidade de publicações ao longo da história, os autores e periódicos mais relevantes, países com maior quantidade de citações e de publicações, as palavras-chave utilizadas com mais frequência, os segmentos de linhas de pesquisa, além de executar análises de acoplamento bibliográfico e cocitação.

Com as análises feitas dos artigos obtidos nas bases de dados da *Scopus* e *Web of Science*, pode-se perceber que o tema em questão encontrasse em ascensão, sendo os últimos cinco anos, responsáveis pela maioria das publicações. Embora a principal vertente explorada seja o combate à retração autógena, a utilização dos SAPs em materiais a base de cimento se mostra versátil, tendo trabalhos com enfoque, por exemplo, na mitigação da retração por secagem, na influência nas propriedades termicas e outros estudos enfatizados em tratar a permeabilidade dos compostos cimentícios. Além disto, foi possível notar que as palavras-chave conseguem mostrar as áreas que estão sendo focadas com o tema. Servindo como ponto de partida para que novos pesquisadores busquem aperfeiçoar o que já foi apresentado ou mesmo focar em vertentes que ainda estão sendo pouco exploradas acerca do tema.

O procedimento experimental deste trabalho visou justamente preencher algumas destas lacunas até então pouco exploradas, incorporando adições de SAP em argamassas autoadensáveis. Esta que por sua vez, pode ser considerada uma base para execução de ensaios com concreto autoadensável, para enfim se obter os valores de resistência na fase de concreto e desta forma, ser possível identificar as possíveis aplicações para estes traços.

6. CONCLUSÕES

Quanto aos objetivos propostos inicialmente pode se afirmar que foi possível analisar a adição de polímeros superabsorventes (SAP) como elemento de cura interna em argamassas autoadensáveis (AAAs), bem como suas características mecânicas e térmicas, servindo esta dosagem encontrada como base para confecção de CAAs com aplicabilidade voltada para estruturas com grande volume.

Nos ensaios no estados fresco, a adição de SAP resultou em: diminuição da massa específica, redução da fluidez que teve que ser corrigida com adição de água adicional e aumento do tempo de escoamento que por sua vez foi corrigido da mesma forma, em ambos tipos de cimento.

Em relação dos ensaios de calor de hidratação, as argamassas tanto com CII-F-32 e CPV-ARI obtiveram valores satisfatórios, possibilitando um controle da temperatura no início do processo de cura, algo muito importante principalmente em estruturas com grande volumes de concreto, como são os casos do empreendimento hidráulicos, sendo o controle da temperatura fundamental para evitar fissuras por retração. Este fato pode ser um indício de forma de mitigar os picos de temperatura que podem ocorrer em peças de grande volume de concreto.

Nos ensaios no estado endurecido, a adição de SAP resultou em: não comprometeu de forma significativa a resistência a compressão em argamassas com o cimento CII-F-32, nas argamassas com CPV-ARI, houveram grandes perdas de resistência, chegando a mais de 40%. Quanto a resistência a tração, as argamassas que passaram por cura submersa com CII-F-32 apresentaram aumento semelhante (em torno de 21%), porém, as argamassas que passaram por cura seca, o ganho de resistência chegou a 70%. Nas argamassas com CPV-ARI, não ouveram ganhos de resistência em relação ao traço de referência. Os módulos de elasticidade dinâmicos, apresentam redução com a adição de SAP, porém, as reduções foram menores para as amostra com 0,2% de SAP, tanto com o cimento de tipo II, quanto com o de tipo V.

Através das análises dos resultados fornecidas pelo DOE foi possível identificar com maior precisão as variáveis que manifestaram maior influência na composição dos traços. Desta forma, sendo possível indicar de uma forma assertiva os ganhos e perdas obtidos da adição de SAP em argamassas autoadensáveis.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Para estudos posteriores sugere-se investigar outros teores e tipos de polímeros superabsorventes, com a finalidade de identificar o teor ótimo que permita mitigar os efeitos da retração com o mínimo prejuízo nas propriedades mecânicas do concreto.

Sugere-se também, avançar para a fase de concreto, possibilitando melhor identificação das reações térmicas em amostras com maiores volumes. Na mesma linha, é aconselhado o estudo térmico em um período de tempo maior do que o apresentado no presente trabalho, afim de compreender melhor a influência do SAP nos primeiros dias de cura do concreto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 9778:2005. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 2:2009.
- ABNT NBR 11578: **Cimento Portland composto - Especificação.** Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT NBR NM 52: **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2002.
- ABNT NBR NM 248: **Agregados - determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT NBR 7222:2011. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].
- ABNT NBR 5739:2018. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.].
- ABNT NBR 9778:2005. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 2:2009.
- ABNT NBR 9833:2009. **Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. [S.l.]. Errata 1:2009.
- AL-HUBBOUBI, S. et al. **Performance of super-absorbent polymer as an internal curing agent for self-compacting concrete.** MATEC Web of Conferences, v. 162, n. 5, p. 3–7, 2018.
- ASLANI, F. **Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules.** [S.l.], p. 553 a 566. 2018. (182).
- BENTZ, B. Y. D. P.; LURA, P.; ROBERTS, J. W. **Mixture Proportioning for Internal Curing.** n. February, p. 35–40, 2005.
- BORJA, E. V. D. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis.** Tese de Doutorado Natal-RN, 2011.
- CARVALHO, A. dos G. de. **Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação e Modelagem.** Rio de Janeiro, 2002, Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- DINIZ, J. Z. F.; FERNANDES, J. F.; KUPERMAN, S. C. **Retração e Fluência.** In: ISAÍÁ, G. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro de Concreto, 2011. p. 672– 703.

DOMONE, P. L. **Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies.** **Department of Civil and Environmental Engineering**, University College London, London, UK. [S.l.], p. 197 a 208. 2006.

EFNARC. **European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.** Specification and guidelines for self-compacting concrete, Fevereiro 2002.

EFNARC. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete.** The European Guidelines for Self Compacting Concrete, n. May, p. 63, 2005.

ESTEVES, L.P. **Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore fluid.** *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 7, p. 717–724, 2011.

FAIRBAIRN, E. M. R, TOLÊDO FILHO, R. D., SILVOSO, M. M., GUERRA, E. A. **Modelagem do concreto a poucas idades com aplicações a barragens: novos paradigmas e suas soluções.** Projeto P&D ANEEL/FURNAS/COPPE, 2003.

GARFIELD, E. **From Bibliographic Coupling to Co-Citation Analysis via Algorithmic Historio-Bibliography: A Citationist's Tribute to Belver C. Griffith.** Drexel University, p. 45, 2001.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R..**Métodos de dosagem de concreto auto adensável.** 1 ed. São Paulo: PINI, 2009, pg. 165.

GRÁCIO, Maria Cláudia Cabrini. **Acoplamento bibliográfico e análise de cocitação: revisão teórico-conceitual.** *Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação*, v. 21, n. 47, p. 82, 2016.

HASHOLT, M.T. et al. **Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength?** *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 226–230, 2012.

HAYSPARK, N. P. et al. **Deformação por retração e fluência.** In: ISAÍÁ, G. C. (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. 1. ed. São Paulo: [s.n.], p. 655–686.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo. 1992. Método para concreto convencional IPT/EPSUP.

HERRERA-SOSA, E. S. E. A. **Recovery and Modification of Waste Tire Particles and Their Use as Reinforcements of Concrete.** [S.l.]. 2015. *International Journal of Polymer Science*, v. 2015, n. 1.

IGTPAN. **Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila.** Disponível em: <<http://www.igtpan.com/>> Acesso em: Fevereiro de 2022.

JENSEN, O.; HANSEN, P. **Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background.** *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 647–654, 2001.

JENSEN, O.M.; HANSEN, P.F. **Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations.** *Cement and Concrete Research*, v. 32, n. 6, p. 973–978, 2002.

JENSEN, O. M.; LURA, P. **Techniques and materials for internal water curing of concrete.** *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 39, n. 9, p. 817–825, 2006.

JOÃO, F. A.; **A Influência do Polímero Superabsorvente nas Propriedades de Concreto Convencional.** 161 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Área: Cerâmica). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2015.

JUSTS, J. et al. **Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 76, p. 82–90, out. 2015.

KARAHAN, O. E. A. **Fresh, Mechanical, Transport and Durability Properties of Self-Consolidating Rubberized Concrete.** [S.l.]. 2013. *ACI Materials Journal*, v. 109.

KOPPE, A. **Utilização de resíduo à base de Polímero Superabsorvente e Fibra Celulósica como agente de cura interna em matrizes de Cimento Portland.** 165 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2016.

KUMM, T. C. **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento portland.** 2009. 121 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC, 2009.

LACERDA, S. S.; FERNANDES, F. E. **Instalação de viga de vedação no vertedouro da UHE Tucuruí.** Comitê brasileiro de barragens, p. 1–15, 2007.

LEE, H.X.D.; WONG, H.S.; BUENFELD, N.R. **Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete.** *Advances in Applied Ceramics*, v. 109, n. 5, p. 296–302, 2010.

LURA, P. **Autogenous Deformation and internal curing of concrete.** Delft: Tese de Doutorado. Delft University of Thecnology, 2003.

MECHTCHERINE, V. et al. **Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: Results of a RILEM round-robin test.** *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, v. 47, n. 3, p. 541–562, 2014.

MECHTCHERINE, V.; REINHARDT, H. **Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction,** State-of-the-Art Report, Springer, 2012.

MECHTCHERINE, V.; SECRIERU, E.; SCHRÖFL, C.. **Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars — Development of yield stress and plastic viscosity over time.** *Cement and Concrete Research*, v. 67, p. 52–65, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 3 ed. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MUTHALVAN, Renuka Senthil et al. **The Effect of Superabsorbent Polymer and Nano-Silica on the Properties of Blended Cement**. Crystals, v. 11, n. 11, p. 1394, 15 nov. 2021.

OKAMURA, H. **Self-Compacting High-Performance Concrete**. International Concrete, v. 19, n. 7, 1997, p. 50-54.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future**. Edição: A. Skarendhai; Petersson, In: First International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete, 1999, Estocolmo, p. 3-14, 1999.

OKAMURA, H.; OUCHI. **Self-Compacting Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. n. 1, 2003. p. 5–15.

OLAWUYI, B J; BOSHOFF, W P. **Compressive strength of high-performance concrete with absorption capacity of super-absorbing-polymers (SAP)**. Department of Civil Engineering, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa: Taylor and Francis - Balkema, 2013. p. 1679–1683.

PEREIRA, E.; PIANARO, S. A.; COSTA, M. R. M. M.; **Influência de aditivo polimérico poliacrilamida nas propriedades de argamassas de cimento Portland**. Revista de Engenharia e Tecnologia – Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2016

REINHARDT, H.-W.; ASSMANN, A. **Effect of superabsorbent polymers on durability of concrete. Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP**. Department of Construction Materials, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany: Springer Netherlands, 2012. p. 115–135.

REPETTE, W. L. **Concreto auto-adensável: características e aplicações**. São Paulo. 2008. Revista Techne. Edição 135. Editora Pini.

RILEM Technical Committee “**Internal Curing of Concrete**”, TC 196 – ICC. Document ICC-N6, Draft of Chapter 2: Definitions. Trabalho não publicado, 2004.

SANDISON, ALEXANDER. **Documentation note: thinking about citation analysis**. Journal of Documentation, v. 45, n. 1, p. 59–64, 1 jan. 1989.

SANTOS, T. A. C.; **Estudo da Adição de Polímero Superabsorvente e de Nano Partículas de Sílica para Melhorar as Propriedades de Concretos de Alto Desempenho**. 145p. Dissertação, Publicação E.DM-02A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SCHRÖFL, Christof; MECHTCHERINE, V.; GORGES, M. **Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage**. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 6, p. 865–873, jun. 2012.

SILVA, L. R. R. da. **Análise de propriedades do concreto autoadensável com resíduo polimérico**. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.

SNOECK, D. et al. **Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 25, n. 1, p. 13–24, 2014.

SNOECK, D. et al. **Visualization of water penetration in cementitious materials with superabsorbent polymers by means of neutron radiography**. Cement and Concrete Research, v. 42, n. 8, p. 1113–1121, 2012.

SNOECK, D.; JENSEN, O.M.; DE BELIE, N. **The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials**. Cement and Concrete Research, v. 74, p. 59–67, 2015.

SUAREZ, M. L. G. **Polímeros Super Absorventes (PSA) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. p. 82, 2015.

TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições**. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

TRAMFLOC, Inc. **Super Absorbent Polymers for Water Retention and Erosion Control**. Disponível em: <<https://www.tramfloc.com/tf62.html>>.

TREINTA, F. T. et al. **Bibliometric studies of research collaboration: A review**. Journal of Information Science, v. 6, n. 1, p. 33–38, 1983.

TREINTA, F. T. et al. **Methodology of bibliographical research using multicriteria decision-making methods**. Producao, v. 24, n. 3, p. 508–520, 2014.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto adensáveis**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004. Dissertação (Mestrado).

TUTIKIAN, B. F. **Concreto auto-adensável**. 1ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2008.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Autoadensável**. [S.l.]. 2015. 2ª Edição ed. São Paulo: Editora Pini.

WYRZYKOWSKI, M; LURA, P; GAWIN, D. **Modeling of internal curing with SAP at meso- and macro-level**. Concrete/Construction Chemistry Laboratory, Empa, Switzerland: [s.n.], 2011. p. 147–157.

VANTI, N. A. P. **Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento**. Ciência da Informação, v. 31, n. 2, p. 152–162, 20 set. 2002.

VOTORANTIMCIMENTOS. **Votorantim cimentos**. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-votoran/obras-especiais-industrial-meios-agressivos/>>. Acesso em: fevereiro 2022.

XAVIER, B. C. Comparação do concreto autoadensável com adição de resíduo de beneficiamento de mármore e granito com o concreto autoadensável convencional. Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de tecnologia - UNICAMP. Limeira. 2019.