

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ENRIQUE GARCIA OLIVEIRA

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C E
POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP) COMO AGENTE DE CURA INTERNA**

**Alegrete
2023**

ENRIQUE GARCIA OLIVEIRA

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C E
POLÍMERO SUPERABSORVENTE (SAP) COMO AGENTE DE CURA INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa

Coorientadora: Eng. Me. Poliana Naissinger Hartmann

**Alegrete
2023**

ENRIQUE GARCIA OLIVEIRA

CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C E POLIMERO SUPERABSORVENTE (SAP) COMO AGENTE DE CURA INTERNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de junho de 2023.

Banca examinadora:

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA - Orientadora

Ma. Enga. POLIANA NAISSINGER HARTMANNI - Membro Externa - Coorientadora

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Eng. M. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 15/07/2023, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Poliana Naissinger Hartmann, Usuário Externo**, em 15/07/2023, às 22:57, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 09:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2023, às 20:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1185820** e o código CRC **9825340B**.

RESUMO

O concreto de alta resistência vem sendo, cada vez mais, utilizado como solução para a construção de edifícios mais esbeltos e complexos. Este concreto possui uma microestrutura densa e refinada, podendo proporcionar vantagens econômicas e estruturais. No entanto, sofre o efeito da autodessecação, fenômeno responsável pela retração autógena, que pode gerar fissuração e perda de desempenho do material. A retração autógena ocorre em todos os tipos de concretos, porém só se torna relevante em concretos com relações a/c inferiores a 0,42. Para mitigar este tipo de retração, é necessário a utilização de um método de cura interna, como a utilização de um Polímero Superabsorvente (SAP). Este material vem se mostrando eficaz no combate da retração autógena, porém a sua adição pode reduzir as propriedades mecânicas do concreto. Diante do exposto, este trabalho visa avaliar a influência da relação a/c e da adição de agente de cura interna nas propriedades físicas e mecânicas em concretos de alta resistência. Para isto, foram realizadas duas misturas referências com relações a/c de 0,3 e 0,36, e também outras duas com adição de polímero para ambas as relações. Os ensaios realizados foram de liberação de calor de hidratação, retração livre, absorção de índice de vazios, absorção por capilaridade, resistência à compressão axial e resistência à tração na flexão. Os resultados mostram que o polímero conseguiu minimizar significativamente a retração autógena, porém reduziu as propriedades mecânicas, elevou a absorção de água, o índice de vazios e a retração por secagem. Já a redução da relação a/c proporcionou uma melhora nas propriedades mecânicas, na estrutura de poros e reduziu a absorção de água e seu efeito na retração autógena se mostrou controverso. Desta forma conclui-se que a adição do polímero no concreto consegue cumprir o papel de reduzir a retração autógena, porém gerou perdas significativas de desempenho mecânico, enquanto que a diminuição da relação a/c proporcionou melhorias nas propriedades do concreto.

Palavras-chave: Retração. Relação a/c. Polímero superabsorvente

ABSTRACT

High strength concrete has been increasingly used as a solution for the construction of more slender and complex buildings. This concrete has a dense and refined microstructure, which can provide economic and structural advantages. However, it suffers the effect of self-desiccation, a phenomenon responsible for autogenous shrinkage, which can lead to cracking and loss of performance. Autogenous shrinkage occurs in all types of concrete, but it only becomes relevant in concrete with w/c ratios below 0.42. To mitigate this type of shrinkage, it is necessary to use an internal curing method, such as the use of a Superabsorbent Polymer (SAP). This material has shown to be effective in combating autogenous shrinkage, but its addition can reduce the mechanical properties of concrete. Given the above, this work aims to evaluate the influence of the w/c ratio and the addition of an internal curing agent on the physical and mechanical properties of high-strength concrete. In order to do this, two reference mixtures were made with w/c ratios of 0.3 and 0.36, and also two others with addition of polymer for both w/c ratios. The tests carried out were heat release of hydration, free shrinkage, water absorption and void ratio, water absorption by capillary, uniaxial compression and flexural tension. The results show that the polymer was able to significantly minimize the autogenous shrinkage, but reduced the mechanical properties, increased the water absorption, the voids index and the drying shrinkage. On the other hand, the reduction of the w/c ratio provided an improvement in mechanical properties, in the pore structure and reduced the water absorption. Its effect on the autogenous shrinkage proved to be controversial. In this way, it is concluded that the addition of polymer in concrete can fulfill the role of reducing autogenous shrinkage, but generated significant losses in mechanical performance, while the decrease in w/c ratio provided improvements in concrete properties.

Keywords: Shrinkage. w/c ratio. Superabsorbent polymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Retração autógena e química durante o processo de hidratação. . .	14
Figura 2 – Ensaio da capacidade de absorção de água pelo método dos cilindros graduados.	18
Figura 3 – Distribuição das fases volumétricas interna de uma estrutura cimentícia, com relação a/c=0,36 (esquerda) e a/c=0,36+0,06 (direita).	20
Figura 4 – Organograma da pesquisa.	21
Figura 5 – Granulometria da brita utilizada.	22
Figura 6 – Granulometria da areia utilizada.	23
Figura 7 – Polímero no estado seco (esquerda) e polímero no estado saturado (direita).	24
Figura 8 – Granulometria do polímero superabsorvente.	25
Figura 9 – Análise das partículas de SAP no MEV.	26
Figura 10 – Processo de mistura de argamassas para o ensaio de espalhamento	27
Figura 11 – Espalhamento das argamassas ensaiadas.	27
Figura 12 – Estrutura para o ensaio de liberação de calor de hidratação.	31
Figura 13 – Armazenamento dos corpos de prova.	32
Figura 14 – Medição da retração autógena	32
Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão.	34
Figura 16 – Ensaio de resistência à tração.	35
Figura 17 – Variação de temperatura ao longo do tempo.	36
Figura 18 – Variação de temperatura ao longo do tempo.	37
Figura 19 – Valores médios de retração autógena.	38
Figura 20 – Valores médios de retração por secagem.	39
Figura 21 – Valores médios de retração total.	40
Figura 22 – Valores médios de absorção.	40
Figura 23 – Valores médios de índice de vazios.	41
Figura 24 – Absorção por capilaridade ao longo do tempo.	43
Figura 25 – Resistência à compressão ao longo do tempo.	44
Figura 26 – Resultados médios do ensaio de Resistência à tração na flexão. . .	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo de trabalhos sobre a influência da relação a/c na retração .	16
Tabela 2 – Caracterização da brita utilizada	22
Tabela 3 – Caracterização da areia utilizada.	23
Tabela 4 – Características do Polímero	25
Tabela 5 – Resumo das propriedades do SAP.	28
Tabela 6 – Traço em massa.	28
Tabela 7 – Traço unitário.	29
Tabela 8 – Resumo de ensaios.	30
Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de absorção.	42
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de índice de vazios. .	42
Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de compressão. . . .	44
Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de tração na flexão. .	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
a_{inc}/c	Relação água incorporada/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing Methods</i>
SAP	Polímero superabsorvente
RILEM	<i>International Union Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contextualização do tema e justificativa	10
1.2	Objetivos	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Retração do concreto	12
2.1.1	Tipos de retração	12
2.1.2	Influência da relação a/c na retração	14
2.2	Polímeros superabsorventes como agente de cura interna	15
2.2.1	Capacidade de absorção livre	17
2.2.2	Capacidade de absorção em meios cimentícios	18
2.2.3	Teor de água para cura interna	19
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	21
3.1	Materiais	21
3.1.1	Cimento	21
3.1.2	Agregado graúdo	22
3.1.3	Agregado miúdo	23
3.1.4	Aditivo Superplastificante	23
3.1.5	Água	24
3.1.6	Polímero Superabsorvente (SAP)	24
3.2	Dosagem dos concretos	28
3.3	Preparo dos concretos	29
3.4	Método	29
3.4.1	Liberação de calor de hidratação	30
3.4.2	Retração livre	31
3.4.3	Absorção e índice de vazios	33
3.4.4	Absorção por capilaridade	33
3.4.5	Resistência à compressão axial	33
3.4.6	Resistência à tração na flexão	34
4	RESULTADOS	36
4.1	Liberação de calor de hidratação	36
4.2	Retração Livre	37
4.3	Absorção e índice de vazios	40
4.4	Absorção por capilaridade	42
4.5	Resistência à compressão axial	43
4.6	Resistência à tração na flexão	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.1	Conclusões	47
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	47

REFERÊNCIAS 49

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema e justificativa

Com o avanço tecnológico, as construções estão, cada vez mais, visando estruturas mais esbeltas e complexas, que necessitam de um concreto de maior resistência. Para suprir essa necessidade, os aditivos superplastificantes surgem como uma tecnologia inovadora, que a sua adição ao concreto, possibilita que não ocorra perda de trabalhabilidade na confecção dos concretos de alta resistência. Este concreto possui uma microestrutura densa e refinada, podendo proporcionar vantagens econômicas e estruturais. Contudo, estes concretos estão sujeitos ao efeito da autodessecação, fenômeno responsável pela retração autógena, que pode gerar problemas como fissuração e perda de desempenho do concreto (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011; MANZANO, 2016).

A retração autógena é a deformação em um sistema fechado, isotérmico e sem ação das forças externas. Sendo que só ocorre em concretos com relação a/c inferiores a 0,42, pois quando a hidratação do cimento consome toda a água capilar disponível, ocorre uma diminuição da umidade relativa interna, ocasionando a retração autógena e, dependendo da relação a/c, até mesmo a fissuração do material (HOLT, 2001).

Para evitar que haja uma perda na qualidade do material, é necessário evitar tais fissurações. O método mais usual para evitar a fissuração em concretos convencionais é a cura externa, através da molhagem superficial. Este método é eficaz na mitigação da retração por secagem, porém, não surte efeito no controle da retração autógena, necessitando também de um método de cura interna para o concreto, como o uso do polímero superabsorvente.

O uso do polímero superabsorvente (SAP), foi apresentado por Jensen e Hansen (2001), como um método para mitigar os efeitos da retração autógena em pastas cimentícias. Durante os anos, diversos estudos vem mostrando a eficácia deste material como um agente de cura interna. Este material tem a capacidade de absorver grandes quantidades de água e quando o concreto está passando pelo processo de hidratação, o SAP fornece água aos capilares, reduzindo a retração autógena. No entanto, algumas pesquisas mostram que a adição do SAP pode levar a uma perda de resistência à compressão do material (JENSEN; HANSEN, 2001; MANZANO, 2016; WYRZYKOWSKI et al., 2020; SNOECK; JENSEN; BELIE, 2015).

Com base no que foi apresentado, percebe-se a importância do estudo do SAP, principal mitigador da retração autógena, e também o estudo da influência da relação a/c na mistura, principal agente da retração autógena.

1.2 Objetivos

Os objetivos que orientam o trabalho estão apresentados nos itens 1.2.1 e 1.2.2.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da relação a/c nas propriedades físicas e mecânicas em concretos com agente de cura interna.

1.2.2 Objetivos Específicos

O trabalho subdivide-se nos seguintes objetivos:

- Avaliar como a relação água/cimento e agente de cura interna influenciam o calor de hidratação em concreto de alta resistência;
- Avaliar a capacidade de absorção de água dos concretos de alta resistência com diferentes relações a/c com e sem agente de cura interna;
- Investigar a influência da relação água/cimento combinada com a adição de polímero superabsorvente na retração autógena de concretos de alta resistência;
- Analisar a influência da relação água/cimento e agente de cura interna na resistência à compressão e resistência a tração em concretos de alta resistência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os itens 2.1 e 2.2 apresentam a revisão bibliográfica utilizada para o embasamento teórico da pesquisa.

2.1 Retração do concreto

A retração é a contração do volume de concreto devido a reações de hidratação, mudanças de temperaturas e alterações na umidade. A retração é um fenômeno intrínseco que se não for cuidadosamente controlado, pode causar fissuras, comprometendo a durabilidade da estrutura. As mudanças de volume do elemento cimentício começam a partir do momento em que a água entra em contato com o cimento. A retração pode ser dividida em duas fases: retração precoce e retração de longo prazo. A retração precoce ocorre nas primeiras 24 horas do concreto. Já a retração de longo prazo ocorre após as 24 horas iniciais (HOLT, 2001; KOSMATKA; PANARESE; KERKHOFF, 2011).

2.1.1 Tipos de retração

A retração do concreto é comumente dividida em seis tipos: plástica, térmica, por secagem, por carbonatação, química e autógena. A seguir, estas retrações serão, individualmente, discutidas.

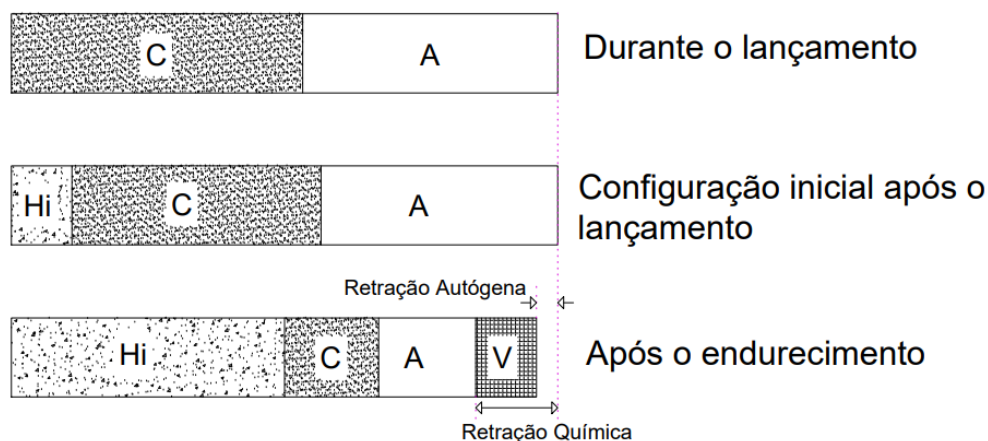
- **Retração plástica:** Após o lançamento do concreto, o fenômeno de exsudação se dá início, este fenômeno é a migração da água presente nos poros para a superfície do concreto. Quando a taxa de evaporação é maior que a taxa de exsudação, o concreto começa a apresentar pressão capilar negativa, resultando na retração plástica da mistura (TANABE et al., 2008).
- **Retração térmica:** A retração térmica é a mudança de volume do concreto devido a variações de temperaturas. O comportamento do concreto quando exposto a mudanças de temperatura, é semelhante a maioria dos sólidos, ou seja, expande quando tem sua temperatura aumentada e contrai quando é diminuída. Nas idades iniciais, a principal causa pela variação térmica é a hidratação dos elementos cimentícios. As reações de hidratação liberam calor e aumentam a temperatura do concreto, gerando a expansão do material. Em seguida, durante o processo de resfriamento ocorre a contração. Já nas idades mais avançadas, as mudanças de temperatura estão relacionadas a alteração de temperatura do meio onde a amostra está inserida (MEHTA; MONTEIRO, 2006).
- **Retração por secagem:** A retração por secagem está relacionada a perda de água do concreto durante o estado endurecido. A evaporação da água superficial

devido a fatores como temperatura e umidade relativa, ocasionam a secagem superficial do concreto e a retirada da água do interior do concreto. Com essa perda de água, o concreto endurecido tem seu volume diminuído, podendo gerar fissuras. A retração autógena e a retração por carbonatação são considerados casos especiais da retração por secagem (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003).

- **Retração por carbonatação:** A retração por carbonatação ocorre quando o concreto já endurecido reage quimicamente com o CO₂ presente no ar. A carbonatação está presente desde a superfície até o interior do elemento cimentício e é um processo que leva muitos anos para que ocorra (MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003).
- **Retração química:** A retração química é a perda de volume da mistura devido ao processo de hidratação. A reação química que ocorre entre a água e o cimento gera produtos que ocupam um volume menor que os reagentes, ocorrendo uma redução de volume da mistura. A relação a/c não afeta a quantidade final de retração química, porém ela afeta a velocidade em que esta retração ocorre (TAZAWA, 1999).
- **Retração autógena:** A retração autógena é a variação macroscópica do volume de concreto, que ocorre sem a troca de umidade com o ambiente externo. Este fenômeno ocorre em todos os tipos de concreto, porém só se torna relevante em misturas com relação a/c inferiores a 0,42. A retração autógena, pode ser diretamente ligada a retração química e também a autodessecação. A autodessecação é o fenômeno que ocorre quando não se possui mais água externa, e então a água capilar é utilizada para a hidratação do cimento, em seguida os vazios causados pelo consumo da água geram tensões capilares que são responsáveis por aproximar os produtos hidratados ocasionando a retração da amostra (TAZAWA, 1999; NETO, 2014).

A relação entre a retração autógena e a retração química é ilustrada na Figura 1, sendo que a retração química é a redução de volume interno e a autógena uma redução do volume externo da mistura. Nas idades iniciais enquanto o concreto apresenta comportamento fluido, a retração autógena é totalmente atribuída a retração química, já quando o concreto começa a apresentar um comportamento sólido, a autodessecação também se torna responsável pela retração autógena (HOLT, 2001).

Figura 1 – Retração autógena e química durante o processo de hidratação.



Fonte: Adaptado de (TAZAWA, 1999)

Onde,

C é o cimento;

A é a água;

Hi é o produto da hidratação;

V são os vazios gerados pela hidratação.

2.1.2 Influência da relação a/c na retração

A relação água/cimento possui papel muito importante na retração dos elementos cimentícios. Em relações a/c altas, maior será a quantidade de água evaporável e, conseqüentemente, maior será o potencial de retração por secagem. Já para relações a/c baixas, menor será a umidade relativa interna do material, possibilitando então uma retração autógena acentuada (TAZAWA, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2006).

Em concretos convencionais, é comum que a quantidade de água da mistura seja maior que a necessária para a hidratação do cimento. Logo, a parte da água que não for utilizada nesse processo, estará livre na mistura. Quando o concreto está em um ambiente com umidade relativa mais baixa que a sua umidade relativa interna, a água começa a migrar para a superfície do concreto, formando vazios e poros capilares (SILVA, 2008; HOLT, 2001; MINDESS; YOUNG; DARWIN, 2003; NUNES, 2006).

Conforme a água da pasta de cimento evapora surgem meniscos nos capilares e, com a secagem do material, esses meniscos tem seu raio de curvatura diminuído, gerando uma diferença de pressão entre a fase gasosa e a líquida, chamada de depressão capilar. Com o aumento da relação a/c, maior será a quantidade de poros e ocorrerá um aumento na quantidade de água que se movimenta na rede de capilares, aumentando a depressão capilar. Para equilibrar essa depressão, ocorre a retração por secagem no concreto (SILVA, 2008; NUNES, 2006; HOLT, 2001).

Yang, Wang e Zhou (2017) estudaram a retração por secagem em traços com relação a/c de 0,42 e 0,50, variando o tempo de cura submersa. Os resultados mostraram que em todas as amostras, independente do tempo de cura submersa, a relação a/c de 0,5 foi a que apresentou a maior retração por secagem.

Silva (2008) obteve resultados semelhantes ao estudar os efeitos da retração por secagem em concretos com adição de sílica ativa. Utilizando relações a/c de 0,33 e 0,45, o estudo mostrou que o concreto que apresentou a maior retração por secagem foi aquele com maior relação a/c.

Já o estudo de Zhang, Tam e Leow (2003) foi relacionado a influência do uso de sílica ativa e diferentes relações a/c na retração autógena, em concretos com relações a/c inferiores a 0,42. Foram realizados traços com relação a/c de 0,26, 0,30 e 0,35 e substituição de sílica de 0%, 5% e 10% em relação ao cimento. Como resultado, um traço com relação a/c de 0,35 apresentou uma retração de 40 μm aos 98 dias, enquanto o concreto de 0,3 apresentou 180 μm na mesma idade, ocorrendo um aumento de 140 μm . Porém quando comparado as amostras de relação 0,3 e 0,26, o aumento de retração foi de apenas 17 μm . As amostras que apresentaram maior retração foram as com menor relação a/c e com maior taxa de substituição de cimento.

Tazawa (1999), apresentou resultados similares, utilizando sílica ativa e relações a/c de 0,28 e 0,23. Seus resultados apresentaram um aumento de 53% na retração autógena pela diminuição de 0,05 na relação a/c. Este trabalho também analisou a retração por secagem nestas amostras, porém apresentou um resultado diferente dos vistos anteriormente, a retração por secagem aumentou com a diminuição da relação a/c.

Na Tabela 1 está apresentado um resumo dos trabalhos encontrados sobre a influencia da relação a/c nos diferentes tipos de retração.

2.2 Polímeros superabsorventes como agente de cura interna

Para otimizar suas propriedades, o concreto necessita passar por um processo de cura. Atualmente, os processos de cura mais difundidos são aqueles que buscam retardar a evaporação de água, por meio da molhagem superficial do concreto ou pela disposição de lonas na superfície. Estes métodos se mostram eficientes para a cura do concreto tradicional, porém não apresentam a mesma eficiência para o concreto de alta resistência, pois além da retração por secagem, o concreto de alta resistência sofre o efeito da autodessecação, a principal causa da retração autógena. Para esse tipo de concreto, o método de cura indicado é a cura interna (MONNIG, 2005; ASSMANN, 2013).

A cura interna consiste em disponibilizar água, internamente, para o concreto. Para isso, é necessário que um elemento, capaz de armazenar água, seja incorporado na mistura. Os agregados leves, quando saturados, conseguem exercer este papel,

Tabela 1 – Resumo de trabalhos sobre a influência da relação a/c na retração

Autores	a/c	Retração	Variação (μm)	Idade (dias)
Yang, Wang e Zhou (2017)	0,42	Secagem	520	365
	0,50		610	
Silva (2008)	0,33	Secagem	231	28
	0,45		280	
Zhang, Tam Leow (2003)	0,26	Autógena	197	98
	0,30		180	
	0,35		40	
Tazawa (1999)	0,23	Autógena	212	40
	0,28		138	80
Tazawa (1999)	0,23	Secagem	336	40
	0,28		248	80
Piasta e Zarzycki (2017)	0,25	Sec + aut	406	60
	0,30		473	
	0,35		515	
Kang et al. (2022)	0,33	Autógena	257	28
	0,40		205	
	0,50		155	

Fonte: Elaboração própria (2023).

porém este material apresenta dificuldade em controlar a consistência e diminuir, significativamente, a resistência do concreto. Como alternativa, surge o uso de polímeros superabsorventes como agente de cura interna (JENSEN; HANSEN, 2001).

Jensen e Hansen (2001) foram os responsáveis por introduzir o polímero superabsorvente (SAP) como agente mitigador da autodessecação do concreto. Os SAPs são materiais poliméricos que tem a capacidade de absorver uma quantidade de água de até 5000 vezes a sua própria massa, podendo ser adicionado à mistura no seu estado seco e quando comparado com o agregado leve, ele possui menos desvantagens para as propriedades do concreto.

A utilização do SAP como agente de cura interna depende dos processos de absorção e dessorção de água. Os principais mecanismos responsáveis pela absorção são: a pressão osmótica, interação eletrostática, entropia, ação capilar e interação de Coulomb. Já o processo de dessorção ocorre quando o material cimentício está passando pelo fenômeno de autodessecação devido a hidratação do cimento, o que gera uma redução da umidade relativa interna e a água presente no SAP migra para a pasta cimentícia. A água armazenada não pode estar confinada (MANZANO, 2016; MONNIG, 2005).

Lam (2005), estudou a retração autógena em concretos com diferentes relações a/c com agregado leve e SAP, e também com adição de sílica ativa. Foram estudados traços com relações de 0,35, 0,42 e 0,45, adições de SAP de 0,3% e 0,6%, sendo que o traço que apresentou a menor retração autógena foi o de relação a/c de 0,45 com adição de 0,6% de SAP. Já o traço que apresentou a maior retração autógena foi o

com relação de 0,35, adição de sílica ativa e sem nenhuma adição de agentes de cura interna.

Kang et al. (2022) estudaram a influência da relação a/c na retração autógena, em concretos com cura interna realizada pelo SAP. Utilizando relações a/c de 0,33, 0,4 e 0,5. Como resultado, as amostras que apresentaram o maior índice de retração foi a de relação a/c igual a 0,33, obtendo resultados similares aos vistos anteriormente.

2.2.1 Capacidade de absorção livre

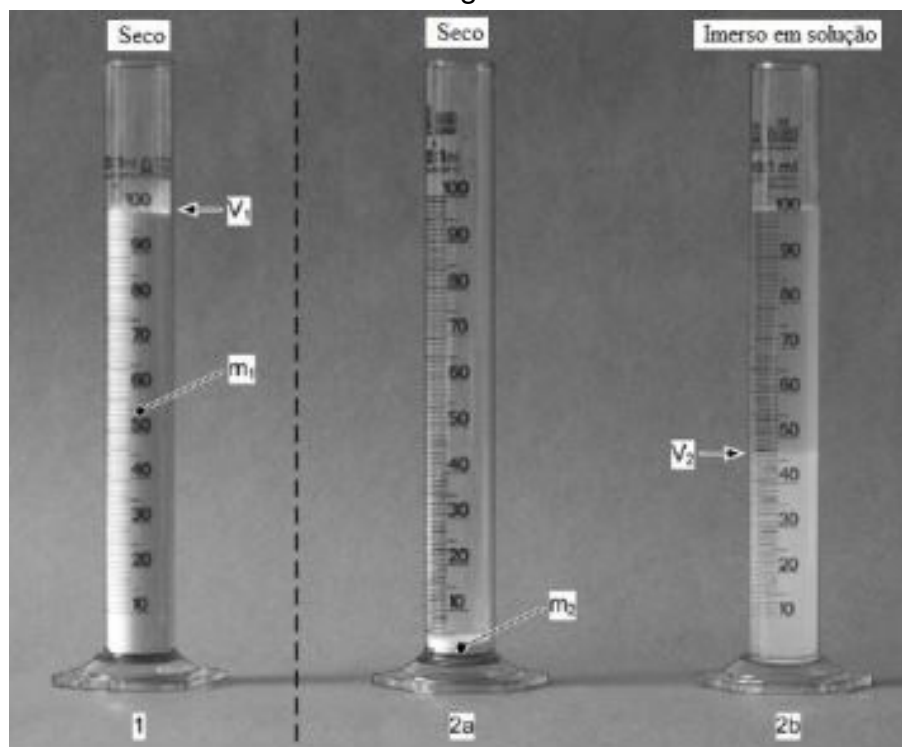
Para a aplicação do SAP no concreto, é necessário determinar a quantidade de água absorvida pelo polímero, para que não seja acrescentada água em excesso e não ocorra um aumento na relação a/c, prejudicando as propriedades mecânicas. Dito isso, é importante realizar ensaios que possibilitem a identificação da capacidade de absorção livre e no meio cimentício, sendo este último o responsável pela dosagem da água adicional incorporada ao concreto (MANZANO, 2016).

O ensaio para determinar a capacidade de absorção livre do polímero, é comumente realizado pelo método do *tea bag* e pelo método dos cilindros graduados, permitindo analisar a absorção quando em contato com a água. O método do *tea bag*, consiste em colocar uma quantidade de SAP de massa conhecida dentro de uma embalagem lacrada e permeável, em seguida inserir esta embalagem em um ambiente com água. Após a saturação do polímero, a embalagem é retirada da água e armazenada de forma que a água, que não foi absorvida pelo polímero, escorra e então a embalagem seja pesada. Tendo conhecimento da massa do conjunto seco e saturado, obtém-se a capacidade de absorção livre do polímero (COUTO, 2016).

De acordo com Jensen (2011), o método dos cilindros graduados é um método simples e rápido para estimar a capacidade de absorção livre. Este método consiste em medir a mudança de volume de uma massa conhecida de SAP quando saturada. Primeiramente, é determinada a densidade aparente do SAP através da relação entre a massa seca do SAP e o volume deste material. Após isso, uma pequena quantidade de polímero é deixado no cilindro, por fim acrescenta-se água no cilindro para que o volume após a absorção possa ser determinado. A absorção (k) é determinada pela Equação 2.1. Na Figura 2 está ilustrado o método dos cilindros.

$$k = \frac{\rho_{agua}}{\rho_{sap}} \cdot \left(\frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} - 1 \right) \quad (2.1)$$

Figura 2 – Ensaio da capacidade de absorção de água pelo método dos cilindros graduados.



Fonte: Adaptado de (JENSEN, 2011)

2.2.2 Capacidade de absorção em meios cimentícios

Já a capacidade de absorção em meios cimentícios, pode ser determinado pelo método do espalhamento ou *slump-flow* das argamassas. Este método foi desenvolvido por Monnig (2005) e consiste em comparar o espalhamento de uma amostra contendo uma quantidade conhecida de SAP com diferentes misturas de argamassas de referência, variando a relação água/cimento. Esta metodologia considera que a água absorvida pelo SAP não altera o espalhamento da argamassa. A absorção do polímero (AC), pode ser determinada através da Equação 2.2, utilizando os dados da argamassa sem polímero com curva mais parecida com a argamassa com SAP.

$$AC = \frac{m_{\text{agua}} - m_{\text{dispon}}}{m_{\text{sap}}} \quad (2.2)$$

Onde,

m_{agua} é a massa de água total da mistura com polímero.

m_{dispon} é a massa de água total da mistura referência que o espalhamento mais se aproxima da mistura do polímero.

m_{sap} é a massa do polímero superabsorvente.

2.2.3 Teor de água para cura interna

Jensen e Hansen (2001) realizaram uma reinterpretação do modelo de Powers, realizado por Powers e Brownyard em 1948, para explicar o fenômeno da autodessecação e os princípios da incorporação de água para cura interna para o combate deste fenômeno.

Assman (2013) ilustrou, em gráficos que podem ser observados na Figura 3, a distribuição das fases volumétricas em função do grau de hidratação de uma pasta de cimento selada para uma pasta de relação a/c de 0,36 em comparação com uma pasta com água de cura interna incorporada de relação a/c de 0,36+0,06. A parte adicional da relação a/c é referente à água incorporada para a cura interna. A pasta de cimento sem água incorporada tem sua hidratação cessada antes de chegar no grau de hidratação máximo, pois a hidratação é interrompida quando toda água capilar disponível é consumida. Já a pasta com água incorporada, consegue atingir o grau de hidratação máximo. A construção dos gráficos da Figura 3 se deu a partir das equações propostas por Powers e Brownyard que são apresentadas a seguir:

$$V_{SG} = 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (2.3)$$

$$V_{AG} = 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (2.4)$$

$$V_C = (1 - p) \cdot (1 - \alpha) \quad (2.5)$$

$$V_{RQ} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (2.6)$$

$$V_{AC} = p - 1,32 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (2.7)$$

$$p = \frac{a/c}{(a/c + \rho_a/\rho_c)} \quad (2.8)$$

Onde,

V_{SG} = Volume sólido de gel.

V_{AG} = Volume de água de gel.

V_C = Volume de cimento não hidratado.

V_{RQ} = Volume de retração química.

V_{AC} = Volume de água capilar.

p = Porosidade inicial.

a/c = relação água cimento.

α = grau de hidratação.

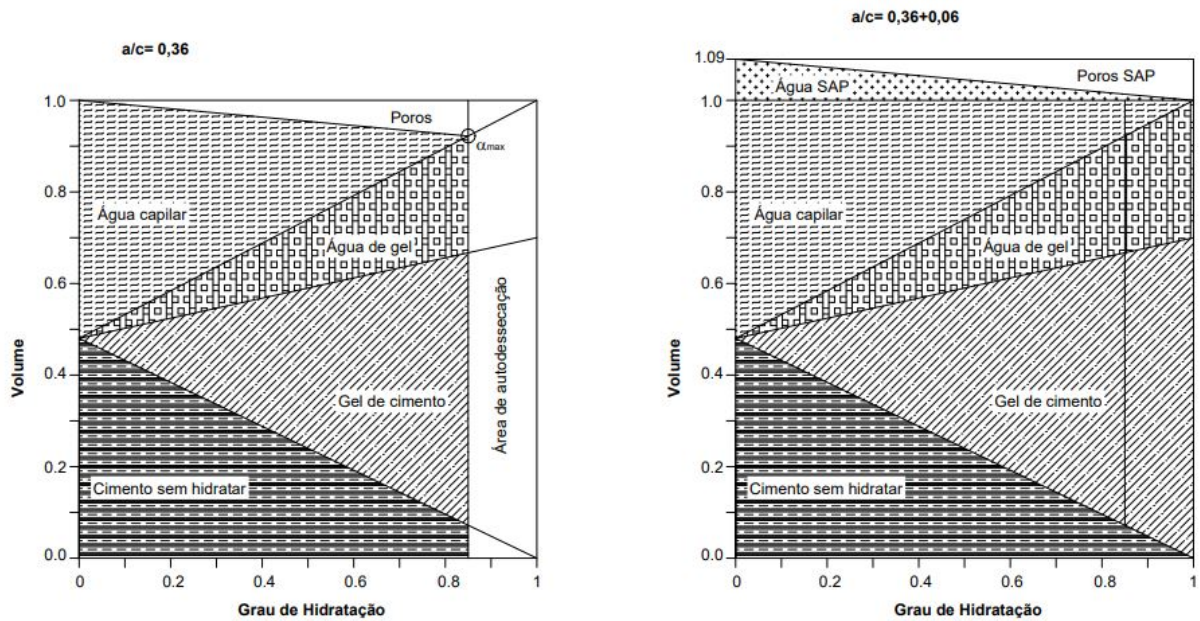
ρ_c = 3150 kg/m³ (massa específica do cimento).

ρ_a = 1000 kg/m³ (massa específica da água).

Considera-se então, que o grau de hidratação máximo é atingido quando todo o espaço é preenchido pelos volumes de sólido de gel (V_{SG}), de água de gel (V_{AG}) e cimento não hidratado (C):

$$V_{SG} + V_{AG} + C = 1 \quad (2.9)$$

Figura 3 – Distribuição das fases volumétricas interna de uma estrutura cimentícia, com relação $a/c=0,36$ (esquerda) e $a/c=0,36+0,06$ (direita).



Fonte: Adaptado de (ASSMANN, 2013)

Ao aplicar as equações de (2.3) a (2.8), pode-se então calcular a quantidade necessária de água incorporada para evitar a autodessecação de uma pasta de cimento:

$$1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{max} + (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{max}) = 1 \quad (2.10)$$

Como resultado, para obter um grau de hidratação máximo para relações a/c inferiores a 0,36, tem-se:

$$a_{inc}/c = 0,18 \cdot a/c \quad (2.11)$$

Ja para valores de relação a/c entre 0,36 e 0,42, a quantidade de água incorporada necessária para obter o grau de hidratação máximo é:

$$a_{inc}/c = 0,42 - a/c \quad (2.12)$$

Conhecendo a quantidade de água incorporada necessária para combater a retração química e a capacidade de absorção em meio cimentício do polímero, é possível calcular a quantidade de SAP que será acrescentado na mistura, através da Equação 2.13 (ZHONG et al., 2019).

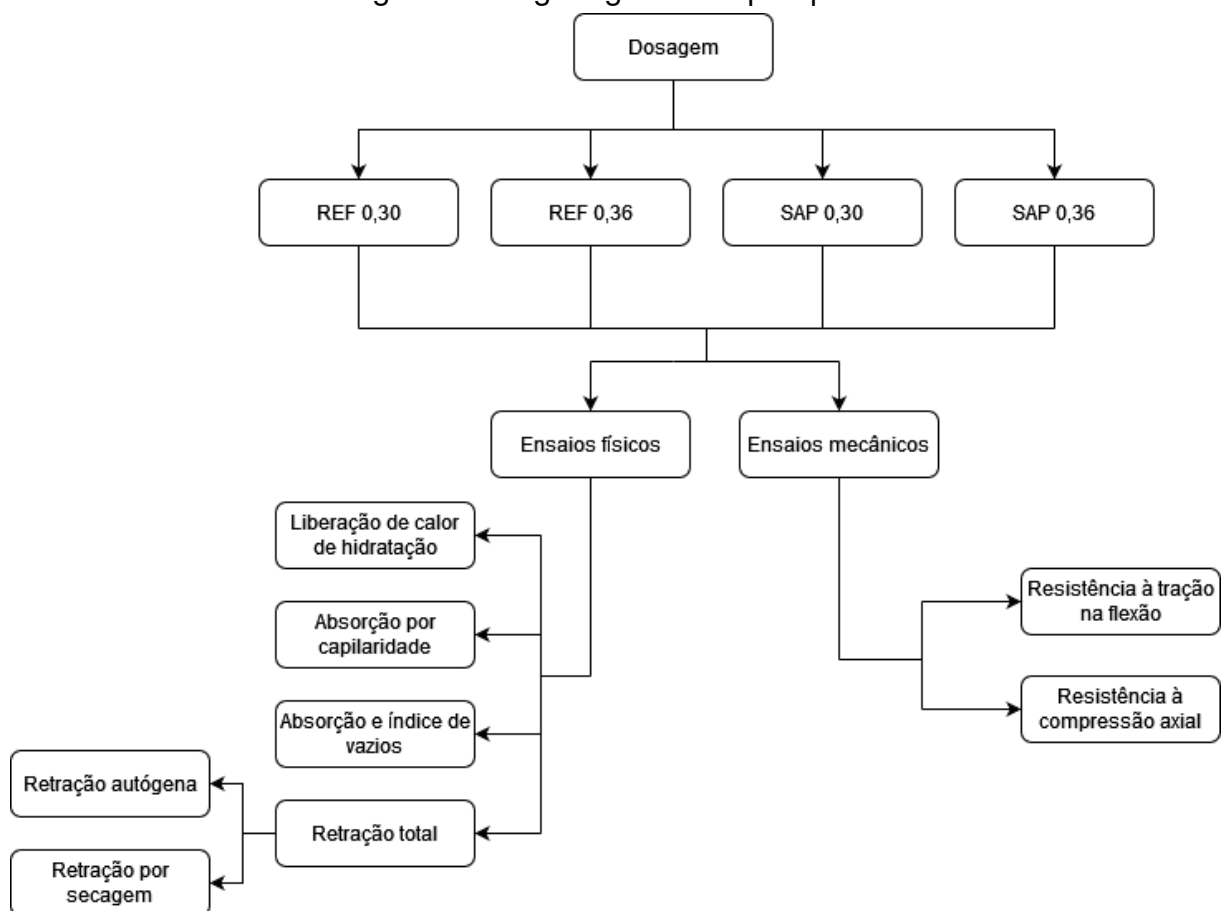
$$SAP/c = \frac{a_{inc}/c}{AC} \quad (2.13)$$

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A descrição do estudo experimental é ilustrada pela Figura 4. Nesta pesquisa o concreto de alta resistência foi estudado e para simplificar a nomenclatura das misturas, estas foram separadas em REF para as amostras referências, e SAP para as amostras com adição do polímero superabsorvente. Já para indicar as relações a/c utilizadas, a mesma foi adicionada após a abreviação REF ou SAP.

Para a execução dos ensaios e produções dos concretos foi utilizado o laboratório de Engenharia Civil da UNIPAMPA do campus Alegrete-RS.

Figura 4 – Organograma da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2023)

3.1 Materiais

Neste item são apresentados os materiais utilizados na pesquisa.

3.1.1 Cimento

O Cimento Portland de Alta Resistencia Inicial (CP V ARI) foi utilizado para a fabricação do concreto, da marca Votorantim Cimentos. Sua composição é formada

por 90 a 100% de clínquer e gesso e 0 a 10% de filler calcário. Optou-se pelo CP V ARI pois este cimento é o que apresenta menor teor de adição mineral do mercado, minimizando o efeito desta adição na retração autógena.

3.1.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado na confecção das amostras é de origem basáltica, proveniente da pedreira Pedra Rosada, localizada na região de Alegrete-RS.

A caracterização do agregado graúdo foi realizada de acordo com as prescrições das normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), para determinação da granulometria, NBR 16972 (ABNT, 2021c), para determinação da massa unitária e índice de vazios, e NBR 16917 (ABNT, 2021a), para determinar a densidade e absorção de água do agregado.

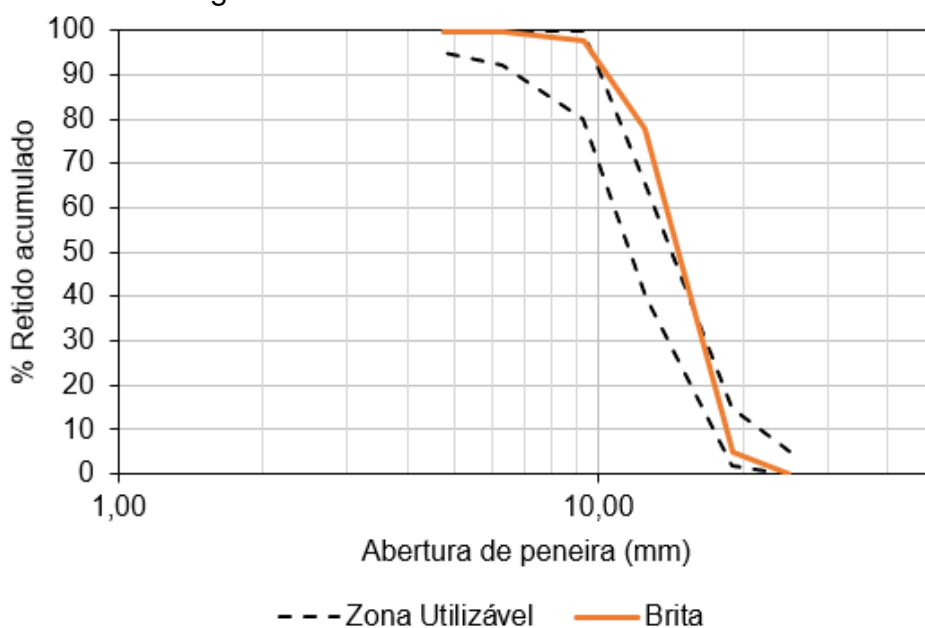
A Tabela 2 apresenta a caracterização da brita, que como pode ser observado devido ao seu diâmetro máximo de 19mm, caracteriza-se como brita 1. Já a curva granulométrica é apresentada na Figura 5, sendo que os limites para a curva granulométrica são estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005a).

Tabela 2 – Caracterização da brita utilizada

Propriedade	Valor
Diâmetro máximo (mm)	19
Massa unitária (g/cm ³)	1,42
Índice de vazios (%)	48
Massa específica seca (g/cm ³)	2,74
Absorção de água (%)	1,76

Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 5 – Granulometria da brita utilizada.



Fonte: Elaboração própria (2023)

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo das amostras foi a areia natural disponibilizada pela empresa Hartmann Materiais de construção, localizada na região de Alegrete-RS. Para a caracterização deste material foram realizados ensaios prescritos nas normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a granulometria, e NBR 16916 (ABNT, 2021b), para massa específica e absorção de água.

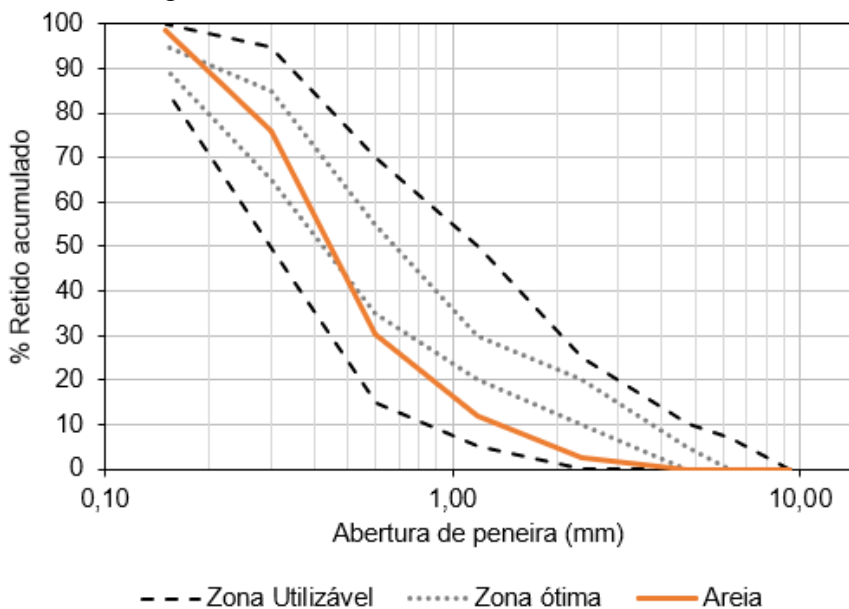
A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização da areia. Já a granulometria da areia é apresentada na Figura 6, sendo que os limites da curva granulométrica da areia são especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2005a).

Tabela 3 – Caracterização da areia utilizada.

Propriedade	Valor
Diametro maximo (mm)	1,18
Módulo de finura	2,19
Massa específica seca (g/cm ³)	2,52
Absorção de água (%)	0,39

Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 6 – Granulometria da areia utilizada.



Fonte: Elaboração própria (2023)

3.1.4 Aditivo Superplastificante

Para a produção dos concretos, foi utilizado o aditivo superplastificante Sili-con NS High 200, da marca Tecnosil. O aditivo foi o responsável por aumentar a trabalhabilidade do concreto, visto que em relações a/c baixas, esta propriedade é

prejudicada. Possui uma massa específica que varia entre 1,05 e 1,07 g/cm³ e sua dosagem recomendada é de 0,2 a 2% em relação a massa do cimento.

3.1.5 Água

A água utilizada é proveniente da rede pública de distribuição de água de Alegrete-RS, fornecida pela CORSAN.

3.1.6 Polímero Superabsorvente (SAP)

O polímero utilizado na pesquisa foi um polímero superabsorvente a base de poliácrlato de sódio, produzido pela empresa Basf e conhecido como SMS Development Polymer PX. Este material apresenta alta capacidade de absorção de água, por isso, ele foi utilizado como agente de cura interna. Os estados do polímero são apresentados na Figura 7, onde é possível observá-lo no estado seco e saturado, sendo que a quantidade de SAP presente em cada recipiente é apenas ilustrativa.

Figura 7 – Polímero no estado seco (esquerda) e polímero no estado saturado (direita).



Fonte: Elaboração própria (2023)

Algumas propriedades do polímero foram disponibilizadas pela empresa Basf, as quais estão apresentadas na Tabela 4. A fim de complementar as propriedades do SAP, foram realizados ensaios de granulometria, densidade real, absorção livre e absorção em meio cimentício.

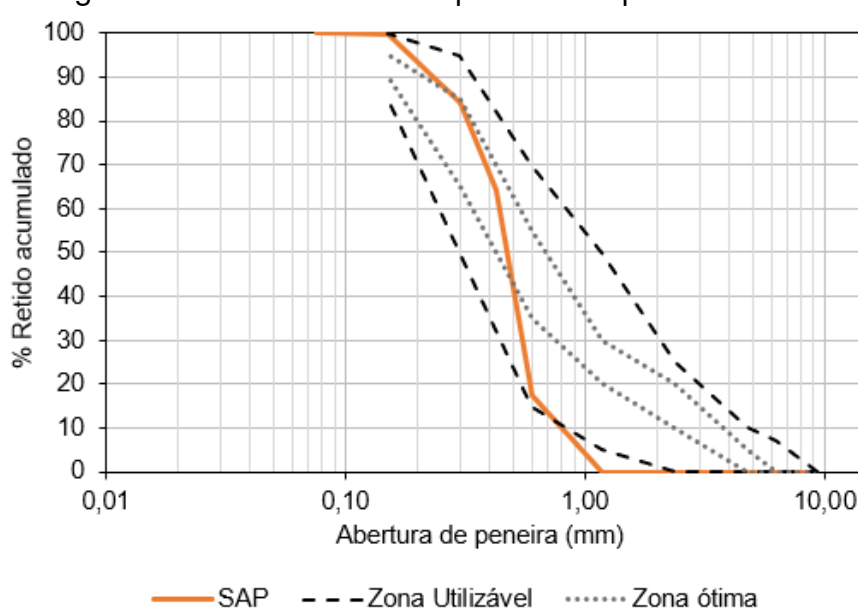
A granulometria do polímero foi realizada seguindo as prescrições da NBR NM 248 (ABNT, 2003), utilizada para granulometria dos agregados miúdos. A curva granulométrica do SAP é apresentada na Figura 8, sendo possível observar que as dimensões das partículas do polímero variam entre 600 μ m e 75 μ m.

Tabela 4 – Características do Polímero

Especificações	Dados
Matéria prima	Ácido poliacrílico, sal de sódio e reticulado
Estado físico	Sólido
Formato	Granular
Cor	Branco
pH	Aproximadamente 6
Odor	Inodoro
Densidade aparente	0,70 g/cm ³

Fonte: Disponibilizado pela empresa Basf.

Figura 8 – Granulometria do polímero superabsorvente.



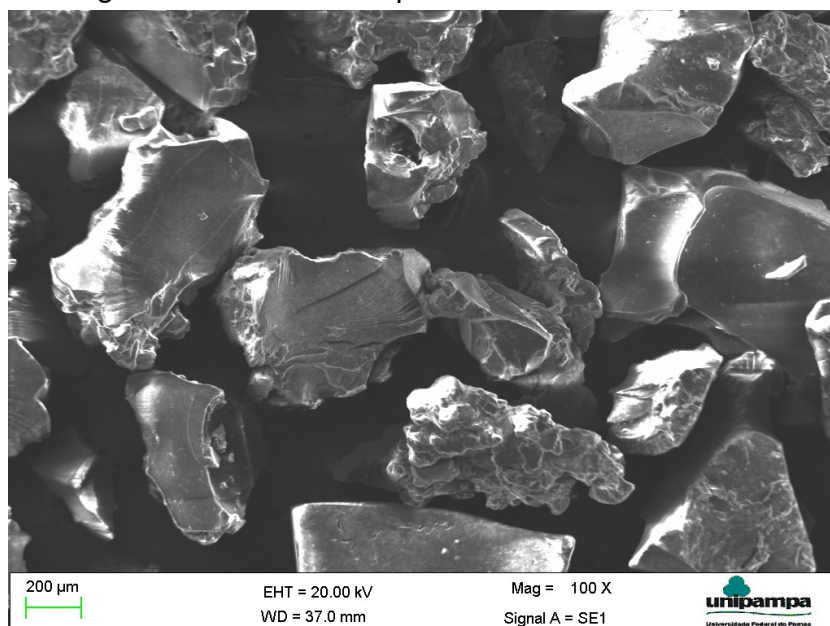
Fonte: Elaboração própria (2023)

A fim de analisar o formato das partículas do polímero, foram realizadas imagens em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), com o polímero no estado seco. Na Figura 9 é possível observar o formato irregular das partículas.

Para determinar a capacidade de absorção de água livre do polímero analisado, foram realizados ensaios através de dois métodos: *tea bag* e cilindro graduado. O método do *tea bag* foi realizado utilizando um filtro de tecido com abertura pequena. Primeiramente, a massa do filtro umedecido foi obtida, em seguida foi inserido uma massa de 0,3 g de SAP e o conjunto foi mantido em submersão com água da torneira por 12 horas. Após este tempo, o conjunto foi armazenado de forma que a água em excesso fosse eliminada e então obteve-se a massa do conjunto. A capacidade de absorção de 202,33 g de água/g de polímero foi obtida através da diferença de massa entre o SAP no estado seco e saturado.

Já para o método do cilindro graduado, inicialmente foi determinada a densidade aparente do SAP, preenchendo o cilindro até um volume conhecido e medindo a massa

Figura 9 – Análise das partículas de SAP no MEV.



Fonte: Elaboração própria (2023)

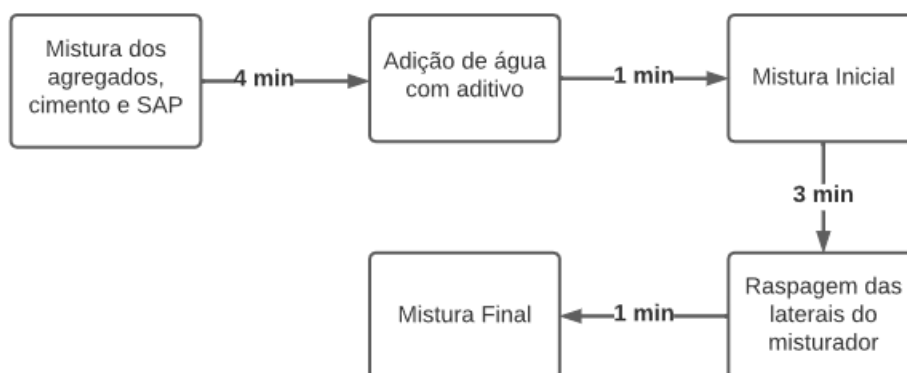
necessária para preencher este volume. Em seguida, uma pequena quantidade de polímero é pesada e inserida em um cilindro vazio, para então preencher o cilindro com água da torneira, agitando o cilindro durante a absorção, para permitir a expansão do polímero. Por fim, foi medido o volume ocupado pelo SAP saturado e através da Equação 2.1 foi determinado a absorção de água livre do polímero de 188,1 g de água/g de polímero. Em posse dos dados de absorção do ensaio *tea bag* e cilindro graduado, foi possível determinar uma absorção média de 195,4 g de água/ g de polímero.

Para determinar a capacidade de absorção em meio cimentício foi realizado o ensaio do espalhamento de argamassa. Ao todo, foram moldadas 4 argamassas de diferentes relações a/c, sendo que uma continha a adição de 0,2% de SAP em relação ao peso do cimento. A relação a/c de 0,34 e o teor de SAP de 0,2% foram determinados por tentativa e erro, onde fosse possível obter condições adequadas de espalhamento. A ordem e mistura das argamassas seguiu as recomendações do comitê técnico da RILEM TC 225-SAP e pode ser observado na Figura 10.

Ao término do processo de mistura, a argamassa foi ensaiada conforme as recomendações da norma DIN EM 18555-2 (1982). O tronco do cone foi preenchido em duas camadas, realizando 10 golpes em cada camada. Após isso, foi retirado o cone e medido o diâmetro de espalhamento das argamassas, sendo que as medições eram realizadas a cada 5 minutos. As medições foram realizadas até a marca de 30 minutos, para permitir que o SAP saturasse por completo.

O gráfico de espalhamento em função do tempo é apresentado na Figura 11, sendo que o tempo zero refere-se a primeira medição, realizada 5 minutos após o início da hidratação. Ao analisar o gráfico é possível identificar que a curva de argamassa

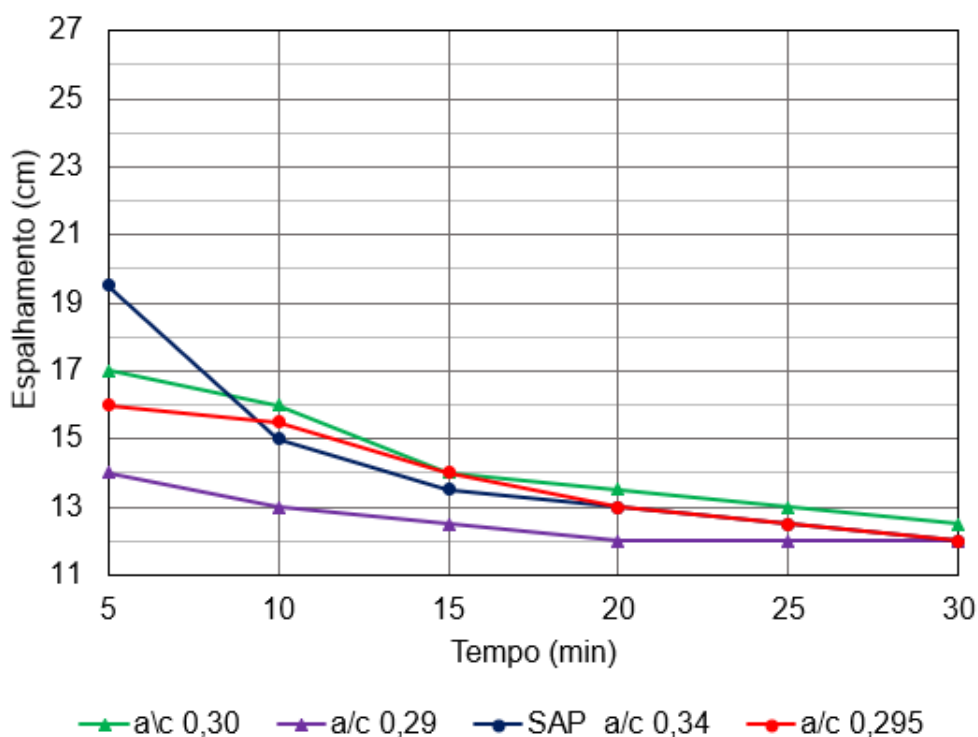
Figura 10 – Processo de mistura de argamassas para o ensaio de espalhamento



Fonte: Elaboração própria (2023)

que se assemelha com a argamassa com SAP é a com relação a/c de 0,295.

Figura 11 – Espalhamento das argamassas ensaiadas.



Fonte: Elaboração própria (2023)

Com isso, foi possível determinar a absorção do SAP no meio cimentício através da Equação 2.2. O SAP absorve cerca de 20g de água/g de polímero e é possível observar que ele demora cerca de 20 minutos a partir da mistura inicial para absorver a água, dado importante para a produção do concreto.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de caracterização

do polímero.

Tabela 5 – Resumo das propriedades do SAP.

Propriedade	Valor
Massa específica real (g/cm ³)	1,62
Massa específica aparente (g/cm ³)	0,7
Capacidade de abs livre (g _a /g _{SAP})	195,4
Capacidade de abs ciment (g _a /g _{SAP})	20

Fonte: Elaboração própria (2023).

3.2 Dosagem dos concretos

Para este estudo, foram realizados traços referência para relação a/c de 0,36 e 0,30, e traços com adição do polímero superabsorvente (SAP) para estas mesmas relações a/c. Isto permitiu a comparação entre amostras de diferentes relações a/c e também com adição do SAP.

O traço padrão foi de 1:1,96:2,72 (cimento: areia: brita), apenas variando o teor de aditivo, relação a/c e o teor do SAP. Estes traços foram pensados para obter-se uma elevada retração autógena, uma resistência à compressão de 60MPa para os concretos com relação a/c de 0,36 e 70MPa para as misturas com relação a/c de 0,30.

O teor de água extra que foi incorporado em cada mistura foi realizado através das Equações 2.11 e 2.12, para as duas relações água/cimento utilizadas. Já o teor de SAP das misturas, foi determinado por meio da Equação 2.13.

Os traços que foram utilizados na pesquisa são apresentados em massa na Tabela 6 e unitário na Tabela 7.

Tabela 6 – Traço em massa.

Componente	Traço em kg/m ³			
	REF 0,30	REF 0,36	SAP 0,30	SAP 0,36
Cimento	411	411	411	411
Areia	807	807	807	807
Brita	1118	1118	1118	1118
Água	123,3	147,96	123,3	147,96
Aditivo SP	2,47	1,64	2,47	1,64
SAP	0	0	1,11	1,23
Água SAP	0	0	22,19	24,66

Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 7 – Traço unitário.

Traço Unitário				
Componente	REF 0,30	REF 0,36	SAP 0,30	SAP 0,36
Cimento	1	1	1	1
Areia	1,96	1,96	1,96	1,96
Brita	2,72	2,72	2,72	2,72
Água	0,30	0,36	0,30	0,36
Aditivo SP	0,40%	0,60%	0,40%	0,60%
SAP	0	0	0,27	0,32
Água SAP	0	0	0,054	0,06

Fonte: Elaboração própria (2023).

3.3 Preparo dos concretos

Os concretos foram produzidos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 450L. Primeiramente, a betoneira foi imprimada e em seguida ocorreu a mistura dos materiais. Após a imprimação, o agregado graúdo foi adicionado, junto com cerca de um terço da água e então deixado misturar por cerca de um minuto. Na sequência, foi adicionado todo o cimento e misturado por três minutos. Em seguida, acrescentou-se o agregado miúdo, com o restante da água, deixando misturar por cinco minutos. E por fim, o aditivo foi adicionado em frações de um terço e misturado por cinco minutos à cada fração, até adicionar todo o aditivo.

O adensamento das amostras foi realizado por meio de mesa vibratória, visto que foram moldados uma grande quantidade de corpos de prova a cada concretagem. Realizou-se o adensamento em duas camadas, sendo que cada camada permaneceu vibrando por cerca de dez segundos. Finalizado o adensamento, as amostras foram armazenadas cobertas por 24 horas até a desmoldagem. Após as 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em cura submersa com exceção das amostras utilizadas nos ensaios de retração e calor de hidratação.

3.4 Método

A metodologia consiste na realização de ensaios nos 176 corpos de prova que foram confeccionados. A Tabela 8 mostra um resumo dos ensaios realizados para cada traço e na sequência estes ensaios são apresentados.

Tabela 8 – Resumo de ensaios.

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Nº de amostras
Resistência à compressão axial	NBR 5739	7,14 e 28	12
Retração livre	ASTM C 157	1-28	8
Absorção e índice de vazios	NBR 9778	7 e 28	8
Resistência à tração na flexão	NBR 12142	7, 14 e 28	12
Calor de hidratação	-	0-3	1
Capilaridade	NBR 9779	28	3

Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4.1 Liberação de calor de hidratação

O ensaio consiste em medir a variação de temperatura gerada pela hidratação do cimento. Este ensaio é realizado continuamente, desde a moldagem da amostra até a estabilização da temperatura. O método utilizado não é normatizado, porém se mostrou eficaz por Righi (2015).

Para este ensaio, foi moldado apenas um corpo de prova para cada traço, utilizando formas sextavadas, com dimensões de largura, comprimento e altura de 25 x 25 x 8 cm, respectivamente. Imediatamente após a moldagem, a amostra foi armazenada em uma sala climatizada à 22 °C, dentro de uma caixa de isopor e com uma termoresistencia do tipo Pt-100 implementada no corpo de prova no estado fresco. A caixa de isopor serviu para impedir a troca de calor com o meio externo e a termoresistencia foi conectada a um sistema de leitura, e este conjunto realizou, constantemente, a leitura referente à liberação de calor e transferiu os dados para o computador. Este ensaio teve duração mínima de 3 dias ou até a estabilização da temperatura da amostra. Na Figura 12 é apresentada a realização de um dos ensaios de liberação de calor de hidratação, sendo possível visualizar a estrutura utilizada para este ensaio.

Figura 12 – Estrutura para o ensaio de liberação de calor de hidratação.



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4.2 Retração livre

O ensaio de retração foi realizado de acordo com a ASTM C157/C157M (2017). Para cada traço foram moldados 4 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm para determinação da retração livre. Cada corpo de prova com dois parafusos em suas extremidades, para que a amostra fosse inserida no aparelho de medição.

O ensaio de retração livre permitiu a obtenção da retração autógena e retração por secagem. Assim que desmoldadas, as amostras do ensaio de retração autógena foram envelopadas com duas camadas de plástico filme e uma camada de manta asfáltica. O envelopamento foi necessário pois ele impede o concreto de qualquer troca de umidade com o ambiente externo, evitando a ação da retração por secagem. Já as amostras destinadas a retração por secagem foram armazenadas em cura em temperatura controlada após a desmoldagem, obtendo-se, assim a retração total dos corpos de prova. A retração por secagem foi então determinada a partir da diferença entre a retração total e a retração autógena.

A retração foi medida diariamente até a idade de 28 dias. Cada amostra continha dois pinos nas extremidades, para que fosse possível fixar o corpo de prova no equipamento de medição. Na Figura 13 é possível observar o armazenamento das amostras, que foi feito em sala com controle de temperatura em 22 °C e permaneceram dispostas sobre roletes, permitindo a deformação em todas as direções. Para a medição da retração, foi utilizado um relógio comparador de resolução de 0,01 mm. O ensaio

consiste em, primeiramente, zerar o relógio comparador através de uma haste de referência, em seguida, realizar as medições de variação volumétrica nos corpos de prova, como é apresentado na Figura 14.

Figura 13 – Armazenamento dos corpos de prova.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 14 – Medição da retração autógena



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4.3 Absorção e índice de vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005b). Para a realização deste ensaio foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), sendo ensaiado 4 corpos de prova na idade de 7 dias e os outros 4 aos 28 dias. A realização deste ensaio consiste em deixar as amostras em cura submersa e na idade desejada levar a amostra para a estufa por 3 dias, após este tempo, é necessário medir a massa do material, em seguida o material é submetido a submersão por 3 dias e por fim o material é submetido a fervura por 5 horas, ao final deste período, é realizado a medição da massa submersa e a massa com superfície seca da amostra.

3.4.4 Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade, foi realizado seguindo as prescrições da NBR 9779 (ABNT, 2012). Este ensaio consiste em deixar as amostras em contato com uma lamina d'água de 5 mm e determinar a massa dos corpos de prova em intervalos de 3, 6, 24 e 72 horas após o início do contato com a água. Em seguida, com os dados de massa de cada intervalo de tempo, a massa seca do CP e área transversal da amostra, é possível determinar a absorção por capilaridade em g/cm^2 . No total, foram moldados 3 corpos de prova para cada traço, ensaiados na idade de 28 dias.

3.4.5 Resistência à compressão axial

O ensaio para a determinação da resistência à compressão axial foi realizado aos 7, 14 e 28 dias em corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm, sendo que em cada uma destas idades foram ensaiados 4 corpos de prova. Conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), para a realização deste ensaio, inicialmente foi realizada a retificação dos corpos de prova, para que as amostras estejam planificadas e a carga fosse aplicada uniformemente. O ensaio para determinação da resistência à compressão axial seguiu a (ABNT, 2018). A Figura 15 apresenta a realização deste ensaio.

Figura 15 – Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Elaboração própria (2023).

3.4.6 Resistência à tração na flexão

O ensaio para determinação da resistência à tração na flexão, foi realizado aplicando duas forças nos terços dos vãos. A Figura 16 mostra a estrutura utilizada para o ensaio. Este ensaio seguiu as prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010), utilizando um corpo de prova prismático com dimensões de 10 x 10 x 40 cm (largura x altura x comprimento) e foi executado em uma prensa hidráulica com capacidade de 200 kN, da marca Emic, com velocidade de 0,05 mm/min até a ruptura. Ao todo, foram moldados um total de 12 amostras para realização deste ensaio, que serão rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Figura 16 – Ensaio de resistência à tração.



Fonte: Elaboração própria (2023).

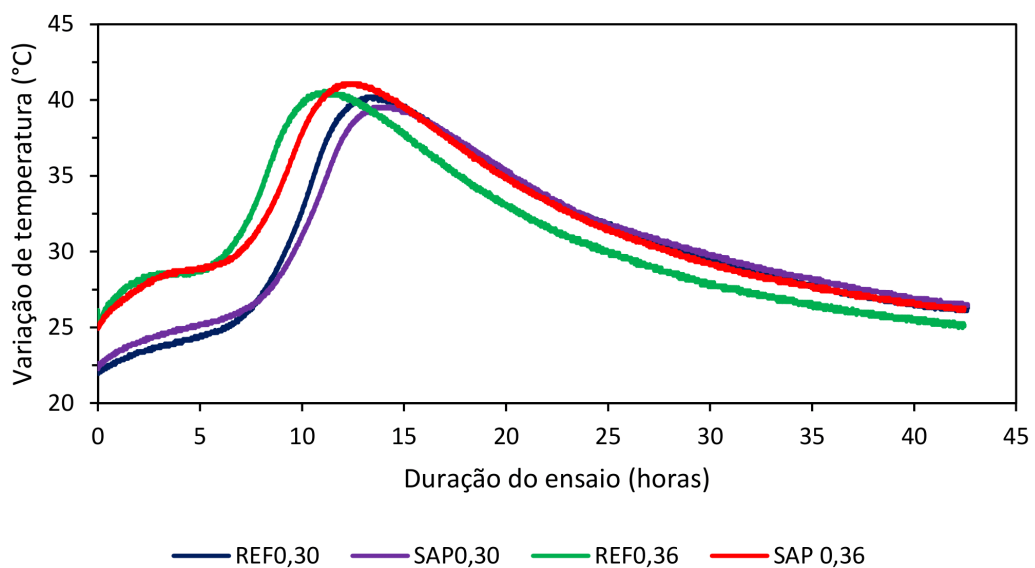
4 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados e analisados os resultados encontrados dos ensaios realizados para os concretos referência e com adição de polímero superabsorvente.

4.1 Liberação de calor de hidratação

Na Figura 17 são apresentadas as curvas de liberação de calor de hidratação para os traços analisados. Ao observar o gráfico, percebe-se uma diferença inicial de 5°C das misturas com relação a/c 0,30 e 0,36. Isto ocorreu devido aos diferentes dias de concretagem, onde as amostras com relação a/c de 0,36 foram confeccionadas no mesmo dia, com uma temperatura de 25°C e as outras misturas, foram moldadas em outro dia, com uma temperatura de 20°C.

Figura 17 – Variação de temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria (2023).

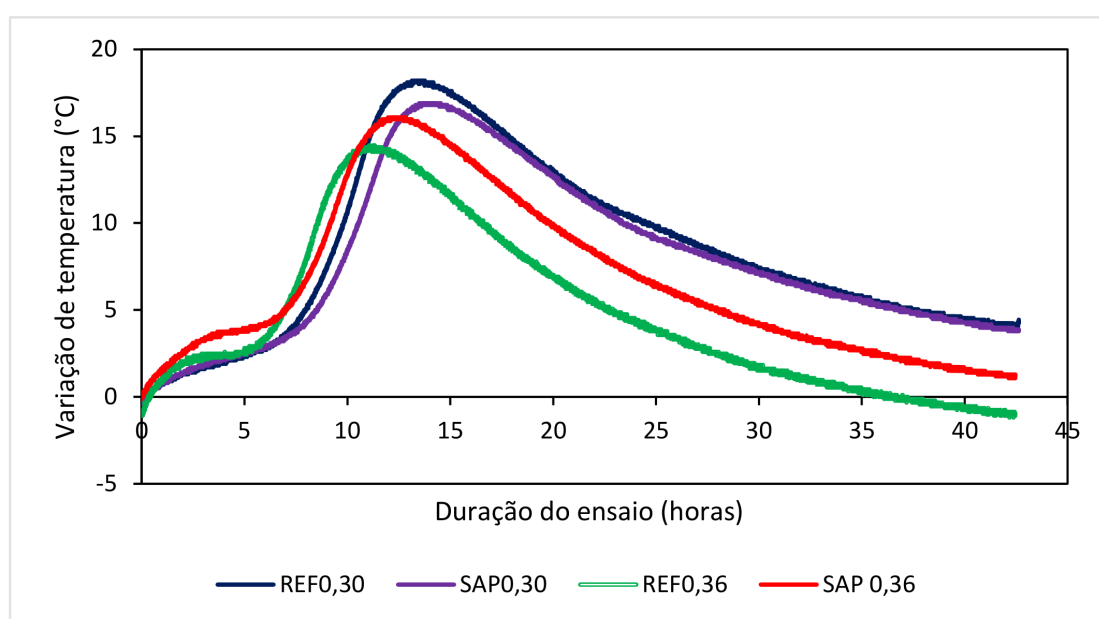
Em ambas as relações a/c foi possível observar que o SAP deslocou a curva de liberação de calor para a direita, representando um leve atraso no processo de hidratação. Segundo HARTMANN (2022), isto pode ser explicado pela característica do SAP de liberar água em função da umidade interna, o que faz com que o processo de hidratação seja mais lento.

Já na Figura 18 é apresentado o gráfico da variação de temperatura absoluta. Através deste gráfico, percebe-se que a redução da relação a/c provocou uma maior variação de temperatura de pico, sinalizando uma intensificação do processo de hidratação. Segundo GRAEFF (2017), como a água possui um calor específico cerca de 5 vezes maior que os outros componentes do concreto, um aumento na quantidade

de água, não necessariamente gera um aumento da temperatura de pico. Como a inércia térmica do material aumenta, é possível uma maior absorção de calor para uma mesma elevação de temperatura que uma mistura com menos água.

A diminuição da relação a/c também aumentou o tempo levado para atingir a temperatura de pico das amostras. Isto ocorre pois quanto maior a disponibilidade de água, mais rápido ocorre o processo de hidratação do cimento.

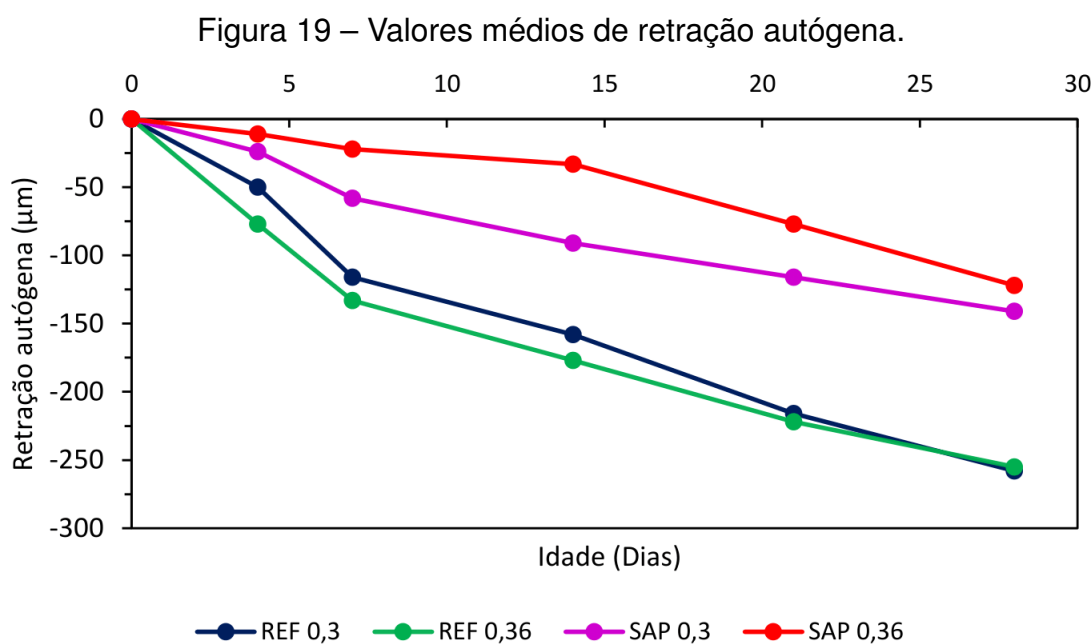
Figura 18 – Variação de temperatura ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria (2023).

4.2 Retração Livre

Neste estudo foram realizadas as medições de retração autógena e também retração por secagem. Sendo a retração autógena obtida pelas amostras com cura selada e a retração por secagem através de amostras com cura em temperatura controlada, sendo que estas estão sujeitas ao efeito da retração por secagem e também da autógena. Para que fosse possível obter apenas a retração por secagem, os valores de retração total obtidos foram subtraídos dos valores de retração autógena. Os valores médios de retração autógena são apresentados na Figura 19.



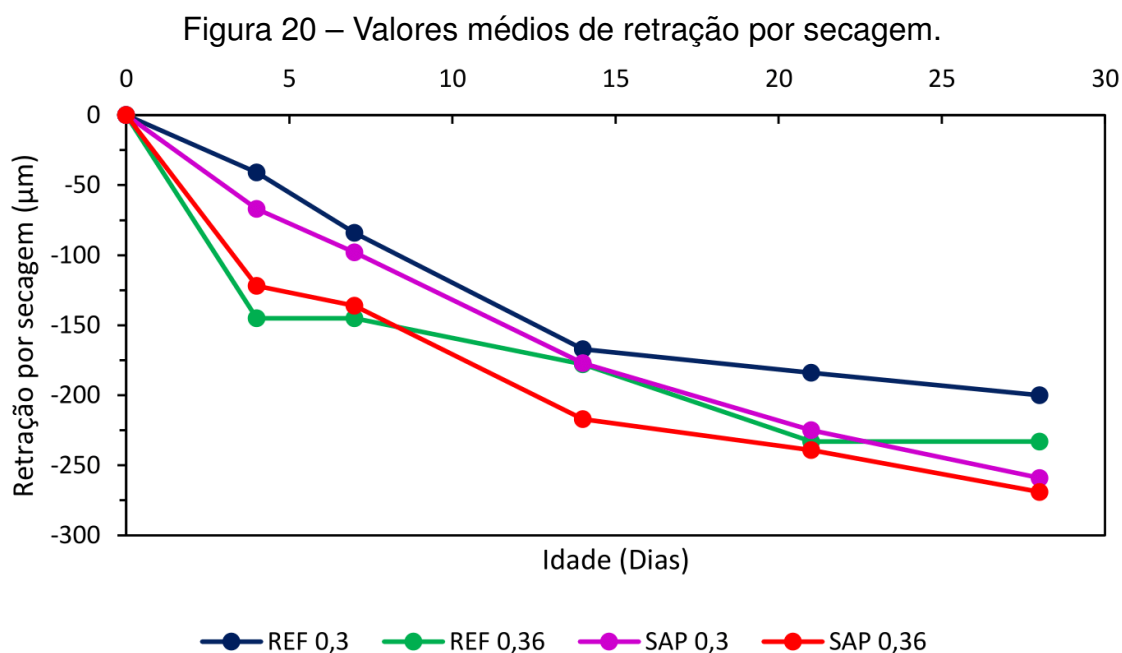
Fonte: Elaboração própria (2023).

Através da análise do gráfico, percebe-se que o SAP foi eficaz na mitigação da retração autógena, porém a sua eficácia, diminui ao longo do tempo. Aos 7 dias, os concretos apresentaram uma redução de retração de 83% e 52% para as relações a/c de 0,3 e 0,36, respectivamente. Enquanto que aos 28 dias, este valor caiu para 52% e 45%, respectivamente. Segundo o estudo realizado por WANG et al. (2009), o polímero superabsorvente libera quase toda sua água até os 7 dias e os vazios deixados se tornam poros da estrutura da pasta. Isto pode justificar a perda de eficiência ao longo do tempo.

É possível observar que a redução da relação a/c não agiu como esperado, sendo que aos 28 dias a diferença de retração autógena entre as misturas com relação a/c de 0,3 para 0,36 foi de apenas 2% e 13%, para as amostras REF e SAP, respectivamente. Diversos estudos mostram que uma diminuição da relação a/c desta magnitude gera um grande aumento na retração autógena. MANZANO (2016) ao estudar a retração autógena em misturas com relação a/c de 0,3 e 0,35, apresentou um aumento de 25% na retração autógena. Porém, ao analisar estes estudos, verifica-se que a retração autógena nas primeiras 24 horas das amostras referências é muito significativa, chegando a quase 50% do valor total e as amostras com polímero apresentam até mesmo uma expansão tão significativa, que aos 28 dias, a amostra apresenta uma retração praticamente nula. E devido ao método de ensaio utilizado, as misturas só começaram a ter sua variação volumétrica mensuradas, após o primeiro dia, não conseguindo medir toda essa retração para os traços REF e expansão para os traços SAP. Segundo Silva (2008), é difícil realizar a comparação de resultados de retração autógena, pois esta possui diferentes técnicas de medição. As medições podem ocorrer

após 1 hora através de dilatômetro e medidas lineares horizontas ou até mesmo depois de 24 horas através de medições verticais, como o presente trabalho. A autora, afirma que ao realizar o ensaio após as primeiras 24 horas, pode-se obter resultados não condizentes com a realidade, pois uma quantidade significativa de retração ocorre no primeiro dia de idade.

No gráfico da Figura 20 pode-se observar os valores encontrados de retração por secagem. Ao analisar os dados, observa-se que o traço com maior relação a/c e adição de polímero foi que apresentou a maior retração, devido ao aumento da quantidade de água livre. A adição do polímero, provocou um aumento de 29% e 15% para as misturas com relação 0,30 e 0,36, respectivamente. COUTO (2016), obteve resultados diferentes, ao analisar a adição de SAP em concretos com relação a/c de 0,30, observou uma redução, aos 28 dias, na retração por secagem de cerca de 30%.

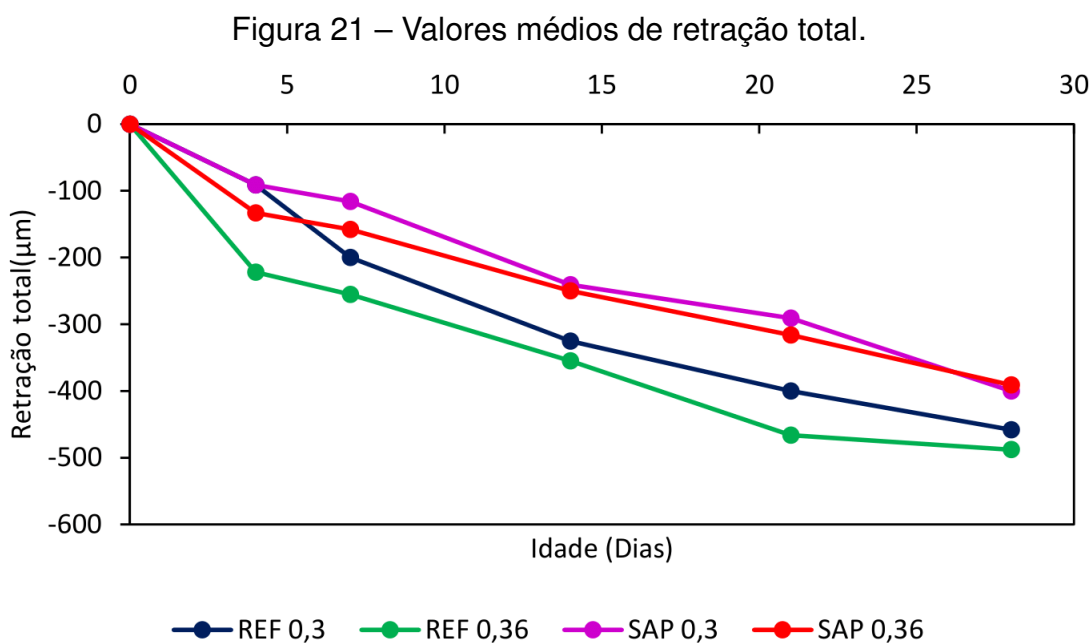


Fonte: Elaboração própria (2023).

A diminuição da relação a/c, conforme esperado, acarretou em uma redução da retração por secagem da ordem de 14% e 4% para os traços REF e SAP, respectivamente. Isto ocorre devido ao aumento da quantidade de poros e, conseqüentemente, acontece um aumento na quantidade de água que se movimenta na rede de capilares, conforme comentado no item 2.1.2. SILVA (2008), ao analisar concretos com relação a/c de 0,33 e 0,45, obteve redução na retração por secagem de 21%. COUTO (2016) também apresentou resultados semelhantes.

A retração total, gerada pelos efeitos combinados da retração por secagem e autógena, pode ser observada no gráfico da Figura 21. Este gráfico mostra que nas idades iniciais a adição do SAP apesar de reduzir a retração autógena, gera uma grande retração por secagem, podendo apresentar uma retração total igual ao traço

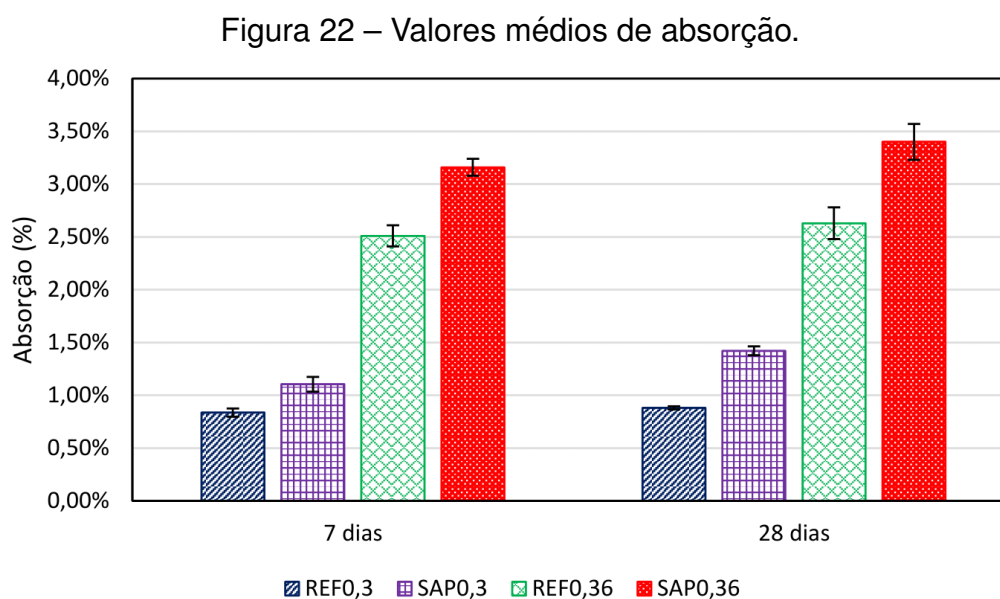
referência, como pode ser observado nas misturas com relação a/c de 0,30 aos 4 dias. Conforme o processo de hidratação avança, a retração autógena se sobressai e aos 28 dias as misturas com agente de cura interna apresentam a menor retração total, com uma redução de 13% e 20% para as relações a/c de 0,30 e 0,36, respectivamente.



Fonte: Elaboração própria (2023).

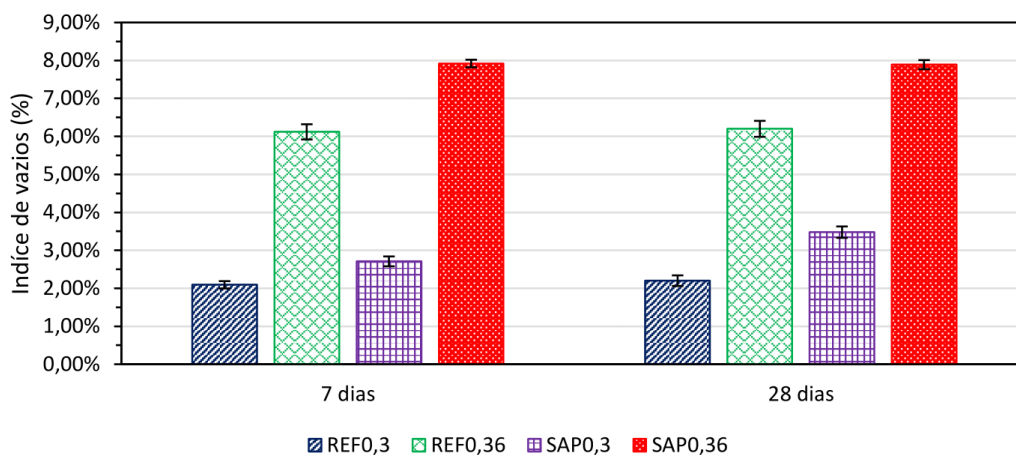
4.3 Absorção e índice de vazios

Os valores médios encontrados para a absorção de água e índice de vazios são apresentados nas Figuras 22 e 23.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 23 – Valores médios de índice de vazios.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Através dos resultados, observa-se que a adição do SAP provocou um aumento de 0,88% para 1,42% e de 2,63% para 3,40% na absorção de água das misturas com relação 0,3 e 0,36, respectivamente. Do mesmo modo, o índice de vazios aumentou de 2,20% para 3,48% e de 6,2% para 7,89% devido ao incremento do polímero. Segundo LYU et al. (2022), este aumento de absorção e índice de vazios é causado pela dessorção da água armazenada pelo SAP, tendo o tamanho das suas partículas reduzido e deixando vazios no concreto.

Já quando observado a influência da relação a/c nestas propriedades, percebe-se que este fator possui maior impacto quando comparado com a adição do polímero. A diminuição da relação a/c proporcionou reduções na absorção da ordem de 66% e 60% para as misturas REF e SAP, respectivamente. Semelhantemente, o índice de vazios apresentou redução de cerca de 64% e 55%. Segundo PIASTA e ZARZYCKI (2017), a baixa capacidade de absorção em concretos com menores relações a/c está associado não apenas à sua menor porosidade, mas também porque suas redes de capilares e poros são um pouco desconectadas, o que restringe a profundidade de penetração da água.

Para verificar se a variação da relação a/c e adição do polímero influenciaram significativamente os valores de absorção e índice de vazios, foram realizados testes de variância (ANOVA), que podem ser observados nas Tabelas 9 e 10. Através desta análise, é possível observar que tanto a relação a/c, quanto a adição do polímero afetaram significativamente a absorção e índice de vazios em ambas as idades ensaiadas.

Tabela 9 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de absorção.

Idade	Combinação	valor-P	Sig
7 Dias	REF 0,30 x 0,36	1,12E-05	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	1,61E-06	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	3,62E-04	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	9,23E-04	Sim
28 Dias	REF 0,30 x 0,36	1,12E-05	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	1,61E-06	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	3,62E-04	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	9,23E-04	Sim

Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de índice de vazios.

Idade	Combinação	valor-P	Sig
7 Dias	REF 0,30 x 0,36	6,11E-06	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	1,09E-07	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	4,59E-04	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	1,53E-04	Sim
28 Dias	REF 0,30 x 0,36	5,44E-06	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	1,25E-06	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	4,83E-05	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	2,67E-04	Sim

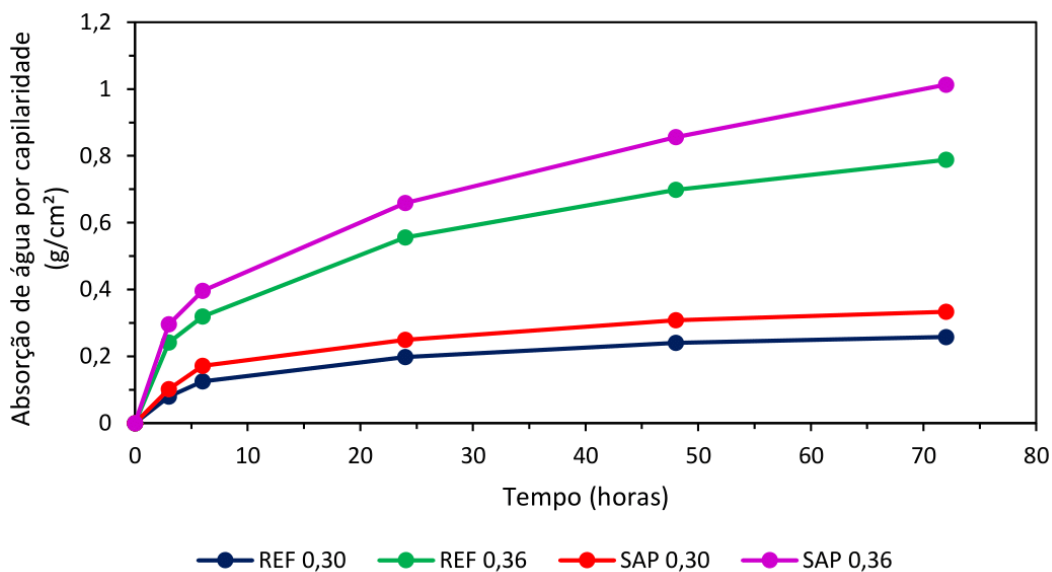
Fonte: Elaboração própria (2023).

4.4 Absorção por capilaridade

Na Figura 24 são mostrados os valores médios do ensaio de absorção por capilaridade obtido para as 4 misturas analisadas.

Ao analisar o gráfico é possível observar a tendência de crescimento da absorção ao longo do tempo. Já ao analisar as misturas, foi possível observar que a relação a/c, assim como no ensaio de absorção e índice de vazios, é o principal influenciador da absorção por capilaridade, reduzindo a absorção em cerca de 67% para ambas as misturas. Isto está de acordo com o estudo realizado por MANZANO (2016) em concretos de alta resistência de diferentes relações a/c.

Figura 24 – Absorção por capilaridade ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria (2023).

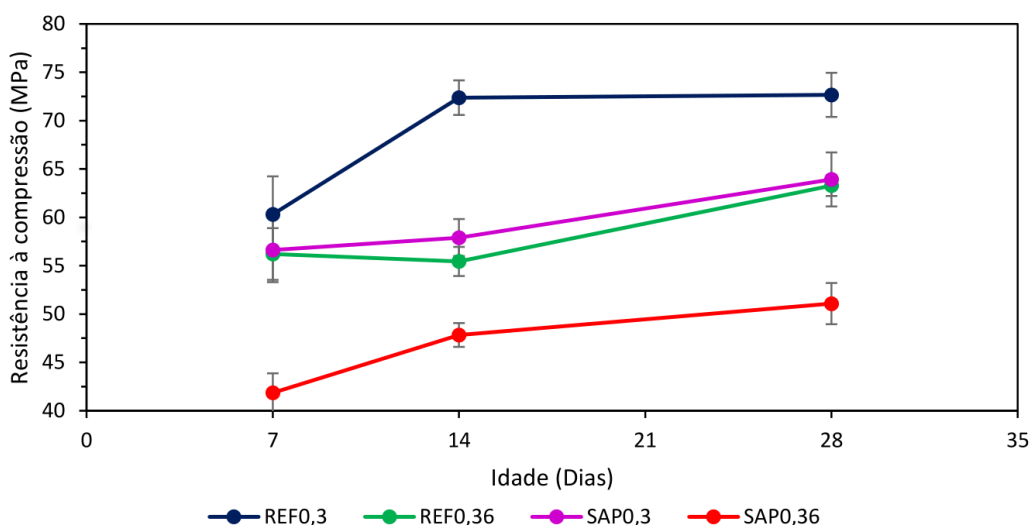
Também, é possível observar que a adição do polímero causou um aumento na absorção em todas as relações a/c, apresentando um aumento de cerca de 29% para ambas as misturas. Resultados semelhantes foram encontrados nas pesquisas de LOPES (2011) e ORDÓÑEZ (2013), que também analisaram concretos de alta resistência com adição do polímero. Segundo ORDÓÑEZ (2013), este comportamento pode ser justificado pelo aumento da porosidade gerada pelo polímero e também, após a secagem, o polímero consegue absorver a água proveniente da ascensão capilar.

4.5 Resistência à compressão axial

Na Figura 25 são apresentados os valores médios da resistência à compressão de todos os traços realizados, para as idades de 7, 14 e 28 dias.

Através da análise do gráfico, é possível observar o crescimento de resistência ao longo do tempo para todos os traços, que ocorre devido ao processo de hidratação. Verifica-se também, que a diminuição da relação a/c aumentou consideravelmente a resistência à compressão do concreto em todas as misturas. Por outro lado, a adição do SAP, diminuiu a resistência em todas as idades quando comparado com a mistura referência de mesma relação a/c. Outro ponto a ser observado é a semelhança de resistência à compressão do concreto referência e do concreto com polímero, com relações a/c 0,36 e 0,30 respectivamente.

Figura 25 – Resistência à compressão ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Para verificar se a adição do polímero superabsorvente e a variação da relação a/c realmente influenciaram a resistência à compressão do concreto de maneira significativa, realizou-se uma análise de variância (ANOVA). Esta análise contempla todas as amostras ensaiadas, sendo realizada uma análise para cada idade (7, 14 e 28 dias) e os resultados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de compressão.

Idade	Combinação	valor-P	Sig
7 Dias	REF 0,30 x 0,36	0,13	Não
	SAP 0,30 x 0,36	2,70E-04	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	0,20	Não
	REF 0,36 x SAP 0,36	1,38E-04	Sim
14 Dias	REF 0,30 x 0,36	6,79E-06	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	1,16E-04	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	3,27E-05	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	2,32E-04	Sim
28 Dias	REF 0,30 x 0,36	3,01E-04	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	3,69E-04	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	2,51E-03	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	5,04E-05	Sim

Fonte: Elaboração própria (2023).

Conforme é possível observar nas tabelas, a adição do polímero superabsorvente e a alteração na relação a/c exercem um efeito significativo sobre a resistência à compressão nas idades de 14 e 28 dias. Já na idade de 7 dias, a relação a/c afetou significativamente apenas a mistura com SAP, enquanto que a adição do polímero afetou significativamente apenas as amostras com relação a/c de 0,36.

a adição do polímero superabsorvente e a alteração na relação a/c exercem um efeito significativo sobre a resistência à compressão em todas as idades analisadas. Já a interação entre as duas variáveis, se mostrou significativa apenas nas idades de 7 e 14 dias.

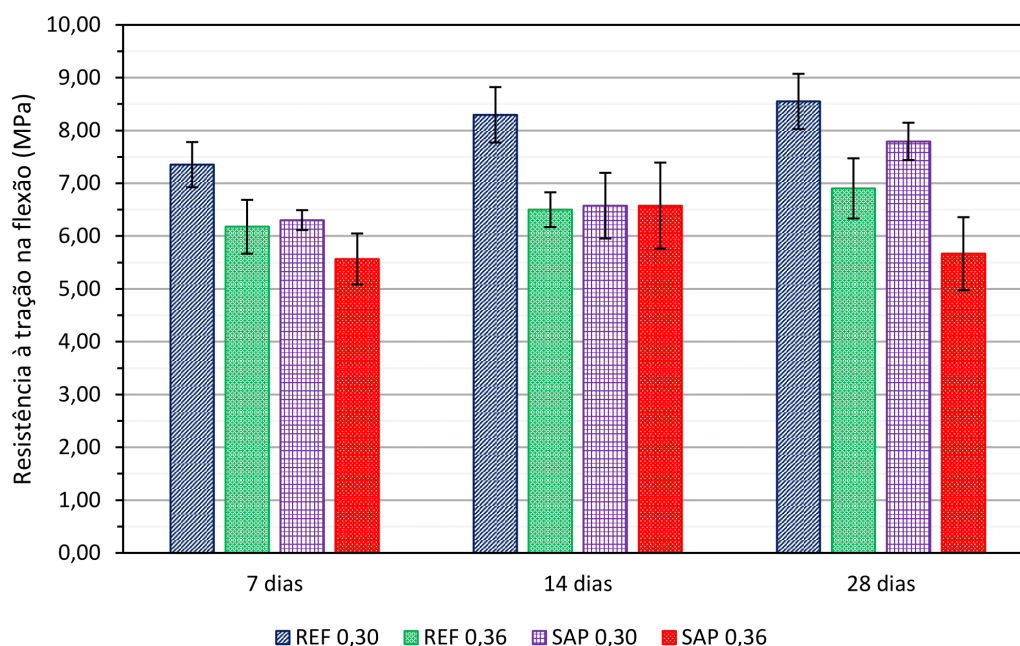
Atualmente, ainda não existe um consenso entre os pesquisadores se a água adicional destinada a cura interna, participa ou não do processo de hidratação. Caso a resposta seja positiva, ao comparar as misturas SAP e referência se faz necessário considerar a água adicional para cura interna como parte da relação a/c total da mistura, pois a perda de resistência do concreto com polímero pode estar associada ao aumento da relação a/c causada pela água de cura. (HASHOLT et al., 2012; CRAEYE; GEIRNAERT; SCHUTTER, 2011)

Diversos estudos relatam perda de resistência à compressão do concreto devido a adição do SAP, quando comparado com misturas referências com a mesma relação a/c, sem levar em conta a água adicional de cura (MANZANO, 2016; JÚNIOR, 2017; SANTOS, 2016). ORDÓÑEZ (2013) analisou microconcretos com adição de polímeros superabsorventes, de mesma relação a/c, e concluiu que a adição do polímero reduziu significativamente a resistência à compressão do concreto. Para explicar isto, ela atribui esta perda de resistência ao aumento da porosidade causada pela adição do polímero.

4.6 Resistência à tração na flexão

No gráfico da Figura 26 são apresentados os resultados médios da resistência a tração na flexão para todas as misturas ao longo do tempo. Ao analisar o gráfico é possível observar que a diminuição da relação a/c causou um aumento da resistência à tração aos 28 dias de 23% e 37% para as misturas referência e SAP, respectivamente. Já o polímero superabsorvente, causou uma queda da resistência à tração do concreto. A redução na resistência aos 28 dias foi da ordem de 9% e 18% para as misturas com relação a/c de 0,3 e 0,36, respectivamente.

Figura 26 – Resultados médios do ensaio de Resistência à tração na flexão.



Fonte: Elaboração própria (2023).

Outro ponto a ser observado é que mesmo obtendo os maiores valores de resistência aos 28 dias, a resistência à tração não possuiu um crescimento de resistência significativo ao longo do tempo.

Foram realizados teste de variância para verificar a significância das variáveis estudadas, sendo que o resultado destas análises são apresentadas na Tabela 12. Ao analisar a ANOVA, observa-se que aos 28 dias, a relação a/c afetou significativamente a resistência à tração, enquanto que a adição do polímero apesar de reduzir a resistência à tração, não foi capaz de influenciar significativamente esta propriedade.

Tabela 12 – Análise de variância (ANOVA) dos resultados de tração na flexão.

Idade	Combinação	valor-P	Sig
7 Dias	REF 0,30 x 0,36	0,038	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	0,069	Não
	REF 0,30 x SAP 0,30	0,018	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	0,207	Não
14 Dias	REF 0,30 x 0,36	0,007	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	0,553	Não
	REF 0,30 x SAP 0,30	0,022	Sim
	REF 0,36 x SAP 0,36	0,578	Não
28 Dias	REF 0,30 x 0,36	0,021	Sim
	SAP 0,30 x 0,36	0,009	Sim
	REF 0,30 x SAP 0,30	0,108	Não
	REF 0,36 x SAP 0,36	0,075	Não

Fonte: Elaboração própria (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões do estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Este trabalho buscou analisar a influência da relação a/c e a adição de um agente de cura interna em concretos de alta resistência. Através dos resultados obtidos, foi possível realizar as seguintes considerações:

- Ao adicionar o polímero superabsorvente, as amostras apresentaram um leve atraso na curva de liberação de calor hidratação. Já a redução da relação a/c gerou um aumento na temperatura de pico e causou um retardo no início das reações de hidratação.
- A presença de um agente de cura interna causou um aumento significativo no índice de vazios, devido aos poros deixados após a dessorção da água armazenada. Em contrapartida, a diminuição da relação a/c reduziu significativamente o índice de vazios.
- A adição do SAP aumentou a absorção de água dos concretos, devido ao aumento de porosidade e também pela capacidade de absorver água do polímero, após seco. Enquanto que a diminuição da relação a/c reduziu a capacidade de absorção de água das amostras.
- A retração autógena diminuiu significativamente com a adição do polímero superabsorvente, principalmente nas idades iniciais. Já a influência da relação a/c sobre a retração autógena se mostrou incerta, devido a medição da retração após as primeiras 24 horas, período essencial na retração autógena. Enquanto que para a retração por secagem, a diminuição da relação a/c reduziu o efeito desta retração e a adição do SAP provocou um aumento, devido ao aumento de água livre disponível.
- O incremento do polímero superabsorvente reduziu a resistência à compressão e a resistência à tração em todas as idades analisadas, porém só afetou significativamente a resistência à compressão. Por outro lado, a diminuição da relação a/c provocou um aumento significativo nas propriedades mecânicas das misturas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A pesquisa realizada buscou avaliar a influência do polímero superabsorvente (SAP) em algumas propriedades do concreto de alta resistência. Com os resultados

obtidos, ficam algumas lacunas que podem ser estudadas a fim de melhor entender o comportamento do material. Assim, como sugestões propõem-se:

- Avaliar a retração autógena desde a moldagem em concretos de alta resistência.
- Realizar estudos com diferentes quantidades de polímero superabsorvente e analisar a influência na retração, bem como nas propriedades mecânicas.
- Avaliar como o polímero afeta as propriedades do concreto para relações a/c maiores que 0,36, cuja retração por secagem é mais acentuada.
- Comparar o efeito da quantidade de água extra para o polímero com o simples aumento da relação a/c na mesma proporção.

REFERÊNCIAS

- AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. C157/C157M. Philadelphia, 2017.
- ASSMANN, A. Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **Agregados para concreto - Especificação**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade**. NBR 9779. Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16917. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16916. Rio de Janeiro, 2021.
- _____. **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. NBR 16972. Rio de Janeiro, 2021.
- COUTO, P. B. Caracterização reológica de pastas de cimento portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional. 2016.
- CRAEYE, B.; GEIRNAERT, M.; SCHUTTER, G. D. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 25, n. 1, p. 1–13, 2011.
- DEUTSCHES INTITUT FÜR NORMUNG. **Esting of mortars containing mineral binders; freshly mixed mortars containing aggregates of dense structure (heavy aggregates); determination of consistence, bulk density and air content**. EN 18555-2. German, 1982.

GRAEFF, E. R. et al. Elevação de temperatura de concretos com baixo consumo de cimento e adição de cinza volante. 2017.

HARTMANN, P. N. Concreto de alta resistência: influência da incorporação de fibras sintéticas e de agente de cura interna (sap) em propriedades mecânicas e de durabilidade. Universidade Federal do Pampa, 2022.

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

HOLT, E. E. **Early age autogenous shrinkage of concrete**. [S.l.]: University of Washington, 2001.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de alto e ultra-alto desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Cap**, v. 36, 2011.

JENSEN, O. M. Water absorption of superabsorbent polymers in a cementitious environment. In: RILEM PUBLICATIONS. **International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering 2011**. [S.l.], 2011.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: I. principles and theoretical background. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 31, n. 4, p. 647–654, 2001.

JÚNIOR, P. F. S. Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica. 2017.

KANG, J. et al. Effect of water-to-cement ratio on internal relative humidity and autogenous shrinkage of early-age concrete internally cured by superabsorbent polymers. **Structural Concrete**, Wiley Online Library, 2022.

KOSMATKA, S. H.; PANARESE, W. C.; KERKHOFF, B. **Design and control of concrete mixtures**. 15. ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2011.

LAM, H. Effects of internal curing methods on restrained shrinkage and permeability. 2005.

LOPES, A. N. d. M. Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura. 2011.

LYU, Z. et al. Absorption characteristics and shrinkage mitigation of superabsorbent polymers in pavement concrete. **International Journal of Pavement Engineering**, Taylor & Francis, v. 23, n. 2, p. 270–284, 2022.

MANZANO, M. A. R. Estudo experimental de materiais cimentícios de alta resistência modificados com polímeros superabsorventes (psas) como agentes de cura interna. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

MINDESS, S.; YOUNG, F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. [S.l.]: Technical Documents, 2003.

MONNIG, S. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete. **Otto-Graf-Journal**, v. 16, p. 193, 2005.

NETO, W. N. d. A. Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação de retração autógena em microconcretos de alta resistência. 2014.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. [S.l.]: Universidade de São Paulo, 2006.

ORDÓÑEZ, S. T. L. Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração. 2013.

PIASTA, W.; ZARZYCKI, B. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 140, p. 395–402, 2017.

RIGHI, D. P. Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz. 2015.

SANTOS, T. A. C. Estudo da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência. 2016.

SILVA, E. F. d. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. UFRJ, 2008.

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

TANABE, T.-a. et al. **Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Two Volume Set: Proceedings of the CONCREEP 8 conference held in Ise-Shima, Japan, 30 September-2 October 2008**. [S.l.]: Crc Press, 2008. v. 1.

TAZAWA, E.-i. **Autogenous shrinkage of concrete**. [S.l.]: CRC Press, 1999.

WANG, F. et al. Autogenous shrinkage of concrete with super-absorbent polymer. **ACI Materials Journal**, American Concrete Institute, v. 106, n. 2, p. 123, 2009.

WYRZYKOWSKI, M. et al. Microstructure development and autogenous shrinkage of mortars with csh seeding and internal curing. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 129, p. 105967, 2020.

YANG, J.; WANG, Q.; ZHOU, Y. Influence of curing time on the drying shrinkage of concretes with different binders and water-to-binder ratios. **Advances in Materials Science and Engineering**, Hindawi, v. 2017, 2017.

ZHANG, M.; TAM, C.; LEOW, M. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 33, n. 10, p. 1687–1694, 2003.

ZHONG, P. et al. Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 123, p. 105789, 2019.