

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSAMENTO DE MATERIAIS

MARIA ROSÁRIA DE OLIVEIRA

Aplicação do uso de polímeros superabsorventes (SAP – *Superabsorbent Polymers*) em compósitos cimentícios na Construção Civil

São José dos Campos/ SP

2021

MARIA ROSÁRIA DE OLIVEIRA

Aplicação do uso de polímeros superabsorventes (SAP – *Superabsorbent Polymers*) em compósitos cimentícios na Construção Civil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Processamentos em Materiais, da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação de créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Processamento de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Erika Peterson Gonçalves

São José dos Campos/ SP

2021

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Oliveira, Maria Rosária de
Aplicação do uso de polímeros superabsorventes (SAP -
Superabsorbent Polymers) em compósitos cimentícios na Construção
Civil / Maria Rosária de Oliveira; orientadora, Profa. Dra.
Erika Peterson Gonçalves. - São José dos Campos, SP, 2021.
1 CD-ROM, 93 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do
Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em
Processamento de Materiais.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais. 2. Polímeros. 3. Compósitos
poliméricos. 4. Materiais. I. Gonçalves, Profa. Dra. Erika
Peterson, orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa
de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Maria Rosária de Oliveira, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 9 de Setembro de 2021.

Maria Rosária de Oliveira

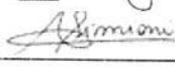
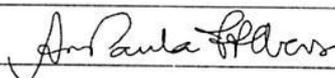
Autor(a) da Obra

Data da defesa: ____/____/____

MARIA ROSÁRIA DE OLIVEIRA

“APLICAÇÃO DO USO DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (*sap – superabsorbent polymers*) EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL”.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

PROF.^ª DR.^ª IVONE REGINA DE OLIVEIRA _____  Ivone Regina de Oliveira
PROF.^ª DR.^ª ERIKA PETERSON GONÇALVES _____ 
PROF.^ª DR.^ª ANDREZA RIBEIRO SIMIONI _____ 
PROF.^ª DR.^ª ANA PAULA FONSECA ALBERS - Unifesp _____ 

Prof.^ª Dr.^ª Lúcia Vieira

Diretora do IP&D – Univap

São José dos Campos, 29 de junho de 2021.

Aos meus pais Benedito e Eduvirges, ao meu esposo Luciano, aos meus irmãos José, Jandira, Luíz, Hélio, Sueli, Irani, Francisco, Sílvia e minha amiga e orientadora Erika Peterson.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila (IGTPAN) e ao Sr. Nilton Granado, por ter a oportunidade de ser bolsista da empresa por dois anos, na qual tive a grande honra de ser um dos pesquisadores do IGTPAN que foi fundamental para concluir o Mestrado

Agradeço o total apoio da minha Orientadora Profa. Dra. Erika Peterson Gonçalves, que me acompanha desde minha graduação e me apoiou em iniciar o mestrado, sempre me incentivou com todo suporte técnico, acadêmico e todo apoio a pesquisa, sempre esteve a disposição para que tudo que necessitei durante esses dois anos.

Agradeço ao Diretor da FEAU-Univap, Prof. Dr. Liu Yao Cho, por disponibilizar os laboratórios que foram de suma importância para o desenvolvimento dos compósitos e ensaios, mesmo em meio à crise da pandemia que estamos enfrentando.

Agradeço a Diretora do IP&D Professora Dra. Lúcia Vieira e aos funcionários Central Analítica Multiusuário que sempre estiveram à disposição.

“Não existem sonhos impossíveis para aqueles que realmente acreditam que o poder realizador reside no interior de cada ser humano. Sempre que alguém descobre esse poder, algo antes considerado impossível, se torna realidade.”

Albert Einstein

Resumo

A argamassa é uma mistura cimentícia utilizada em alvenarias, recuperação de estruturas, acabamento de paredes e tetos, revestimento de pisos e azulejos. Com o decorrer da vida útil do material, podem ocorrer a redução das propriedades físicas e mecânicas devido as fissuras e deslocamentos. Para melhorar e corrigir patologias futuras da argamassa, tem sido estudado como um aditivo para auxiliar na cura interna da massa cimentícia e amenizar os microporos e os mesoporos o polímero superabsorvente (SAP), por ser um material hidrofílico capaz de absorver e dessorver água de acordo com a necessidade do cimento. Os estudos efetuados nesse trabalho, analisam o comportamento da argamassa com a adição do SAP em diferentes concentrações e métodos de cura. Para a caracterização foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, sendo ensaiados no estado fresco quanto à consistência da argamassa, e no estado endurecido por meio de ensaios de resistência mecânica, ataques químicos, nível de absorção, variação dimensional. Discutidos no que se refere aos diferentes tipos de cura para avaliação do SAP na massa, optando por adição do SAP seco ou saturado e com variação de quantidade de água, os resultados obtidos nos ensaios mecânicos das amostras demonstram que o SAP saturado apresentou melhoria na resistência mecânica, a trabalhabilidade. Ainda a textura e adesão dos agregados na matriz foram avaliados por MEV, onde observou-se a redução dos índices de vazios, bloqueando a entrada dos agentes químicos que afetam os compósitos, aumentando o tempo de vida útil da argamassa.

Palavras-chave: Polímero superabsorvente. SAP. Argamassa. Cura interna.

Applying the use of Superabsorbent Polymers in cementitious composites in Civil construction

Abstract

Mortar is a cementitious mixture used in masonry, structural restoration, wall and ceiling finishing, floor and tile coating. Over the life of the material, there may be a reduction in physical and mechanical properties due to cracking and peeling. To improve and correct future pathologies of mortar, the superabsorbent polymer (SAP) has been studied as an additive to aid in the internal curing of the cementitious mass and to soften micropores and mesopores, as it is a hydrophilic material capable of absorbing and desorbing water accordingly. with the need for cement. The studies carried out in this work analyze the behavior of the mortar with the addition of SAP in different curing methods and methods. For the characterization, tests were carried out in the fresh and hardened state, being tested in the fresh state as to the consistency of the mortar, and in the hardened state through tests of mechanical resistance, chemical attack, absorption level, dimensional variation. Discussed in terms of the different types of cure for evaluating SAP in the mass, opting for the addition of dry or saturated SAP and with varying amounts of water, the results obtained in people's mechanical tests demonstrate that the saturated SAP showed an improvement in strength mechanics, workability. Also the texture and adhesion of the aggregates in the matrix were adopted by MEV, where it was observed a reduction in the void rates, blocking the entry of chemical agents that affect the composites, increasing the useful life of the mortar.

Keywords: Superabsorbent polymer. SAP. Mortar. Internal healing..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Amostra polímero superabsorvente de poliacrilonitrila.....	32
Figura 2: Fluxograma de apresentação das etapas de amassamento da argamassa	32
Figura 3: Apresentação dos tipos de cura.....	33
Figura 4: Ensaio de índice de consistência.....	34
Figura 5: Ensaio de capilaridade.....	37
Figura 6: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do aglomerante hidráulico – Cimento Portland.....	40
Figura 7: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do agregado miúdo – Areia.....	42
Figura 8: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do Polímero superabsorvente de poliacrilonitrila. (a) Polímero superabsorvente seco com aumento 25X ; (b) Polímero superabsorvente seco com 200X; (c) Polímero superabsorvente saturado seco em estufa por 24 h com aumento de 17X; (d) Polímero superabsorvente saturado seco em estufa por 24 h com aumento de 110X.....	43
Figura 9: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura no hidróxido de cálcio.....	46
Figura 10: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras expostas em temperatura ambiente sem cura externa.....	47
Figura 11: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 3 dias na estufa com temperatura e umidade controlada.....	48
Figura 12: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 7 dias na estufa com temperatura e umidade.....	49
Figura 13: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura no hidróxido de cálcio.....	51
Figura 14: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras exposta em temperatura ambiente sem cura externa.....	52
Figura 15: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 3 dias na estufa com temperatura e umidade controlada.....	53
Figura 16: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 7 dias na estufa com temperatura e umidade controlada.....	54
Figura 17: Difratoograma do agregado miúdo (areia natural).....	55
Figura 18: Difratoograma do Cimento Portland CP III/40 RS.....	56
Figura 19: Difratoograma do Polímero Superabsorvente de Poliacrilonitrila (SAP).....	57
Figura 20: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas em solução saturada de hidróxido de cálcio.....	58

Figura 21: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas em atmosfera ambiente	60
Figura 22: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas sob 40°C e 50% de umidade durante 3 dias.....	62
Figura 23: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas sob 40°C e 50% de umidade durante 7 dias.....	63
Figura 24: Análise volumétrica das amostras com cura no hidróxido de cálcio.....	64
Figura 25: Análise volumétrica das amostras sem cura externa	65
Figura 26: Análise volumétrica das amostras com cura de 3 dias na estufa	66
Figura 27: Análise volumétrica das amostras com cura de 7 dias na estufa	67
Figura 28: Ensaio de compressão axial com 28 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).	68
Figura 29: Ensaio de compressão axial com 90 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).	70
Figura 30: Ensaio de compressão diametral indireta com 28 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).	71
Figura 31: Ensaio de compressão diametral indireta com 90 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).	72
Figura 32: Resultados do nível de absorção de água	74
Figura 33: Comparativo do ataque de sulfato de cálcio.	76
Figura 34: Ensaio de carbonatação com fenoftaleína	77
Figura 35: Ensaio de ataque de cloreto de sódio (NaCl)	78
Figura 36: Ensaio de fissuração da massa cimentícia	80
Figura 37: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 Amostras submersa com camada de hidróxido de cálcio.....	92
Figura 38: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 Amostras exposta em atmosfera ambiente	92
Figura 39: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 °C.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da argamassa com relação a diversos critérios	26
Tabela 2: Composição e característica do cimento	28
Tabela 3: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal)	29
Tabela 4: Limite de distribuição granulométrica	29
Tabela 5: Identificação das amostras	30
Tabela 6: Tipos de curas das amostras	31
Tabela 7: Traço da argamassa.....	31
Tabela 8: Resultado do ensaio da granulometria da areia	41
Tabela 9: Resultado do ensaio de índice de consistência por tronco-cônico	45
Tabela 10 : Resultados da quantidade de água absorvida pela amostra	73
Tabela 11 : Resultados de massa específica	75
Tabela 12: Resultados de ataque acelerado de carbonatação	77
Tabela 13: Resultados de ataque de cloreto de sódio (NaCl)	79
Tabela 14 : Resultados do ensaio de temperatura.....	79
Tabela 15 : Resultado ensaio volumétrico em mm amostras com cura normatizada	87
Tabela 16: Resultado ensaio volumétrico em mm amostras sem cura externa e cura na estufa com umidade de 50% e temperatura à 40 °C	87
Tabela 17 : Resultado ensaio de compressão axial 28 dias	88
Tabela 18 : Resultado ensaio de compressão axial 90 dias	89
Tabela 19: Resultado ensaio de compressão diametral indireta 28 dias	90
Tabela 20 : Resultado ensaio de compressão diametral indireta 90 dias	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
a/c	Fator água cimento
CP	Cimento Portland
IGTPAN	Instituto Granado de Tecnologia da Poliacrilonitrila
MEV	Microscopia eletrônica de varredura;
NBR	Norma Brasileira de Regras
NM	Norma Mercosul;
SAP	<i>Superabsorbent Polymer</i> (Polímero superabsorvente)
PAN	Poliacrilonitrila
P	Padrão
P_28	Padrão com 28 dias
P_90	Padrão com 90 dias
SU	SAP Saturado
SU_28	SAP Saturado com 28 dias
SU_90	SAP Saturado com 90 dias
SS	SAP Seco
SS_28	SAP Seco com 28 dias
SS_90	SAP Seco com 90 dias
SH	SAP Saturado com dobro de água
SH_28	SAP Saturado com dobro de água com 28 dias
SH_90	SAP Saturado com dobro de água com 90 dias
S20	SAP Saturado com 20% a mais de água
S20_28	SAP Saturado com 20% a mais de água com 28 dias
S20_90	SAP Saturado com 20% a mais de água com 90 dias
S20S	SAP Seco com 20% a mais de água
S20S_28	SAP Seco com 20% a mais de água com 28 dias
S20S_90	SAP Seco com 20% a mais de água com 90 dias
S40S	SAP Saturado com 40% a mais de água
S40_28	SAP Saturado com 40% a mais de água com 28 dias
S40_90	SAP Saturado com 40% a mais de água com 90 dias
S40S	SAP Seco com 40% a mais de água
S40S_28	SAP Seco com 40% a mais de água com 28 dias
S40S_90	SAP Seco com 40% a mais de água com 90 dias

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVO.....	18
3	JUSTIFICATIVA.....	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	Polímeros superabsorventes (SAP - <i>Superabsorbent Polymers</i>)	20
4.2	Ataques Químicos	24
4.3	Agregados	26
4.4	Argamassa.....	26
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
5.1	Materiais	28
5.1.1	Cimento	28
5.1.2	Agregados miúdos.....	28
5.1.3	Polímero superabsorvente de poliacrilonitrila	30
5.2	Moldagem.....	30
5.2.1	Ensaio de índice de consistência da argamassa.....	34
5.2.2	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	34
5.2.3	Difratometria de Raios X após cura	35
5.2.4	Ensaio de estabilidade volumétrica	35
5.2.5	Ensaio mecânicos de compressão axial	35
5.2.6	Ensaio mecânicos de compressão diametral – Tração Indireta.....	36
5.2.7	Ensaio de capilaridade.....	36
5.2.8	Ensaio de densidade aparente	37
5.2.9	Ensaio de resistência ao ataque por sulfato de cálcio	38
5.2.10	Ensaio acelerado de carbonatação	38
5.2.11	Ensaio de resistência ao ataque por cloreto de sódio	38
5.2.12	Ensaio de Temperatura da argamassa	39
5.2.13	Ensaio de fissuração	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
6.1	Caracterização dos materiais	40
6.1.1	Cimento Portland CPIII	40
6.1.2	Areia	41
6.1.3	SAP.....	42

6.2	Moldagem dos corpos de prova.....	44
6.2.1	Ensaio de índice de consistência da argamassa	45
6.2.2	MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura	46
6.2.3	Difratometria de Raios X.....	55
6.2.4	Ensaio de estabilidade volumétrica	64
6.2.5	Ensaio Mecânicos em compressão axial	68
6.2.6	Ensaio Mecânicos de Tração Indireta	71
6.2.7	Ensaio de capilaridade.....	73
6.2.8	Ensaio de massa específica e absorção.....	75
6.2.9	Ensaio de resistência ao ataque por sulfato de cálcio	76
6.2.10	Ensaio de carbonatação com CO ₂	77
6.2.11	Ensaio de resistência ao ataque por cloreto de sódio	78
6.2.12	Ensaio de variação de temperatura da argamassa	79
6.2.13	Ensaio de fissuração	80
7	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIA.....	83
	Anexos A: Tabela	87
	Anexos B: Figuras	92

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil vem buscando novas tecnologias que sejam capazes de mitigar e corrigir patologias diversas recorrentes nas massas cimentícias e que proporcionem a manutenção das propriedades mecânicas. Patologias como trincamento da massa cimentícia são responsáveis pela aceleração do processo de corrosão do aço das armaduras prejudicando a estrutura e integridade das estruturas construídas em concreto armado.

Massas cimentícias são formuladas para serem duráveis e apresentarem boa resistência aos esforços mecânicos aplicados nas edificações, além disso, estes materiais devem apresentar boa resistência à penetração de água. Porém quando estas estruturas são submetidas à esforços trativos, seja pelo carregamento nela aplicado, seja como resultado das variações dimensionais devido à retração gerada pela cura, o compósito é propenso sofrer trincamento.

A presença de trincas nas estruturas afeta o poder impermeabilizante do material, pois estes vazios abrem passagem para agentes agressivos, acelerando os mecanismos de deterioração das propriedades, assim, as trincas formadas afetam não somente a estanqueidade da estrutura como também a sua durabilidade a longo prazo.

Na busca do desenvolvimento de materiais cimentício auto regenerativos estuda-se a inserção de microcápsulas de monômeros e catalisadores, que prometem romper-se com o crescimento de uma trinca sendo então misturados e proporcionando o preenchimento do caminho da trinca, reduzindo seus efeitos. (MECHTCHERINE *et al*, 2021).

A cura do cimento é responsável pela obtenção das propriedades físicas do compósito cimentício, trata-se de um processo exotérmico ativado pela presença de água. A variação descontrolada de temperatura resultante da reação de hidratação do aglomerante pode resultar em uma cura descontrolada do material diminuindo resistência mecânica e facilitando o desenvolvimento de outras patologias.

Na busca de mitigar estes efeitos, em grandes obras, é comum o uso de aditivos retardantes de cura e gelo na massa cimentícia, buscando reduzir a taxa de hidratação do aglomerante, seja pela alteração na composição química da formulação da massa, seja pela redução da temperatura, ambos com intuito de deslocar o equilíbrio da reação química de cura, favorecendo a redução da velocidade de reação.

Concomitantemente o desenvolvimento de materiais inovadores vem crescendo na medida que o mercado se torna mais competitivo, visando a melhoria no desempenho e na qualidade nos materiais de construção, com isso tem crescido os estudos da aplicação de polímeros superabsorventes como um aditivo de cura interna na massa cimentícia.

O polímero superabsorvente também conhecido como SAP (*Superabsorbent Polymer*), é um material hidrofílico e biodegradável. Esta classe de polímeros, desenvolvida no final da década de 80, são polieletrólitos que desenvolvem estrutura reticulada quando entram em contato com soluções aquosas. Capazes de absorver até 1,5 L de água por grama de SAP. A produção destes materiais se dá a partir de uma solução aquosa de monômero que é submetida ao processo de polimerização formando um gel que será extrudado para a obtenção dos pellets. A fabricação anual do SAP atinge cerca de 100.000 toneladas (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

A utilização do SAP é promissora em massas cimentícias visando retardar o tempo de absorção da água e controlando a cura do material. Porém, acredita-se que o poder superabsorvente do polímero possa ser estudado para o desenvolvimento de materiais cimentícios com características de autorregeneração, muitas vezes classificados como materiais *self-healing*.

Contudo, a utilização de SAP pode acarretar redução nas propriedades mecânicas finais do compósito cimentício, visto que após a liberação da água absorvida pelas micropartículas de SAP o espaço inicialmente ocupado pelas partículas entumecidas formará um vazio gerando porosidade residual.

O presente trabalho propõe o estudo do comportamento de massas cimentícias com adição do SAP para o uso na construção civil visando avaliar a influência nas propriedades mecânicas e o poder autorregenerativo do compósito formado, por meio da reestruturação as fissuras causadas pelo intemperismo ambiental.

2 OBJETIVO

Desenvolver novas tecnologias aplicadas à indústria de construção civil pela aplicação de materiais superabsorvente na matriz cimentícia.

Identificar os efeitos da inserção dos materiais superabsorventes no comportamento físico dos compósitos formados.

Avaliar o poder regenerativo das massas cimentícias formuladas com adição de SAP.

Difundir a utilização do polímero superabsorvente na indústria da construção civil.

3 JUSTIFICATIVA

A matéria prima principal da construção civil o cimento Portland, as estruturas produzidas com base neste material estão sujeitas ao intemperismo ambiental podendo acarretar patologias, tais como, corrosão e fissuração durante a vida útil das edificações.

Visando retardar os efeitos do intemperismo e ainda buscando a possibilidade de mitigar os efeitos dos danos causados, a adição de polímeros superabsorventes, mais especificamente baseados em poliacrilonitrila (PAN), torna-se alvo de estudos, visto que estes são materiais promissores para tais aplicações. Assim, a pesquisa busca estudar o comportamento dos materiais cimentícios com adição de diferentes concentrações SAP almejando determinar a influência da adição destes materiais tanto nas propriedades mecânicas, físicas e auto regenerativas de argamassas de cimento.

Ao fim do desenvolvimento pretende-se determinar a quantidade ótima de adição de SAP na massa cimentícia para uso comercial baseada em cimento Portland CP III e assim promover o material como um meio construtivo de correção passível de auto regeneração perante as patologias recorrentes ao intemperismo ambiental.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Polímeros superabsorventes (SAP - *Superabsorbent Polymers*)

O SAP é um polímero superabsorvente que absorve o líquido por osmose, deste modo quando o SAP é adicionado em sua forma seca (como recebido) na formulação de argamassas, este compete no processo de hidratação com o cimento, a desorção do SAP ocorre quando a mistura de cimento necessita de água, o SAP perde sua água lentamente similar ao processo de evaporação em ar livre (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

A adição de maior quantidade de água na mistura de concreto, melhora a trabalhabilidade da massa, porém acarreta a redução das propriedades mecânicas. Como a água é um fator preponderante para garantir o bom desempenho do processo de hidratação e cura do concreto, sendo que com a falta ou excesso de água possibilita ocorrência de diversas patologias nas construções. Deste modo o estudo da aplicação do SAP como aditivo de controle da distorção da quantidade de água disponível para a cura (THIRUMOORTHY; 2018)

Segundo Santos (2015) o SAP possui dois tipos, os formados por monômeros iônicos e os monômeros não-iônicos. Os iônicos têm maior capacidade de absorção de líquido, por apresentar carga elétrica negativa e positiva. Esse tipo de material geralmente é usado para absorver metais pesados de solução aquosa, já os não iônicos por não possuírem cargas elétricas a absorção depende dos ácidos carboxílicos e das ligações de hidrogênio.

A utilização destes materiais na construção civil comumente é aplicada para a vedação de tubulões quando misturados com asfalto e cimento, e ainda pode ser utilizado também como aditivo de prevenção de rachaduras, auxiliando na hidratação do cimento (SANTOS, et al; 2015)

A porosidade do polímero superabsorvente influencia na capacidade de inchamento e conseqüentemente na absorção de líquidos. Os biopolímeros superabsorventes apresentam menor grau de absorção e maior perda de massa quando expostos à altas temperaturas quando comparados aos polímeros superabsorventes sintéticos, que apresentam poros maiores e são mais resistentes à altas temperaturas (NASSER, et al; 2007)

A capacidade de absorção de um SAP é relevante visto que estará diretamente ligada à disponibilidade de água para a cura da massa cimentícia, estando relacionado ao fator a/c (água/cimento). Esta relação entre a quantidade de água e de cimento aplicada em uma formulação é muito importante pois tanto a escassez quanto o excesso de água no processo de hidratação do aglomerante pode resultar na redução da resistência e conseqüente redução no o tempo de vida útil.

O conhecimento da capacidade de absorção de um SAP e a cinética de liberação é de especial relevância para a aplicação em materiais cimentícios, visto que acredita-se que a necessidade de cura externa controlada, em ambiente com umidade elevada, possa ser descartada quando utilizado aditivos baseados em SAP com excesso de água absorvido. Este excesso adicionado ao SAP garantirá que o volume de água perdido para o ambiente por meio de evaporação superficial seja repostado pela liberação contínua da reserva se água nele absorvido (DUGANE, *et al*; 2019).

Segundo Dang *et al.* (2017), a adição de SAP saturado com água na massa cimentícia funciona como um lubrificante, melhorando a trabalhabilidade e plasticidade da mistura, porém se a dosagem de adição for pode prejudicar as propriedades mecânicas do concreto.

Ademais, a adição de SAP como um aditivo na massa cimentícia pode variar dependendo do tipo de cimento utilizado, tendo em vista que o cimento Portland comercial pode ser encontrado em diversas composições. Todavia, os mais utilizados nos canteiros de obra são os compostos CPI, que possui em sua formulação pequena quantidade de clínquer, o CPII, que possui em sua formulação além da adição de clínquer adição de gesso, escórias de alto forno, material carbonático e pozolânico, e o CPIII que tem adições de resíduos de alto forno promovendo a este tipo de cimento elevada durabilidade mesmo em ambientes agressivos. Quando é necessária elevada resistência inicial, é aplicado o CPV-ARI, que possui as mesmas adições do CPII, porém em quantidades controladas (ABCP, 2002).

Outros fatores que interferem na durabilidade e resistência dos compósitos de matriz cimentícia com adição de SAP são as variações dimensionais resultantes do processo de cura, podendo haver baixa adesão dos polímeros com a matriz, o que inviabiliza a utilização da reserva de água absorvida no SAP para a manutenção da cura controlada, a presença de poros residuais após a liberação do conteúdo absorvido no SAP ou a tensão gerada pelo subsequente entumescimento excessivo do mesmo após o término da cura (LEE *et al.*, 2018).

O efeito da adição de diferentes tipos de SAP em sua forma seca, copolímero de acrilamida e acrilato de sódio e um poliacrilato de sal de potássio reticulado, reduz os microporos e os mesoporos, já a adição destes SAP em sua forma úmida não apresentou melhoria na ocorrência de microporos e aumento de mesoporos. A ocorrência de mesoporos é relacionada ao acréscimo de água na massa cimentícia (SNOECK; 2015).

O SAP saturado pode favorecer a diferença de distribuição interna de poros, dependendo da granulometria (MECHTCHERINE; REINHARDT; 2012).

Estudo realizado na aplicação do SAP como um aditivo para rachaduras auto vedantes na dosagem de 0,6 % e 2,0 % em massa de cimento, constatou que após a dessorção da água contida no SAP, o polímero superabsorvente não perde a capacidade de absorção de água, mas a constância de ciclos de absorção e dessorção resulta na redução da eficiência de retenção de líquidos (LEE *et al.*, 2018).

O processamento convencional das formulações cimentícias a via de regra é iniciada pela adição de água, do cimento e aos poucos a areia, respectivamente. Segundo Pourjavadi (2013), a adição do SAP na formulação de massas cimentícias deve ser realizada após a adição de cimento, pois o início de pega de uma massa de cimento com adição 0,3 %_m SAP apresenta aumento de 4 minutos no tempo de início de pega quando comparado com a massa convencional, fato que não interfere no tempo final de endurecimento.

De acordo com Mechtcherine e Reinhardt (2012), a adição de 0,6% de SAP em relação à massa do cimento, em uma mistura com 20% de sílica ativa, após 14 dias a pasta de cimento ainda estava sendo hidratada, comparado com uma mistura padrão, o que comprovou que o SAP controlou a liberação da água na massa.

A mistura de cimento sofre retração devido a evaporação da água. Ahmed e Abd (2018), em seus estudos com adição de SAP no concreto identificaram que após 28 dias a retração da amostra diminuiu em 89% em relação a uma amostra sem a adição de SAP. Fato que indica que o SAP, quando saturado com água, ocupa os vazios do concreto, havendo a liberação controlada desta água durante o processo de cura interna reduzindo assim, a formação de fissuras causadas por retração.

O uso do SAP na argamassa melhora a retração autógena, pois o SAP age como um reservatório interno de água. De fato, com a adição de quantidade extra de água pode haver a redução na resistência aos 7 dias de cura (HASHOLD; 2012)

O SAP é um material promissor para uso como agente de controle de cura, porém é necessário a realização de um ajuste ideal da quantidade de água extra para o SAP continuar hidratando o cimento pelo tempo necessário para atingir a resistência mecânica necessária, isto pois o fator a/c é predominante na causa da perda de resistência mecânica da argamassa.

De acordo com Mechtcherine e Reinhardt (2012), casos em que é adicionado excesso de água na mistura da massa cimentícia com o SAP, o grau de hidratação pode-se chegar até 56 dias, retardando e controlando assim os processos de obtenção das propriedades finais das argamassas.

Quando se adiciona o SAP na pasta cimentícia a tendência é retardar o processo de cura interna melhorando assim o processo de hidratação do cimento onde ocorre a formação dos cristais de sílica, obtendo a ligação dos agregados para formar a estrutura de concreto.

Em alguns estudos observa-se que o SAP vem sendo estudado para correção de patologias e aumento de resistência mecânica nas misturas de cimento.

Cimento de alto desempenho tem a capacidade de atingir a resistência a compressão de até 26 MPa em 1 dia. Porém devido a hidratação rápida e a falta de cura externa, no decorrer do tempo de cura pode ocorrer fissuras e deslocamento. Os autores Mechtcherine e Reinhardt (2012), adicionaram o SAP como um reservatório de água em uma argamassa de alto desempenho com uma quantidade extra de água no intuito de avaliar seu efeito nesta classe de cimentos. Em seus experimentos observaram que houve redução na resistência nos primeiros 7 dias de cura, sendo 12% para uma argamassa com 0,3% de SAP e para 0,6% de SAP atinge 30% de redução na resistência. Quando analisados os resultados obtidos após 28 dias de cura a redução da resistência da argamassa com 0,3% cai para 4%, comparado com amostra padrão.

Por outro lado, a adição de SAP em formulações de concreto convencionais, Dugane *et al.* (2019), reporta que a adição de 1%_m de SAP acarreta o aumento na resistência mecânica, porém reduz a plasticidade da massa.

Formulações de cimento com adição de fibras de aço visando a melhoria das propriedades mecânicas em compressão e flexão, apresentam microfissuras no compósito, porém os efeitos dessa patologia podem ser mitigados com a adição de

SAP na mistura, pois estes superabsorventes controlam a liberação de água na mistura (KUNDGOL e VIJUAPUR ;2016)

A adição de SAP em formulações de concreto que possuem a adição fibras de casca de coco não alteram a plasticidade da massa, porém acarretam na melhoria das propriedades mecânicas (KANNA et al; 2018).

Segundo Singh e Singh (2018) substituindo parte de agregados finos da formulação da argamassa por SAP resulta na redução das fissuras pós cura, não compromete a resistência mecânica, melhora a elasticidade e diminui a temperatura interna da massa cimentícia durante o processo de cura.

A adição de 0,3 à 0,5% de SAP na formulação, independente da classe de cimento Portland utilizada, proporciona aumento da resistência mecânica e da eficiência de cura interna, porém acarreta a redução a trabalhabilidade da mistura. A redução da trabalhabilidade está relacionada com o tipo de cimento usado na mistura (ANANTHI e ANANTHAKUMAR ;2019)

4.2 Ataques Químicos

Segundo Romano e Brito (2012), a redução nas propriedades mecânicas do concreto é devido aos ataques químicos que podem ocorrer por ataque de sulfatos, carbonatação, penetração de cloretos. A absorção de cloretos reduz o pH do concreto, causando a corrosão interna do aço enquanto que o ataque de sulfatos pode causar a formação de fissuras devido a variação da rigidez do material.

Em ambientes marítimos a despassivação da armadura da estrutura de concreto armado, ocorre devido a fissuração do concreto, os íons de cloreto de sódio atacam a armadura causando corrosão localizada e danificando a estrutura. Deste modo, faz-se necessário o uso de impermeabilizantes para aumentar a resistência à absorção de agentes agressivos e controle do processo de cura buscando reduzir a formação de fissuras do concreto (FERNANDES; NÓBREGA, 2018).

As massas cimentícias em contato com íons cloreto quando em apresenta redução no módulo de elasticidade, perdendo a função de proteção das armaduras do aço (SHUKAI *et al.*, 2020).

A importância do uso de aditivos para inibir a corrosão é sem dúvida fator relevante a ser considerado na formulação destes materiais, porém o uso inadequado destes aditivos pode afetar as propriedades do concreto (VIERA ;2010).

Como o processo de fabricação do concreto pode interferir na sua vida útil, o entendimento das reações químicas e interações entre os compostos formadores da massa cimentícia é importante. Quando o cimento entra em contato com a água inicia-se a hidratação, formando cristais prismáticos de silicatos de cálcio hidratados, quando os agregados são misturados ocorre a reação exotérmica, (COUTO *et al.* ;2016).

O uso de nitrato de cálcio na mistura do concreto visa mitigar a corrosão da armadura. A adição de SAP na mistura de cimento com nitrato de cálcio, resulta em melhoria na resistência a cloreto, porém acarreta um aumento no tempo de pega (DURAN-HERRERA, 2020).

Geralmente no transporte de concreto usinado usa-se aditivos para obter uma mistura mais fluida e aumentar a trabalhabilidade do concreto, normalmente são usados aditivos superplastificantes, na função de retardar o processo de absorção de água.

Segundo Sidiq (2020), o uso de superplastificantes e SAP retarda o processo de hidratação da massa cimentícia, com adição de 2,2%_m de plastificante os resultados apresentados mostram até 40% de fissuras no material, com a adição de 1%_m de SAP o estudo aponta que ocorre o fechamento dessas fissuras sendo curadas resultando na recuperação de até 80% das fissuras.

Patologias no concreto são comuns de acontecer quando ocorrem erros na aplicação ou no procedimento de preparação da massa. As patologias surgem no decorrer da vida útil do concreto, por fatores climáticos, mecânicos, físicos, químicos, ocasionando danos nas estruturas como deslocamentos, corrosão do aço, lixiviação. Um dos mais comuns de ocorrer é a carbonatação do concreto, segundo Moreira (2016), a carbonatação ocorre por condições ambientais e o fator água cimento pode aumentar o processo de carbonatação do concreto.

Usualmente adota-se a solução de fenolftaleína, para verificar o nível de profundidade da ação do CO₂ no concreto. A solução de fenolftaleína apresenta uma cor rosada, quando não ocorreu alteração do pH do concreto, como a diminuição do pH, não ocorre alteração da cor (OLIVEIRA, 2017).

A condutividade térmica dos agregados é inferior à do cimento, essa diferença interfere na temperatura interna durante o processo de cura. As reações químicas envolvidas têm caráter exotérmico, quanto maior a quantidade de agregados menor será a temperatura de reação de interação água/cimento. Deste modo torna-se importante estudar o ambiente no qual será aplicada a mistura, pois a temperatura ambiental interferirá diretamente no comportamento da massa cimentícia, sendo um

dos maiores causadores de patologias superficiais no concreto (ASSIS; RABELO, 2013).

4.3 Agregados

De acordo com a NBR 9935:2011 – Agregados – Terminologia, define como agregado miúdo natural são os extraídos dos rios, mas também pode ser adquirido por meio de processo industrial sendo um agregado artificial ou reciclado. A areia (agregado miúdo natural) é definida como (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA, 2011).

- Areia grossa - grãos com diâmetro entre 2 e 4 mm;
- Areia média - grãos com diâmetro entre 0,42 a 2 mm;
- Areia fina - grãos com diâmetros entre 0,05 e 0,42 mm.

4.4 Argamassa

A argamassa é usual para diferentes tipos de procedimento na construção civil, Tabela 1, é aplicada em alvenarias, revestimentos de paredes e tetos, revestimento de pisos, recuperação de estruturas. De acordo com seu uso necessita ser preparada de diferentes traços para sua aplicação, assim sendo definida de acordo com a tabela a seguir (CARASEK, 2007).

Tabela 1: Classificação da argamassa com relação a diversos critérios.

(Continua)

Critério de Classificação	Tipo
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea
	Argamassa hidráulica
	Argamassa de cal
	Argamassa de cimento
Quanto à natureza de aglomerante	Argamassa de cimento e cal
	Argamassa de gesso
	Argamassa de cal e gesso
	Argamassa simples
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa mista
	Argamassa seca
	Argamassa plástica
Quanto à consistência da argamassa	Argamassa fluida
	Argamassa pobre ou magra

Tabela 1: Classificação da argamassa com relação a diversos critérios.

(Conclusão)

Critério de Classificação	Tipo
Quanto à densidade de massa da argamassa	Argamassa média ou cheia
	Argamassa rica ou gorda
	Argamassa leve
	Argamassa normal
	Argamassa pesada
	Argamassa preparada em obra
Quanto à forma de preparo ou fornecimento	Mistura semipronta para argamassa
	Argamassa industrializada
	Argamassa dosada em central

Fonte: Carasek (2007).

As interações químicas estudadas por Ferreira, *et al.* (2014) no estado fresco da argamassa, analisou-se por Difractometria de raios X, onde identificou-se as fases formadas: SiO_2 (Sílica); $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (alite); $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandite=hidróxido de cálcio); C_2S (Belite); C_3S (Cálcio Silicato). O que comprova a atividade pozolânica, que resulta na formação de cristais de belita e alita, que influenciam na resistência mecânica da argamassa e aumenta o desempenho.

Os cimentos Portland têm variações nas composições, aplicando-se a técnica de difratometria de raio X, a análise do CPI, efetuada por Romano *et al.*, (2016), identificou os seguintes componentes químicos na mistura do concreto: Alita, $(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ C3; Belita $(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ C2; Aluminato tricálcico $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ CA; Brownmillerita $(4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3)$ B; Calcita (CaCO_3) C; Gipsita $(\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ G; Portlandita $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ P; Periclásio (MgO) Pe; Hematita (Fe_2O_3) He; Quartzo (SiO_2) Qz, após hidratado o cimento ocorre a reação química formando novos componentes químicos que são a Etringita. CSH, Portlandita e Gisita.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e os métodos de confecção dos corpos de prova e ensaios realizados no estudo.

5.1 Materiais

5.1.1 Cimento

Cimento Portland CP III - 40 RS – Resistência a sulfato da fabricante CSN, normatizado de acordo com ABNT NBR 16697 - 2018 - Cimento Portland Requisitos, sua composição está apresentada na Tabela 2. Moagem do clínquer e escória granulada de alto-forno, também conhecida como LHS - Ligante Hidráulico Siderúrgico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018).

Tabela 2: Composição e característica do cimento.

Proporção em massa para composição do CP III										
Tipo de cimento	Clínquer e gesso	Escória granulada de alto-forno				Material carbonático				
CP III	25 -65%	35 -70 %				0 - 5%				
Principais características físicas do cimento CP III										
Tipo de cimento	Classe	Resistência à compressão				Finura Resíduo na peneira 75 µm	Tempo de pega		Expansibilidade	
		MPa 3 dias	MPa 7 dias	MPa 28 dias	MPa 91 dias		Início (horas)	Fim (horas)	À frio	À quente
CP III	40 32	≥ 12 ≥ 10	≥ 23 ≥ 20	≥ 20 ≥ 32	≥ 48 ≥ 40	≤ 8,0	≥ 1	≤ 12	≤ 5	≤ 5

Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (2019).

5.1.2 Agregados miúdos

Utilizou-se nos ensaios areia natural de rio, seca em estufa a 110 °C por 24 h, passante na peneira com abertura 1,19 mm.

Para definir o módulo de finura da areia foi efetuado o ensaio de granulometria da areia, usando a série de peneira normal de acordo com a Tabela 3: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Tabela 3: Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal)

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	–
–	63 mm
–	50 mm
37,5 mm	–
–	31,5 mm
–	25 mm
19 mm	–
–	12,5 mm
9,5 mm	–
–	6,3 mm
4,75 mm	–
2,36 mm	–
1,18 mm	–
600 µm	–
300 µm	–
150 µm	–

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2005).

O cálculo de módulo de finura é a soma da quantidade de grãos retidos nas peneiras dividido por 100. Para definir a qualidade do agregado utilizamos a Tabela 4 para determinar se o agregado se encontra dentro da zona utilizável.

Tabela 4: Limite de distribuição granulométrica

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	35	50
600 µm	15	35	65	70
300 µm	50	65	90	95
150 µm	85	90	95	100

Notas: 1 - O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90;

2 - O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 à 2,20;

3 - O módulo de finura da zona ótima varia de 2,90 à 3,50

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2005).

5.1.3 Polímero superabsorvente de poliacrilonitrila

O polímero superabsorvente de poliacrilonitrila fornecido pela empresa IGTPAN – Instituto Granado de Tecnologia em Poliacrilonitrila, para ser adicionado na argamassa.

Segundo o fabricante, 1g de SAP de poliacrilonitrila tem a capacidade de absorver 250 mL de água, para adicionar na argamassa será pesada o SAP na balança analítica a quantidade necessária para absorver a água de amassamento da massa cimentícia.

5.2 Moldagem

Foram moldados 2000 (dois mil) corpos de provas, em formato cilíndrico de 5 x 10 cm, as formas foram untadas com óleo mineral. Adicionou-se a massa em quatro etapas, em cada etapa da adição da argamassa realizou-se trinta golpes de soquete padrão para adensar a massa segundo previsto na ABNT/NBR 7215:1996 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996).

Os termos utilizados para identificar as amostras estão mostrados na Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5: Identificação das amostras

Descrição	Cód..	28 dias	90 dias
Padrão	P	P_28	P_90
SAP saturado	SU	SU_28	SU_90
SAP seco	SS	SS_28	SS_90
SAP saturado/dobro de água	SH	SH_28	SH_90
SAP saturado/com 20% a mais de água	S20	S20_28	S20_90
SAP seco/com 20% a mais de água	S20S	S20S_28	S20S_90
SAP Saturado/ com 40% a mais de água	S40	S40_28	S40_90
SAP Seco/ com 40% a mais de água	S40S	S40S_28	S40S_90

Fonte: o autor.

Com a numeração indicando o processo de cura efetuado nas amostras, para analisar o comportamento de retração, dilatação e resistência mecânica do material.

Tabela 6: Tipos de curas das amostras

Descrição	Cód..
Normalizado de acordo com NBR-5738/2015	1
Sem cura externa	2
Cura na estufa com 50% de umidade com temperatura à 40 °C por 3 dias	3
Cura na estufa com 50% de umidade com temperatura à 40 °C por 7 dias	4

Fonte: o autor.

O traço da argamassa de base comparativa foi efetuado de acordo com padrões de laboratórios, sendo uma parte de cimento para 3 partes de areia e 0,5 de água em relação ao cimento. (ABCP, 2002)

A moldagem dos corpos de prova foram efetuados com os seguintes traços apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Traço da argamassa

Cód..	Cimento(g)	Areia(g)	Água(mL)	SAP(g)
P				
SU			250	1
SS				1
SH	500	1500	500	2
S20			300	1,2
S20S				
S40			350	1,4
S40S				

Fonte: o autor.

Nas misturas cimentícias foram adicionadas a quantidade de polímero superabsorvente em sua forma seca e saturado, conforme codificação apresentada na Tabela 5. Nas amostras que foram adicionados SAP saturado, a água foi colocada em um recipiente e logo adicionado o SAP e aguardou-se 5 minutos para que o SAP absorvesse a totalidade da água, para ser usada na mistura dos agregados, como podemos identificar na Figura 1.

Figura 1: Amostra polímero superabsorvente de poliacrilonitrila.



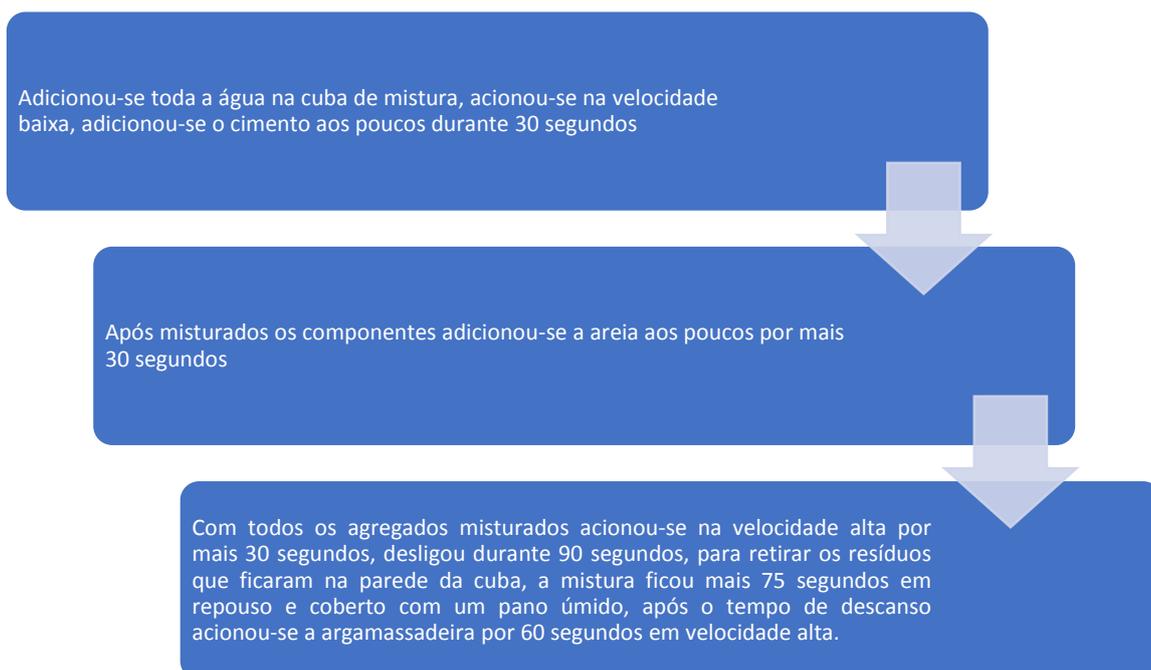
Fonte: o autor.

A mistura cimentícia foi realizada na argamassadeira planetária, de acordo com a ABNT-NBR 7215:1996 Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, foram moldados os corpos de prova (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996). A areia foi seca na estufa à 110 °C, após secagem foi peneirada na peneira 1,19 mm, na qual os grãos passantes foram utilizados para a mistura da argamassa, sendo pesado na balança a quantidade específica para o uso.

A água foi aferida em proveta na quantidade necessária para ser usada, o SAP foi pesado na balança analítica em quantidade necessária para absorver a água que será usada na mistura da argamassa.

A mistura da argamassa é realizada em etapas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2: Fluxograma de apresentação das etapas de amassamento da argamassa.



Fonte: o autor.

O SAP seco adicionado na argamassa após a primeira etapa da mistura da água com o cimento, como o SAP saturado substitui a água, para adicioná-lo na mistura efetuou o mesmo procedimento que a amostra padrão.

Para avaliação das variações da mistura da argamassa, passaram por quatro processos de cura por 28 dias e 90 dias, pode-se verificar na Figura 3.

Figura 3: Apresentação dos tipos de cura.

Cura padronizada	<ul style="list-style-type: none"> • Cura padronizada de acordo com a norma: os corpos de prova ficaram submerso em água 5L com uma camada superficial de 50 g de hidróxido de cálcio;
Sem cura externa	<ul style="list-style-type: none"> • Os corpos de prova ficaram expostos a temperatura ambiente;
Cura em estufa com umidade controlada por 3 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Os corpos de prova ficaram por 3 dias na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 °C, após ficaram em temperatura ambiente até completar 28 e 90 dias para ensaio de resistência mecânica;
Cura em estufa com umidade controlada por 7 dias	<ul style="list-style-type: none"> □ Os corpos de prova ficaram por 7 dias na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 °C, após ficaram em temperatura ambiente até completar 28 e 90 dias para ensaio de resistência mecânica.

Fonte: o autor

Utilizou-se uma estufa com umidade e temperatura controlada, para manter o ambiente (temperatura e umidade) similar aos dias quentes de verão, buscando aproximar-se da realidade nos canteiros de obras. Após a exposição na estufa os corpos de prova ficaram expostos a temperatura ambiente sem cura.

Para avaliação, devido aos melhores resultados preliminares do estudo, foram submetidos a cura úmida de acordo com a Norma da ABNT NBR 5738 – 2015 Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, onde os corpos de prova ficam submersos em solução aquosa de hidróxido de cálcio, no período de 28 e 90 dias.

5.2.1 Ensaio de índice de consistência da argamassa

O ensaio de índice de consistência seguiu a NBR 13276:2002 – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.

Para realizar o ensaio é usado um tronco-cônico, de acordo com a Figura 4, no centro da mesa de ensaio, onde a argamassa é adicionada em três etapas, em cada nível aplicou-se 15, 10 e 5 golpes com soquete, respectivamente, quando necessário adicionou mais argamassa até preencher o tronco-cônico, após realizar-se o rasamento com auxílio de régua metálica e retirar o molde, acionou-se a manivela da mesa com 30 golpes em 30 segundos, após medir três pontos do diâmetro do espalhamento da argamassa com paquímetro.

O traço da argamassa SH, não foi possível efetuar o ensaio devido o escoamento da mistura sobre a mesa de ensaio.

Figura 4: Ensaio de índice de consistência



Fonte: o autor.

5.2.2 MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Para realização das análises por microscopia dos materiais utilizou a microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Zeiss modelo EVO M10, os materiais foram secos na estufa a 50 °C por 24 h, passou por um processo de metalização no vácuo com ouro na superfície do material, para possibilitar a dispersão dos elétrons que são emitidos na superfície do material.

Os materiais analisados foram Areia, Cimento, SAP seco, SAP após absorver água passando por processo de secagem além das composições de formulação estudadas.

5.2.3 Difractometria de Raios X após cura

As amostras foram secas a temperatura de 50 °C por 24 horas, maceradas, peneiradas em malha 0,038 mm e armazenadas protegidas da umidade, até a realização da análise por difração de raios X. Cada uma das composições foram colocadas em um porta amostras com uma espátula de inox para compactá-lo cuidando-se para não realizar cisalhamento nas amostras, a fim de reduzir o escorregamento e orientação de planos preferenciais. O difratograma foi obtido em um Difrátômetro de Raios X marca Shimadzu, modelo XRD-6000, em condições normais de temperatura e pressão atmosférica, com default com variação de 2θ de 20° à 60° e velocidade de 2°/min. A identificação das fases presentes foi realizada em software de análise HighScore Plus.

5.2.4 Ensaio de estabilidade volumétrica

A análise volumétrica da amostra foi feita no primeiro dia de desmolde do corpo de prova, após 28 e 90 dias de cura, com o paquímetro aferindo a altura e o diâmetro da amostra, os resultados foram analisados de acordo com a volumetria da amostra.

5.2.5 Ensaio mecânicos de compressão axial

O ensaio de compressão axial foi executado de acordo com a NBR 7215 Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), utilizando uma máquina de ensaios Universal Marca Instron, modelo 5900R-5584 com célula de carga de 150 kN onde o cilindro foi posicionado com a direção axial no centro do eixo de carregamento recebendo uma carga até a ruptura da amostra, com a velocidade de carregamento de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s.

5.2.6 Ensaio mecânicos de compressão diametral – Tração Indireta

Para o ensaio de compressão diametral foi utilizada a NBR 7222: 2011- Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, a amostra foi posicionada de modo que seu eixo longitudinal formasse angulação de 90 ° com o centro do eixo de carga do equipamento. Aplicou-se carga até a ruptura, com a velocidade de carregamento $0,05 \pm 0,02$ MPa/s, para encontrar a tração indireta da compressão diametral foi usada a Equação 1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011; GARCIA, 2013).

$$\sigma_{ct} = 0,9 \cdot \sigma_{ct.sp} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

σ_{ct} = Resistência à tração direta;

$\sigma_{ct.sp}$ = Resistência à tração indireta, medida no ensaio de compressão diametral.

5.2.7 Ensaio de capilaridade

O ensaio de capilaridade da amostra como podemos verificar na Figura 5, foi efetuado de acordo com a NBR 9779:2012 - Argamassa e concreto endurecidos - determinação da absorção de água por capilaridade, o corpo de prova foi seco na estufa por 24 h a temperatura de 105 °C, após resfriá-lo até atingir a temperatura ambiente, pesou-se as amostras em balança analítica, e colocou-se as amostra sobre um suporte em um recipiente com água para ter contato somente sua face inferior e os corpos de prova foram pesados com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, após a ruptura no eixo longitudinal das amostras aferiu-se o nível de água absorvido no interior da amostra com um paquímetro.

Para definir a quantidade de água absorvida foi usada a seguinte equação:

$$C=(A-B)/S \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade(g/cm)²

A = massa do corpo-de-prova que está em contato com a água, em g

B = massa do corpo-de-prova seco, em g

S = área da seção transversal, em cm²

Figura 5: Ensaio de capilaridade



Fonte: o autor

5.2.8 Ensaio de densidade aparente

O ensaio de densidade aparente foi efetuado de acordo com a norma NBR 9778/2009 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica, foram realizados em triplicata para cada formulação estudada. Os corpos de prova foram curados por 90 dias, após a retirada do meio de cura foram secos em estufa a 105 °C, por 72 horas, foram pesadas todas as amostras e depois submersas em água por mais 72 horas, sendo novamente pesadas, com os valores obtidos utilizou-se as seguintes fórmulas para determinar a densidade das amostras conforme equações 3, 4 e 5:

- Absorção

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

m_{sat} = massa da amostra saturada em água

m_s = massa da amostra seca em estufa

- Massa específica da amostra seca

$$P_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equação 4})$$

- Massa específica da amostra saturada

$$P_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (\text{Equação 5})$$

5.2.9 Ensaio de resistência ao ataque por sulfato de cálcio

Para o ensaio de ataque por sulfato de cálcio, foram moldadas 3 amostras para cada composição, após a cura por 90 dias, foi seco em estufa por 3 horas. Após o resfriamento a temperatura ambiente, as amostras foram submersas em uma solução de sulfato de cálcio (CaSO_4), por 90 dias, para avaliar o ataque na argamassa. De acordo com Gomides *et al.* (2008), para a obtenção de melhores resultados é necessário ficar exposto ao sulfato de cálcio por 4 a 6 meses, onde será possível analisar visualmente o ataque do sulfato, mas para um resultado parcial as amostras foram pesadas antes e depois de 90 dias expostas ao meio agressivo.

5.2.10 Ensaio acelerado de carbonatação

Após 28 dias de cura os corpos de prova P_28, SU_28, S20_28, S20S_28, foi colocado em um recipiente fechado por 90 dias, com pressão constante controlada por um manômetro, expostas no gás carbônico (CO_2). Após o tempo de exposição as amostras foram cortadas em sua linha longitudinal em sua superfície aspergiu a solução de Fenolftaleína, para analisar a profundidade de carbonatação da amostra, o pH da amostra (MOREIRA, 2016).

A solução usada foi de 2% fenolftaleína, 70% de álcool etílico e 28% de água destilada, para aferir as áreas carbonatadas, foi usado o paquímetro.

5.2.11 Ensaio de resistência ao ataque por cloreto de sódio

Para a realização do ensaio de ataque de cloreto de sódio, foram moldadas amostras P_28, SU_28, S20_28, S20S_28, com cura de 28 dias em solução de hidróxido de cálcio. Após a cura as amostras foram colocadas na estufa por 3 horas em

temperatura de 100 °C, retiradas e expostas a temperatura ambiente por 24 h. As amostras foram submersas em uma solução de 20% de cloreto de sódio (NaCl), por 90 dias. Para identificar a presença de NaCl, preparou-se uma solução de 2 g de nitrato de prata (AgNO₃), dissolvida em 50 mL de água destilada, essa solução quando em contato com a superfície com o cloreto de sódio, forma uma película branca onde identifica a quantidade de absorção de cloreto de sódio na amostra. Para efetuar o ensaio das amostras foram cortadas em sua seção longitudinal, aspergiu-se a solução de nitrato de prata para que, por meio de uma reação química, foi possível revelar a profundidade de penetração de cloreto na amostra (VIEIRA *et al.*, 2010).

5.2.12 Ensaio de Temperatura da argamassa

Para o ensaio de temperatura da argamassa, foi utilizado um calorímetro e um termostato. As amostras foram colocadas dentro do calorímetro, que após lacrado, inseriu-se um termostato. A partir dos dados coletados pelo sistema montado, mantido em temperatura ambiente controlada, aferiu-se a temperatura inicial/final da massa, monitorou-se por 10 minutos, tempo no qual não observou-se variações na temperatura do sistema. De acordo com Graeff (2017), o calorímetro ideal para analisar a hidratação do cimento é o semi-adiabático, conhecido como Garrafa de Langavant, para melhores resultados.

5.2.13 Ensaio de fissuração

Para o ensaio de fissuração foi usado um corpo de prova no formato de anel. Devido a retração da massa cimentícia, a tensão exercida pela parte interna da forma, causa a fissuração do compósito no decorrer do processo de cura. Para moldagem foi usada uma forma no formato de anel, com proteção interna, colocado a mistura de cimento em três partes, a amostra ficou em processo de secagem em temperatura ambiente por 21 dias. (EHRENBRING, TUTIKIAN, QUININO, 2018)

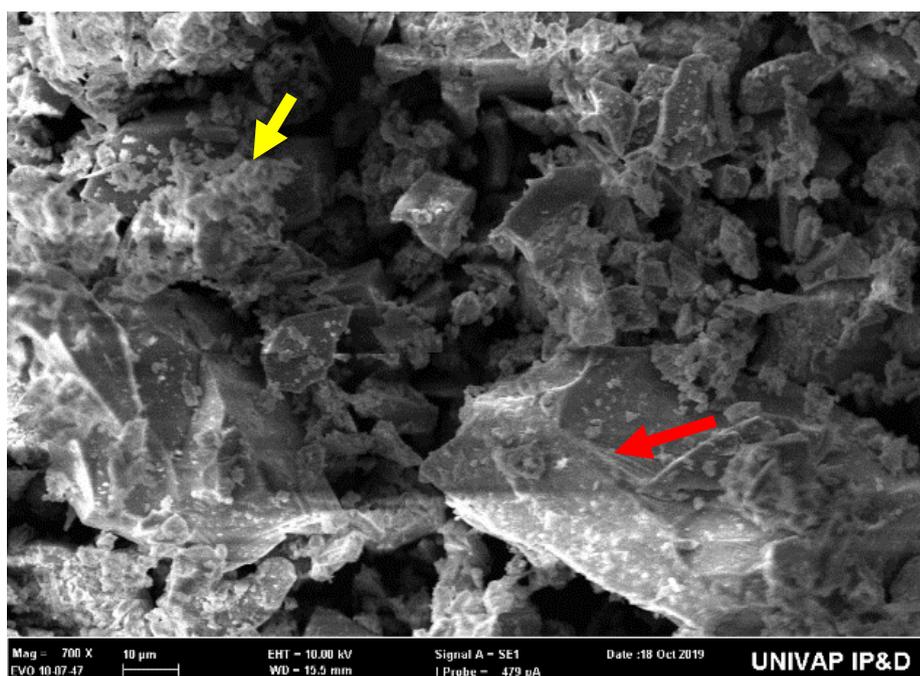
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização dos materiais

6.1.1 Cimento Portland CPIII

Para a determinação da morfologia das partículas do aglomerante hidráulico utilizado, realizou-se a microscopia eletrônica de varredura de uma amostra do cimento Portland utilizado para fabricação dos corpos de prova, as imagens obtidas estão mostradas na Figura 6.

Figura 6: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do aglomerante hidráulico – Cimento Portland.



Fonte: o autor.

Conforme o especificado pela ABNT- NBR 16697:2018, o aglomerante listado como CPIII tem em sua composição adição de escória de alto forno, clínquer, gesso e material carbonático. Na análise morfológica realizada por MEV, Figura 6, observa-se em destaque indicado pela seta amarela a presença de material proveniente da adição de gesso na composição, a textura rugosa apresentada por esta fase, na magnitude de aumento analisada, identifica este material mineral. Do mesmo modo, a morfologia

facetada, destacada pela seta vermelha, identifica a presença de materiais provenientes da adição de escória de alto forno, esta morfologia é obtida visto que estes materiais possuem elevada dureza quando comparado aos demais formadores do aglomerante hidráulico. A realização de ensaio qualitativo por dispersão de raios X não foi possível devido à indisponibilidade do equipamento. Porém, com base no informado na ficha técnica do material, recebido do fabricante CSN, e com o conhecimento das características morfológicas de cada um dos componentes, foi possível identificar a presença das fases (Companhia Siderúrgica Nacional ;2019).

6.1.2 Areia

A determinação do módulo de finura do agregado miúdo utilizado na formulação das argamassas estudadas, realizou-se o ensaio granulométrico da areia seguindo o procedimento apresentado na norma NBR 7211:2005, resultado apresentados na Tabela 8.

Conforme previsto em norma, a faixa ótima de finura dos agregados miúdos situa-se entre 2,20 a 2,90 porém é aconselhável a aplicação de materiais que estejam localizados na zona utilizável superior que situa-se entre 2,90 e 3,50 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

Tabela 8: Resultado do ensaio da granulometria da areia.

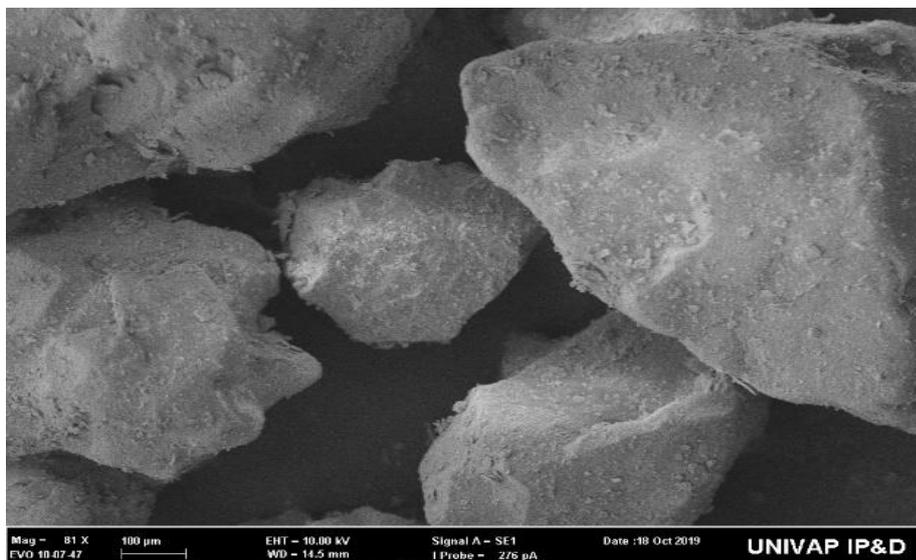
Cód. peneira	Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retida acumulada	Peso passante (g)	% passante
4	4,75	0	0	0	1018,16	100
8	2,36	0	0	0	1018,16	100
16	1,18	217,93	21	21	800,23	78,6
30	0,6	295,14	28	51	505,09	49,61
50	0,3	328,49	32	83	176,6	17,35
100	0,15	158,06	15	98	18,54	1,82
FUNDO	FUNDO	18,54	4	100	0	0
	TOTAL	1018,16	100			
Módulo de finura	3,5					

Fonte: Autor.

A análise granulométrica realizada no material utilizado para a confecção dos corpos de prova apresentou módulo de finura de 3,5, estando assim situado na faixa aceitável de utilização. Buscando a identificação da morfologia destas partículas de

agregado, foi realizada microscopia eletrônica de varredura, imagem apresentada na Figura 7.

Figura 7: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do agregado miúdo – Areia.



Fonte: o autor.

Na análise morfológica foi possível identificar que as partículas apresentam cantos suavizados com baixos ângulos, o que é coerente com a erosão sofrida por estas partículas em seu ambiente pré-extração, visto que estes materiais são obtidos nos leitos de rios, sendo assim erodidas pela correnteza. Os formatos irregulares destas partículas o que é uma característica desejável para o adensamento das massas cimentícias (EHRENBRING *et al.*, 2019).

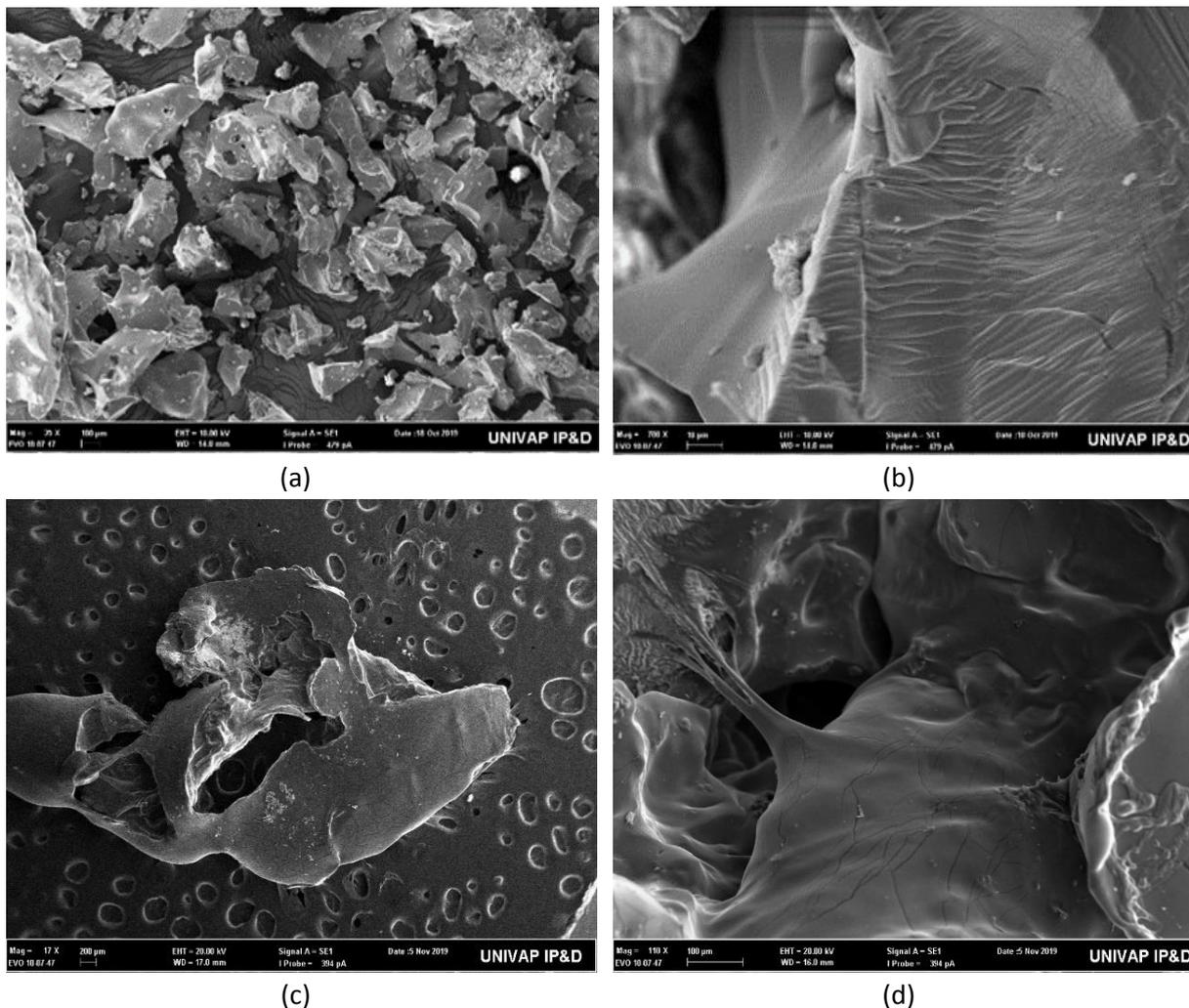
6.1.3 SAP

A Figura 8 apresenta a microscopia eletrônica de varredura realizada no polímero superabsorvente em diferentes condições e aumentos: a) SAP seco com aumento 25X ; (b) SAP seco com 200X; (c) SAP saturado após secagem em estufa por 24 h com aumento de 17X; (d) SAP saturado após secagem em estufa por 24 h com aumento de 110X.

A estrutura das partículas de SAP, apresentaram forma de escamas, com formato e tamanhos irregulares, conforme observado na imagem mostrada na Figura 8

(a), na ampliação desta imagem, figura 8 (b) observa-se linhas como “marcas de praia” que são características de materiais poliméricos extrudados.

Figura 8: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura do Polímero superabsorvente de poliacrilonitrila. (a) Polímero superabsorvente seco com aumento 25X ; (b) Polímero superabsorvente seco com 200X; (c) Polímero superabsorvente saturado seco em estufa por 24 h com aumento de 17X; (d) Polímero superabsorvente saturado seco em estufa por 24 h com aumento de 110X.



Fonte: o autor.

Com intuito de avaliar a mudança morfológica do polímero superabsorvente após ciclo de saturação e secagem, buscando a característica deste material no interior da massa cimentícia, realizou-se o processo de absorção de água destilada no SAP até a sua saturação e posteriormente a extração desta água por meio de secagem em estufa. A Figura 8 (c) mostra uma visão geral, com aumento de 17X da película formada após o ciclo de saturação/secagem, identificando-se como um material liso com ruptura com superfície rugosa após secagem, em detalhe, Figura 8 (d), pode-se observar que

apesar de possuir regiões caracteristicamente plásticas, possui microfissuras em sua superfície, provavelmente provenientes da secagem acelerada em estufa. Característica semelhante foi encontrado por Ananthi e Ananthakumar (2019) em seus estudos da aplicação dos polímeros superabsorventes como agentes de autocura de massas cimentícias.

6.2 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova quando foram moldados de acordo com a NBR 7215:1996 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1996), notou-se que a mistura com SAP saturada (SU), apresentou redução em seu volume fresco. Por outro lado, a mistura realizada com SAP seco (SS) apresentou-se mais seca, não havendo plasticidade para a moldagem visto que não observou-se escoamento adequado na cavidade do molde. As melhores misturas estudadas forma as quais houve adição de 20% (S20) e 40% (S40) de água, apresentou uma massa homogênea com facilidade de manusear.

Na massa produzida com o dobro de adição de água de amassamento (SH), após a moldagem, observou exsudação da água nas extremidades livres do molde. Para a quantificação da exsudação, os corpos de prova moldados, foram acondicionados em um refratário para coletar a água resultando em 125 mL. Este excesso de água de amassamento não mostra-se interessante para a aplicação em canteiros de obras, visto que devido a exsudação, as massas não ficariam estáveis na superfície de aplicação, sendo esta mistura descartada dos demais estudos realizados neste trabalho.

Para a análise do comportamento e interação do aglomerante hidráulico e o polímero superabsorvente, foram moldados dois corpos de prova sendo um com cimento e água e outro com cimento e SAP saturado, após 7 dias de cura estes corpos de prova foram rompidos em compressão axial apresentando 8,7 MPa e 3,8 MPa respectivamente. Notou-se que a amostra com adição de SAP apresentou umidade interna enquanto que a amostra sem a adição apresentou-se totalmente seca. Ainda durante a moldagem, notou-se que a mistura com adição de SAP apresentou maior consistência e melhor trabalhabilidade, o que indica que as utilizações destes materiais são realmente promissoras para a aplicação com agentes de controle de cura, pois

claramente com os resultados de resistência mecânica indicaram que a cura dos corpos de prova com adição de SAP não atingiram resistência esperada aos 7 dias de cura.

6.2.1 Ensaio de índice de consistência da argamassa

De acordo com as normas estabelecidas para ensaio de plasticidade tronco-cônico o aparato de ensaio possui abertura de 80 mm, e a partir desta dimensão são aferidas o escoamento da massa fresca, assim os resultados obtidos no ensaio dos traços estudados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultado do ensaio de índice de consistência por tronco-cônico.

Cód..	(mm ± 0,02 mm)
P	83,7
SU	85,3
SS	91,7
S20	93,3
S20S	89,7
S40	98,3
S40S	96,7

Fonte: o autor

Não foi possível efetuar o ensaio de consistência com o traço SH, devido a elevada fluidez da mistura, ocorrendo o escoamento por toda a base quando retirado o molde para efetuar o ensaio, o que foi corroborado com a exsudação observada durante o processo de moldagem.

A mistura da argamassa com SAP saturado apresentou fluidez e trabalhabilidade superior ao traço P, sendo a variação de 2% a 17% as amostras SU, S20 e S40, o espalhamento da argamassa, os traços apresentaram uma mistura plástica e homogênea, com facilidade no manuseio e fluidez, de acordo com Dang et al. (2017) o SAP funciona como lubrificante para os agregados podendo explicar esta característica plástica da massa.

Quando adicionado o SAP seco na massa, apresentou uma massa menos fluída, com dificuldades de manuseio, o espalhamento das amostras SS, S20S e S40S, apresentando menores índices de espalhamento, podendo ser observado o aparecimento de trincas de 0,5 mm à 0,8 mm na superfície superior das amostras. Ainda segundo Dugane et al. (2019), a adição de SAP na massa cimentícia, mesmo

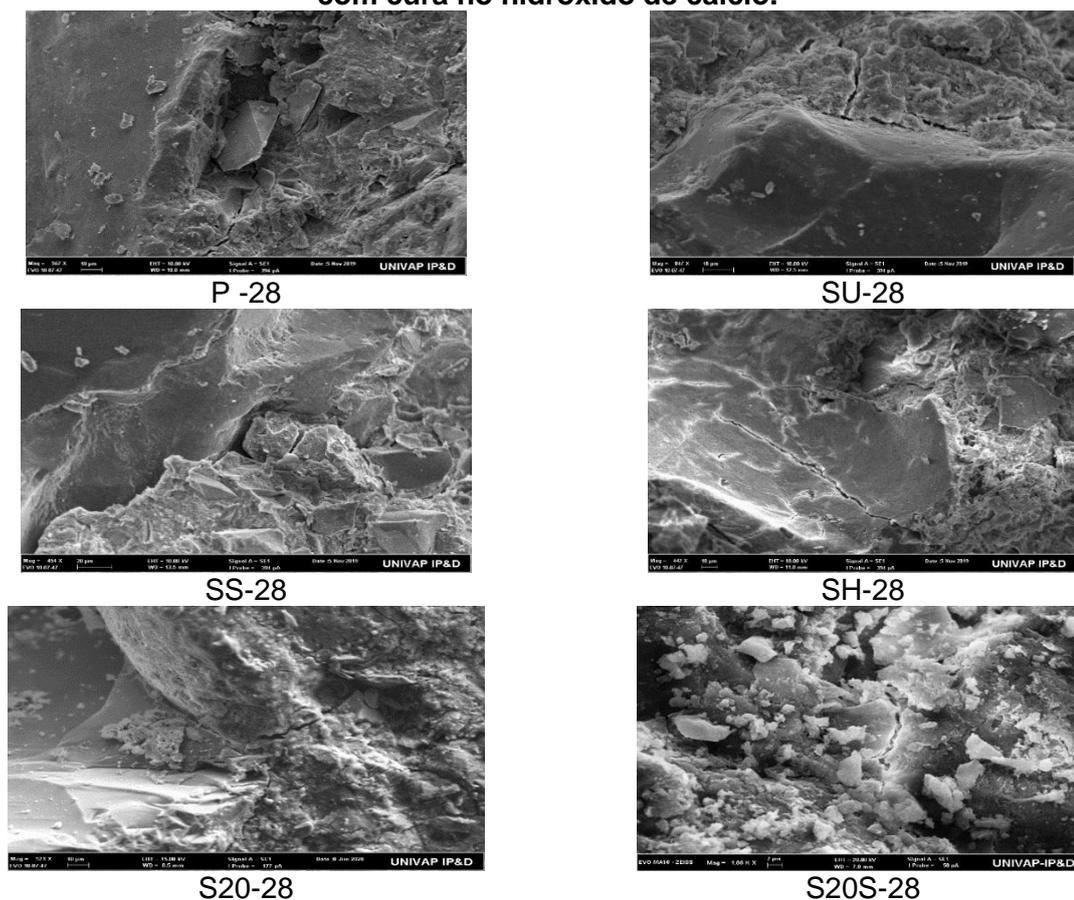
que o SAP possa agir como um lubrificante, quando não dosado corretamente pode reduzir a plasticidade em até 6% comparado com uma amostra padrão, o que comprova que a utilização de polímeros superabsorventes devem ser aplicadas em seu estado saturado.

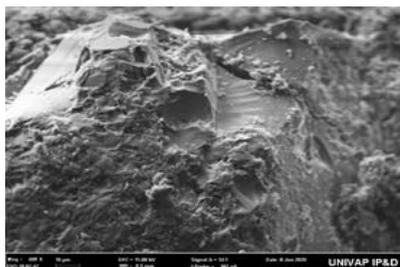
6.2.2 MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise micrográfica dos compósitos após 28 e 90 dias cura, visou observar o comportamento da adesão dos agregados e se possível identificar o SAP na mistura.

Amostras com cura submersa no hidróxido de cálcio por 28 dias estão apresentadas na Figura 9.

Figura 9: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura no hidróxido de cálcio.





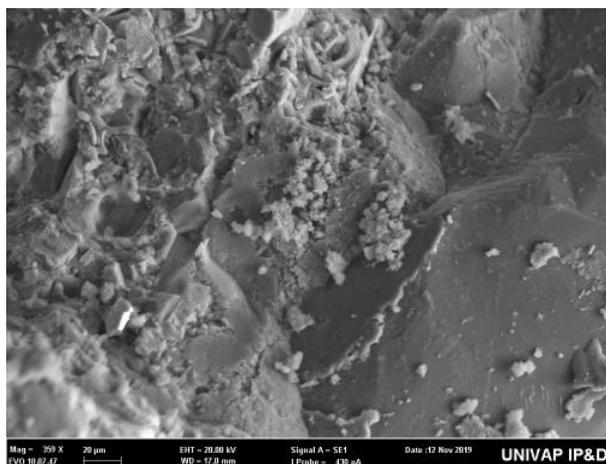
S40-28

Fonte: o autor.

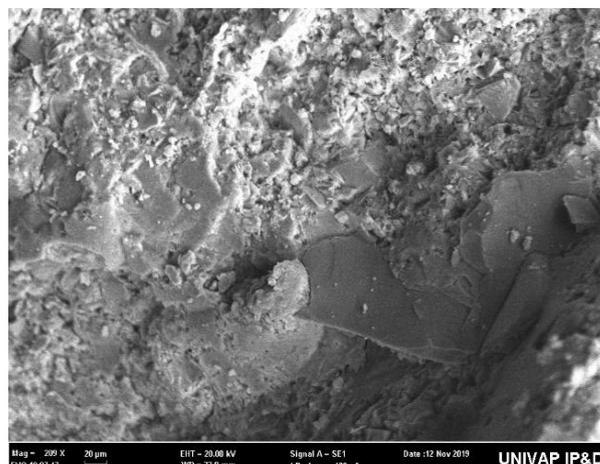
Pode-se identificar que as amostras SU_28 e SS_28 apresentam uma textura mais homogênea e uniforme com menores quantidades de vazios quando comparadas com a amostra padrão. Já a amostra SH_28 apresenta trincas e deslocamento na argamassa. Como reportado por Dang et al (2017) a adição de água de 40% com SAP saturado (S40_28), apresentou um compósito equivalente a mistura padrão (P_28) e nas amostras S20_28 notou-se uma textura homogênea com presença de fissuras, provavelmente provenientes do ensaio de ruptura. A amostra S20S_28 apresenta maior número de vazios o que corrobora com já discutido sobre o índice de consistência, a menor plasticidade das massas obtidas com adição de SAP seco na mistura acarreta no maior índice de vazios.

Na Figura 10, estão apresentadas as fotomicrografias das amostras que não obteve cura externa.

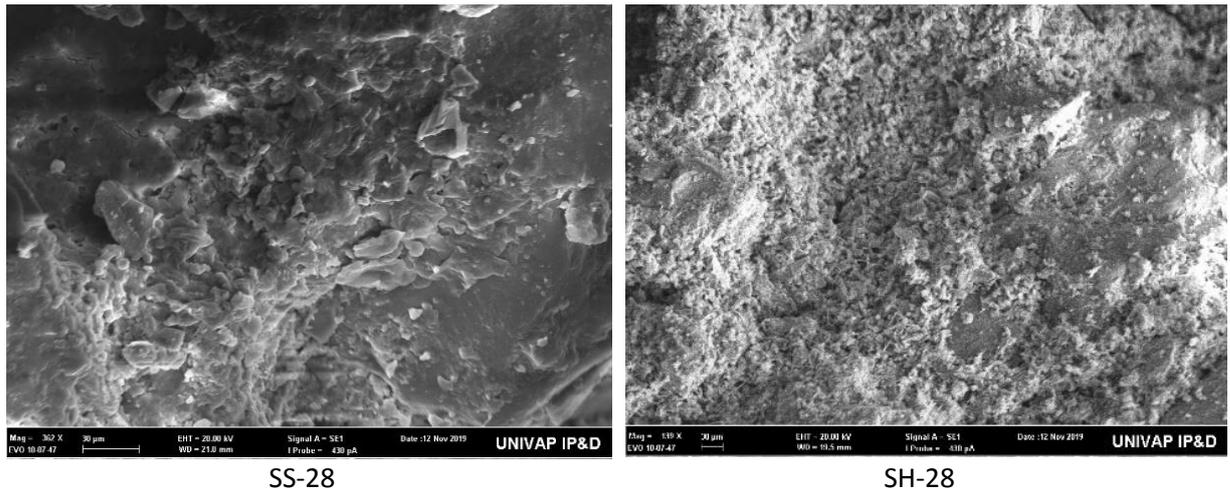
Figura 10: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras expostas em temperatura ambiente sem cura externa.



P-28



SU-28



SS-28

SH-28

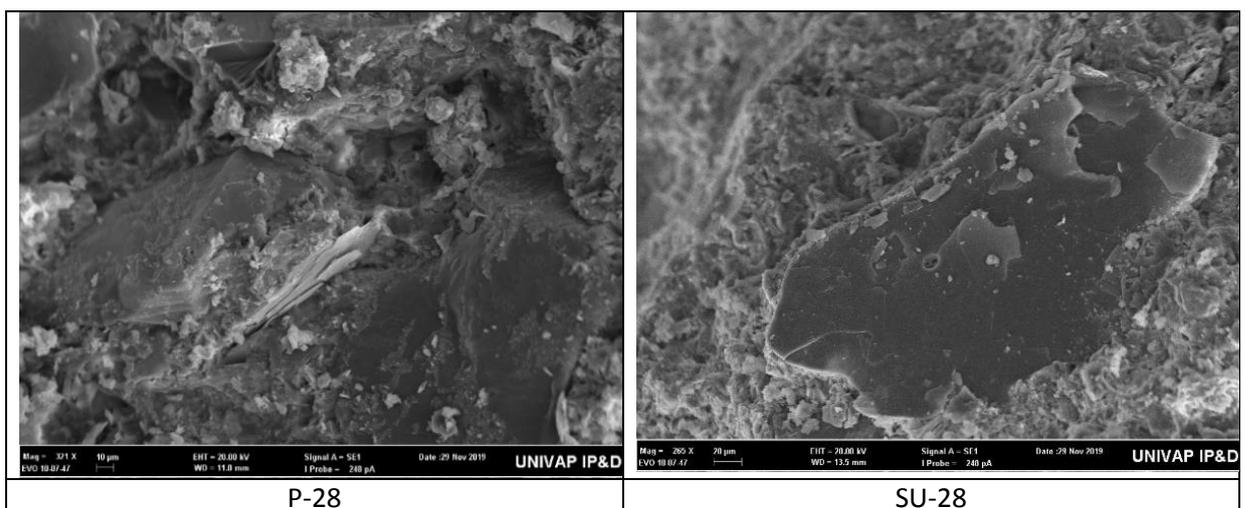
Fonte: o autor.

A análise da Figura 10 indica que as amostras SU_28 e SS_28 apresentam porosidade aparente baixa com uma textura rugosa e bem compactada, comparado com a amostra P_28, indicando boa adesão das fases do compósito, e a figura SH_28 apresenta um material poroso.

HASHOLD (2012) relatou em seus trabalhos que a boa adesividade das fases nestes materiais interfere diretamente nas propriedades de retração durante cura.

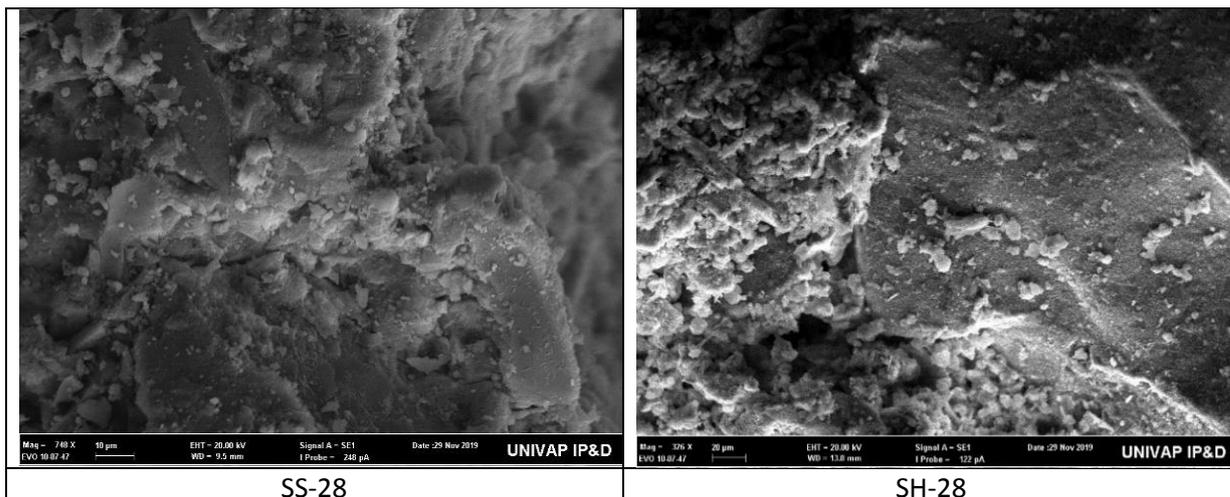
Na Figura 11, são apresentadas as amostras com cura na estufa por 3 dias, que foram analisadas no MEV.

Figura 11: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 3 dias na estufa com temperatura e umidade controlada



P-28

SU-28

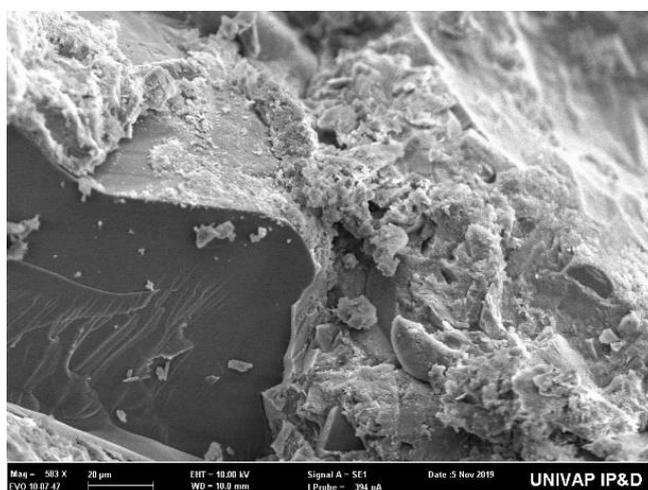


Fonte: o autor.

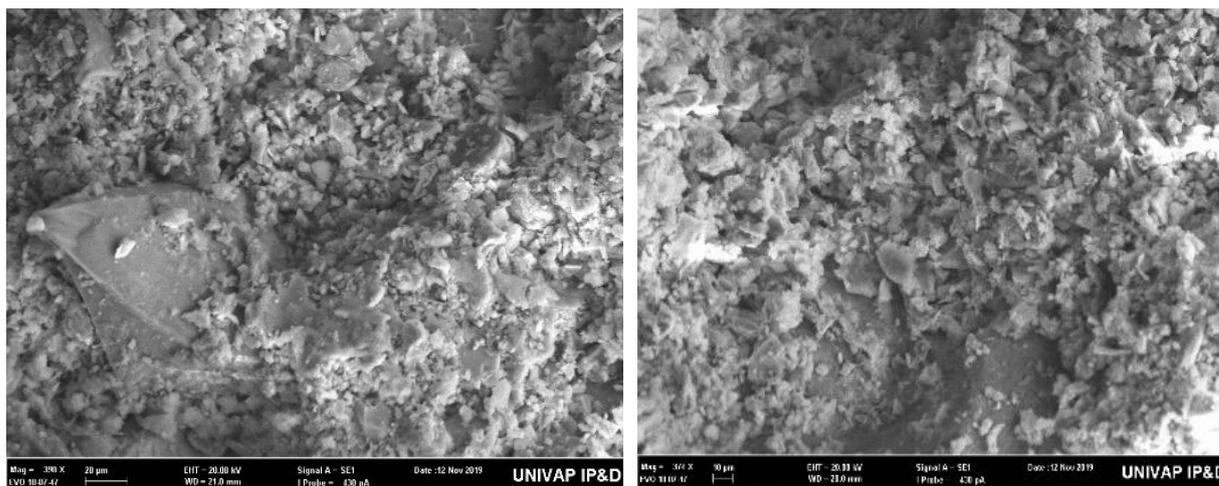
Analisando as imagens apresentadas na Figura 11, observa-se que a SS_28 e SH_28 apresenta um material irregular em formação dos compositos com índice de vazios elevado. Nas amostras com adição de SAP seco (SS_28) estes índices de vazios são provenientes da baixa plasticidade da massa cerâmica, conforme relatado por DANG et al (2017). Já as amostras com adição de quantidade excessiva de água de amassamento (SH_28) o efeito dessa adição do excesso de água prejudica a formação da massa, aumentando a sua fluidez e causando exsudação dos corpos de prova, conforme discutido anteriormente. A amostra SU_28 apresenta características microestruturais equivalente a amostra P_28.

Na Figura 12 estão apresentadas as fotomicrografias das amostras curadas sob exposição à ambiente de cura com temperatura de 40 °C e 50% de umidade por 7 dias.

Figura 12: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 7 dias na estufa com temperatura e umidade



P-28



SS-28

SH-28

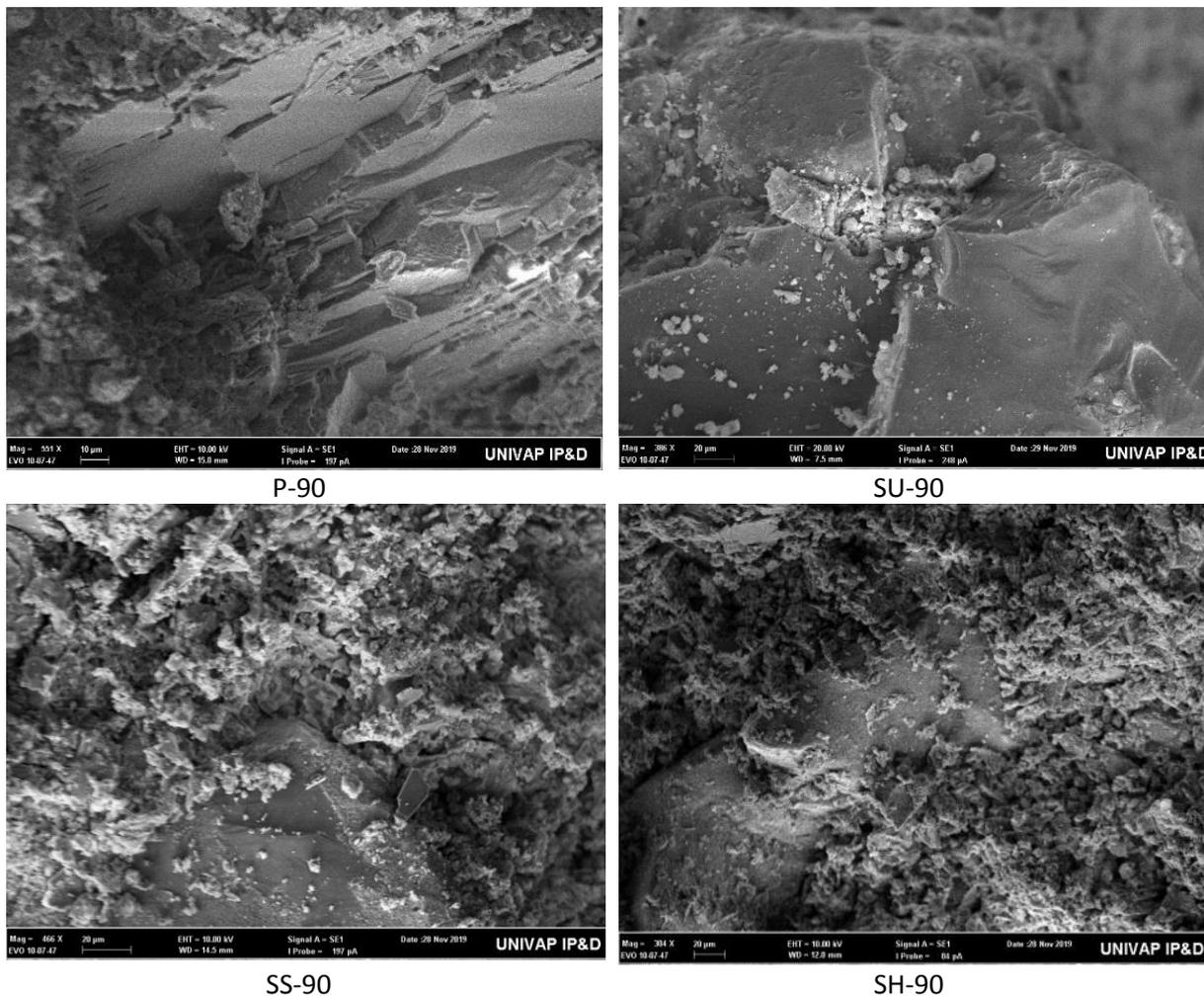
Fonte: o autor.

Na Figura 12 utilizando a amostra P_28 como parâmetro de comparação, onde apresenta-se um o compósito formado com boa homogeneidade, pode-se observar que a amostra SS_28, possui superfície rugosa repleta de microporos, resultado do já discutido anteriormente, indicando que o controle de temperatura de cura inicial e umidade relativa não impactam positivamente no desenvolvimento da microestrutura.

Já na formulação SH_28 nota-se maior índice de vazios do material com fraca ligação entre os agregados, a relação a/c é de extrema importância para o desenvolvimento das características microestruturais e propriedades mecânicas do compósito formado, ademais o tempo de cura para amostras com elevada relação a/c é afetado, sendo necessário maiores tempos de cura para a obtenção das propriedades físicas e microestruturais (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

A Figura 13 mostra a superfície de ruptura das amostras submetidas a 90 dias de cura submersa no hidróxido de cálcio, conforme descrito pela norma ABNT- NBR 5738:2015.

Figura 13: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura no hidróxido de cálcio.



Fonte: o autor.

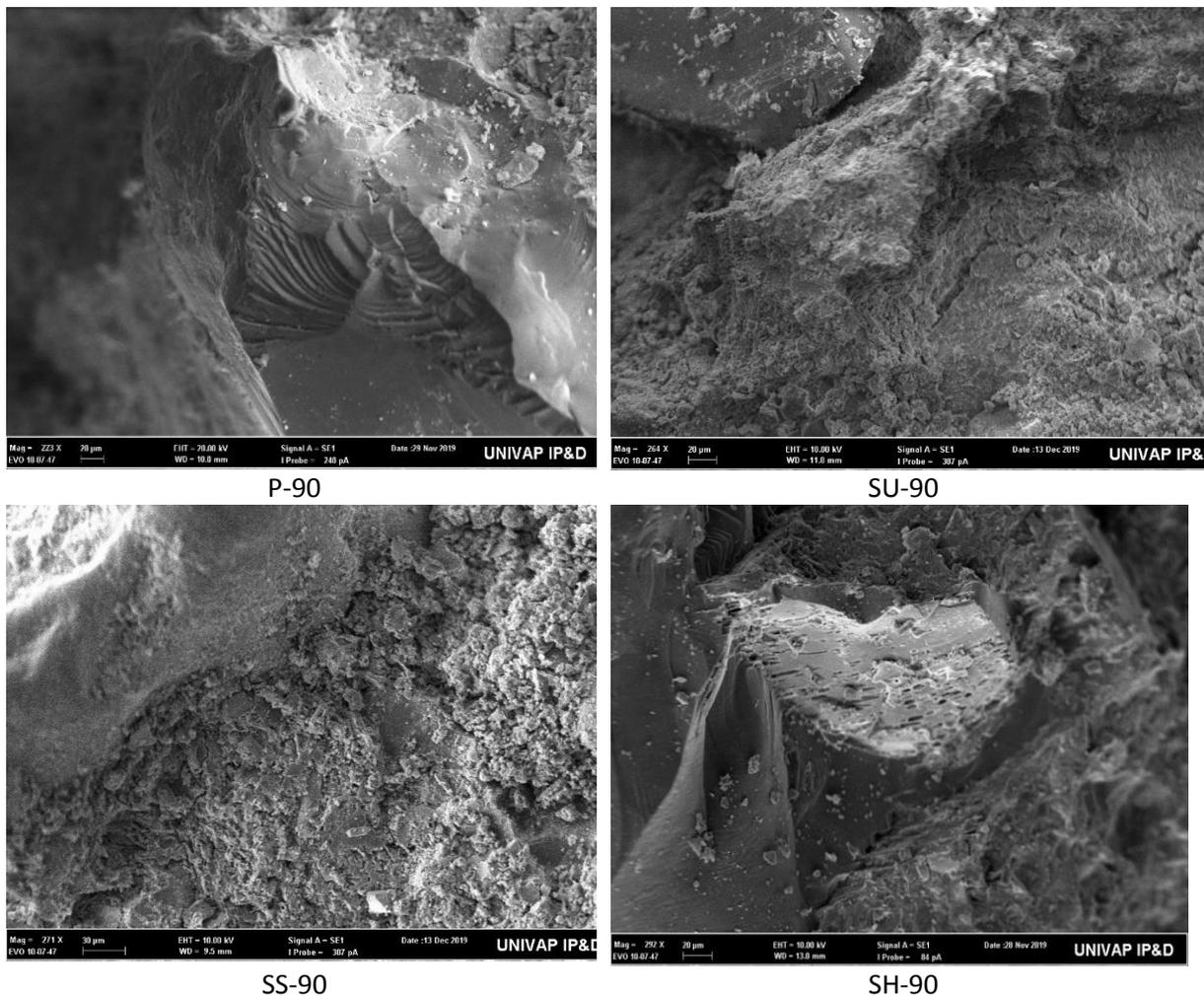
De acordo com as fotomicrografias apresentadas na Figura 13, a amostra SU_90 apresenta um compósito com textura homogênea de formação rochosa, similar aos observados na P_90, esta é uma formação característica de amostras que atingiram a totalidade do processo de cura, conforme descrito por Caraseck (2007).

A baixa adesão nas amostras SS_90 e SH_90 é resultado da plasticidade da massa no estado fresco.

Na

Figura 14 estão apresentados os resultados de MEV das amostras sem cura externa, exposta em temperatura ambiente por 90 dias.

Figura 14: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras exposta em temperatura ambiente sem cura externa

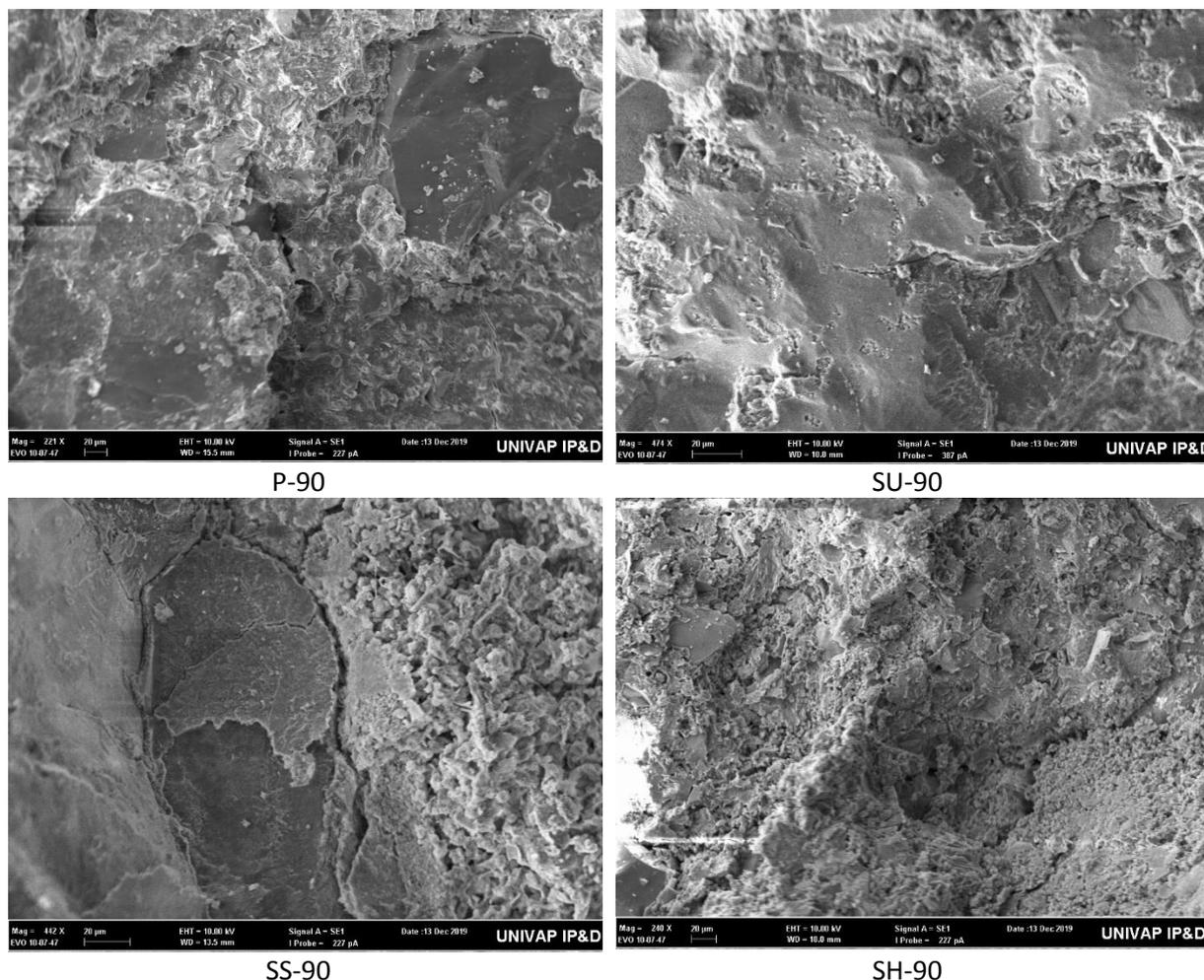


Fonte: o autor.

Nestas amostras com adição de SAP nota-se elevada rugosidade que não é observada amostra P_90.

A Figura 15, apresenta as análises no MEV das amostras com cura na estufa por 3 dias, após exposta em temperatura ambiente até 90 dias.

Figura 15: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 3 dias na estufa com temperatura e umidade controlada

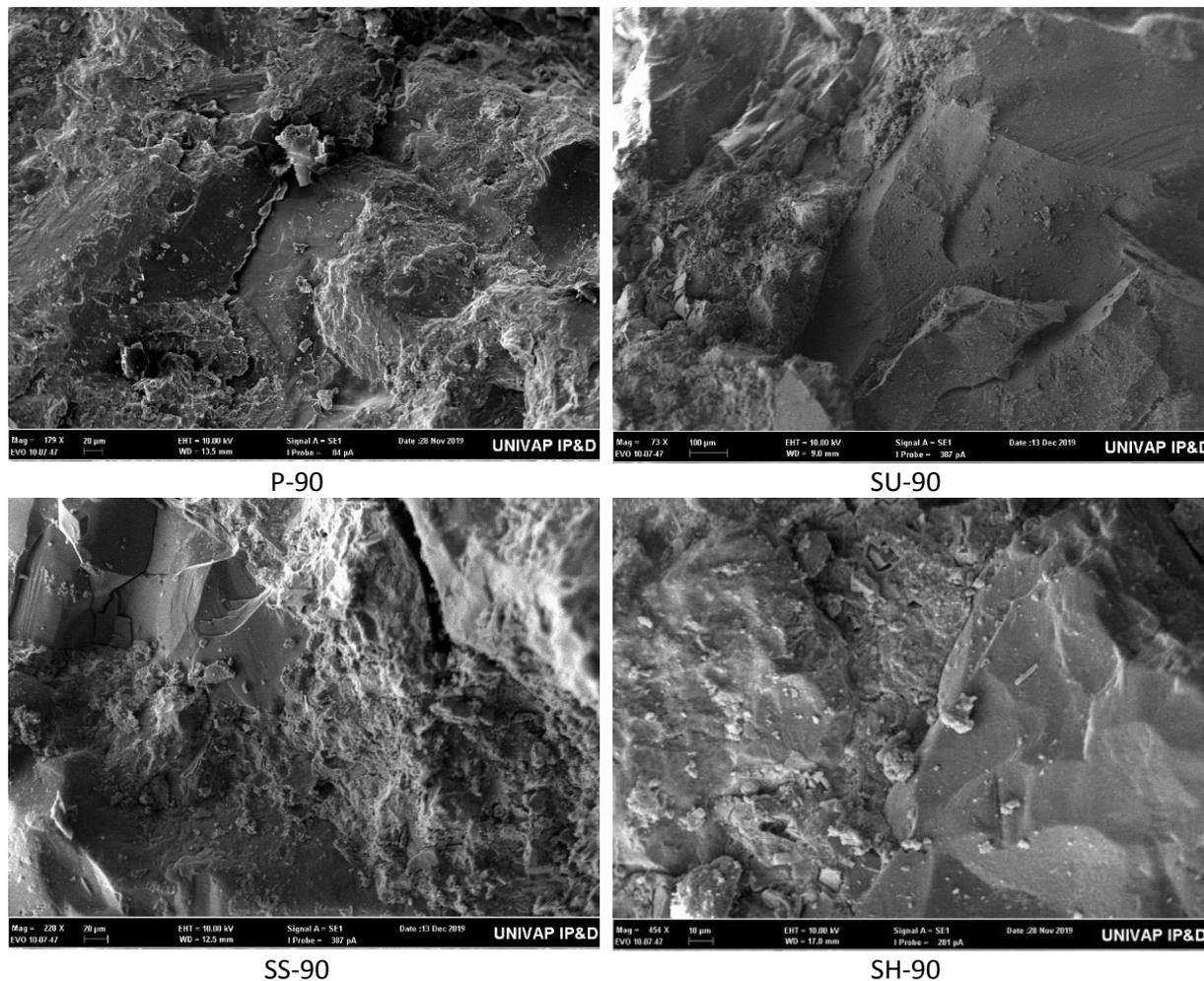


Fonte: o autor.

Nas análises realizadas constatou-se que a amostra SS_90, apresenta fissura deslocando parte do material na qual apresenta a superfície rugosa, a figura SH_90 apresenta baixa adesão entre os agregados podendo ser observado vazios em sua superfície de ruptura. Por outro lado, comparando as figuras SU_90 e SS_90 com a P_90 nota-se que o aspecto superficial das amostras são similares, este comportamento é devido a plasticidade da massa fresca que adensa-se melhor aos moldes.

Na Figura 16 estão apresentadas as fotomicrografias das amostras com cura de 7 dias na estufa seguida por cura por 90 dias em temperatura ambiente, foram analisadas no MEV:

Figura 16: Análise da morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras com cura de 7 dias na estufa com temperatura e umidade controlada.



Fonte: o autor.

As amostras que ficaram exposta a neblina de vapor de água por 7 dias na estufa com 50% de umidade a temperatura controlada de 40 °C, apresentaram textura homogênea, com a superfície rochosa, resultado similar ao relatado por Caraseck (2007).

Somente na amostra figura SH_90 são observadas deslocamentos entre os agregados, resultado da ação da quantidade excessiva de água adicionada durante a produção da massa. Aspecto semelhante foi encontrado na amostra SS_90, porém neste caso, a adição do SAP no seu estado seco não possibilitou a completa hidratação inicial do aglomerante resultando em baixa adesão entre os agregados (ABD e AHMED; 2018).

As amostras SU_90 apresentaram a textura similar a obtida nas amostras P_90 com boa adesão e baixa quantidade de poros.

6.2.3 Difractometria de Raios X

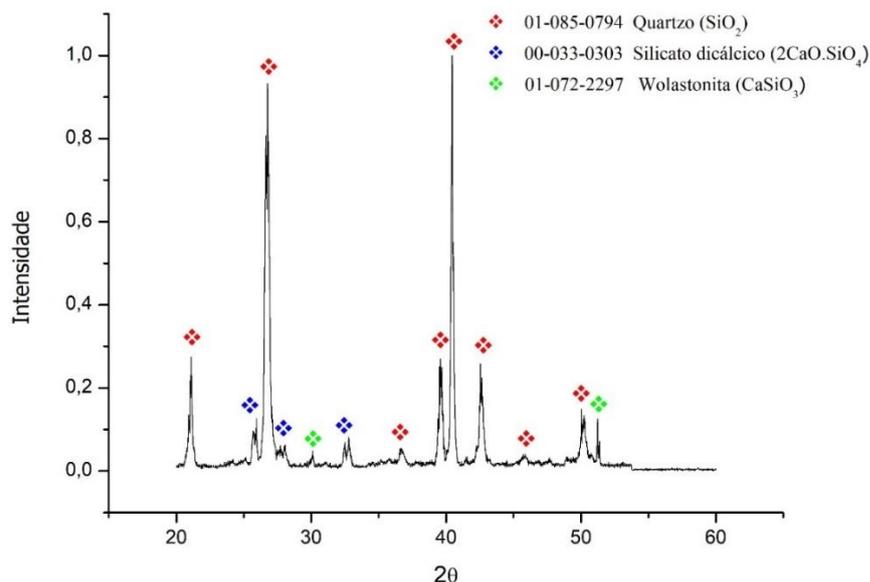
As análises realizadas têm valor qualitativo, assim as intensidades dos picos obtidos nos ângulos de difração característicos não podem ser relacionadas à quantidade das fases presentes. Utilizou-se inicialmente a análise dos três picos mais intensos das fases sugeridas para a determinação da composição das amostras, os picos restantes nas análises foram avaliados comparativamente as intensidades dentre as fases propostas buscando mais confiabilidade nos resultados apresentados.

Em algumas amostras foi observada o excesso de “ruído” e distorção na linha de base, provavelmente causados durante o preparo das amostras que podem apresentar distribuição granulométrica larga e irregular devido à presença de fases com ampla faixa de variação em sua dureza, análises matemáticas realizadas para reduzir estes efeitos foram realizadas porém houve alteração no posicionamento e intensidade dos picos obtidos, julgou-se mais prudente realizar a análise criteriosa avaliando a ocorrência dos picos com o auxílio do software HighScore Plus.

Os ensaios realizados por difratometria de raios X nas matérias primas utilizadas para a confecção das formulações estudadas são importantes para que seja possível a análise das fases desenvolvidas durante a cura do compósito.

Na Figura 17 está apresentado o difratograma do agregado utilizado, proveniente de areia lavada obtida no comercio local. Neste observa-se a presença de sílica na fase quartzo, descrita pela ficha ICDD-JCPDS nº01-085-0794.

Figura 17: Difratograma do agregado miúdo (areia natural).



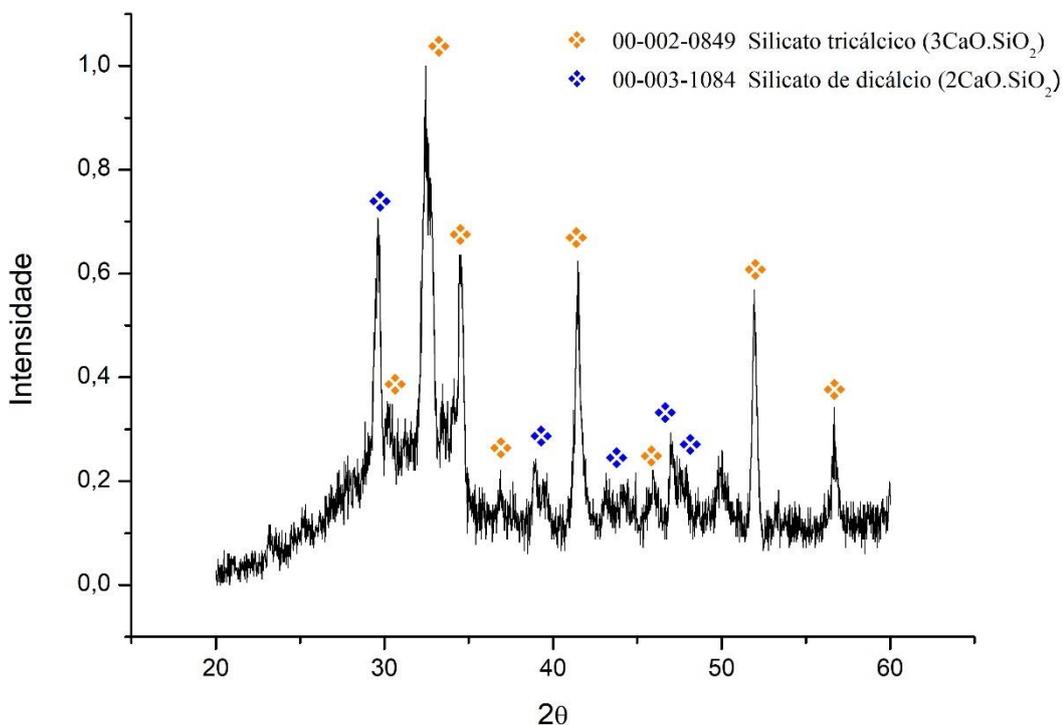
Foram encontradas também duas fases tricomponentes tais como, Wollastonita descrita pela ficha ICDD-JCPDS nº 01-072-2297 e silicato dicálcico descrita pela ficha ICDD-JCPDS nº00-033-0303.

O ensaio realizado com amostra do Cimento Portland CPIII/40 RS utilizado como aglomerante hidráulico na confecção das formulações de estudo está apresentado na Figura 18.

Nesta análise observa-se a presença de silicatos de cálcio descritos pelas fichas ICDD-JCPDS nº 00-002-0849 – silicato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) e nº 00-003-1084 – silicato dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$).

As fases encontradas corroboram com o esperado visto que a classe de aglomerante utilizado neste trabalho possui a adição de escória de alto forno, sendo estas fases responsáveis pelo efeito pozolânico nesta classe de cimento conforme reportado por Ferreira (2014).

Figura 18: Difratograma do Cimento Portland CPIII/40 RS

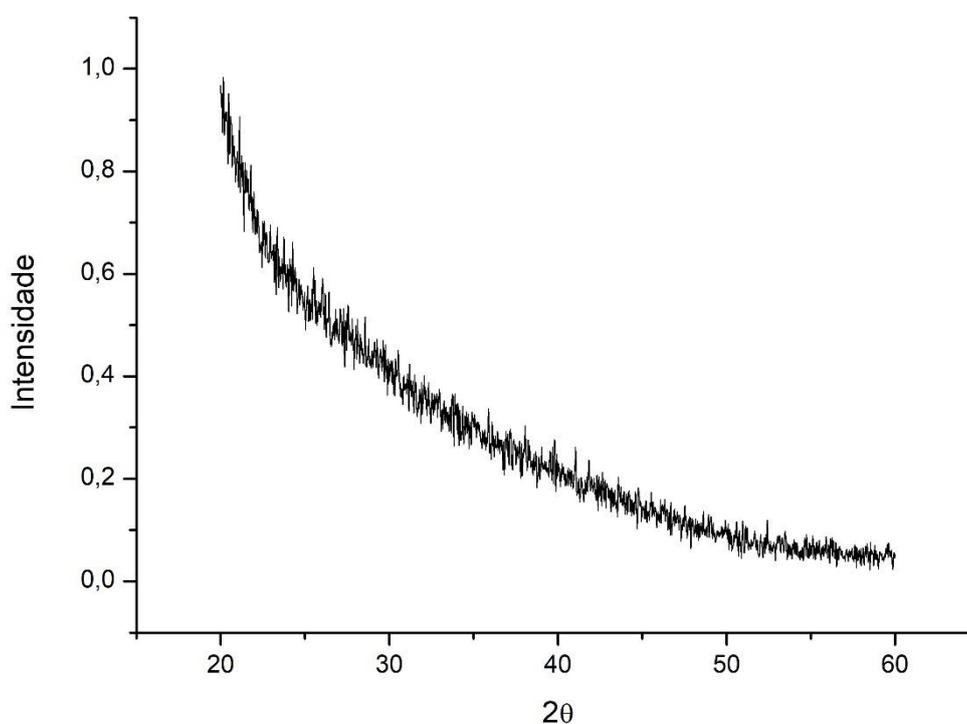


Fonte: o autor.

Já na análise realizada no polímero superabsorvente, Figura 19, não observa-se a formação de picos cristalinos, o que era esperado visto a estrutura amorfa da poliacrilonitrila.

A ausência de cristalitos na composição do SAP confere a este material a capacidade de entumescimento necessária para a absorção da água de amassamento utilizada na formulação das argamassas estudadas sendo aplicado como agente de controle da cura do compósito cimentício.

Figura 19: Difratoograma do Polímero Superabsorvente de Poliacrilonitrila (SAP).



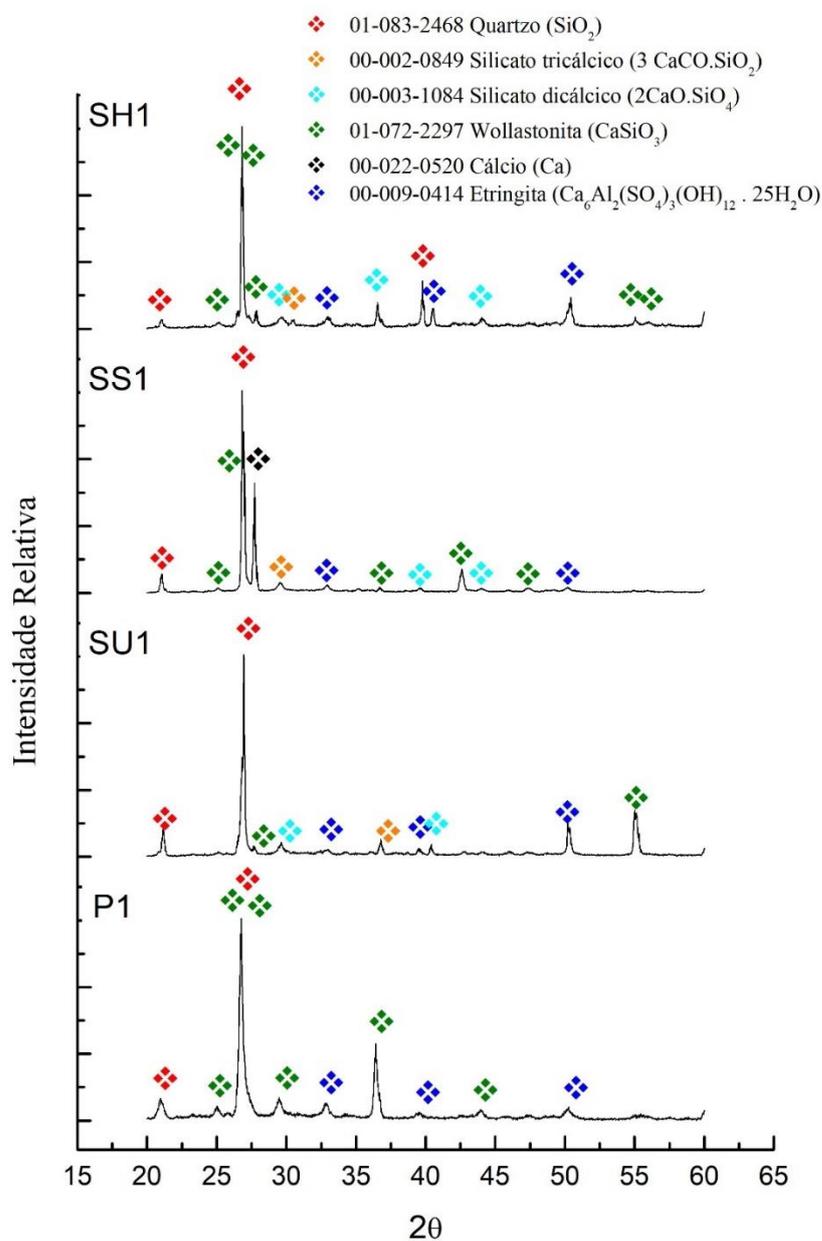
Fonte: O autor.

Os ensaios de difratometria de raios X das amostras após 28 dias de cura foram realizadas para avaliar a influência do meio de cura nas fases presentes no compósito. Nas amostras curadas em solução saturada de hidróxido de cálcio,

Figura 20, onde está apresentado o comparativo entre as amostras estudadas, pode-se observar que na amostra de controle (P1) não foi identificado picos das fases formadoras do aglomerante, sendo identificadas as fases etringita, descrita pela ficha ICDD-JCPDS n° 00-009-0414 resultante do processo de cura do material.

Na amostra na qual o SAP foi adicionado em sua forma saturada (SU1) observa-se a presença de picos discretos de silicatos de cálcio, fases formadoras do aglomerante hidráulico, indicando que a cura do material não foi completada mesmo passados 28 dias. Isto evidência que a presença do SAP em sua forma saturada controla o processo de cura por meio da limitação da oferta de água para a hidratação dos silicatos formadores do aglomerante. Isto pode é corroborado pelos resultados obtidos nos ensaios mecânicos realizados, onde este grupo de amostras apresentou redução de 1% na resistência à compressão e manteve as propriedades apresentadas pela amostra de controle quando ensaiada em tração indireta.

Figura 20: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas em solução saturada de hidróxido de cálcio.



Fonte: o autor.

Já quando avaliadas as amostras com adição de SAP em sua forma seca na formulação (SS1), observa-se que além da presença das fases formadoras do aglomerante que não completaram o processo de hidratação, identifica-se a presença de cálcio. Este comportamento pode ser explicado pela concorrência pela absorção de água entre o SAP e o aglomerante hidráulico, o que leva a redução mais proeminente nas propriedades de resistência à compressão aos 28 dias.

Quando analisadas as amostras com excesso de água de amassamento (SH1), observa-se que está mais evidente a presença de sílica, sendo esta formadora da fase agregado, o que evidencia que o excesso de água pode causar a separação das fases reduzindo a possibilidade de interação entre os materiais para formação da fase responsável pela resistência mecânica do compósito, Etringita.

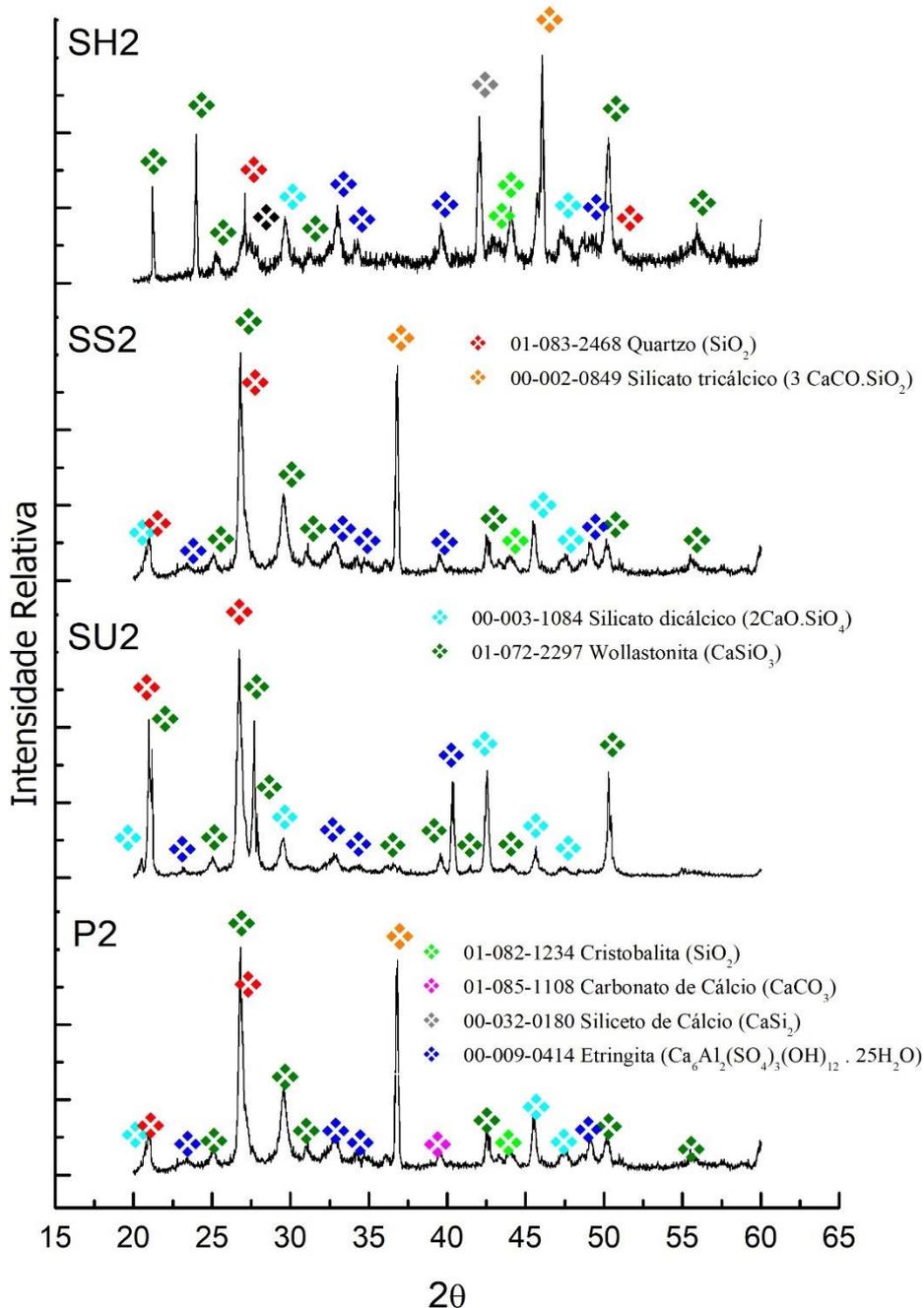
As formulações submetidas em cura em ambiente de laboratório, foram analisadas e os resultados comparativos estão apresentados na Figura 21.

Claramente as amostras curadas em atmosfera ambiente apresentam difratogramas com maior número de picos que são resultados da ausência do controle do processo. Em todas as amostras analisadas ao final dos 28 dias de cura existem ainda fases formadoras do aglomerante hidráulico que não foram hidratadas, porém observa-se que nas amostras com adição do SAP em sua forma saturada não observa-se a presença da fase de silicato tricálcico que são observadas nas demais amostras, por isso ocorreu a perda de resistência a compressão.

Analisando a amostra com excesso de água de amassamento, SH2, observa-se a presença de siliceto de cálcio, sendo essa uma fase intermediária na formação da etringita além de picos mais definidos da fase etringita, indicando que a elevada umidade na massa cimentícia é fator importante para o processo de cura. Do mesmo modo, a presença de SAP na forma saturada apresentou-se mais efetivo no processo de cura, porque o SAP libera a água de acordo com a necessidade da hidratação do cimento.

Avaliando os resultados em comparação aos obtidos pelos ensaios mecânicos, nota-se que as maiores taxas de redução nas propriedades são obtidas pela falta de cura externa.

Figura 21: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas em atmosfera ambiente.

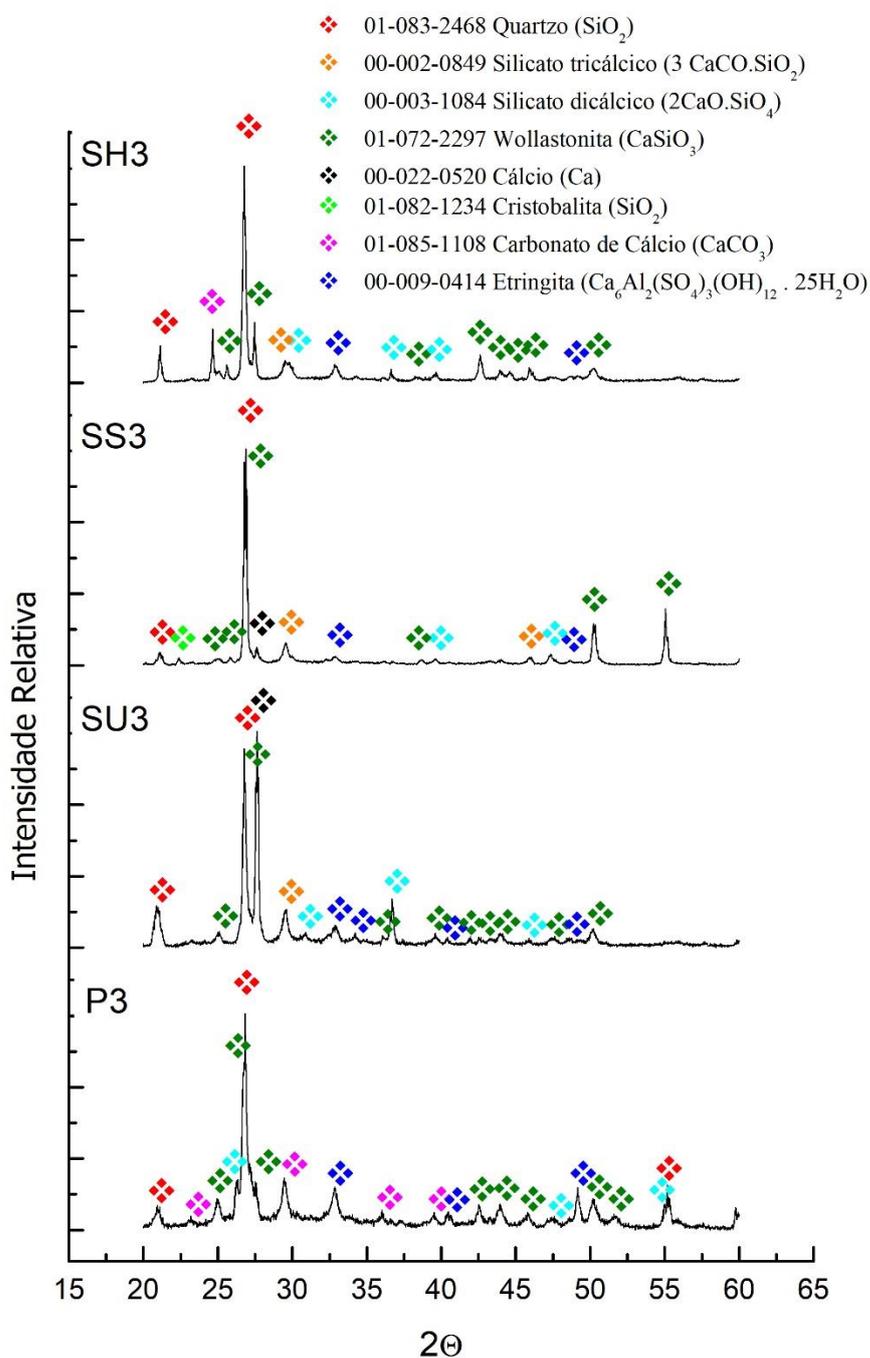


Fonte: o autor.

A relevância do controle da atmosfera de cura nos primeiros dias de cura é evidenciada pelos resultados obtidos nas amostras que foram submetidas à 40 °C e 50% de umidade neste período.

Comparando os resultados apresentados na Figura 22, amostras curadas por 3 dias sob 40 °C e 50% de umidade, com os resultados da Figura 21, observa-se que as fases etringita são identificadas com picos mais intensos nas amostras com temperatura e umidade controlados. Além disso, para todos os modos de cura estudados, as fases presentes estão mais definidas.

Figura 22: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas sob 40°C e 50% de umidade durante 3 dias.

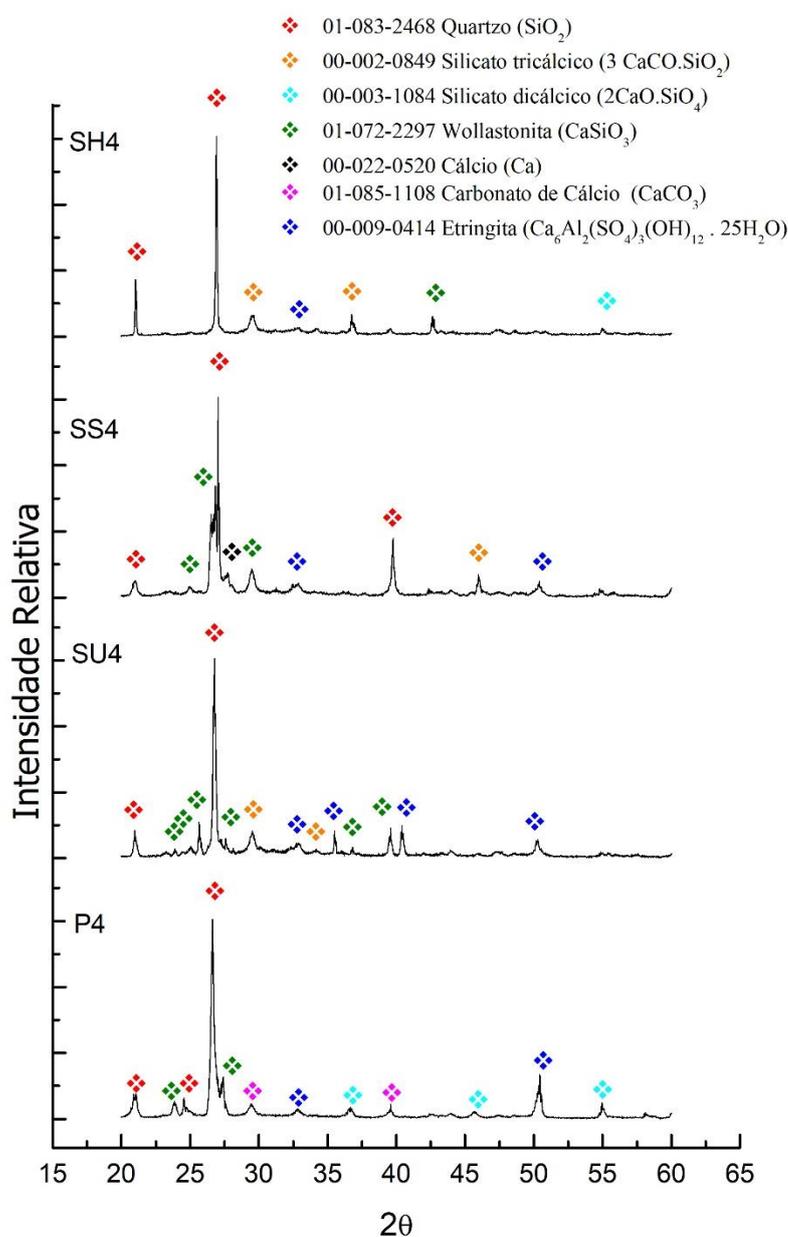


Fonte: o autor.

Comportamento semelhante é apresentado nas amostras que foram submetidas a 7 dias de cura com temperatura e atmosfera controladas, Figura 23.

As amostras com adição de SAP saturado possibilitaram a formação controlada de etringita com o consumo de silicato dicálcico proveniente do aglomerante hidráulico, já nas amostras com adição de SAP em sua forma seca na massa apresenta picos mais discretos da fase citada, o que corrobora com os resultados apresentados pelos ensaios mecânicos.

Figura 23: Comparativo dos difratogramas obtidos pela análise das amostras curadas sob 40°C e 50% de umidade durante 7 dias.



Fonte: o autor.

As amostras de controle, P4, apresentam poucos picos identificados de etringita e a presença de silicato tricálcico remanescente mesmo após 28 dias de cura.

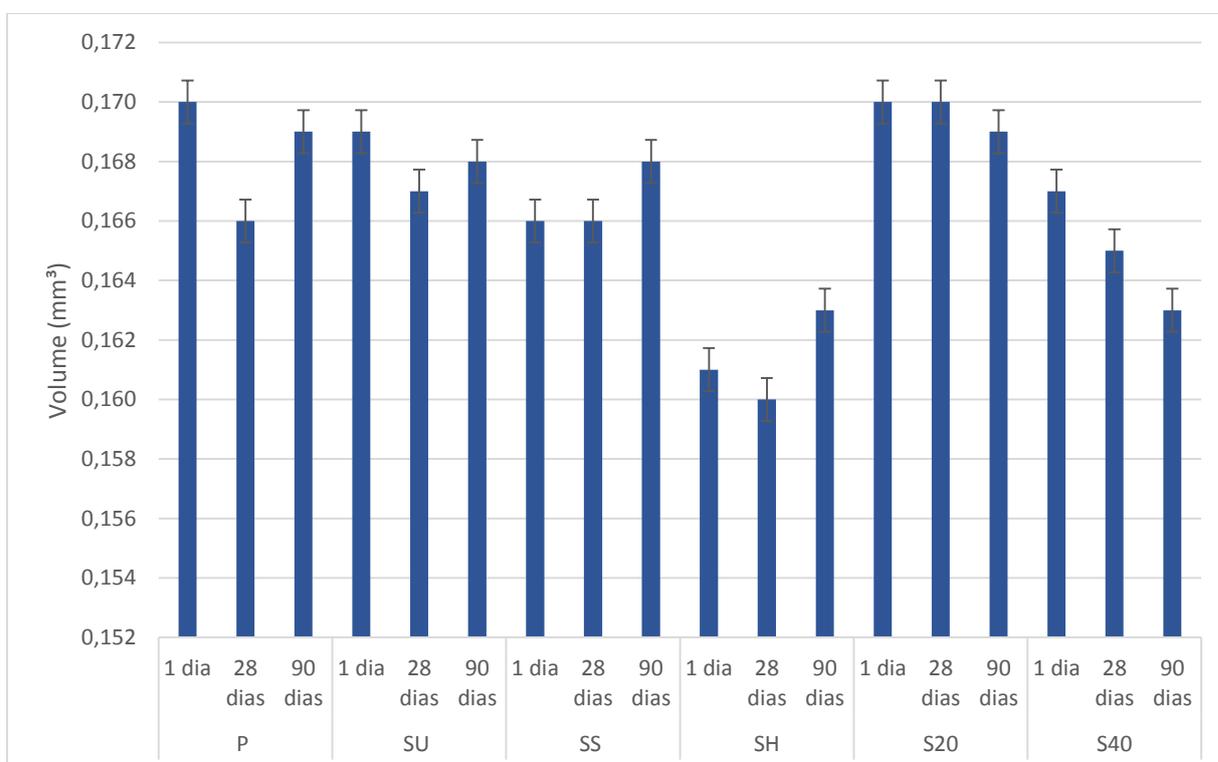
Por fim, as amostras com excesso de água de amassamento, SH4, não apresentam picos de etringita definidos, o mesmo comportamento apresentado pelos demais modos de cura estudados.

Estudos complementares do comportamento de cura das formulações estudadas estão sendo conduzidos pelo grupo de pesquisa com intuito de entender a influência da abundância de água no processo de hidratação.

6.2.4 Ensaio de estabilidade volumétrica

Os ensaios efetuados nas amostras de 28 e 90 dias de cura submersa no hidróxido de cálcio buscando avaliar comportamento de retração e dilatação do material comparando com uma amostra padrão tem seus resultados apresentados Figura 24.

Figura 24: Análise volumétrica das amostras com cura no hidróxido de cálcio.



Fonte: o autor.

A amostra de controle, P, apresentou retração de 4 mm³ com 28 dias de cura no hidróxido de cálcio, devido a hidratação do cimento e a formação das fases resistentes

das argamassas conforme previsto por EHRENBRING et al (2018), após 90 dias expande 3 mm³.

Analisando o comportamento das amostras com adição de SAP a amostra SU e SH obteve o comportamento equivalente a amostra P. Resultado surpreendente encontrado para as amostra SH, pois não encontrou-se relatos na literatura deste comportamento, visto o excesso de água durante o processo de produção da massa.

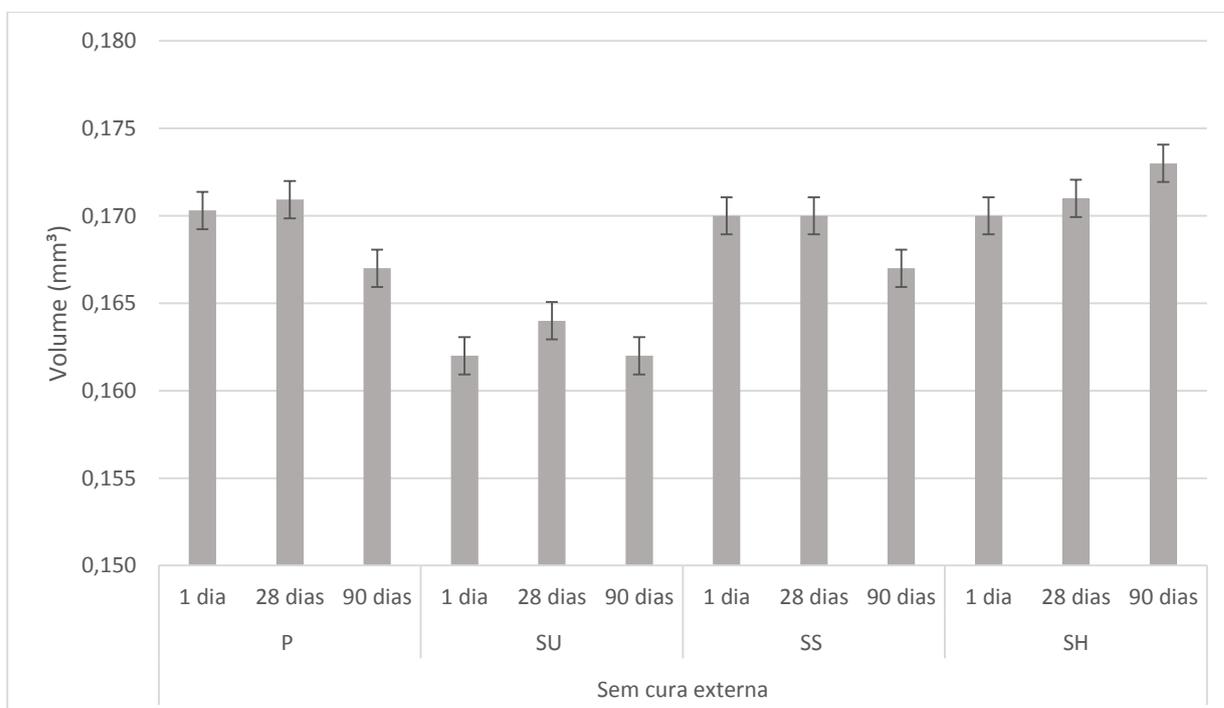
Já a amostra SS, devido a adição de SAP em sua forma seca, sofreu com a competição entre a hidratação do aglomerante e do aditivo polimérico superabsorvente.

Na amostra S20 a adição de SAP saturado com 20% de água, notou que o material não apresentou resultados significativos quanto a retração e expansão.

A amostra S40 observou que a adição de SAP saturado com 40% de água, apresentou a retração do compósito, isto pode ser explicado devido ao excesso de água desbalanceando a relação a/c fazendo com que exista a redução das propriedades de aglomerante hidráulico.

Na Figura 25, estão apresentados os resultados dos ensaios das amostras que ficaram exposta em temperatura ambiente sem cura externa.

Figura 25: Análise volumétrica das amostras sem cura externa



Fonte: o autor.

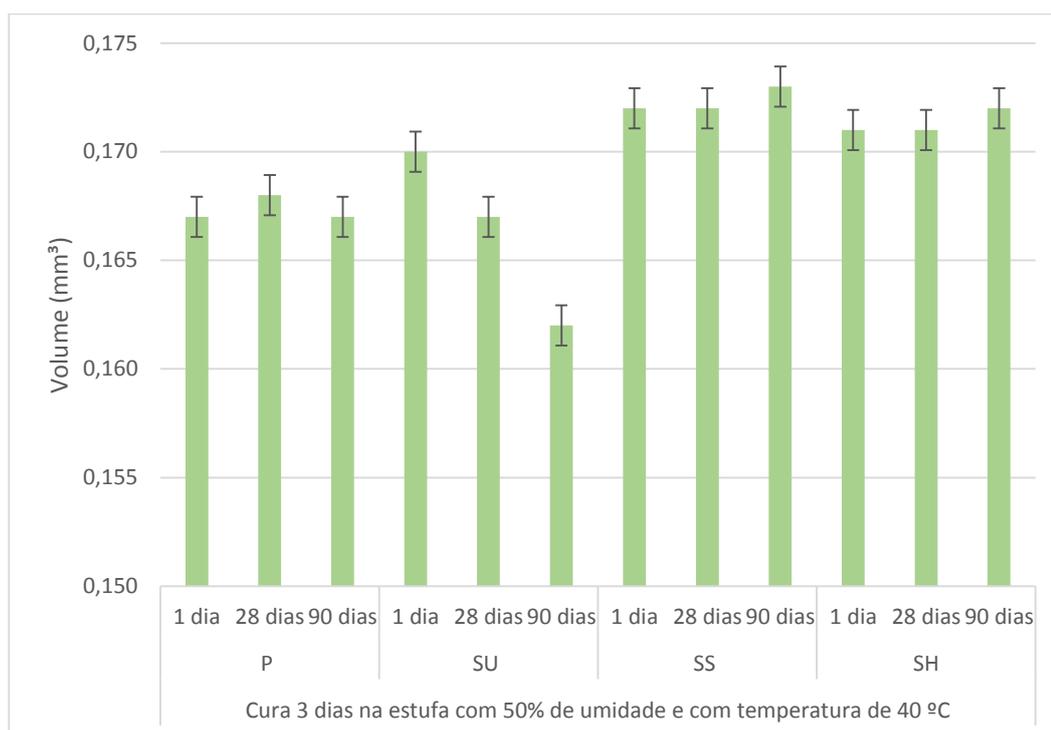
Nesta análise observa-se que a amostra P sem cura externa, obteve o comportamento inverso do apresentado nas amostras P submetidas a cura sob imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio. A dilatação observada é resultado da interferência do tipo de ambiente exposto, segundo Lee *et al.* (2018), o ambiente de exposição interfere diretamente na dilatação ou retração da massa cimentícia.

As amostras SU apresentaram comportamento equivalente à amostra de controle, P, explicado pela disponibilidade de água nas idades iniciais de cura.

A adição do SAP seco, amostra SS, com 28 dias manteve estável devido ao controle interno de liberação da água.

Na figura 26, apresenta-se os resultados da análise volumétrica das amostras com cura de 3 dias na estufa com umidade de 50% e temperatura de 40°C.

Figura 26: Análise volumétrica das amostras com cura de 3 dias na estufa



Fonte: o autor.

Nestas análises nota-se que a amostra P apresenta dilatação, isto devido à temperatura externa nos primeiros dias de cura interferir diretamente no processo de cura e a alteração da temperatura nos demais dias de cura, fez com que as fases estabilizassem-se em sua estrutura inicial. Quando este comportamento é comparado ao comportamento da amostra SU observa-se a retração após 28 dias, isto por ocorrer

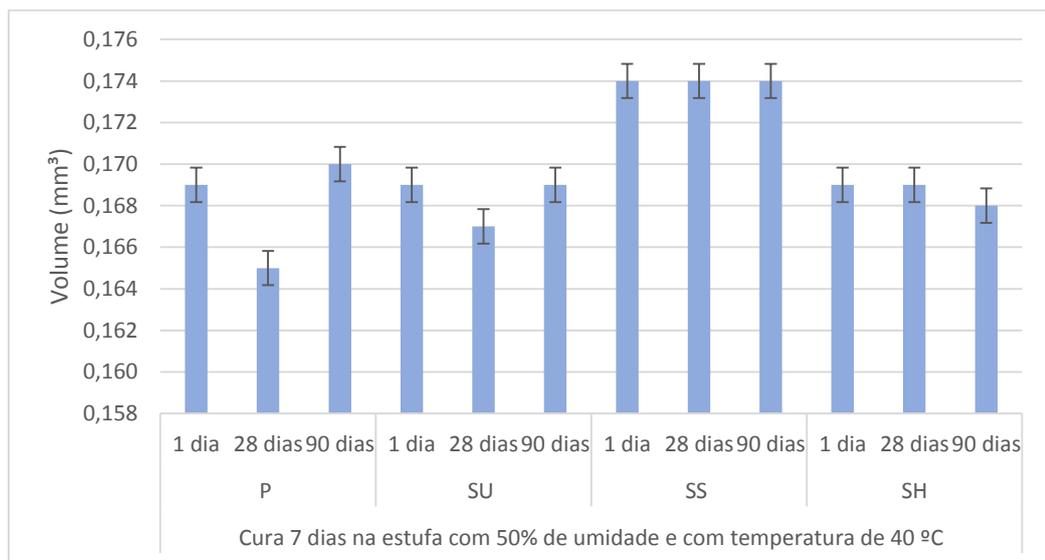
devido o controle de liberação de água. A ausência da exposição à cura em solução de hidróxido de cálcio resultou na retração após 90 dias.

Nas amostras SS e SH os três dias de cura mesmo com temperatura elevada não influenciou a variação de volume inicial.

Os resultados das análises volumétricas das amostras com cura na estufa por 7 dias estão apresentados na Figura 27.

Avaliando os dados coletados, observa-se que os comportamentos tanto das amostras de controle, P, quanto das amostras com adição de SAP saturado, SU, são similares aos obtidos quando as amostras de mesma formulação são curadas submersas em solução saturada de hidróxido de cálcio, ou seja, apresentando retração aos 28 dias de cura e dilatação após 90 dias de cura.

Figura 27: Análise volumétrica das amostras com cura de 7 dias na estufa



Fonte: o autor.

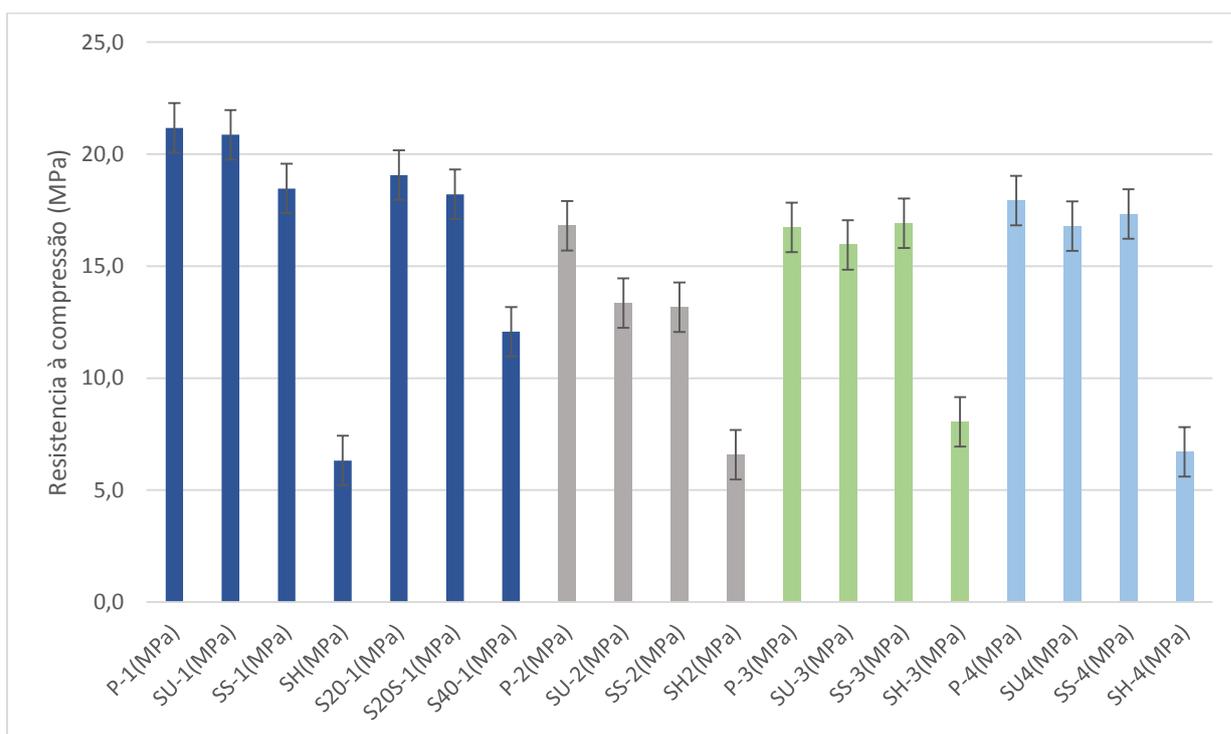
A exposição das amostras ao ambiente com umidade e temperatura controlados nos 7 dias iniciais de cura, reduz a perda de água do compósito por evaporação, conforme relatado por Ahmed e Abd (2018), a evaporação da água nos dias iniciais de cura é a responsável pela retração volumétrica nos materiais cimentícios. Com a adição o SAP na mistura, é possível que as partículas poliméricas ocupem os vazios do material, controlando a liberação da água e diminuindo a retração do compósito.

6.2.5 Ensaio Mecânico em compressão axial

Para os resultados dos ensaios mecânicos realizados sob compressão axial, foram plotados dois gráficos cura de 28 dias e 90 dias, com intuito de analisar o comportamento do compósito em relação a cura com hidróxido de cálcio apresentado na cor azul escuro, sem cura na cor cinza, cura com 3 dias em ambiente controlado na cor verde e com cura 7 dias em ambiente controlado na cor azul claro.

Na Figura 28 estão apresentados os resultados no ensaio de resistência mecânica sob compressão axial com 28 dias de cura.

Figura 28: Ensaio de compressão axial com 28 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).



Fonte: o autor.

Quando aplicada a cura normatizada, submersas em solução saturada de hidróxido de cálcio, as amostras SU e a amostra P, apresentaram valores de resistência similares, redução nesta propriedade é observada nas amostras SS, S20 e S20S com valores variando de 10 a 14%. Este comportamento foi previsto por Mechtcherine e Reinhardt (2012), quando relata que a cura de massas com adição de polímeros superabsorventes tem sua velocidade retardada podendo alcançar até 56 dias. O SAP

em sua forma saturada atua como lubrificante preenchendo os vazios do material, na qual são ocupados pela formação dos cristais de sílica após hidratação, por isso ocorre a perda de resistência após os 28 dias iniciais de cura.

As amostras com cura sem a imersão em solução básica, apresentaram redução nos valores máximos obtidos de resistência quando comparado ao traço de controle, P. Já quando submetidas à cura em estufa úmida as amostras SU e SS apresentaram resultados similares aos obtidos pela amostra de referência, P.

A redução na umidade relativa durante a cura impacta no processo de evaporação da água, sendo acelerado e por consequência reduzindo a hidratação do aglomerante hidráulico, estes resultados corroboram com os obtidos nos ensaios por difratometria de raios X.

Na cor verde com cura na estufa úmida por 3 dias e na azul claro na estufa úmida por 7 dias,

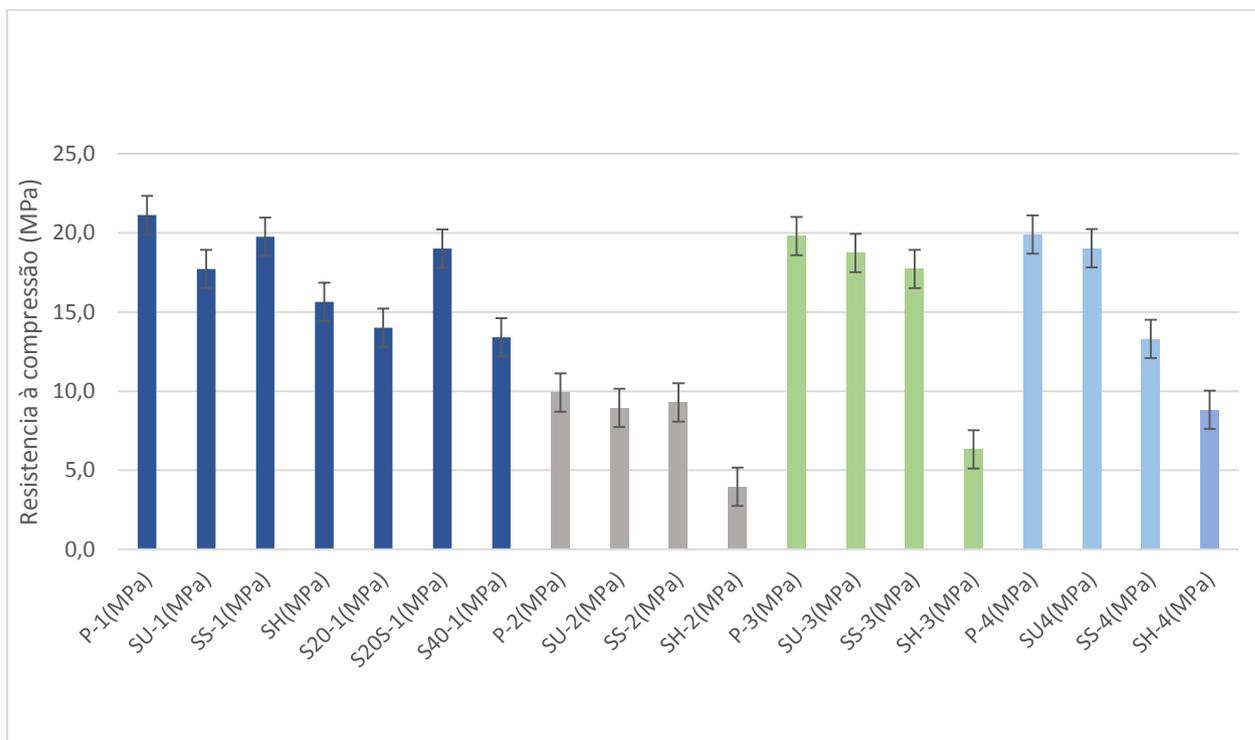
Isto é comprovado pelos resultados obtidos nas amostras que foram mantidas durante 3 e 7 dias iniciais em ambiente aquecido e com umidade de 50%, onde são observados a melhoria do valores de resistência quando comparadas às amostras curadas sob ar atmosférico (sem cura externa). O ambiente com umidade controlada reduz a evaporação da água de amassamento garantindo a disponibilidade de água para hidratação do aglomerante.

As amostras SH devido a adição do dobro de água apresentaram redução significativa na resistência, isto pois o excesso de água influencia na relação a/c prejudicando a hidratação do aglomerante.

Na Figura 29 estão apresentados os resultados do ensaio de resistência mecânica sob compressão com 90 dias de cura.

As amostras SH apresentaram redução na resistência de 26% podendo alcançar a redução de 56%, quando comparadas com as amostras de referência (P), as amostras SU e a SS apresentaram reduções de 6% a 10% da sua resistência comparada com a amostra P. A ausência de cura externa resultou na propriedade físicas e mecânicas dos compósitos com adição de SAP, de acordo de difratometria de raio X, pois foi observado o retardo na hidratação do cimento.

Figura 29: Ensaio de compressão axial com 90 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).



Fonte: o autor.

Na cura sob solução saturada de hidróxido de cálcio a amostra P apresentou 21 MPa de resistência, as amostras SS e S20S apresentaram redução na resistência de 6% à 10% comparado com a P. Adicionando-se o SAP seco na mistura a amostra apresenta melhores resultados, porém a textura das amostras SU e SS obtidas MEV são equivalentes enquanto que a amostra S20S apresenta alto índice de vazios, em relação as outras amostras o que implicou na redução na resistência a compressão de até 37%, ficando assim comprovado os resultados apresentados pelo ensaio da textura microestrutural.

As amostras submetidas à cura inicial em estufa com umidade e temperatura controlada, com 3 e 7 dias, nota-se que mesmo com a temperatura elevada as amostras de controle apresentando resistência de 19 MPa.

As amostras SU-3 e SU-4 apresentaram resultados similares, enquanto que amostras SS-4 com 7 dias de cura controlada na estufa apresentaram redução na resistência. Tanto as amostras com adição de SAP seco quanto a adição de SAP saturado após cura inicial de 3 dias em ambiente controlado apresentaram resultados equivalentes.

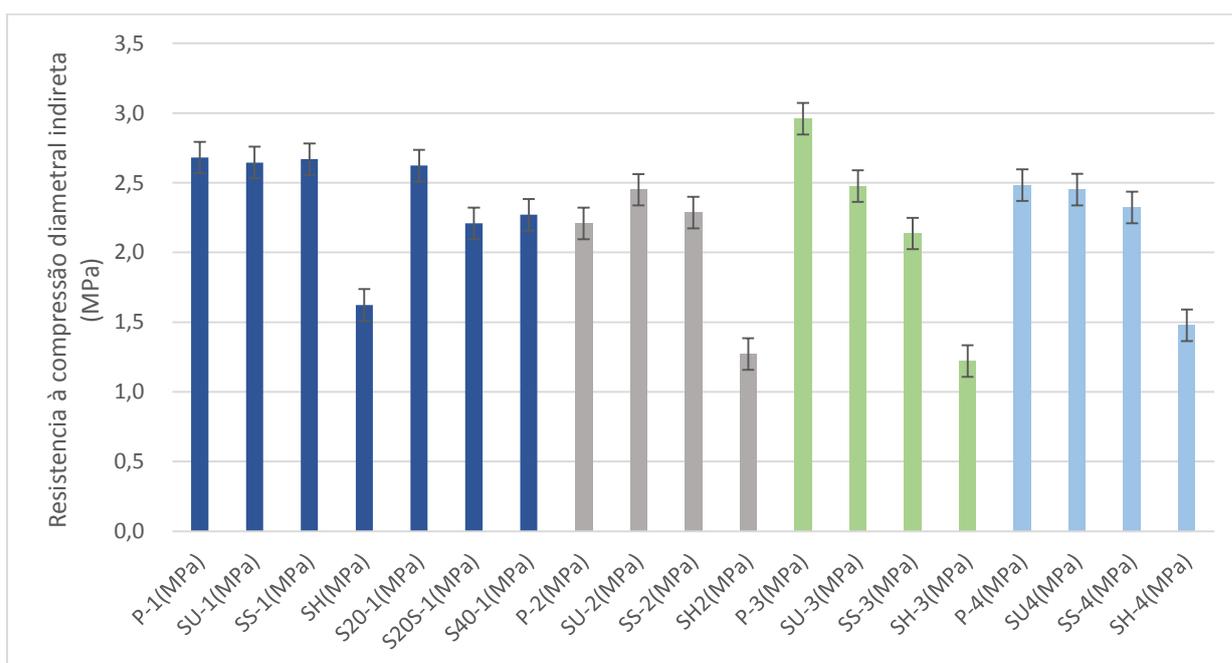
As amostras SH apresentaram redução na resistência devido a adição do dobro de água, pelos mesmos motivos já discutidos anteriormente relacionados à razão a/c. Mechtcherine e Reinhardt (2012) relatam que ocorre redução na resistência quando adicionado uma quantidade extra de água na mistura do concreto, aos 28 dias atinge até 4% de redução. A adição de SAP na massa cimentícia, aumenta o tempo de hidratação do cimento em até 56 dias, assim podendo identificar que o material não atingiu seu total desempenho com 28 dias. Nos ensaios realizados observa-se que a resistência mecânica alcançada após 90 dias de cura, têm valores equivalentes aos apresentados pelas amostras de controle.

6.2.6 Ensaios Mecânicos de Tração Indireta

Com base nos resultados do ensaio mecânico de tração indireta, plotou dois gráficos das amostras com 28 e 90 dias de cura.

Na Figura 30 estão apresentados os resultados dos ensaios mecânicos de tração indireta das amostras com 28 dias de cura.

Figura 30: Ensaio de compressão diametral indireta com 28 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).



Fonte: o autor.

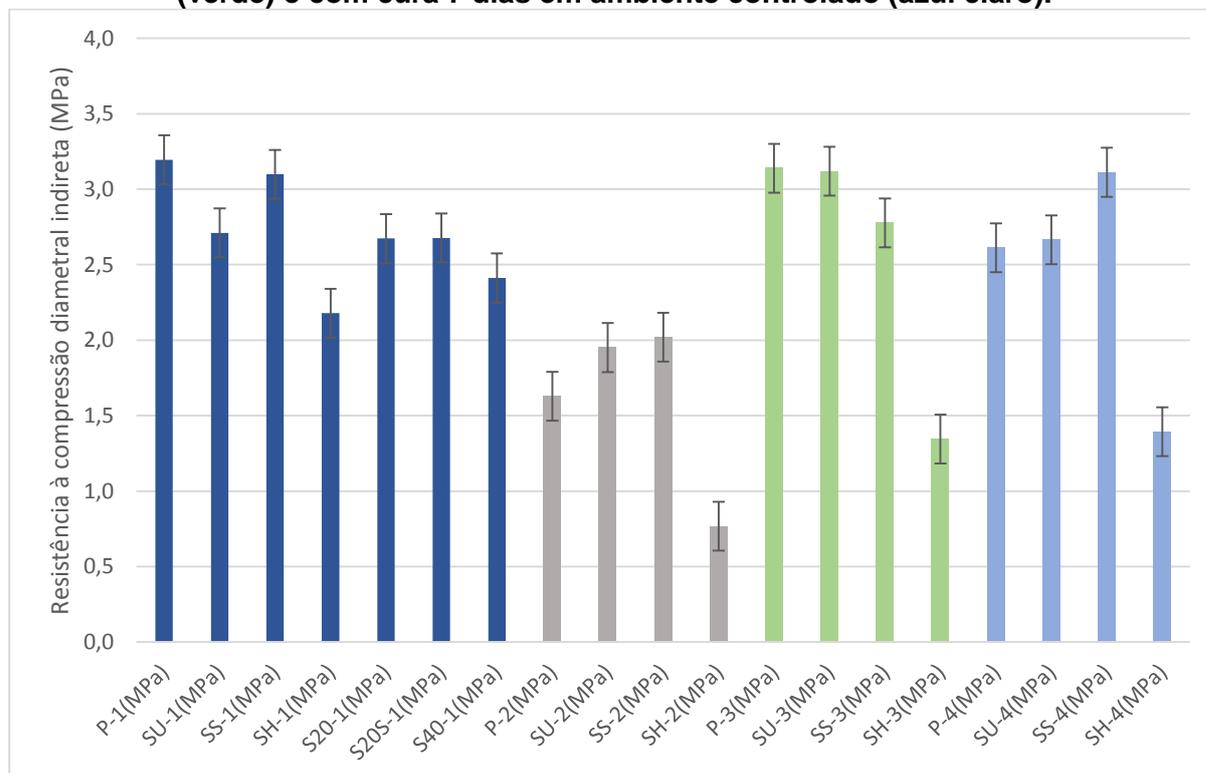
Pode-se observar que na cura com hidróxido de cálcio as amostras SU-1, SS-1 e S20-1, apresentam resistência à tração indireta equivalente à amostra P. A adição de 20% de excesso de água não altera as propriedades mecânicas pois o polímero superabsorvente controla a liberação de água para a hidratação do cimento. Nas amostras sem cura externa quando adicionado SAP apresenta redução de resistência comparada com as amostras com cura em hidróxido de cálcio.

Nas amostras com cura de 3 dias na estufa úmida, observou-se reduções significativas de resistência comparado a amostra P enquanto que as amostras com 7 dias de cura as amostras apresentaram resistência similar à apresentada pela amostra P, sabendo que quando adicionado o SAP retarda o processo de cura interna podendo não atingir a cura total em 28 dias.

As amostras SH notou-se que em independente dos processos de cura aplicados ocorreu redução na resistência na faixa de 39% à 59%, não estando indicado para aplicação, pois não obedecem às normas nacionais (ABNT- NBR 7222: 2011).

Os resultados dos ensaios de tração indireta com cura de 90 dias, são apresentados na Figura 31.

Figura 31: Ensaio de compressão diametral indireta com 90 dias. Cura com hidróxido de cálcio (azul escuro); sem cura (cinza); cura com 3 dias em ambiente controlado (verde) e com cura 7 dias em ambiente controlado (azul claro).



Fonte: o autor.

Após 90 dias de cura em solução saturada de hidróxido de cálcio somente as amostras com adição de SAP seco (SS-1) apresentaram resultados similares aos da amostra P-1.

As amostras sem cura externa apresentaram comportamento equivalente aos esforços mecânicos das amostras sem cura com ensaio de 28 dias.

Comparando os resultados obtidos pelas amostras com cura úmida de 3 dias com os resultados obtidos após 28 dias, observa-se que a amostra SU apresenta resistência equivalente a amostra P, sendo que aos 28 dias notou-se redução na resistência de 16%.

Já as amostras SS com 7 dias de cura úmida na estufa apresentaram aumento na resistência após 90 dias, comparado com amostra P.

Segundo Hashold (2012), a adição de uma quantidade a mais de água com adição de SAP, resulta na redução de resistência nos primeiros dias de cura, assim pode-se apontar que a amostra na qual foi adicionado uma quantidade a mais de água ocorreu redução de resistência de até 40%, as amostras que foram adicionado SAP saturado e SAP seco, com cura em temperatura de 40 °C, com aspersão de água por 7 dias, apresentaram aumento na resistência de 2% chegando até 19% superior ao apresentado pela amostra de referência.

6.2.7 Ensaio de capilaridade

A análise do ensaio de capilaridade é realizado pela aferição da massa dos corpos de prova considerando a absorção de água inicial e após 72 hs. Para as análises é observada a superfície de corte transversal na amostra e afere-se o nível de umidade percolada na amostra. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos de absorção de água apresentadas pelas amostras.

Tabela 10 : Resultados da quantidade de água absorvida pela amostra

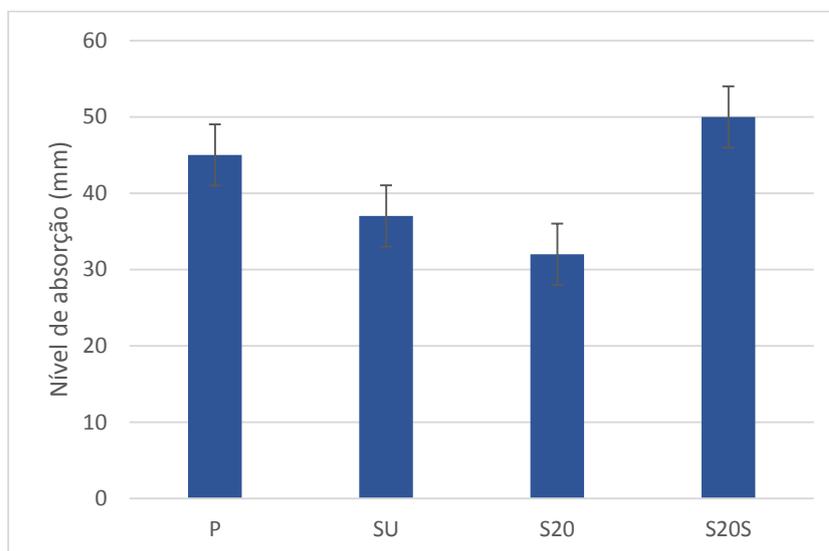
Cód..	Massa (g)				
	Seco	3h	6 h	24 h	72 h
P	325,74	0,0038	0,0003	0,0039	0,0023
SU	318,45	0,0031	0,0003	0,0043	0,156
S20	320,41	0,0032	0,001	0,0058	0,0024
S20S	321,21	0,002	0,0029	0,0076	0,004

Fonte: o autor.

O material sofre alteração de absorção de água no decorrer do tempo determinado, nota-se que a amostra P absorve 0,11% de água nas primeiras 3 horas, sendo superior as amostra com adição de SAP, onde a SU e a S20 absorveu somente 0,09% e a S20S 0,06%, após 6 horas a amostra P e SU absorveu 0,01% de água, as amostras S20 absorveu 0,03% e a S20S 0,09%, em 24 horas amostra P com 0,11% de absorção, as amostras SU com 0,13%, S20 com 0,28% e a S20S com 0,23%, com 72 horas notou-se que a amostra P absorveu 0,07% de água, a SU chegou a absorver 4,89%, e a S20 com 0,07% equivalente a amostra P e S20S 0,12%, portanto pode-se analisar que mesmo quando o SAP é incorporado na massa cimentícia continua retendo a água que estiver em contato com o compósito, entende-se que a água adicionada na mistura não é o suficiente para hidratação do cimento quando exposto a temperatura ambiente e a amostra SU comprova que mesmo o SAP liberando a água para o compósito, sua função de absorção ainda continua após 28 dias de cura, e as amostras com 20% a mais de água ocorre o controle de liberação da água funcionando como um reservatório interno.

Com os dados obtidos no ensaio de capilaridade define-se o nível de absorção interna das amostras, Figura 32.

Figura 32: Resultados do nível de absorção de água



Fonte: o autor.

A amostra P atingiu 45 mm de água percolada para o interior do corpo de prova, comparando esse resultado com o apresentado pelas demais amostras o notou-se SU apresentou redução de cerca de 17% , a amostra S20 redução de 28%, como o SAP

saturado ocupando os vazios do compósitos e retardando o processo de liberação de água para a hidratação do cimento diminuindo os microporos do material.

A amostra S20S foi adicionada uma quantidade de água com SAP seco de acordo com a análise de MEV esse material obteve alto índice de vãos, isso explica o maior nível de absorção que a amostra P atingindo 11%. Conforme Snoeck (2015), adicionando SAP seco na massa cimentícia, sucede a redução dos microporos e os mesoporos, o SAP funciona como vedante ocupando os vazios do material, por isso que a amostra S20 com adição de 20% de água apresenta o menor nível de absorção.

6.2.8 Ensaio de massa específica e absorção

O ensaio da massa específica analisou o nível de absorção submerso da amostra através da aferição da massa seca e saturada, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 : Resultados de massa específica

Cód..	Absorção %	Massa (g)	
		P _s (seca)	P _{sat} (saturado)
P	0,06	16,93	17,93
SU	0,04	22,71	23,71
S20	0,10	9,70	10,70
S20S	0,04	23,10	24,10
S40	0,10	9,94	10,94

Fonte: o autor

Analisando os valores obtidos em relação aos encontrados pela amostra P, observa-se que em todos os casos houve baixa flutuação nos valores de taxa de saturação, assim identificando que a presença do SAP não altera as características originais da argamassa e melhora o desempenho em 33% com relação nível de absorção de água em relação a amostra P.

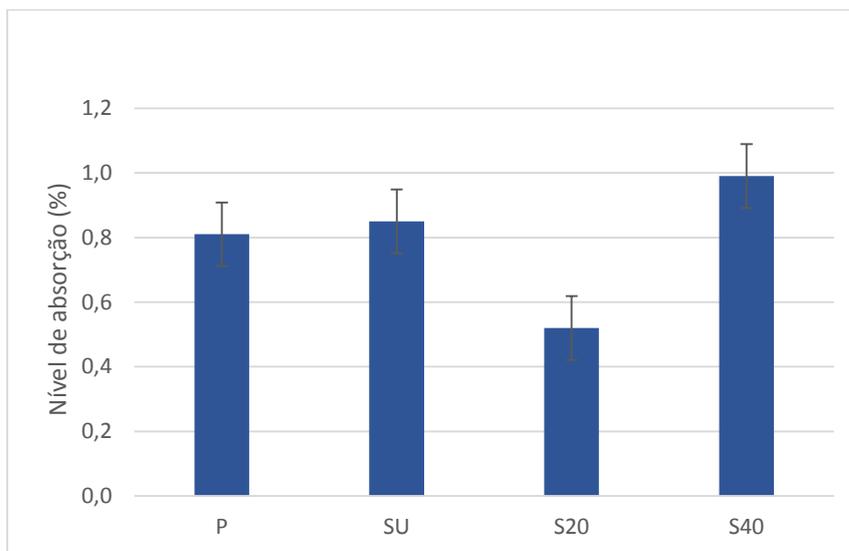
As amostras SU, S20S, S20 e S40 são as amostras com adição de água e SAP saturado, nelas foi observado aumento superior a 66% no nível de absorção quando comparado com a P.

6.2.9 Ensaio de resistência ao ataque por sulfato de cálcio

O ataque de sulfato ocorre na mudança de aparência da amostra causando um desgaste superficial na argamassa, de acordo com a

Figura 33 onde está apresentada uma relação entre o peso inicial e o peso após exposição de 21 dias em solução de Sulfato de Cálcio.

Figura 33: Comparativo do ataque de sulfato de cálcio.



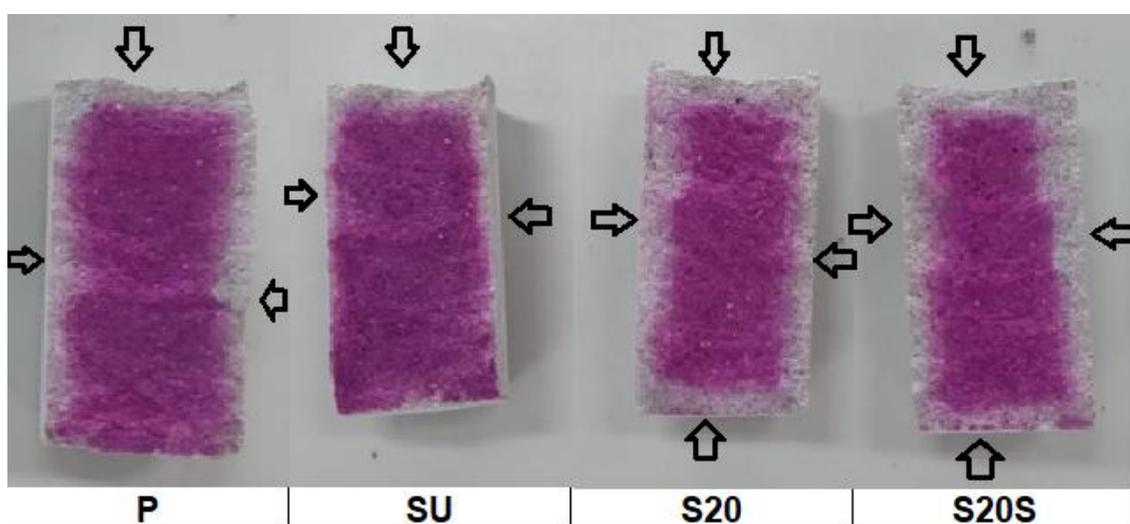
Fonte: o autor

Comparando as amostras com a P que sofreu 0,81% de ataque de sulfato de cálcio, a amostra S20 obteve o melhor resultado apresentando redução de 35% e as amostras que sofreram aumento no ataque onde, SU com 4% e S40 com 22%. Conforme Romano e Brito (2012), o ataque de sulfato causa redução na resistência do compósito cimentício, danificando a proteção das estruturas por meio de geração de fissuras e ocorrência de deslocamento. Nos resultados obtidos neste trabalho, mesmo usando um cimento de resistência a sulfato, houve ataque quando exposto a ambiente agressivo, mas tendo em vista quando adicionada uma quantidade maior de SAP com água na mistura, este polímero age como uma barreira de proteção para a penetração do sulfato.

6.2.10 Ensaio de carbonatação com CO₂

O ensaio de carbonatação da argamassa é ideal para identificar a qualidade do material, na qual é a entrada para despassivação da armadura no decorrer da vida útil da massa cimentícia, na Figura 34, pode-se observar o nível de profundidade do ataque de CO₂ no compósito, com a redução do pH da argamassa a reação química com o indicador fenolftaleína aponta a absorção do CO₂, visualmente podendo detectar a coloração rosada no material.

Figura 34: Ensaio de carbonatação com fenolftaleína.



Fonte: o autor.

Como a solução de fenolftaleína é aspergida na superfície de corte das amostras expostas à ambiente saturado de CO₂, permite revelar a camada onde ocorreu a penetração dos gases, estando incolor, Figura 34.

Na Tabela 12 estão apresentados os resultados do ensaio de ataque acelerado de carbonatação, nela mostra-se a profundidade do ataque da carbonatação nos traços de argamassa estudados.

Tabela 12: Resultados de ataque acelerado de carbonatação.

Cód..	Superior (mm)	Inferior(mm)	Direita(mm)	Esquerda(mm)
P	5	2	4	4
SU	5	0	6	6
S20	7	7	8	8
S20S	6	6	7	11

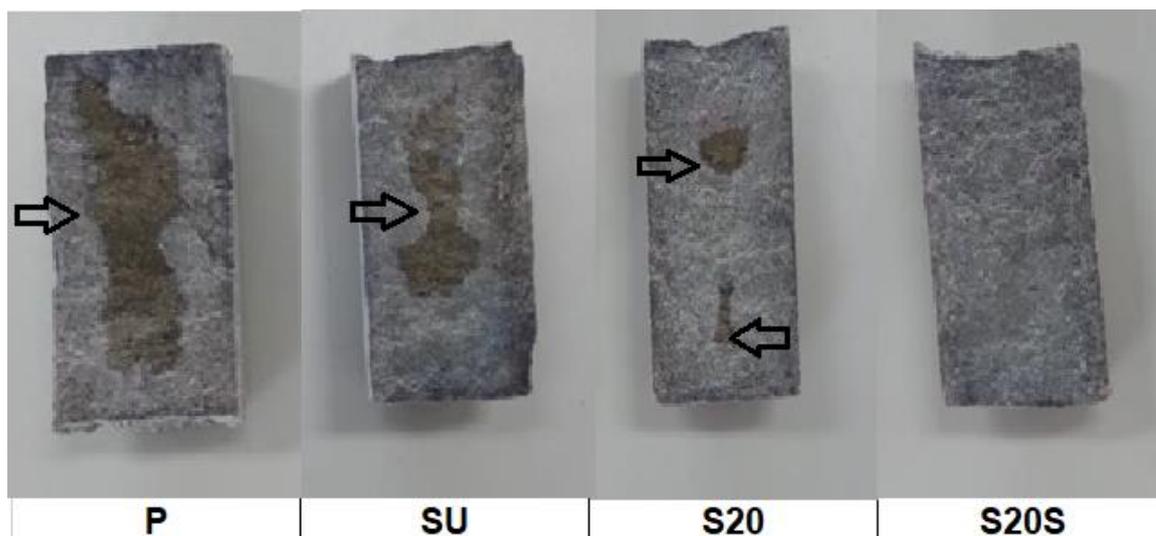
Fonte: o autor.

Conforme os dados coletados a amostra P usada como referência a carbonatação atingiu 27% da amostra. Para análise os dados obtidos pelos demais traços com adição de SAP foi realizada a comparação com o valor obtido para a amostra P, assim, a amostra SU obteve redução de 33% no nível de absorção e as amostras S20 e S20S apresentaram acréscimo de 51% a 59% no nível de absorção de CO₂. Moreira (2016), declara que o fator a/c pode interferir diretamente na aceleração do processo de carbonatação da massa cimentícia, como a presença de SAP nas amostras permite maior retenção de água buscando controlar a cura estas amostras estão mais susceptíveis à carbonatação em idades inferiores a 56 dias, pois segundo a Mechtcherine *et al.* (2021) a presença de SAP nas amostras pode retardar o processo de cura tendo as propriedades obtidas somente após passados 56 dias.

6.2.11 Ensaio de resistência ao ataque por cloreto de sódio

Na análise visual realizada nos corpos de prova que estão apresentados na Figura 35, pode-se identificar a reação do cloreto de sódio na amostra, o aspecto esbranquiçado devido a aspensão da solução de Nitrato de Prata, indica que as amostras P, SU e S20 foram danificadas pela ação do cloreto de sódio.

Figura 35: Ensaio de ataque de cloreto de sódio (NaCl).



Fonte: o autor.

A Tabela 13 mostra os resultados das aferições realizadas nas amostras submetidas ao ensaio de ataque por cloreto de sódio.

Tabela 13: Resultados de ataque de cloreto de sódio (NaCl).

Cód..	Superior (mm)	Inferior(mm)	Direita(mm)	Esquerda(mm)
P	18	12	15	12
SU	9	30	20	20
S20	24	15	15	11
S20S	50	30	25	25

Fonte: o autor.

Nota-se pelos dados que na amostra P houve a permeabilidade de NaCl em 67% da amostra, a amostra SU obteve nível 1% superior quando comparado à amostra P e a S20 de 17% superior, a amostra S20S a amostra sofreu 100% de ataque por NaCl pode-se observar nas imagens apresentadas na Figura 35. Segundo Sidiq (2020), a adição do SAP, ocorre o retardo da cura e diminui a fissuração da massa cimentícia, com as amostras foram testadas após 28 dias de cura, com o retardo da cura interna o processo de reação química entre a água e cimento retarda o crescimento dos cristais de sílica estando o compósito mais susceptível ao ataque por cloretos.

6.2.12 Ensaio de variação de temperatura da argamassa

A análise da variação da temperatura da massa cimentícia durante a cura pode detectar o início da hidratação do cimento, as temperaturas referentes a cada amostra estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 : Resultados do ensaio de temperatura.

Cód..	temperatura ambiente °C	temperatura °C	temperatura °C	Tempo minutos	temperatura °C
P	24	24	23-24	5 a 6	23
SU	20	22	22-23	1 a 2	22
S20	20	22	21-22	7 a 8	21
S20S	23	22	21-22	9 a 10	21

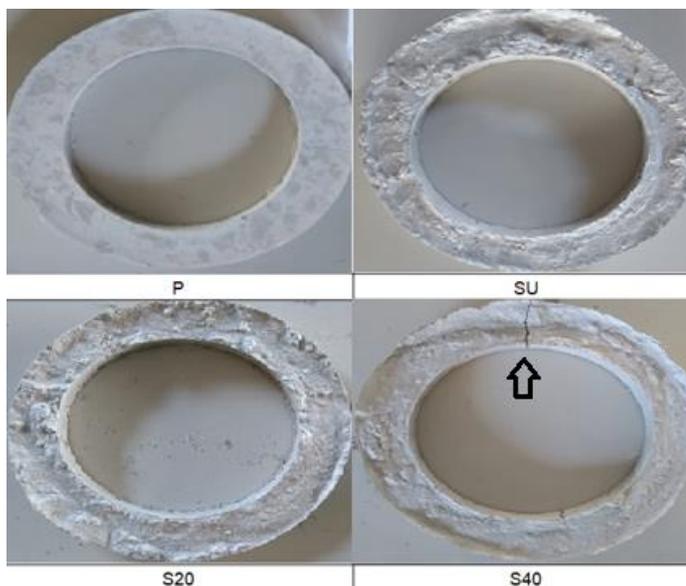
Fonte: o autor.

Segundo Couto *et al.* (2016), a hidratação do cimento com escória de alto forno ocorre em altas temperaturas, acelerando o processo de cura, como pode-se observar nos resultados do ensaio, quando adicionado o SAP, a mesma composição de agregados nota-se que adicionando uma quantidade maior de água a temperatura da hidratação do cimento interfere diretamente no tempo de variação da temperatura, de acordo com Pourjavadi (2013), o início de pega da uma massa convencional inicia-se com até 10 minutos e adicionando SAP ocorre um retardo no processo de início de pega, para melhores resultados é necessário procedimento de controle rigoroso no mínimo pelos 7 dias iniciais de cura com corpos de prova maiores.

6.2.13 Ensaio de fissuração

No ensaio de fissuração usou-se um molde circular, onde conforme a hidratação do aglomerante do compósito ocorre a retração, dessa forma pode-se observar que o material desenvolverá fissuras no decorrer do período de cura da massa cimentícia. A Figura 36 apresenta as imagens dos anéis desmoldados após o ensaio de fissuração.

Figura 36: Ensaio de fissuração da massa cimentícia



Fonte: o autor.

Na moldagem das amostra para o ensaio de fissuração, notou-se que a amostra P, quando adicionado a massa cimentícia no molde, forma uma película de água sobre a mistura, isso ocorre também com a amostra S40, e as amostras SU e S20 apresenta

uma mistura pastosa, necessitando de vibração para homogeneizar a distribuição no molde e não ocorre a exsudação de água para a superfície do molde.

As amostras foram observadas por 21 dias, somente a amostra S40 sofreu fissura causando o rompimento do anel no primeiro dia de cura, as amostras SU e S20 apresentou um material mais consistente e volumoso comparado com a amostra P e não houve fissuração nas amostras. De acordo com Assis e Rabelo (2013), as causas de fissuração geralmente ocorre por elevação de temperatura da mistura do cimento. Quanto eleva a temperatura acelera o processo de cura causando retração no material, como podemos identificar na amostra S40 a fissura.

7 CONCLUSÃO

O cimento é um aglomerante hidráulico, quando entra em contato com a água ocorre a liberação de calor, assim elevando a temperatura interna da mistura cimentícia, formando cristais de sílica o qual faz a ligação dos agregados da mistura da massa cimentícia, com o decorrer do dia com a influência da temperatura ambiente interfere na aceleração do processo de cura, acelerando a cura da massa, ocorre a retração do material causando fissuras, quando adicionado SAP ocorre o controle de liberação de água desacelerando o processo de hidratação do cimento e diminuindo a índice de vazios, mitigando as fissuras.

Quando adicionado polímero superabsorvente na argamassa melhora a fluidez e a trabalhabilidade nas misturas, facilitando o manuseio, os melhores resultados são as amostras com adição de água com SAP saturado, apresenta uma mistura mais pastosa e com aumento do volume da massa.

O tipo de ambiente exposto interfere diretamente no comportamento de retração e dilatação do compósito, podendo identificar nas imagens do MEV que os materiais que ficaram em temperatura ambiente e na estufa com umidade e temperatura controlada por 3 dias apresentaram mais fragilidade com maior índice de vazios e com algumas fissuras e as amostras com cura submersa apresentou um material mais consistente e homogêneo.

Nas amostras no MEV pôde-se identificar que adicionando SAP saturado o aspecto do compósito é como uma rocha sólida, sem presença de vazios, mesmo apresentando perda de até 6% resistência, entende-se que o comportamento do SAP na argamassa, mesmo após a dessorção total de água pelo cimento, quando há contato com a água o SAP ainda continua absorvendo o líquido, sendo capaz de funcionar como reservatório interno de água, como podemos observar na amostra que foi adicionada SU após 72 horas absorveu uma quantidade maior de água no ensaio de capilaridade, com o retardo de cura interna observou-se que o índice de vazios nas amostras com SAP apresentou resultados mais satisfatórios que as amostras padrão.

Nos ensaios de ataques químicos conseguiu-se identificar que o índice de vazios a argamassa S20 obteve redução de 35% em relação à amostra padrão, quando exposto em solução de sulfato de cálcio. No ataque de CO₂ a amostra SU sofreu a carbonatação, 33% de redução quando comparado à amostra de referência, comprovando que a adição de SAP reduz os mesoporos do material.

REFERÊNCIA

- ABD, S. M.; AHMED, B. K. Eliminating the Shrinkage of High Strength Concrete by using Super Absorbent Polymer (SAP). **Diyala Journal of Engineering Sciences**, v. 11, n. 4, p. 8-13, 2018.
- ANANTHI, P.; ANANTHAKUMAR, A. Self curing concrete by super absorbent Polymer: a review. **International Journal of Advance Research and Innovation**, v. 5, n. 3, p. 117-119, 2019.
- ASSIS, Fernando Fernandes de; RABELO, Quintino. **Fissuras por movimentação térmica em estruturas de concreto armado**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:2002** – Índice de consistência da argamassa. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018** - Cimento Portland Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:2015** – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2005**: Agregados para concreto- Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: 1996** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: 2005** -. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: 2012** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935:2011** – Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: 2011**- Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011b.
- ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de revestimentos de argamassa**. 1. ed. São Paulo, SP: ABCP, 2002.
- CARASEK, H. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ações da carbonatação no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, v 1, p 849-885, 2011.

COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL. **Cimentos**. [2019]. Disponível em: http://www.csn.com.br/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=59832&conta=45. Acesso em: 25 nov. 2019.

COUTO, D. *et al.* Monitoramento de temperatura em sapata de fundação de grande porte: estudo de caso “Parque da Cidade” – SP. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 9, n. 6, p. 953 – 968, 2016.

DANG, J.; ZHAO, J.; DU, Z. Effect of Superabsorbent Polymer on the Properties of Concrete. **Polymers**, v. 9, n. 12, p. 1-17, 2017.

DUGANE, S. *et al.* Analysis of Effect of Internal Curing with Super Absorbent Polymer (SAP). **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 60-62, 2019.

DURAN-HERRERA, A. *et al.* Synergetic effect of a super-absorbent polymer and a calcium nitrite corrosion inhibitor in high performance concrete durability. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 2, p. 206 – 218, 2020.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. C. de M. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, jul./set. 2018.

FERNANDES, A. S. C.; NÓBREGA, M. J. R. Corrosão em estruturas de concreto armado. **TEC-USU**, v. 1, n. 1, p. 47-59, 2018.

FERREIRA, K. C. *et al.* Estudo de parâmetros físico-químicos para a produção de argamassas utilizando resíduos industriais e da construção civil. *In*: CBECIMAT - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 21., 2014. **Anais [...]**. Cuiabá: CBECIMat, 2014.

GARCIA, Amauri. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

GRAEFF, Eduardo Recktenvald Graeff. **Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante**. 2017. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2017.

GOMIDES, M. de J. *et al.* Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo. **Tecnosil**, 2008. Disponível em: https://www.tecnosilbr.com.br/wpcontent/uploads/2018/05/ATAQUE_POR_SULFATOS_AO_CCR.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

HASHOLD, Marianne Tange. Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength? **Construction and Building Materials**, v. 31, 2012, p. 226–230, 2012.

KANNA, G. V.; KARTHICKEYAN, S.; ANITHA, P. Study on Behaviour of Coconut Shell Aggregate using Super Absorbent Polymer. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology**, v. 6, n. 7, p. 641-646, 2018.

KUNDGOL, M. N. F.; VIJAPUR, V. Study on internal curing of steel fiber reinforced concrete using super absorbent polymer. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 3, n. 7, p. 2103-2112, 2016.

LEE, H.X.D., *et al.* Effect of alkalinity and calcium concentration of pore solution on the swelling and ionic exchange of superabsorbent polymers in cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v. 88, p. 150-164, 2018.

MECHTCHERINE, Viktor; REINHARDT, Hans-Wolf. **Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report** Prepared by Technical Committee 225-SAP. [S.I.]: Springer, 2012.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction: update of RILEM state-of-the-art report **Materials and Structures**, v. 54, p.80, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01668-z>

MOREIRA, Jairo Dutra. **Verificação de profundidade de carbonatação em estruturas de concreto: Estudo de caso.** 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia civil) Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia Departamento de engenharia civil e Ambiental, 2019

NASSER, Rachel O., *et al.* Correlação entre a capacidade de inchamento e as características estruturais de polímeros superabsorventes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 9, 2007. **Anais[...]**. Campina Grande: [s.n.], 2007.

OLIVEIRA, Tatiane Rodrigues de. **Análise da frente de carbonatação em concreto convencional: Estudo de caso em edificações com idade diferenciada na cidade de Juazeiro do Norte – CE.** 2007. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia da Construção Civil) - Universidade Regional do Cariri, Ceará, 2017

POURJAVADI, Ali *et al.* Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 196-204, 2013.

ROMANO, P.; BRITO, Paulo S. D. Estudo da degradação de estruturas de betão armado expostas ao ataque por sulfatos. In: SEMINÁRIO DE I&DT, 3., 2012, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Centro Interdisciplinar de Investigação e Inovação do Instituto Politécnico, 2012.

ROMANO, R. C. O. *et al.* Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, n. 363, p. 215-223, 2016 .

SANTOS, Rodrigo Vergane de Abreu. **Polímeros superabsorventes: processos de produção, aplicação e mercado.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

SHUKAI, C. *et al.* Degradation progress of Portland cement mortar under the coupled effects of multiple corrosive ions and drying-wetting cycles. **Cement and Concrete Composites**, v. 111, p. 1-10, 2020.

SIDIQ, A. *et al.* The effectiveness of Super Absorbent polymers and superplasticizer in self-healing of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 253, 2020.

SINGH, N.; SINGH, H. Optimum dosage of superabsorbent polymers in concrete. **International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering**, v.5, n. 2, p. 83-87, 2018.

SNOECK, D. *et al.* The effects of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by means of sorption experiments. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 26-35, 2015.

THIRUMOORTHY, S. Self-Curing Concrete by using Super Absorbent Polymer. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v.6, n.7, p.1-6, 2018. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/self-curing-concrete-by-using-super-absorbent-polymer-IJERTCONV6IS07007.pdf>. Acesso em 8 jun. 2021.

VIEIRA, Daniel Venâncio *et al.* Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado. **Matéria (Rio J.)**, v. 15, n. 3, p. 431-444, 2010.

Anexos A: Tabela

Tabela 15 : Resultado ensaio volumétrico em mm amostras com cura normatizada.

P			SU			SS		
1 dia	28 dias	90 dias	1 dia	28 dias	90 dias	1 dia	28 dias	90 dias
0,17	0,166	0,169	0,169	0,167	0,168	0,166	0,166	0,168
SH			S20			S40		
1 dia	28 dias	90 dias	1 dia	28 dias	90 dias	1 dia	28 dias	90 dias
0,161	0,160	0,163	0,17	0,17	0,169	0,167	0,165	0,163

Fonte: o autor

Tabela 16: Resultado ensaio volumétrico em mm amostras sem cura externa e cura na estufa com umidade de 50% e temperatura à 40 °C.

Sem cura externa											
P			SU			SS			SH		
28	90		28	90		28	90		28	90	
1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias
0,17	0,17	0,167	0,162	0,164	0,162	0,17	0,17	0,167	0,17	0,171	0,173
Cura 3 dias na estufa com 50% de umidade e com temperatura de 40 °C											
P			SU			SS			SH		
28	90		28	90		28	90		28	90	
1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias
0,167	0,168	0,167	0,17	0,167	0,162	0,172	0,172	0,173	0,171	0,171	0,172
Cura 7 dias na estufa com 50% de umidade e com temperatura de 40 °C											
P			SU			SS			SH		
28	90		28	90		28	90		28	90	
1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias	1 dia	dias	dias
0,169	0,165	0,17	0,169	0,167	0,169	0,174	0,174	0,174	0,169	0,169	0,168

Fonte: o autor

Tabela 17 : Resultado ensaio de compressão axial 28 dias.

Cura submersa com hidróxido de cálcio						
P-1(MPa)	SU-1(MPa)	SS-1(MPa)	SH-1(MPa)	S20-1(MPa)	S20S-1(MPa)	S40-1(MPa)
25,17335	20,012	15,84387	5,71031	19,18117	17,70015	13,01123
19,22741	20,50574	21,07332	6,48076	20,21867	17,52742	10,29
18,92539	21,98132	15,41138	6,77274	16,06863	19,16884	12,465
21,37597	20,96642	21,5473	6,30912	20,80349	18,43889	12,50724
Sem cura externa						
P-2(MPa)	SU-2(MPa)	SS-2(MPa)	SH2(MPa)			
17,09063	10,94217	11,85808	7,87551			
17,4457	14,72958	12,94448	6,84042			
15,51003	14,12019	12,55782	5,02634			
17,17742	13,60175	15,31576	6,55377			
Cura 3 dias na estufa com 50% de umidade e temperatura de 40°C						
P-3(MPa)	SU-3(MPa)	SS-3(MPa)	SH-3(MPa)			
15,84637	16,36433	15,27607	8,66349			
15,66721	16,83892	16,89029	7,22183			
17,68525	18,09818	18,27498	8,88071			
17,69711	12,49432	17,22347	7,4001			
Cura 7 dias na estufa com 50% de umidade e temperatura de 40°C						
P-4(MPa)	SU4(MPa)	SS-4(MPa)	SH-4(MPa)			
19,04363	17,8222	18,52025	7,13534			
16,11231	17,3681	16,53814	8,37281			
18,38132	15,20164	16,1469	6,28597			
18,17991	16,75577	18,08525	5,0556			

Fonte: o autor

Tabela 18 : Resultado ensaio de compressão axial 90 dias.

Cura submersa no hidróxido de cálcio						
P-1(MPa)	SU-1(MPa)	SS-1(MPa)	SH(MPa)	S20-1(MPa)	S20S-1(MPa)	S40-1(MPa)
16,4504	16,4504	16,4504	16,4504	16,4504	20,6318	13,5119
22,88134	17,1348	17,84765	15,43756	12,4523	16,5818	12,07433
19,23577	16,12362	15,97913	14,46263	12,2829	20,7124	13,27207
24,07412	21,4157	24,37354	16,52294	14,8395	18,1136	14,74126
Sem cura externa						
P-2(MPa)	SU-2(MPa)	SS-2(MPa)	SH2(MPa)			
10,084	7,06295	10,90296	5,5105			
9,40406	9,38367	9,41866	3,20212			
10,63107	9,84704	7,34215	4,66125			
9,53992	9,43741	9,48615	2,4595			
Cura 3 dias na estufa com 50% de umidade e temperatura de 40°C						
P-3(MPa)	SU-3(MPa)	SS-3(MPa)	SH-3(MPa)			
18,17738	18,09409	16,02049	5,71031			
17,46269	21,16994	16,1022	6,48076			
24,23274	20,69653	20,02736	6,77274			
19,26419	14,89573	18,71799	6,30912			
Cura 7 dias na estufa com 50% de umidade e temperatura de 40°C						
P-4(MPa)	SU4(MPa)	SS-4(MPa)	SH-4(MPa)			
16,61346	18,80274	14,71667	10,6983			
19,43158	18,17377	10,4866	9,74477			
23,25517	17,08587	15,17205	9,87297			
20,27122	22,04848	12,80659	5,00047			

Fonte: o autor

Tabela 19: Resultado ensaio de compressão diametral indireta 28 dias.

Cura submersa no hidróxido de cálcio						
P-1(MPa)	SU-1(MPa)	SS-1(MPa)	SH(MPa)	S20-1(MPa)	S20S-1(MPa)	S40-1(MPa)
2,44267	2,568726	2,69884	1,55673	2,66401	2,191896	2,20073
2,40397	2,542419	2,734974	1,482849	2,46123	2,340252	2,45449
3,0689	3,035448	2,378106	1,878786	2,56349	2,140056	2,09892
2,80733	2,432196	2,86091	1,576395	2,80113	2,161125	2,32634
Sem cura externa						
P-2(MPa)	SU-2(MPa)	SS-2(MPa)	SH-2(MPa)			
2,22139	2,707947	1,999269	1,189404			
2,2411	2,1258	2,356236	1,273842			
2,13655	2,514294	2,679534	1,196568			
2,23046	2,449071	2,105901	1,424547			
Cura BOD 3 dias						
P-3(MPa)	SU-3(MPa)	SS-3(MPa)	SH-3(MPa)			
3,40516	2,400192	2,17944	1,225242			
2,89087	2,121147	1,840437	1,231623			
2,74077	3,01482	1,958193	1,268586			
2,79845	2,370078	2,564847	1,155159			
Cura BOD 7 dias						
P-4(MPa)	SU4(MPa)	SS-4(MPa)	SH-4(MPa)			
2,66291	2,55483	2,638161	1,69299			
2,30874	2,40231	2,117646	1,357272			
2,49815	2,496897	2,26503	1,139247			
2,46339	2,351007	2,265714	1,722969			

Fonte: o autor

Tabela 20 : Resultado ensaio de compressão diametral indireta 90 dias

Cura submersa com hidróxido de cálcio						
P-1(MPa)	SU-1(MPa)	SS-1(MPa)	SH-1(MPa)	S20-1(MPa)	S20S-1(MPa)	S40-1(MPa)
3,04552	2,591307	2,823903	2,378736	3,069369	2,65849	2,267442
2,93947	2,943441	2,883105	2,398509	2,665647	2,826243	2,588319
3,40244	2,58372	3,459618	2,125008	2,524068	2,779992	2,235915
3,39314	2,72736	3,230397	1,81242	2,436687	2,443284	2,5577951
Sem cura externa						
P-2(MPa)	SU-2(MPa)	SS-2(MPa)	SH-2(MPa)			
1,81635	2,142405	1,870272	0,877914			
1,4847	1,784439	1,980216	0,724842			
1,48252	1,818666	2,260719	0,687573			
1,73204	2,057922	1,971351	0,775251			
Cura 3 dias na estufa com 50% de umidade e com temperatura de 40 °C						
P-3(MPa)	SU-3(MPa)	SS-3(MPa)	SH-3(MPa)			
2,75225	3,375504	3,106107	1,440945			
3,33668	3,223107	2,629998	1,33515			
2,8611	2,633223	2,711682	1,128834			
3,60831	3,246426	2,660778	1,475856			
Cura dias na estufa com 50% de umidade e com temperatura de 40 °C						
P-4(MPa)	SU-4(MPa)	SS-4(MPa)	SH-4(MPa)			
2,86352	2,872008	3,10671	1,143702			
2,38793	2,767833	3,032622	1,752831			
2,33279	2,665992	2,789406	1,394487			
2,86463	2,351052	3,520926	1,283288			

Fonte: o autor

Anexos B: Figuras

Figura 37: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 Amostras submersa com camada de hidróxido de cálcio



Fonte: o autor

Figura 38: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 Amostras exposta em atmosfera ambiente



Fonte: o autor

Figura 39: Amostra na estufa com 50% de umidade com temperatura controlada à 40 °C.



Fonte: o autor