

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RAFAEL VINICIUS WEBER

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS COM ADIÇÕES DE METACALIM E SÍLICA ATIVA**

TOLEDO

2022

RAFAEL VINICIUS WEBER

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS COM ADIÇÕES DE METACAULIM E SÍLICA ATIVA**

**EVALUATION OF CEMENT COMPOSITES AUTOGENOUS SELF-HEALING WITH
METAKAOLIN AND SILICA FUME ADDITION**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Lucia Bressiani.

Coorientadora: Tassiane Apolinário de Oliveira.

TOLEDO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RAFAEL VINICIUS WEBER

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS COM ADIÇÕES DE METACAULIM E SÍLICA ATIVA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24 de novembro de 2022

Lucia Bressiani - Orientadora
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo

Tassiane Apolinário de Oliveira - Coorientadora
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Federal do Paraná - Campus Curitiba

Fernando Nunes Cavalheiro
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo

Gustavo Savaris
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Toledo

TOLEDO
2022

Dedico este trabalho à minha família, pelos
momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de dedicar um agradecimento especial à minha mãe, avó, irmão, tios e primos por estarem sempre ao meu lado e nunca medirem esforços ao proporcionarem as condições necessárias para que eu conseguisse alcançar meus objetivos, sem vocês essa caminhada seria impossível.

Agradeço às minhas orientadoras, Prof. Me. Tassiane Apolinário de Oliveira e Prof. Dra. Lucia Bressiani, por toda a curiosidade cativada por seus talentos docentes, todo conhecimento transmitido, por todo suporte durante esse período e por aceitarem essa missão.

Gostaria também de agradecer ao corpo docente da UTFPR campus Toledo, pela dedicação e compromisso com o aprendizado.

Aos meus amigos, que posso chamar de irmãos, pelo suporte, companheirismo e motivação para continuar nessa caminhada.

Sem todos vocês, nada disso seria possível.

RESUMO

Elementos construtivos confeccionados utilizando compósitos cimentícios, como concreto e argamassa, estão suscetíveis à aparição de manifestações patológicas, principalmente pela facilidade com que o material apresenta abertura de fissuras, a qual, além de poder demonstrar problemas estruturais, serve como porta de entrada para agentes agressivos. Segundo a “lei dos cinco”, de Sitter, sabe-se que quanto mais demorado for para que se execute uma intervenção do elemento que apresenta patologias, mais custoso fica esse processo, seguindo uma proporção de cinco vezes para cada etapa concluída da obra. Com o intuito de minimizar esse custo com manutenção e visando um menor impacto ambiental, em decorrência da substituição de parte do cimento, o qual é um grande emissor de poluentes na atmosfera, o presente trabalho busca avaliar a capacidade de autocicatrização e recuperação de resistência mecânica de compósitos cimentícios que contenham adição de metacaulim e sílica ativa. Foram utilizados três traços de misturas contendo adições, uma com 10% de metacaulim, uma com 10% de sílica ativa e uma última com 5% de cada adição, todas em substituição da respectiva massa de cimento, além de uma última mistura de referência, para comparação. A capacidade de autocicatrização foi avaliada aos 28 dias após a fissuração dos compósitos, que ocorreu após os 28 dias de cura submersa, exigidos pela NBR 13279, com o auxílio de um fissurômetro e recursos computacionais. A recuperação de resistência mecânica foi determinada, novamente, por meio dos ensaios de resistência à tração na flexão, também especificado pela NBR 13279, nas idades de 28 dias após a fissuração e exposição dos compósitos. Os dois traços contendo sílica ativa retornaram os melhores resultados, chegando a atingir mais de 91% de fechamento de fissuras para a exposição ao ambiente submerso e tendo recuperado, em média, 23,11% de resistência mecânica para o traço apenas com sílica ativa. Verificou-se que, de maneira isolada, a adição de metacaulim não se faz eficiente em nenhum dos cenários avaliados, seja para cicatrização ou recuperação mecânica, mas quando combinada com a adição de sílica, houve uma estabilização das características para o ambiente submerso e uma potencialização destas para a exposição ao ar, sendo ela a mais problemática. Para o traço contendo as duas adições, cicatrizado em ambiente externo ao tanque de submersão, houve um fechamento de fissuras médio de 42,79%, mais que o dobro que o segundo melhor traço para a exposição referida, e uma recuperação de resistência média de 16,08%.

Palavras-chave: Compósitos cimentícios; Fissuras; Adições; Metacaulim; Sílica ativa; Autocicatrização; Recuperação mecânica.

ABSTRACT

Constructive elements made using cementitious composites, such as concrete and mortar, are susceptible to the appearance of pathological manifestations, mainly due to the ease with which the material presents cracks, which, in addition to being able to demonstrate structural problems, serves as a gateway for aggressive agents. According to Sitter's "law of five", it is known that the longer it takes to perform an intervention on the element that presents pathologies, the more costly this process becomes, following a ratio of five times for each completed stage of the work. With the aim of minimizing this maintenance cost and aiming at a lower environmental impact, due to the replacement of part of the cement, which is a major emitter of pollutants in the atmosphere, the present work seeks to evaluate the self-healing capacity and recovery of mechanical resistance of cementitious composites that contain addition of metakaolin and silica fume. Three traces of mixtures containing additions were used, one with 10% metakaolin, one with 10% silica fume and the last one with 5% of each addition, all replacing the respective cement mass, in addition to a last reference mixture, to comparison. The self-healing capacity was evaluated 28 days after the composites cracked, which will occurred after the 28 days of submerged curing, required by NBR 13279, with the aid of a crack gauge and computational resources. The recovery of mechanical strength was determined, again, through tests of tensile strength in flexion, also specified by NBR 13279, at 28 days after cracking and exposure of the composites. The two mixes containing silica fume returned the best results, reaching more than 91% of crack closure for exposure to the submerged environment and having recovered, on average, 23.11% of mechanical strength for the mix with just silica fume. It was verified that, alone, the addition of metakaolin is not efficient in any of the evaluated scenarios, either for healing or mechanical recovery, but when combined with the addition of silica, there was a stabilization of the characteristics for the submerged environment and a potentiation of these for exposure to air, which is the most problematic. For the mix containing the two additions, healed outside the submersion tank, there was an average crack closure of 42.79%, more than double that of the second-best mix for the aforementioned exposure, and an average strength recovery of 16.08%.

Keywords: Cementitious composites; Cracks; Additions; Metakaolin; Silica fume; Self-healing; Mechanical recovery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da lei de Sitter.....	8
Figura 2 - Emissão de gases contribuintes ao efeito estufa pelas indústrias de cimento no ano de 2000.....	9
Figura 3 - Tipos de fissuração decorrentes de cada tipo de solicitação na estrutura	17
Figura 4 - Processo de densificação da matriz cimentícia gerada pela hidratação de partículas ainda não hidratadas ao longo da superfície da área fissurada.....	19
Figura 5 - Produtos gerados pelas reações da adição de sílica ativa (SF) para o fechamento da fissura gerada aos 28 dias.....	20
Figura 6 - Microscopia de composto contendo adição de metacaulim antes da autocicatrização (a) e depois de 26 dias submerso em água (b).....	21
Figura 7 - Fluxograma de desenvolvimento do procedimento experimental.....	22
Figura 8 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão (dimensões em milímetros).....	27
Figura 9 - Corpo de prova do traço REF no dispositivo de carga do ensaio de resistência à tração na flexão.....	27
Figura 10 - Corpo de prova dividido após o colapso.....	28
Figura 11 - Ambientes de exposição dos corpos de prova fissurados, ao ar (a) e em submersão (b).....	28
Figura 12 - Utilização do Software Tracker para determinação de dimensão de fissura - Escala 1.....	29
Figura 13 - Utilização do Software Tracker para determinação de dimensão de fissura - Escala 2.....	30
Figura 14 - Micrografia das fusões entre as partículas esféricas de uma amostra de sílica ativa.....	36
Gráfico 1 - Gráfico de acompanhamento diário de temperatura.....	31
Gráfico 2 - Gráfico de acompanhamento diário de umidade relativa do ar.....	32
Gráfico 3 - Resistências médias à tração na flexão e à compressão por traço.....	35
Gráfico 4 - Comparativo de fechamento de fissura para exposição ao ar.....	38
Gráfico 5 - Comparativo de fechamento de fissura para exposição submersa.....	39
Gráfico 6 - Resistências médias à tração na condição inicial e após o período de recuperação em diferentes exposições.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Normatização usada para caracterização do agregado miúdo	23
Tabela 2 - Tabela resumo dos traços de argamassa adotados para o procedimento experimental (kg/kg de cimento)	24
Tabela 3 - Tabela resumo de consumo de material para cada traço de argamassa (kg/m ³)	24
Tabela 4 - Tabela resumo de dados gerais de acompanhamento meteorológico	31
Tabela 5 - Resultados da caracterização do agregado miúdo	32
Tabela 6 - Índices de consistência das argamassas	33
Tabela 7 - Resistências à tração na flexão e à compressão médias com respectivas cargas aplicadas por corpo de prova	34
Tabela 8 - Estados de fissuração inicial e após exposições, para todos os traços ...	37
Tabela 9 - Estudo de autocicatrização	38
Tabela 10 - Resistências à tração antes e depois da cicatrização, com respectivas recuperações mecânicas	41
Tabela 11 - Dados para análise de variância de fator duplo com repetição	43
Tabela 12 - Dados amostrais	43
Tabela 13 - Teste de Tukey para comparação de médias de resistência	44
Tabela 14 - Teste de Tukey para comparação das médias de aberturas de fissuras na condição inicial e após cicatrização ao ar	45
Tabela 15 - Teste de Tukey para comparação das médias de aberturas de fissuras na condição inicial e após cicatrização submersa	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CP	Corpo de prova
M10	Traço de argamassa com 10% de metacaulim
REF	Traço de argamassa de referência
S10	Traço de argamassa com 10% de sílica ativa
SM5	Traço de argamassa com 5% de metacaulim e 5% de sílica ativa

LISTA DE SÍMBOLOS

C_3S	Silicato Tricálcico
C_2S	Silicato Dicálcico
C_3A	Aluminato Tricálcico
C_4AF	Ferro Aluminato Tetracálcico
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio
CPV - ARI	Cimento Portland Tipo V - Alta Resistência Inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Justificativa	8
1.2	Objetivo Geral	10
1.3	Objetivos Específicos	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Compósitos Cimentícios	11
2.1.1	Concreto.....	11
2.1.2	Argamassa	11
2.1.3	Composição de traço.....	12
2.2	Adições e aditivos	13
2.2.1	Metacaulim	15
2.2.2	Sílica ativa	15
2.3	Manifestações patológicas	16
2.4	Concreto Autocicatrizante	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Caracterização dos Materiais	22
3.2	Dosagem e amostragem	24
3.3	Caracterização físico-mecânica	25
3.4	Avaliação da autocicatrização e recuperação de resistência	26
3.4.1	Estudo da autocicatrização	29
3.4.2	Estudo da recuperação de resistência	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	Caracterização	31
4.1.1	Condições meteorológicas	31
4.1.2	Características do agregado miúdo.....	32
4.1.3	Características físico-mecânicas.....	32
4.2	Verificação da autocicatrização	36
4.2.1	Fissuração	36
4.2.2	Estudo da recuperação de resistência	40
4.3	Análise de variância	42
4.3.1	Resistência.....	42
4.3.2	Autocicatrização	45
5	CONCLUSÕES	47

REFERÊNCIAS.....	48
ANEXO A -Laudos técnicos dos materiais	53

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios, isto é, materiais à base de cimento, estão entre os recursos mais utilizados do mundo. O concreto, por exemplo, é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo ainda a segunda substância mais consumida anualmente no planeta, atrás apenas da água (SABIR; WILD; BAI, 2001). Isso se deve pela versatilidade e facilidade de modelagem as mais diversas formas quando no estado fresco e por seu bom desempenho no que diz respeito à resistência de esforços solicitantes.

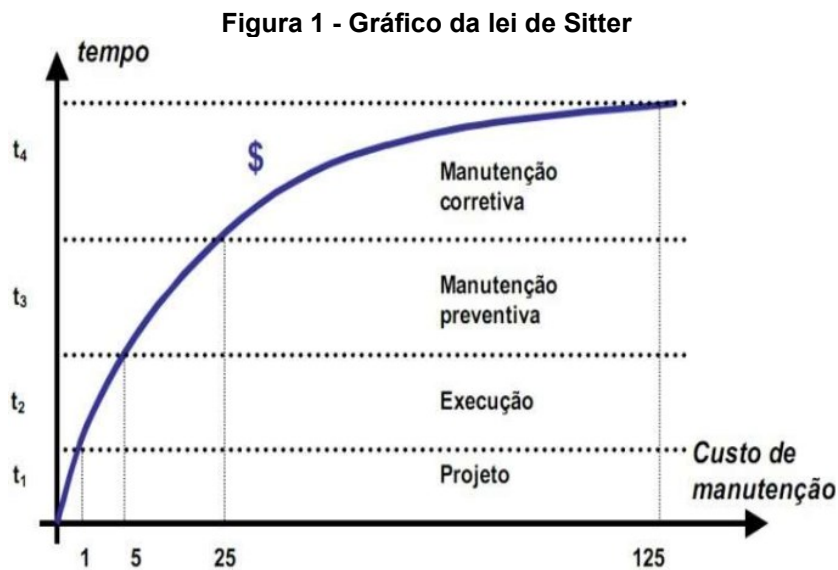
Mesmo com esse caráter de resistência, aprimorado quando aliado ao aço, os compósitos cimentícios em geral estão suscetíveis à aparição de sintomas patológicos, sendo esses as mais diversas origens. Seja pelos próprios mecanismos das reações de hidratação dos compósitos, expansão térmica, má execução *in loco* ou por excesso de carregamentos, a fissuração aparece como a manifestação patológica mais comum deste tipo de material.

A fissuração pode ou não indicar problemas estruturais graves, tendo seus limites de abertura especificados pelas normas vigentes. Contudo, em qualquer um dos casos, a abertura de fissuras gera a exposição do interior do material, deixando este vulnerável à entrada de agentes agressivos que acabam por gerar outros tipos de manifestações patológicas, o que evidencia a necessidade do tratamento deste tipo de manifestação o mais rápido possível.

Atualmente existem diversos meios de se tratar e recuperar estruturas fissuradas, desde tratamentos químicos até revestimentos externos. Entretanto, na maioria dos casos, os processos apresentam elevado custo ou ineficiência à longo prazo. Cabe lembrar, ainda, que a fissuração do compósito nem sempre é de fácil identificação, visto que esse ato está suscetível ao julgamento humano e à aparição em posições que vão além do campo de visão. A partir dessa análise, os compósitos cimentícios autocicatrizantes surgem como alternativa mais rentável para conter o caso. Mesmo com um maior custo agregado quando comparado aos compósitos originais, a ação deste material se mostra eficiente frente ao tratamento demandado para reparação da estrutura.

1.1 Justificativa

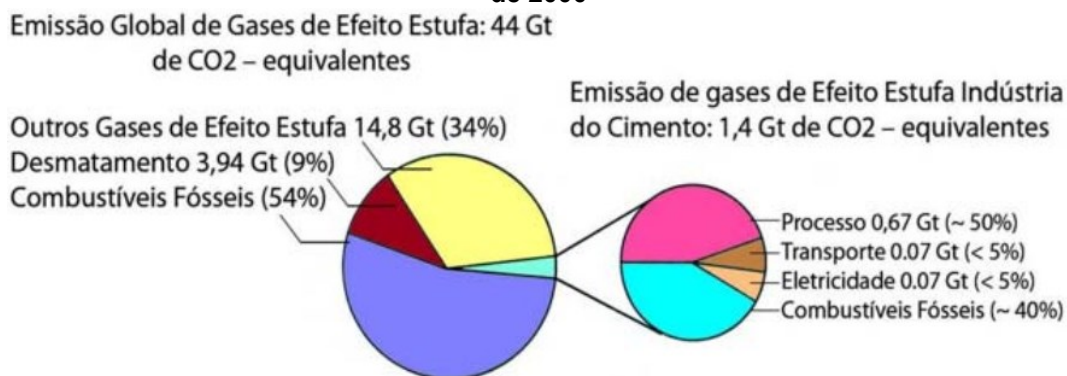
Sitter (1984) propôs a “lei dos cinco”, na qual determina os custos para a otimização da vida útil de estruturas, de acordo com o tempo. O autor demonstrou que o valor demandado para se executar uma intervenção em estruturas varia de acordo com o tempo, relativo a cada etapa do empreendimento, em uma razão de cinco vezes, como demonstrado pela Figura 1.



Fonte: Duarte; Barbosa; Farias (2019, p. 50)

Considerando esse valor demandado para a recuperação de estruturas depois de já apresentarem sintomas patológicos, o presente trabalho busca avaliar a autocicatrização de compósitos cimentícios contendo adições de metacaulim e sílica ativa, que são subprodutos e rejeitos industriais, respectivamente, utilizados como matéria prima ou liberados na produção de outros materiais, como estratégia de prevenção dessas manifestações. Scrivener et al. (2018) mostram que isso agrega um valor ambiental ao processo de confecção dos compósitos, visto que estes materiais são considerados materiais cimentícios suplementares pela capacidade de serem empregados substituindo parte do cimento, o qual tem um processo de fabricação de extremo impacto ao meio ambiente, devido a liberação de grande quantidade de poluentes no ar, sendo responsável, já em 2000, por cerca de 3% de todos os poluentes contribuintes ao efeito estufa, conforme exposto pela Figura 2.

Figura 2 - Emissão de gases contribuintes ao efeito estufa pelas indústrias de cimento no ano de 2000



Fonte: Maury; Blumenschein (2012, p. 79)

O fator central dessa alta taxa de emissão de gases se deve à queima de grandes quantidades de materiais combustíveis para atendimento das altíssimas temperaturas demandadas pelos fornos utilizados para a produção do clínquer, matéria prima da produção do cimento, e pelo processo de calcinação constituinte do ciclo de produção deste (DEJA; ULIASZ-BOCHENCZYK; MOKRZYCKI, 2010).

Ali, Saidur e Hossain (2011) dizem que, na Malásia, aproximadamente 7% da emissão total de dióxido de carbono é emitida pelas indústrias de cimento. Da mesma forma, na China, maior emissora de gases poluentes do planeta (ALI; SAIDUR; HOSSAIN, 2011), Lin e Zhang (2016) mostram que, em 2011, a emissão desse poluente girou em torno de 8,97 bilhões de toneladas. O mesmo se repete para outros países como Brasil (SALVI MALACARNE et al., 2021), Cuba (SÁNCHEZ BERRIEL et al., 2016), entre outros. Todos esses estudos corroboram para a averiguação do fato de que o exposto por Maury e Blumenschein (2012) continua, de maneira crescente, representando os níveis de emissão de gases poluentes por parte das indústrias de cimento ao redor do mundo.

Outra vertente da utilização dessas adições, tanto de forma separada, quanto de forma simultânea, está atrelada às vantagens e desvantagens contidas no processo. Estudos indicam uma melhoria de algumas características do compósito, como redução da porosidade e ganho de resistência mecânica, além da acentuação da habilidade de cicatrização deste material, principalmente quando exposto à ambientes que contenham umidade (NAMNOUM et al., 2021; SILVA et al., 2021). Assim, este trabalho busca, também, verificar a influência de dois tipos diferentes de exposição durante a cura, submersa e ao ar, no processo de cicatrização de fissuras

e a capacidade de recuperação de resistência mecânica deste, em relação ao compósito sem a presença de fissuras.

1.2 Objetivo Geral

Analisar o potencial de autocicatrização e de recuperação mecânica de compósitos cimentícios contendo adição de sílica ativa e metacaulim em substituição de 10% da massa de cimento.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que foram definidos para se alcançar o proposto pelo objetivo geral foram:

- Desenvolver quatro traços de compósitos cimentícios à base de cimento Portland, um com adição de metacaulim ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) e um com adição de sílica ativa (SiO_2), ambos em substituição de 10% da massa de cimento, outro sendo uma composição entre as duas adições, substituindo 5% da massa de cimento cada, além do traço de referência, sem adições.
- Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas das misturas confeccionadas e posteriormente compará-las com um compósito de referência.
- Expor os compósitos fissurados à duas condições, saturada e ao ar, durante 28 dias e avaliar a influência do meio no processo de autocicatrização.
- Avaliar o potencial de autocicatrização dos compósitos e sua recuperação mecânica de maneira visual e por meio do ensaio de resistência à tração na flexão, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos Cimentícios

Segundo Hashin (1983), compósitos são materiais formados por dois ou mais componentes distintos que formam regiões de ligação grandes o suficiente para serem considerados contínuos e que, geralmente, estão fortemente ligados na região da interface do compósito. Neville e Brooks (2010) ainda ressaltam que compósitos são materiais que apresentam duas fases com duas formas distintas, uma rígida e outra macia, com características mecânicas essencialmente diferentes, principalmente em seu módulo de elasticidade.

2.1.1 Concreto

Sendo o principal compósito cimentício no quesito estrutural, o concreto como é conhecido nos dias de hoje é produto de estudos e evoluções provenientes da descoberta do cimento artificial, por Vicat em meados do século XIX (BAUER, 2019). Desde então se tornou um dos materiais de construção mais empregados nos mais diversos setores da construção civil, seja por seu alto desempenho no que se refere a resistir carregamentos quando no estado endurecido ou sua fácil modelagem e adaptação às mais diversas formas quando no estado fresco (CARVALHO, 2008). O concreto é um compósito cimentício formado por cimento e água (pasta de cimento) somados a agregados graúdo e miúdo.

Segundo a NBR 7211 (2022), agregado miúdo é aquele cujos grãos passam pela peneira 4,75 mm e ficam retidos na peneira 150 μ m, sendo a areia seu principal representante, enquanto o agregado graúdo é definido como material passante pela peneira 75 mm e retido na malha de 4,75 mm, representado principalmente pela pedra brita.

2.1.2 Argamassa

Argamassa, que foi o compósito cimentício utilizado para o procedimento experimental da presente pesquisa, é, segundo Lisboa, Alves e Melo (2017), um

compósito cimentício com propriedades aderentes composto, basicamente, por um ou mais materiais aglomerantes em composição com agregados miúdos e água, podendo, ainda, conter cal hidratada na mistura para aumento da elasticidade, como exposto por Salgado (2018). É utilizada para revestimento de edificações ou assentamento de alvenaria, pela facilidade de modelagem, essencialmente pela ausência de agregados graúdos da matriz cimentícia. Moliterno (1995) diz que a propriedade aderente das argamassas faz com que essa proporcione à estrutura de revestimento de alvenarias resista a esforços de compressão, flexão e até mesmo choques que eventualmente ocorrem, não sendo eficientes, assim como o concreto, para resistir a esforços solicitantes na tração.

2.1.3 Composição de traço

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2022b) a proporção de cada uma desses componentes de compósitos à base de cimento é expressa pelo chamado traço. O traço é o resultado da aplicação dos estudos de dosagem que, por sua vez, consistem principalmente em definir métodos e critérios de seleção e controle da qualidade dos componentes do concreto, visando atingir propriedades pré-definidas por projeto (NEVILLE, 2015). Os mais utilizados no Brasil são: o método de dosagem proposto pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o método proposto pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Após o emprego do método de dosagem, uma expressão que define a proporção de cada material que irá compor a mistura é elaborada, sendo essa proporção de materiais definida em relação à massa de cimento, conforme a Equação 1:

$$1: A_m: A_g: a/c \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

1: massa de cimento (kg);

A_m : massa de agregado miúdo proporcional à massa de cimento (kg);

A_g : massa de agregado graúdo proporcional à massa de cimento (kg);

a/c : razão entre massa de água e massa de cimento.

O compósito cimentício resultante é aplicado em elementos estruturais ou não estruturais ainda em seu estado fresco e, então, é submetido ao processo chamado de cura. A cura está relacionada com as reações que ocorrem no interior do compósito

após a sua concepção, as chamadas reações de hidratação. A hidratação é uma reação química que consiste, basicamente, na geração de produtos rígidos pelos silicatos de cálcio C_3S e C_2S ($3CaO.SiO_2$ e $2CaO.SiO_2$, respectivamente) e aluminatos de cálcio C_3A e C_4AF ($3CaO.Al_2O_3$ e $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, respectivamente), constituintes do cimento, ao entrar em contato com a água, em um processo exotérmico (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Por consumir parte da própria água e por parte desta se dissipar para o ambiente, seja pela exposição solar ou pelo caráter exotérmico da reação, o compósito tende a apresentar sintomas de retração, o que torna o processo de cura essencial. A cura do concreto, podendo ser a base de água ou de elementos químicos, consiste em submeter o compósito constantemente a um ambiente úmido ou submerso. O processo busca diminuir a magnitude dessa retração hidráulica causada pela hidratação, além de também buscar que estas reações continuem ocorrendo, garantindo assim o enrijecimento do compósito e seu consequente aumento de resistência ao longo do tempo (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

2.2 Adições e aditivos

Com a evolução dos materiais e desenvolvimento de pesquisas, buscou-se cada vez mais formular novos concretos, tanto para que suprissem necessidades específicas, desde sua trabalhabilidade, porosidade e vida útil até sua resistência final quanto para reduzir os impactos ambientais gerados por sua produção em larga escala. Uma solução estudada foi a aplicação de outros tipos de materiais e substâncias ao compósito, classificados posteriormente como aditivos e adições.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define aditivo e adição, por meio da normativa C125 (ASTM, 2018) como sendo qualquer material, exceto fibras e os componentes básicos do próprio compósito, que integre a composição, sendo este adicionado antes ou durante a mistura dos elementos.

Quando a substância acrescentada busca modificar uma qualidade pré-existente do compósito original, como por exemplo a consistência, este é definido pela NBR 11768-1 (ABNT, 2019b) como “aditivo”. Aditivos podem aparecer na forma de substâncias químicas, que têm ação imediata quando adicionados ao compósito, ou podem ainda aparecer na forma de adições químicas, as quais tem ações de longo

prazo. Ainda segundo a norma, a proporção dos aditivos no traço não deve ser superior a 5% da massa de ligante total. Os aditivos mais comuns são: o acelerador de pega, acelerador de resistência, plastificantes e superplastificantes, modificadores de viscosidade e incorporadores de ar.

As adições minerais são materiais de origem pozolânicas, definidos e normatizados pela NBR 12653 (ABNT, 2015b), que sozinhos não apresentam propriedades ligantes mas quando finamente moídos e submetidos ao contato com a água, promovem reações com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente no cimento e, então, formam produtos que possuem propriedades ligantes. Durante a hidratação, o cimento puro gera hidróxido de cálcio como subproduto, enquanto as adições pozolânicas reagem com esse hidróxido de cálcio e formam cristais com maior resistência (FILHO, 2008).

Van Oss e Padovani (2002) pontuam que para cada tonelada de cimento produzida são demandadas 1,7 toneladas de matéria prima e é emitida cerca de 1,0 tonelada de gases na atmosfera, tornando a indústria de cimento uma das duas maiores indústrias no que diz respeito a fontes emissão de gases contribuintes para o efeito estufa. A partir disso, as adições pozolânicas vem sendo amplamente empregadas para composições já que, além de somando, estas podem também ser empregadas substituindo parte do cimento, em proporções que variam de acordo com o tipo de adição e a finalidade de seu uso.

Quando utilizada em substituição, acaba por reduzir o consumo de cimento, que também reduz o custo final da mistura, introduzindo também um caráter econômico ao processo visto que a maioria das adições são subprodutos de processos industriais ou matérias primas com índices de poluição mais baixos, além de que a incorporação de pozolanas reduz a porosidade da matriz cimentícia, aumentando assim resistência do compósito final (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Algumas das adições minerais mais comuns são a escória de alto forno, cinzas volantes, sílica ativa e metacaulim, sendo que estes dois últimos foram utilizados para as composições do presente trabalho.

2.2.1 Metacaulim

A produção do metacaulim é feita a partir de argilas cauliníticas ou do próprio caulim depois de ser moído finamente e submetido à calcinação sob temperaturas entre 650 e 800°C, tendo como resultado um material pozolânico contendo sílica e alumina em estado ativo. Por seu caráter pozolânico, o metacaulim como adição para compósitos cimentícios ganhou atenção por promover reações com o hidróxido de cálcio gerado pela hidratação do próprio cimento, reduzindo a quantidade remanescente deste em seu interior, o qual é associado à redução da vida útil da estrutura (SABIR; WILD; BAI, 2001).

O metacaulim é um material que apresenta elevado grau de finura que, quando misturado ao compósito cimentício, tem a capacidade de preencher seus poros, elevando sua resistência mecânica e sua resistência à penetração de agentes agressivos, reduzindo assim a ocorrência de manifestações patológicas deste compósito (BREDY; CHABANNET; PERA, 1988). Devido às propriedades pozolânicas já citadas e a reação que ocorre entre o metacaulim e o hidróxido de cálcio decorrente da hidratação das partículas de cimento, esta adição tem a capacidade de aprimorar a habilidade de autocicatrização de matrizes cimentícias.

2.2.2 Sílica ativa

A sílica ativa é um material residual gerado durante o processo de confecção de ligas metálicas a base de silício, produzidas a partir de quartzo puro e carvão, em fornos elétricos de arco submerso (NEVILLE; BROOKS, 2010). Esse material se apresenta na forma de pó de extrema finura que, devido as suas propriedades pozolânicas, tem a capacidade de alterar as propriedades do concreto tanto quando no estado fresco, quanto no endurecido. A sílica pode já estar agregada à mistura nos pacotes de cimento vendidos comercialmente quando pode ser empregada durante o ato da confecção do compósito, utilizada na forma de pó ou de lama.

Devido à sua baixa espessura de partícula, o material é capaz de preencher os vazios do compósito cimentício, reduzindo sua permeabilidade e aumento sua resistência tanto a esforços quanto à ataques químicos. Contudo, essa adição reduz

o pH final da mistura, o que o torna mais suscetível aos efeitos de carbonatação (SOUZA; RIPPER, 2009).

A partir do exposto por Carmo e Portella (2008), a adição de sílica ativa, bem como a de metacaulim, resulta em um ganho de resistência mecânica desde as primeiras idades, tendo maior evidência para idades mais avançadas, além de proporcionar uma redução no custo final do compósito.

2.3 Manifestações patológicas

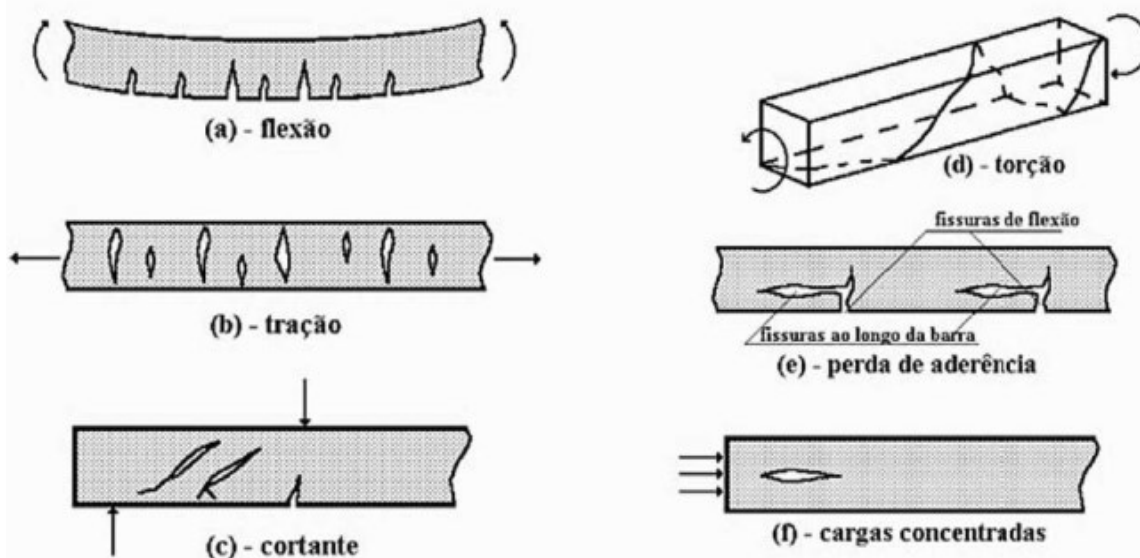
Apesar dos concretos, argamassas e pastas de cimento serem materiais que desenvolvem capacidade de resistência a esforços, ainda maior quando aliados ao aço, estes ainda estão sujeitos à aparição de sintomas patológicos ao longo de sua vida útil.

Compreende-se por patologia de estruturas a área que é responsável por estudar as causas, tipos de manifestação e as consequências decorrentes dos defeitos na construção civil e sintomas patológicos, ou manifestações patológicas, se referem aos sinais que a estrutura demonstra para alertar que algum tipo de reação está ocorrendo, podendo estes apresentarem diversas origens, desde excesso de carregamento ou carregamentos específicos, até a exposição a determinados ambientes ou substâncias agressivas (SOUZA; RIPPER, 2009).

Manifestações patológicas em geral tem por efeito a redução (quando não a condenação) da vida útil de uma estrutura, por meio da redução do seu desempenho. O termo “vida útil” é utilizado para se referir ao tempo em que a estrutura mantém estados de desempenho satisfatório e está diretamente relacionado com a durabilidade, que por sua vez é definida, segundo a NBR 15575-1 (ABNT, 2021a), como a capacidade de um elemento em desempenhar a função para a qual foi projetado, ao longo da vida da estrutura e considerando as situações de uso e ocupação.

Dentre as manifestações patológicas que podem ocorrer em compósitos cimentícios a fissuração é a mais comum delas por ter diversas possíveis origens, como a expansão térmica e carregamentos excessivos, de maneira indicada pela Figura 3, ou até mesmo pela decorrência da retração hidráulica devido ao processo de hidratação do compósito (MOREIRA, 2016).

Figura 3 - Tipos de fissuração decorrentes de cada tipo de solicitação na estrutura



Fonte: Souza; Ripper (1998, p. 58)

A fissuração nem sempre é sinal de que a estrutura pode sofrer problemas de estabilidade, desde que não ultrapassem os valores permitidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014a), a qual limita a dimensão de abertura de fissuração em 4mm para ambientes com classe de agressividade ambiental nível I, reduzindo progressivamente até o valor de 2mm para ambientes com classe de agressividade nível IV.

Entretanto, ao exceder esses limites, a fissuração pode sim atuar como um indicador de problemas estruturais mais graves, como problemas com sobrecarga, além de também atuar como porta de entrada para a aparição outros tipos de sintomas patológicos. Isso se dá porque a fissuração gera um estado de exposição do interior do compósito, deixando esse sujeito à entrada e ação de agentes deletérios (LISBOA; ALVES; MELO, 2017).

Dessa forma, a partir do momento em que esses agentes adentram na microestrutura do compósito, principalmente quando se trata de ambientes agressivos por si só, como ambientes marinhos, dão início ao processo de corrosão dos elementos de aço, promovendo sua deterioração e o futuro problema de estabilidade da estrutura, sendo este um dos mais comuns motivos de colapsos estruturais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os procedimentos para recuperação de patologias nos compósitos cimentícios são muitos, devendo estes serem escolhidos adequadamente para cada caso. Daí surge a necessidade de um rigoroso diagnóstico, desde as causas e estado

do dano gerado pelo agente, bem como a posterior análise de soluções possíveis, considerando as possíveis consequências, o tempo de ação necessário e os fatores econômicos cabíveis.

Os processos mais comumente utilizados partem desde a utilização de elementos químicos para a estabilização do interior do compósito até o uso de elementos externos para impedir a entrada desses agentes, como pinturas especiais ou revestimentos específicos (BAUER, 2019). Por outro lado, pelo fato de as manifestações patológicas serem, em grande parte, conduzidas pela própria umidade presente no ar, seu meio de ação é equiparável a doenças transmitidas entre seres humanos e, de acordo com Martins (1997), em grande parte dos casos a prevenção é uma das maneiras mais eficientes de tratamento.

2.4 Concreto Autocicatrizante

Seguindo a linha de raciocínio referente à prevenção das manifestações patológicas em estruturas, a partir de 1969 surgiram os primeiros estudos sobre propriedades autocicatrizantes de materiais, utilizando polímeros (VAN TITTELBOOM; DE BELIE, 2013), mas só em 1994 Carolyn Dry articulou os primeiros conceitos de autocicatrização em compósitos cimentícios (DRY, 1994). Dry estudou o fechamento de fissuras e poros de matrizes cimentícias com adições de fibras, responsáveis por atenuarem as dimensões da fissuração intencional, promovida por ensaios mecânicos.

Atualmente, o conceito de autocicatrização se divide em duas áreas: autônoma e autógena. A autocicatrização autônoma se baseia na incorporação de elementos não comuns ao traço do concreto, exclusivamente para proporcionar ao compósito o efeito de cicatrização, como a incorporação de bactérias. Quando a cicatrização ocorre sem a implementação de agentes autocicatrizantes, sendo resultado da utilização de materiais já comuns ao compósito, como os materiais pozolânicos, esta foi definida como autocicatrização autógena (HUANG; YE; PEL, 2016).

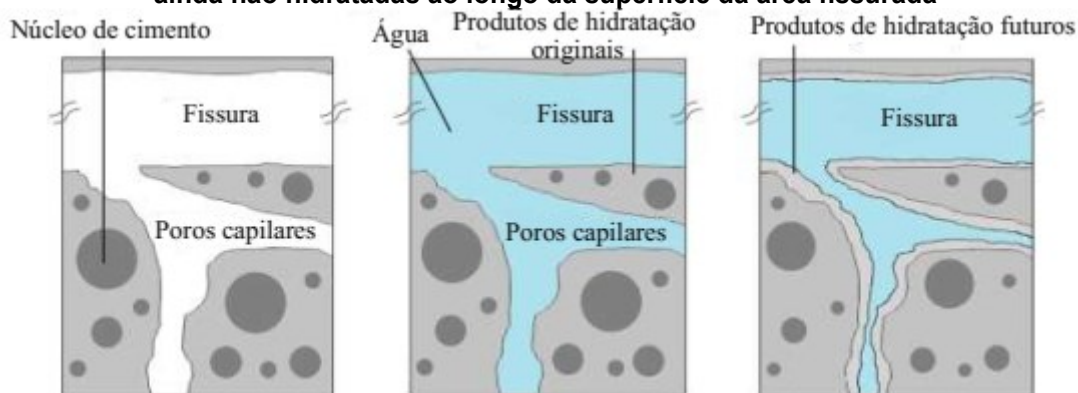
A autocicatrização autógena, abordada por este trabalho, pode ser resultado de dois mecanismos de ação. Um deles consiste na hidratação de partículas de

cimento no interior do próprio compósito que ainda não tenham sido hidratadas. O outro consiste na reação com a adição citada.

Adições minerais como o metacaulim e a sílica ativa apresentam reatividade quando combinadas com o hidróxido de cálcio e umidade, acelerando a própria hidratação do cimento e gerando silicato de cálcio hidratado adicional ($\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que tem como característica o aumento de resistência do compósito assim como a colmatação de poros ou, neste cenário, o preenchimento das fissuras geradas.

Dessa forma, a fissuração do compósito pode atuar expondo o interior do compósito para a umidade presente do ar, dando início ao processo de autocicatrização autógena (NEVILLE, 2002). Huang (2016) ainda demonstrou que a hidratação adicional que ocorre com os grãos não hidratados de cimento ao longo da superfície fissurada, gera um estado mais denso da matriz do compósito nessa região, tornando este também mais resistente ao ingresso de agentes agressivos, conforme demonstrado pela Figura 4.

Figura 4 - Processo de densificação da matriz cimentícia gerada pela hidratação de partículas ainda não hidratadas ao longo da superfície da área fissurada



Fonte: Adaptado de Huang; Ye; Pel (2016, p. 2517)

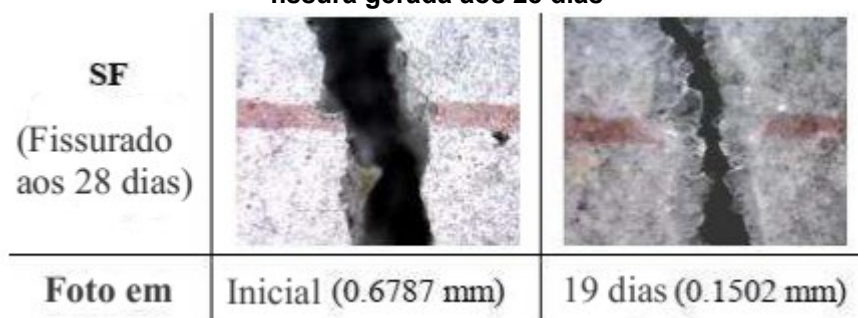
Entretanto, mesmo com a habilidade de regeneração de fissuras, o processo apresenta determinadas limitações, principalmente no que diz respeito à magnitude das fissuras. Os compósitos cimentícios, devido a sua composição, são materiais que apresentam, quando solicitados a tal ponto, rupturas do tipo frágil, isto é, rompem abruptamente sem aviso prévio ou indicação de que isto está para ocorrer.

Com base nisso, foram sugeridos compósitos com acréscimo de fibras, buscando uma redução na magnitude das fissuras e, assim, otimizando o processo de cura. As fibras quando agregadas ao traço do material, atuam como pontes de tensões, propagando o esforço de um lado para o outro de fissuras sem concentrá-

los na região já degradada, sendo capaz de reduzir consideravelmente as dimensões das fissuras geradas pelos esforços (LI; LIM; CHAN, 1998).

De acordo com os procedimentos executados por Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010), compósitos cimentícios com adição de sílica ativa tem maior capacidade e taxa de cicatrização em relação a fissuras de maiores dimensões, quando comparadas com compósitos executados com aditivo cristalino ou cinzas volantes, sendo a única realmente efetiva, isto é, que tenha cicatrizado por completo, para aberturas de fissuras que ultrapassaram 0,1 mm. Os autores ainda mostram que a performance desse compósito se mostra ainda mais eficiente para compósitos fissurados em idades avançadas, com resultado demonstrado pela Figura 5.

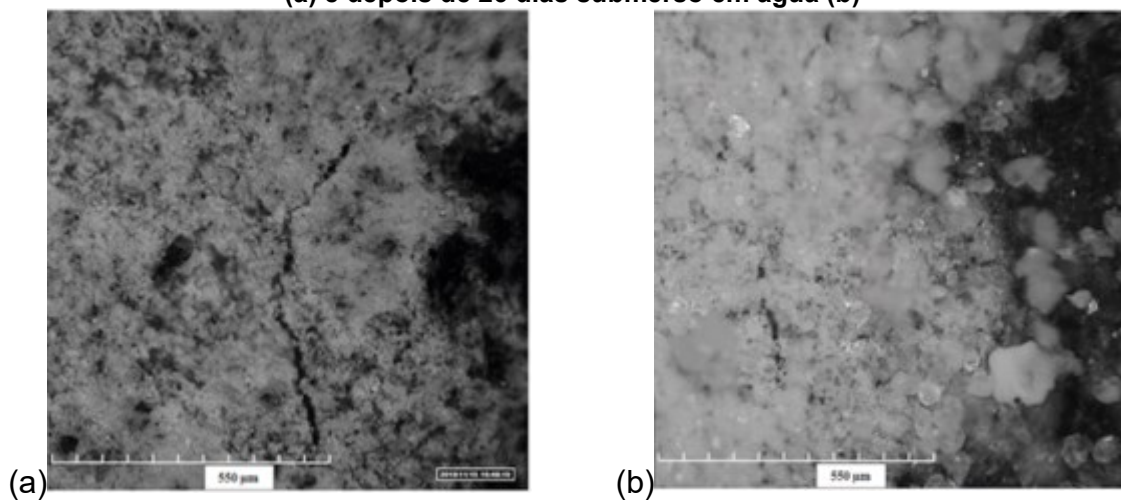
Figura 5 - Produtos gerados pelas reações da adição de sílica ativa (SF) para o fechamento da fissura gerada aos 28 dias



Fonte: Adaptado de Jaroenratanapirom (2010, p. 555)

O metacaulim desempenha um papel parecido, por conter sílica em sua composição. Namnoum *et al.* (2021) demonstraram que compósitos contendo adição de metacaulim possuem maior capacidade autocicatrizante quando comparados ao compósito de referência, sem adições, com ação demonstrada pela Figuras 6a e 6b. Em seu trabalho, os autores estudaram a capacidade de recuperação mecânica dos compósitos fissurados após a cicatrização, demonstrando que composições que continham metacaulim e sílica simultaneamente retornaram para valores de resistência próximos ao compósito de referência, além de recuperar quase totalmente a rigidez do compósito.

Figura 6 - Microscopia de compósito contendo adição de metacaulim antes da autocicatrização (a) e depois de 26 dias submerso em água (b)



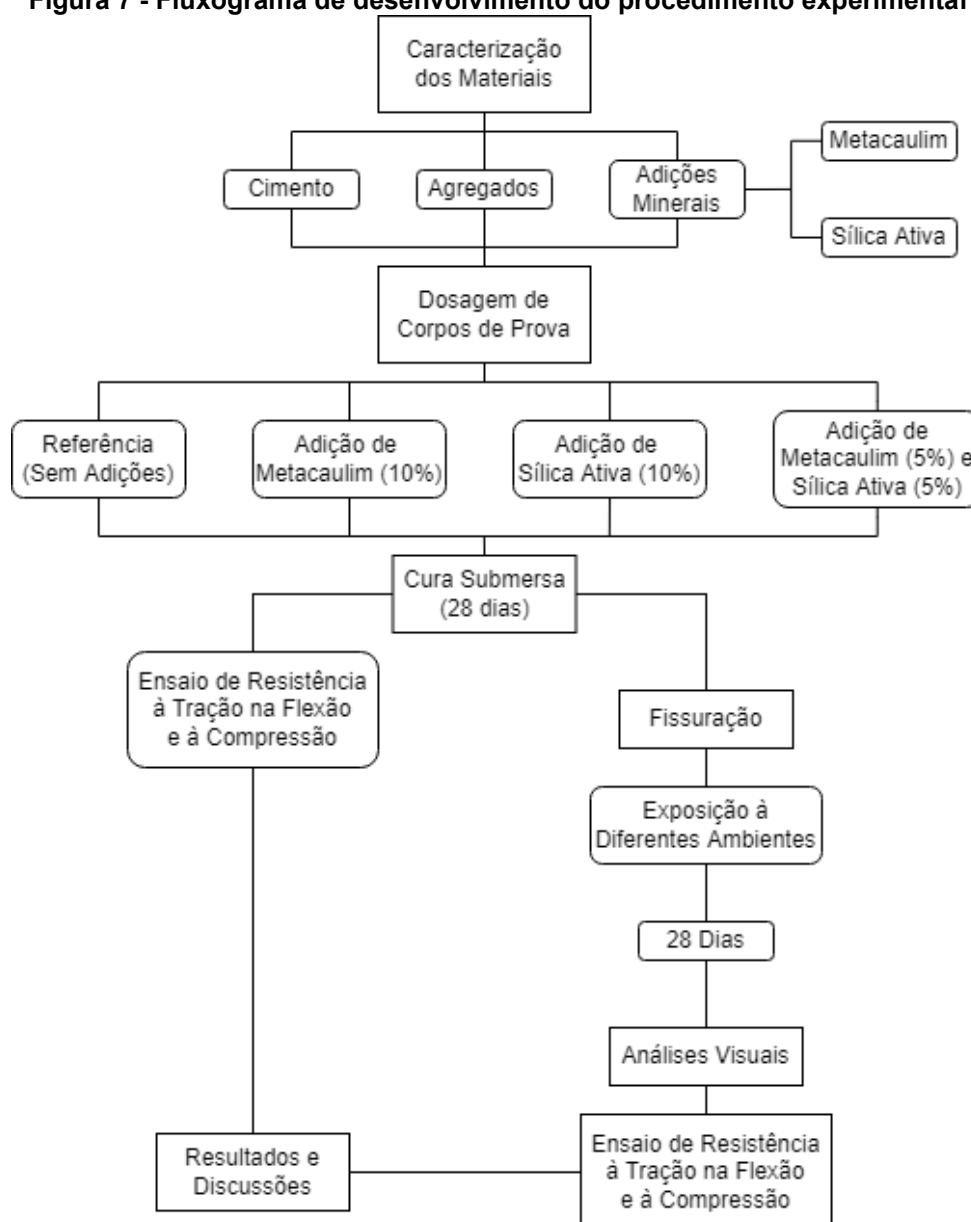
Fonte: Namnoum et al. (2021, p. 5)

Conforme exposto, ambas adições tem a capacidade de potencializar o processo de autocicatrização autógena de compósitos cimentícios, bem como alteram algumas propriedades mecânicas deste, como a resistência mecânica e a porosidade, acentuada ainda pela união das duas adições em uma mesma mistura.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais realizados no presente trabalho estão resumidos pelo fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fluxograma de desenvolvimento do procedimento experimental



Fonte: O autor (2022)

3.1 Caracterização dos Materiais

O tipo de material aglomerante utilizado foi o CPV - ARI, fabricado pela Supremo Secil Cimentos, sendo escolhido como aglomerante para o presente

procedimento experimental pelo fato deste cimento apresentar maior teor de hidróxido de cálcio lixiviado ao longo de sua superfície durante à exposição do processo de cura, quando comparado com outros tipos de cimento (SILVA et al., 2021). Sua massa específica, determinada de acordo com o descrito pela NBR 16605 (ABNT, 2017), é de 3,12 g/cm³, segundo o fabricante. A caracterização e verificação de atendimento aos requisitos para o material estão definidos de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018c).

O agregado miúdo utilizado para a confecção dos corpos de prova é de origem natural, proveniente da região de Guaíra-PR e foi caracterizado de acordo com os requisitos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), utilizando as especificações e ensaios descritos pelas normas dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 - Normatização usada para caracterização do agregado miúdo

Característica	Norma
Distribuição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Densidade e absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021b)
Massa unitária e volume de vazios	NBR 16972 (ABNT, 2021c)
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021d)

Fonte: O autor (2022)

Para alcançar uma amostra satisfatória de areia e buscando preservar a característica de ser um material fino, foi realizada uma seleção de granulometria do agregado miúdo, sendo utilizado todo o material passante a partir da peneira 600 µm.

A água utilizada para os ensaios é proveniente da rede pública de distribuição local, fornecida pela Sanepar.

A adição de metacaulim, com requisitos definidos pela NBR 15894-1 (ABNT, 2010), é proveniente da empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio e trata-se de metacaulim de alta reatividade, com massa específica média de 2,60 g/cm³, massa unitária de 300 a 1000 kg/m³ e diâmetro médio da partícula de 12,4 µm.

A adição de sílica ativa, com requisitos definidos pela NBR 13956-1 (ABNT, 2012b), é proveniente da empresa Tecnosil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda, com massa específica média de 2,22 g/cm³, massa unitária média de 350 kg/m³ e diâmetro médio da partícula de 0,20 µm.

As características dos materiais utilizados foram obtidas por meio de seus respectivos laudos, fornecidos pelos fabricantes, constantes no Anexo A.

3.2 Dosagem e amostragem

Considerando os materiais caracterizados e de acordo com os procedimentos descritos por Namnoum *et al.* (2021) e Jaroenratanapirom e Sahamitmongkol (2010), foi adotado um fator água cimento de 0,4 para o traço de argamassa, resultando no valor de 1:4:0,4 (aglomerante: agregado miúdo: água/cimento) para o traço de referência. Durante a realização de testes com esse traço, percebeu-se uma dificuldade de moldagem devido à baixa trabalhabilidade apresentada, principalmente para o traço com sílica ativa, e, para tanto, fez-se necessário um ajuste de traço. Os traços reajustados são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela resumo dos traços de argamassa adotados para o procedimento experimental (kg/kg de cimento)

	Cimento	Areia	a/c	Sílica Ativa	Metacaulim
REF	1,00	3,00	0,50	0,00	0,00
S10	1,00	3,00	0,50	0,10	0,00
M10	1,00	3,00	0,50	0,00	0,10
SM5	1,00	3,00	0,50	0,05	0,05

Fonte: O autor (2022)

A Tabela 3 descreve o consumo de material para cada metro cúbico de argamassa confeccionada.

Tabela 3 - Tabela resumo de consumo de material para cada traço de argamassa (kg/m³)

	Cimento	Areia	a/c	Sílica Ativa	Metacaulim
REF	369,50	1108,51	184,75	0,00	0,00
S10	332,55	1108,51	184,75	36,95	0,00
M10	332,55	1108,51	184,75	0,00	36,95
SM5	332,55	1108,51	184,75	18,475	18,475

Fonte: O autor (2022)

Para o presente procedimento experimental foram elaboradas três composições para execução dos corpos de prova, além de uma de referência, isto é, sem adições, para efeito de comparação dos parâmetros obtidos posteriormente, com cada um dos casos. Com base nas composições expostas por Jaroenratanapirom

(2010) e Bredy (1988), foram executadas composições substituindo 10% da massa de cimento por adição mineral, sendo a sílica ativa empregada em uma composição, metacaulim em outra e uma última com uma mistura entre as duas adições, mantendo a proporção total de 10% de material adicionado.

De acordo com o descrito pela NBR 13279 (ABNT, 2005), devem ser executados ao menos três corpos de prova para obtenção dos resultados do ensaio. Para o presente procedimento experimental, foram modelados quatro corpos de prova por traço para cada data de ensaio e exposição, totalizando 48 corpos de prova, de modo a permitir uma análise estatística mais precisa e detalhada, bem como prever possíveis perdas de corpos de prova em função do delicado processo de fissuração destes.

Os corpos de prova foram confeccionados com 4 cm de altura, 4 cm de largura e 16 cm de comprimento e foram executados com a finalidade de realizar o ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão previsto pela norma, tendo suas preparações realizadas em conformidade com os procedimentos descritos pela NBR 16541 (ABNT, 2016c) e mantidos por 48 ± 24 h nos moldes antes da desforma, para então passarem pelo processo de cura em imersão completa à temperatura constante de 23 ± 2 °C, em conformidade com a NBR 5738 (ABNT, 2015a).

O primeiro ensaio foi realizado após 28 dias de cura, como solicitado pela respectiva norma, com quatro corpos de prova de cada traço, a fim de se estabelecerem valores de base para o procedimento. Os demais corpos de prova foram submetidos à fissuração por flexão e então a amostra foi dividida ao meio para exposição à dois ambientes diferentes por mais 28 dias, sendo eles: ao ar e imersão completa em água saturada com cal.

3.3 Caracterização físico-mecânica

Para a caracterização de argamassas deve-se determinar o índice de consistência do compósito, o qual será feito seguindo os procedimentos descritos pela NBR 13276 (ABNT, 2016b). Para isso, deve-se posicionar o molde no centro da mesa para índice de consistência, e então, com argamassa fresca, preencher o molde em três camadas com aproximadamente a mesma altura, realizando golpes com o

soquete em cada camada, com o objetivo de promover a distribuição uniforme da mistura.

Depois disso, deve-se rasar o molde e retirá-lo verticalmente, para então acionar a mesa de forma que esta suba e desça 30 vezes em 30 segundos, uniformemente. Após a última queda, deve-se medir o espalhamento da argamassa sobre a mesa com um paquímetro, em três posições distintas. O índice de consistência é definido pela média entre as 3 dimensões obtidas, arredondada para o inteiro mais próximo.

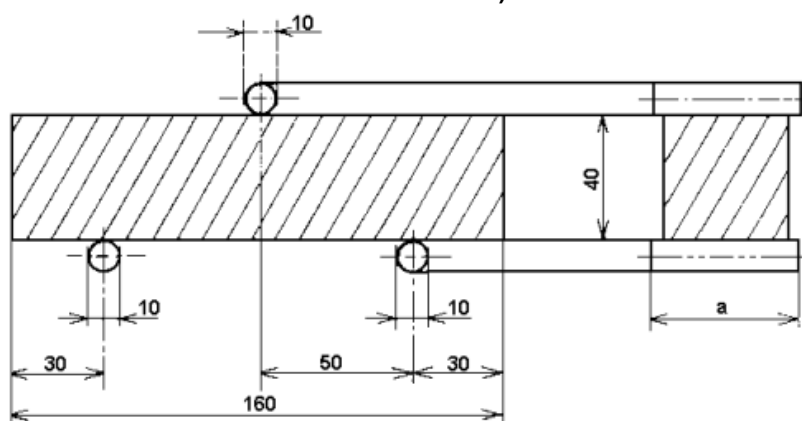
Posteriormente, para todos os traços, foi realizado o ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão, de acordo com o exposto pela NBR 13279 (ABNT, 2005), com as amostras ensaiadas aos 28 dias.

3.4 Avaliação da autocicatrização e recuperação de resistência

Após a fissuração, aos 28 dias, os corpos de prova foram expostos à diferentes ambientes, sendo um o ambiente submerso em solução de água saturada com cal, e o outro ao ar, na qual as amostras foram mantidas em ambiente externo ao tanque de cura, localizado na cidade de Toledo-PR, tendo a temperatura ambiente e umidade relativa do ar monitorados diariamente com o auxílio de um termômetro digital HC520, com a finalidade de acompanhar o envelhecimento das amostras expostas às condições atmosféricas naturais e a influência dos diferentes ambientes no processo de autocicatrização. A temperatura média durante o procedimento foi de 21,48°C e a umidade relativa do ambiente foi de 73,50%.

O procedimento de fissuração, como citado, foi realizado a partir do ensaio de flexão, por meio da utilização da aparelhagem do ensaio de resistência à tração na flexão, representada nas Figuras 8 e 9, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Foi utilizado o ensaio de aplicação de carga na flexão pela utilização de cargas mais baixas que o ensaio de resistência à compressão, resultando em uma maior precisão da aplicação de carga e consequente maior controle do estado de fissuração.

Figura 8 - Dispositivo de carga para determinação da resistência à tração na flexão (dimensões em milímetros)



Fonte: ABNT (2005, p. 8)

Figura 9 - Corpo de prova do traço REF no dispositivo de carga do ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: O autor (2022)

Tomando como base o exposto por Moreira (2016) e Şahmaran *et al.* (2008), que recomendaram em seus trabalhos a utilização de carregamentos superiores a 70% da carga de ruptura do compósito, para ocorrência de um maior grau de fissuração e conseqüente melhor avaliação da influência na resistência mecânica gerada pelo processo de autocicatrização, a aparelhagem foi ajustada para autodeteção de colapso inicialmente em 70%.

Entretanto, a programação de detecção de colapso ajustada para 70% acabou resultando na fragmentação do corpo de prova ao fim do ensaio, exposto pela Figura 10, o que dificulta o processo de autocicatrização.

Figura 10 - Corpo de prova dividido após o colapso



Fonte: O autor (2022)

Assim, após mais alguns testes, foi verificada que a colocação da detecção de colapso em 50% da carga de ruptura proporcionava o cenário ideal para o estudo da autocicatrização e de recuperação de resistência. Com essa proposta, foi possível fissurar o corpo de prova, sem que ocorresse sua completa separação, mas mantendo o critério de colapso, de modo que um simples esforço manual foi capaz de rompê-lo.

Após a fissuração de todos os corpos de prova utilizados, estes foram expostos aos dois diferentes ambientes propostos, ao ar com temperatura e umidade relativa do ar diariamente controladas e em submersão em água saturada com cal hidratada, como mostrado pela Figuras 11a e 11b.

Figura 11 - Ambientes de exposição dos corpos de prova fissurados, ao ar (a) e em submersão (b)



(a)



(b)

Fonte: O autor (2022)

A temperatura e umidade relativa do ambiente da exposição externa ao tanque foi monitorada diariamente por meio de um termo-higrômetro digital HC520, permitindo, assim, que fossem determinadas as condições de ensaio.

3.4.1 Estudo da autocicatrização

As fissuras introduzidas nos compósitos foram acompanhadas ao longo do procedimento experimental, por meio de avaliações visuais com o auxílio de um fissurômetro e também com o auxílio de recursos computacionais de imagem, por meio do Software Tracker, com fotografias obtidas com uma câmera Canon EOS Rebel T7, aos 28 dias após o início das exposições.

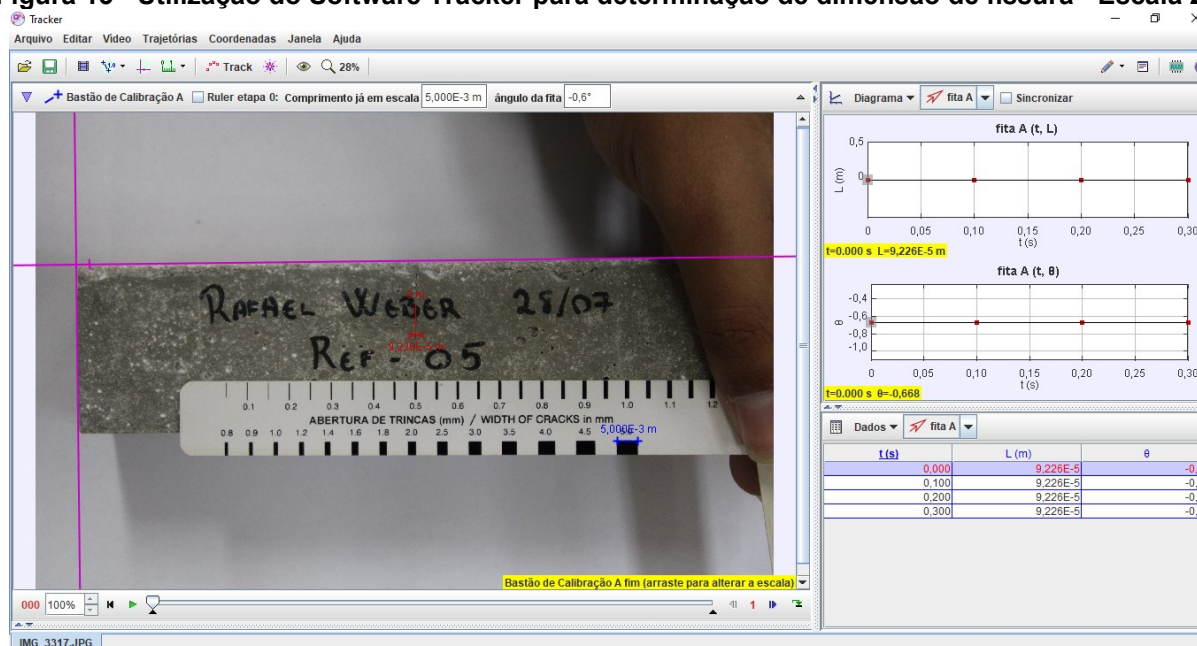
Com a utilização dos recursos de proporção e escala disponíveis no software Tracker, foi possível obter as dimensões das fissuras causadas nos corpos de prova, bem como a nova dimensão após o período de autocicatrização. O procedimento se deu pela determinação de duas escalas diferentes a partir da proporção de um fissurômetro constante na imagem. O valor utilizado é a média entre os dois valores (Figuras 12 e 13).

Figura 12 - Utilização do Software Tracker para determinação de dimensão de fissura - Escala 1



Fonte: O autor (2022)

Figura 13 - Utilização do Software Tracker para determinação de dimensão de fissura - Escala 2



Fonte: O autor (2022)

A partir disso, foram contabilizados todos os dados de antes e depois das exposições, para evidenciar a influência do meio no processo para os diferentes traços

A recuperação de resistência foi ser mensurada pela aplicação de carga na mesma modalidade em que foi aplicada para confecção da fissura, isto é, por meio do ensaio de resistência à tração da flexão, também após 28 dias de exposição.

3.4.2 Estudo da recuperação de resistência

Para a avaliação da recuperação de resistência foi realizado o mesmo ensaio do método de fissuração, a fim de se estabelecer a carga suportada na mesma direção e sentido da força aplicada anteriormente, recriando as condições iniciais de ensaio, mas com uma nova resistência ao esforço.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização

Seguindo os procedimentos experimentais detalhados pela metodologia, foram obtidos os dados necessários para caracterização dos materiais a serem utilizados durante o procedimento, assim como os valores básicos de resistência dos traços após a dosagem destes

4.1.1 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas do ambiente de exposição externamente ao tanque foram diariamente monitoradas para melhor controle da influência principalmente do teor de umidade no ambiente. Os ensaios foram iniciados no dia 26 de agosto de 2022 e se encerraram no dia 21 de outubro de 2022. A temperatura ambiente média resultante e a umidade relativa média do ar estão expostas na Tabela 4. Os Gráficos 1 e 2 representam os dados obtidos pelo acompanhamento diário.

Tabela 4 - Tabela resumo de dados gerais de acompanhamento meteorológico

Temperatura			Umidade Relativa		
Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
14,00°C	21,48 °C	25,80 °C	33,00%	73,50%	94,00%

Fonte: O autor (2022)

Gráfico 1 - Gráfico de acompanhamento diário de temperatura

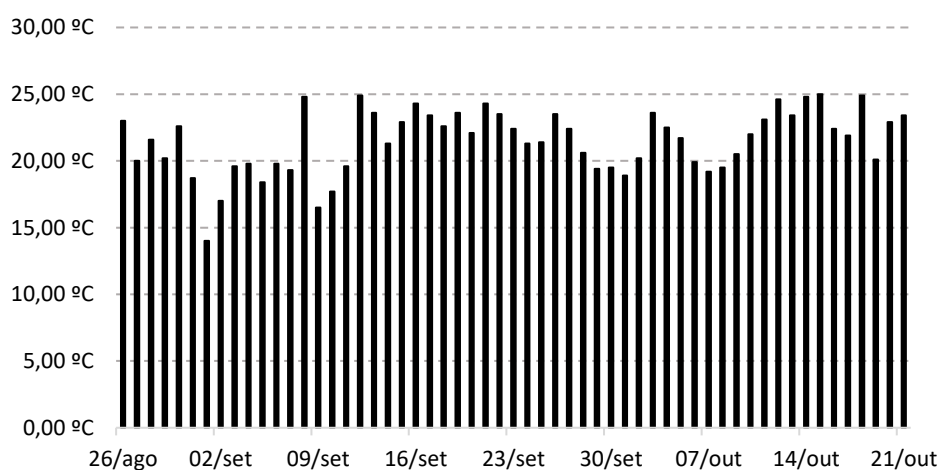
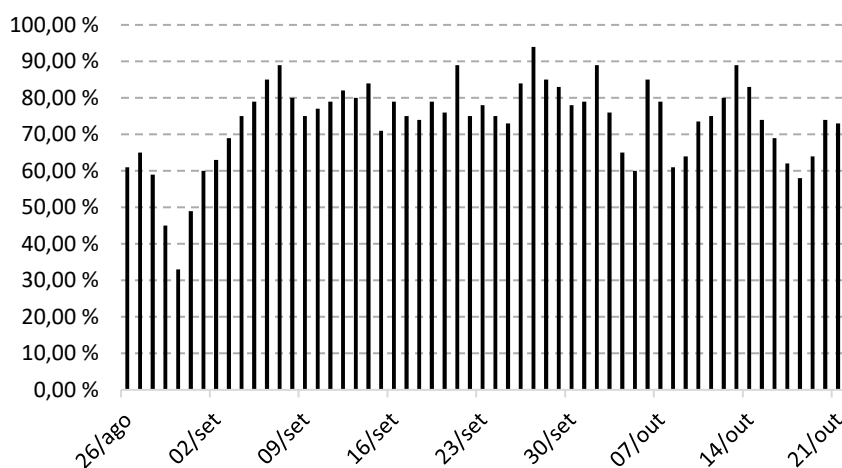


Gráfico 2 - Gráfico de acompanhamento diário de umidade relativa do ar

Fonte: O autor (2022)

4.1.2 Características do agregado miúdo

Seguindo o procedimento detalhado pela Seção 3.1, foram realizados os ensaios normativos para obtenção das características pertinentes à amostra de agregado miúdo disponível em laboratório. Os resultados obtidos são descritos pela Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados da caracterização do agregado miúdo

Característica	Resultado
Módulo de finura	1,41
Massa unitária	1590,82 kg/m ³
Densidade seca	2498,36 kg/m ³
Densidade saturado de superfície seca	2505,03 kg/m ³
Absorção de água	0,27%
Material passante na peneira 75µm	0,51%

Fonte: O autor (2022)

4.1.3 Características físico-mecânicas

A partir dos ensaios propostos pela NBR 13279 (ABNT, 2005), foi possível obter os valores de índice de consistência, resistência à tração na flexão e à compressão.

Os valores para o índice de consistência (Tabela 6), obtidos pelas médias das três medições de diâmetro de espalhamento da argamassa, indicam que o traço com metacaulim sofreu pouca redução em sua trabalhabilidade. Já o traço com mais sílica ativa sofreu uma redução considerável em sua trabalhabilidade, resultando em uma matriz mais porosa pela dificuldade incidida por esse fato no processo de adensamento dos corpos de prova. O traço com as duas adições teve um índice de resistência intermediário, indicando que o equilíbrio entre as proporções das adições é refletido diretamente para a consistência da argamassa.

Tabela 6 - Índices de consistência das argamassas

Traço	Índice de consistência
REF	146,1 mm
S10	124,53 mm
M10	141,27 mm
SM5	135,4 mm

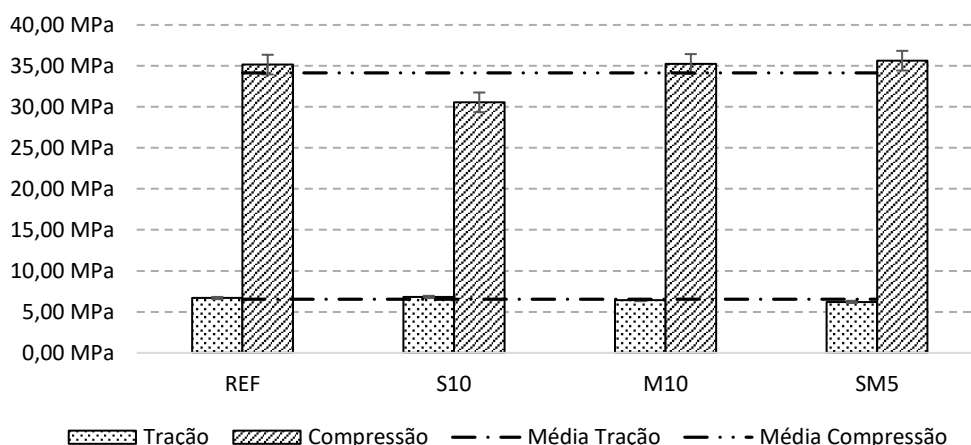
Fonte: O autor (2022)

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram utilizados quatro corpos de prova para cada traço, sendo estes levados ao colapso e, com as duas metades resultantes, foi realizado o ensaio de resistência à compressão para cada traço. A Tabela 7 detalha as resistências por corpo de prova em cada situação de carregamento, bem como as cargas aplicadas para realização de cada ensaio, enquanto o Gráfico 3 representa as resistências médias obtidas para cada traço e modo de ensaio.

Tabela 7 - Resistências à tração na flexão e à compressão médias com respectivas cargas aplicadas por corpo de prova

Traço	CP	Carga na Flexão	Resistência à Tração	Carga na Compressão	Resistência à Compressão
REF	1	2,74 kN	6,42 MPa	52,64 kN	32,90 MPa
				55,45 kN	34,66 MPa
	2	2,88 kN	6,74 MPa	55,29 kN	34,55 MPa
				57,87 kN	36,17 MPa
	3	2,84 kN	6,67 MPa	56,40 kN	35,25 MPa
				56,01 kN	35,00 MPa
	4	2,95 kN	6,91 MPa	58,63 kN	36,65 MPa
57,72 kN				36,07 MPa	
Média	2,85 kN	6,68 MPa	56,25 kN	35,16 MPa	
Desv. Pad.	0,09 kN	0,20 MPa	1,90 kN	1,19 MPa	
S10	1	2,90 kN	6,79 MPa	51,50 kN	32,19 MPa
				52,24 kN	32,65 MPa
	2	2,86 kN	6,71 MPa	48,69 kN	30,43 MPa
				50,62 kN	31,64 MPa
	3	2,91 kN	6,81 MPa	46,18 kN	28,86 MPa
				47,91 kN	29,94 MPa
	4	2,97 kN	6,96 MPa	45,95 kN	28,72 MPa
48,02 kN				30,01 MPa	
Média	2,91 kN	6,82 MPa	48,89 kN	30,55 MPa	
Desv. Pad.	0,04 kN	0,10 MPa	2,35 kN	1,47 MPa	
M10	1	2,85 kN	6,69 MPa	56,31 kN	35,19 MPa
				56,27 kN	35,17 MPa
	2	2,64 kN	6,18 MPa	58,15 kN	36,34 MPa
				56,72 kN	35,45 MPa
	3	2,80 kN	6,57 MPa	59,62 kN	37,26 MPa
				56,61 kN	35,38 MPa
	4	2,69 kN	6,30 MPa	53,43 kN	33,39 MPa
53,92 kN				33,70 MPa	
Média	2,75 kN	6,44 MPa	56,38 kN	35,24 MPa	
Desv. Pad.	0,10 kN	0,23 MPa	2,02 kN	1,26 MPa	
SM5	1	2,61 kN	6,11 MPa	58,42 kN	36,51 MPa
				54,98 kN	34,36 MPa
	2	2,66 kN	6,23 MPa	53,59 kN	33,49 MPa
				58,45 kN	36,53 MPa
	3	2,77 kN	6,50 MPa	59,50 kN	37,19 MPa
				55,83 kN	34,89 MPa
	4	2,57 kN	6,01 MPa	59,20 kN	37,00 MPa
56,18 kN				35,11 MPa	
Média	2,65 kN	6,21 MPa	57,14 kN	35,64 MPa	
Desv. Pad.	0,09 kN	0,21 MPa	2,17 kN	1,36 MPa	

Fonte: O autor (2022)

Gráfico 3 - Resistências médias à tração na flexão e à compressão por traço

Fonte: O autor (2022)

Considerando os valores médios de resistência à tração e à compressão e seus respectivos valores de desvio padrão, observa-se um valor de coeficiente de variação de 4,09% e 7,04%, respectivamente, e, para tanto, verifica-se que não houve variação expressiva entre eles, com exceção do traço com 10% de sílica ativa, que teve um leve decréscimo em relação às demais médias, ficando fora do intervalo abrangido pelo desvio padrão.

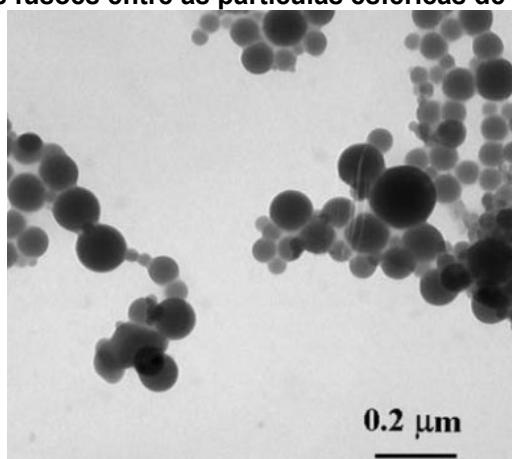
A não variação das resistências com colocação de adições minerais se deve ao fato da zona de transição, ou seja, ligações entre a interface do agregado e a matriz cimentícia, da argamassa experimentada ser muito menor do que a utilizada pelas referências citadas, como Carmo e Portella (2008). A redução dos grãos de uma amostra faz com que sua superfície específica seja aumentada (DANE; TOPP, 2002) o que, em teoria, poderia aumentar a zona de transição deste agregado, considerando que esta é gerada nessa região (LIAO *et al.*, 2004).

Contudo, verifica-se que com a redução das partículas ocorre um melhor empacotamento granular (CHRIST *et al.*, 2019), levando a uma matriz menos porosa e com menos espaço para formação da zona de transição. Isso acaba por reduzir a área de atuação das adições utilizadas, levando a um cenário não tão eficiente quanto o encontrado em matrizes com agregados de maiores dimensões.

O fato de a resistência à compressão dos corpos de prova com sílica ativa terem sido inferiores aos demais pode ter sido influenciada pela menor trabalhabilidade encontrada para este traço, mesmo com a adição possuindo uma superfície específica menor que o metacaulim, sendo 19.000 m²/kg para a sílica e 23.000 m²/kg para o metacaulim, de acordo com os fabricantes (Anexo A).

Outro fato que pode explicar a leve redução da resistência desse traço é a ocorrência de aglomerados verificados nas partículas de sílica ativa. Diamond e Sahu (2006) dizem que as partículas esféricas de sílica ativa comumente geram *links* de fusão nas regiões de contato com outras partículas de sílica, podendo atingir centenas de esferas fundidas em um mesmo aglomerado, chamado de “efeito aglomerante” (Figura 14).

Figura 14 - Micrografia das fusões entre as partículas esféricas de uma amostra de sílica ativa



Fonte: Adaptado de Diamond e Sahu (2006, p. 851)













Segundo Yajun e Cahyadi (2003), esse efeito acaba por gerar uma densificação da matriz de sílica, isolando ou diminuindo o contato de algumas partículas com a matriz cimentícia, gerando uma menor taxa de reatividade da adição com o hidróxido de cálcio liberado pelo processo de hidratação do cimento. Os autores ainda relatam um estudo sobre o efeito que verificou partículas não reagentes de sílica em uma matriz durante um ano inteiro de cura.

4.2 Verificação da autocicatrização

4.2.1 Fissuração

Quanto as dimensões das aberturas de fissuras, a Tabela 8 exemplifica o estado de fissuração inicial e o estado de fissuração após 28 dias de exposição para cada um dos dois ambientes de exposição propostos.

Tabela 8 - Estados de fissuração inicial e após exposições, para todos os traços

Traço	Inicial	28 dias ao ar	28 dias submerso
REF			
S10			
M10			
SM5			

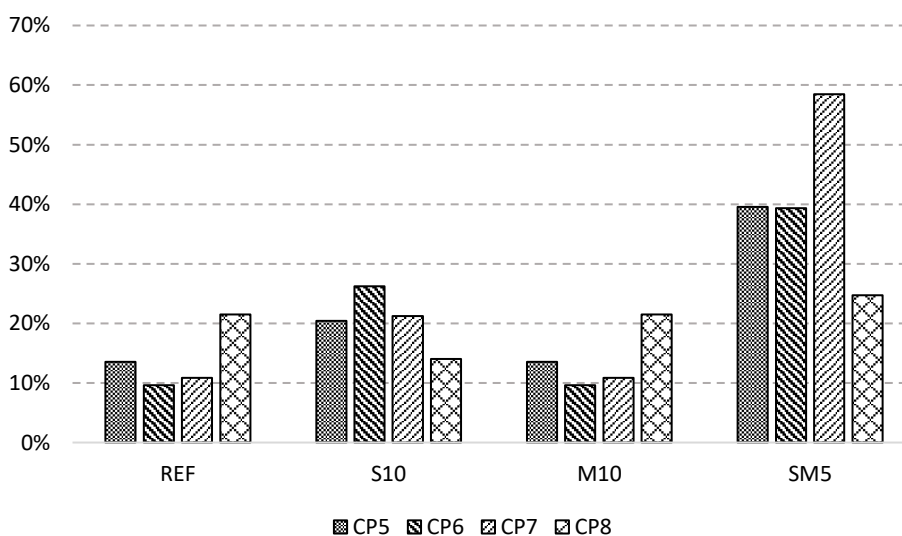
Fonte: O autor (2022)

A Tabela 9 representa detalhadamente o estudo de autocicatrização dos corpos de prova de acordo com cada traço e exposição, enquanto os Gráficos 4 e 5 demonstram um comparativo entre os corpos de prova de cada traço, ambos de maneira porcentual.

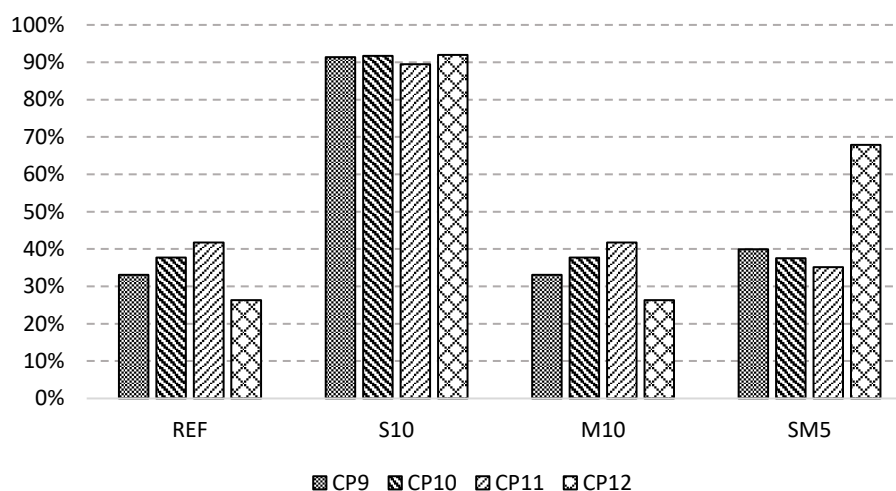
Tabela 9 - Estudo de autocicatrização

Traço	CP	Abertura Inicial	Abertura 28 Dias	Exposição	Recuperação	Média	Fechamento de Fissura
REF	5	0,0917 mm	0,0899 mm	Ar	-0,0019 mm	-0,0036 mm	4,22%
	6	0,0847 mm	0,0815 mm	Ar	-0,0032 mm		
	7	0,0939 mm	0,0899 mm	Ar	-0,0040 mm		
	8	0,0753 mm	0,0698 mm	Ar	-0,0055 mm		
	9	0,0828 mm	0,0755 mm	Submerso	-0,0073 mm	-0,0047 mm	5,20%
	10	0,0992 mm	0,0886 mm	Submerso	-0,0106 mm		
	11	0,0874 mm	0,0866 mm	Submerso	-0,0008 mm		
	12	0,0921 mm	0,0920 mm	Submerso	-0,0001 mm		
M10	5	0,1150 mm	0,0994 mm	Ar	-0,0156 mm	-0,0160 mm	14,16%
	6	0,1082 mm	0,0978 mm	Ar	-0,0104 mm		
	7	0,1052 mm	0,0938 mm	Ar	-0,0114 mm		
	8	0,1234 mm	0,0969 mm	Ar	-0,0265 mm		
	9	0,1314 mm	0,0880 mm	Submerso	-0,0435 mm	-0,0424 mm	34,88%
	10	0,1154 mm	0,0718 mm	Submerso	-0,0436 mm		
	11	0,1268 mm	0,0739 mm	Submerso	-0,0529 mm		
	12	0,1123 mm	0,0827 mm	Submerso	-0,0296 mm		
S10	5	0,1345 mm	0,1070 mm	Ar	-0,0275 mm	-0,0264 mm	20,72%
	6	0,1353 mm	0,0999 mm	Ar	-0,0355 mm		
	7	0,1248 mm	0,0983 mm	Ar	-0,0265 mm		
	8	0,1153 mm	0,0991 mm	Ar	-0,0162 mm		
	9	0,1241 mm	0,0107 mm	Submerso	-0,1134 mm	-0,1036 mm	91,16%
	10	0,1125 mm	0,0093 mm	Submerso	-0,1032 mm		
	11	0,1070 mm	0,0113 mm	Submerso	-0,0958 mm		
	12	0,1108 mm	0,0089 mm	Submerso	-0,1019 mm		
SM5	5	0,0639 mm	0,0386 mm	Ar	-0,0253 mm	-0,0297 mm	42,79%
	6	0,0534 mm	0,0324 mm	Ar	-0,0210 mm		
	7	0,0972 mm	0,0404 mm	Ar	-0,0568 mm		
	8	0,0627 mm	0,0472 mm	Ar	-0,0155 mm		
	9	0,0772 mm	0,0464 mm	Submerso	-0,0308 mm	-0,0320 mm	44,54%
	10	0,0716 mm	0,0447 mm	Submerso	-0,0269 mm		
	11	0,0724 mm	0,0469 mm	Submerso	-0,0254 mm		
	12	0,0658 mm	0,0212 mm	Submerso	-0,0447 mm		

Fonte: O autor (2022)

Gráfico 4 - Comparativo de fechamento de fissura para exposição ao ar

Fonte: O autor (2022)

Gráfico 5 - Comparativo de fechamento de fissura para exposição submersa

Fonte: O autor (2022)

Assim como esperado, os corpos de prova que não continham adições não obtiveram valores significativos de fechamento de fissuras, não chegando a ultrapassar 8% de fechamento da fissura original, ficando apenas com uma película superficial gerada pela própria solução de cal na qual os corpos da exposição submersa estavam contidos. As aberturas de fissuras para o traço REF variaram entre 0,0753 e 0,0992 mm, não tendo cicatrizações eficientes, independente do ambiente de exposição, com taxa máxima de fechamento estabelecida em 5,20%, no ambiente submerso.

Já os corpos de prova que continham adição de sílica ativa, obtiveram aberturas de fissuras com dimensões maiores, variando entre 0,1070 e 0,1353 mm. Em ambiente com menor umidade, a autocicatrização não apresentou resultados eficientes, apesar de ainda assim superiores ao compósito de referência, mas, em compensação, no ambiente submerso obtiveram de maneira isolada a melhor taxa de autocicatrização, fechando, em média, 91,16% do espaço da fissuração.

Esse fato reforça o exposto por Jaroenratanapirom (2010), de que, de fato, compósitos contendo sílica ativa tem maiores taxas de autocicatrização e capacidade de preenchimento de fissuras de maiores dimensões. Isso ocorre em função da reação das partículas de sílica ativa com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento. Silva *et al.* (2021) mostrou que amostras contendo o CPV apresentaram maiores teores de Ca(OH)_2 lixiviado sobre a superfície dos corpos de prova, independente do ambiente em que está contido, o que facilita o fechamento das fissuras não só no interior do compósito mas também sobre a sua superfície.

Os corpos de prova contendo metacaulim, por sua vez, ficaram em um nível intermediário. Suas taxas de cicatrização não foram elevadas, mesmo com aberturas de fissuras com dimensões semelhantes às do traço anterior, variando entre 0,1052 e 0,1314 mm.

É importante observar a taxa reduzida de fechamento de fissuras quando sujeito ao ambiente com menor incidência de umidade ambiente. Alshaaer (2020) e Kan (2019) expuseram que geopolímeros contendo adição de metacaulim possuíam características promissoras no que diz respeito à cicatrização de fissuras em ambientes de baixa umidade. Seja pela diferença entre a matriz cimentícia e a matriz geopolimérica ou pela aparição de um resultado realmente contrário, o metacaulim nesse caso, não se fez eficiente.

Tendo aberturas de fissuras que variaram entre 0,0534 e 0,0972 mm, os corpos de prova contendo ambas adições retornaram resultados promissores. Apesar das amostras contendo apenas metacaulim ou sílica ativa não terem sido eficientes na cicatrização da fissura em ambiente com menor teor de umidade, quando combinadas as adições o resultado é outro. Na composição ocorreu a melhor taxa de cicatrização no ambiente externo do presente procedimento experimental, atingindo 42,79% de fechamento de fissura, quase igualando a cicatrização da matriz mantida em ambiente submerso.

Bilal *et al.* (2021) mostraram que matrizes compostas por ambas as adições retornaram valores maiores de resistência, principalmente em idades avançadas, o que indica que os produtos de reação dessa matriz possuem elevada rigidez, bem como que a incorporação de um material muito fino como o metacaulim age na redução da permeabilidade, mantendo as partículas de água, absorvidas no processo de cura, retidas por maiores períodos de tempo no interior do compósito que, por sua vez, auxiliam nas reações das demais adições da matriz, como a sílica ativa.

4.2.2 Estudo da recuperação de resistência

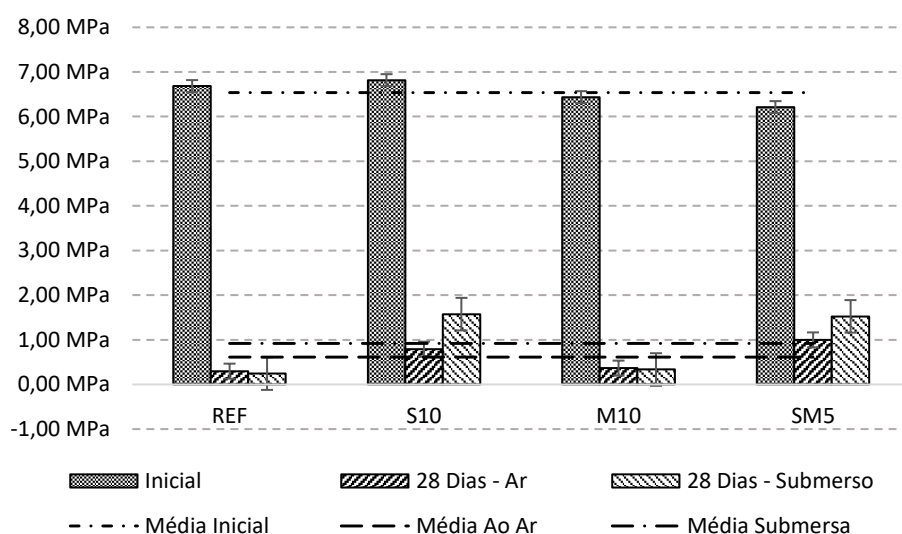
Os resultados detalhados para a recuperação de resistência mecânica estão contidos na Tabela 10. O Gráfico 6 faz a comparação entre as resistências antes e depois do processo de cicatrização das fissuras.

Tabela 10 - Resistências à tração antes e depois da cicatrização, com respectivas recuperações mecânicas

Traço	Resistência à Tração			Recuperação Mecânica	
	Inicial	Ao Ar	Submersa	Ao Ar	Submersa
REF	6,42 MPa	0,36 MPa	0,27 MPa	5,60%	4,20%
	6,74 MPa	0,27 MPa	0,22 MPa	4,01%	3,26%
	6,67 MPa	0,17 MPa	0,26 MPa	2,55%	3,90%
	6,91 MPa	0,39 MPa	0,22 MPa	5,65%	3,18%
S10	6,79 MPa	0,77 MPa	1,55 MPa	11,35%	22,84%
	6,71 MPa	0,77 MPa	1,69 MPa	11,47%	25,17%
	6,81 MPa	0,77 MPa	1,47 MPa	11,31%	21,58%
	6,96 MPa	0,85 MPa	1,59 MPa	12,22%	22,86%
M10	6,69 MPa	0,34 MPa	0,14 MPa	5,08%	2,09%
	6,18 MPa	0,29 MPa	0,41 MPa	4,69%	6,63%
	6,57 MPa	0,27 MPa	0,19 MPa	4,11%	2,89%
	6,30 MPa	0,56 MPa	0,60 MPa	8,88%	9,52%
SM5	6,11 MPa	1,09 MPa	1,42 MPa	17,84%	23,24%
	6,23 MPa	1,18 MPa	1,47 MPa	18,94%	23,59%
	6,50 MPa	0,87 MPa	1,28 MPa	13,39%	19,70%
	6,01 MPa	0,85 MPa	1,93 MPa	14,13%	32,09%

Fonte: O autor (2022)

Gráfico 6 - Resistências médias à tração na condição inicial e após o período de recuperação em diferentes exposições



Fonte: O autor (2022)

É possível visualizar que os traços que contêm sílica ativa, independentemente da quantidade, proporcionaram maior eficiência na recuperação mecânica principalmente no ambiente submerso, tendo recuperado, em média, 23,11% de resistência para o traço S10 e 24,66% de resistência para o traço SM5. Esse resultado converge, também, com a eficiência de preenchimento do estado de fissuração apresentado na Seção 4.2.1.

Verifica-se, também, que, apesar da adição de metacaulim por si só não ser eficiente para recuperação mecânica, em composição com a sílica ativa, este acabou por potencializar as capacidades de recuperação também em ambientes com menores teores de umidade relativa, ambiente que, nesta composição, apresentou um acréscimo de mais de 20% de eficiência da cicatrização de estados de fissuração em relação aos demais traços (Tabela 9). Para este traço, obteve-se o maior valor de recuperação mecânica para o ambiente em submersão, tendo corpos de prova com recuperação superior à 30% da resistência à tração média para o traço (Tabela 10), apesar do traço apenas com sílica ativa ter sido protagonista de maneira geral no procedimento experimental.

Conforme exposto pelos gráficos, os valores de recuperação de resistência mecânica mais significativos foram provenientes dos dois traços contendo sílica ativa, especificamente em submersão, tendo ambas girado em torno de 24% de recuperação. Para esse fator de análise, o traço contendo apenas metacaulim pouco se diferenciou do traço de referência, mostrando que os produtos de hidratação tardios não possuem a mesma rigidez que os formados por matrizes com sílica ativa.

4.3 Análise de variância

Buscando um grau de confiabilidade maior nas análises feitas, utilizou-se de recursos estatísticos para validar as considerações. Com base na análise dos dados de resistência e fissuração por regressão linear, constatou-se que os resultados seguem o modelo de distribuição normal. A partir disso, foi realizada a análise estatística dos dados, com base na análise de variância dos resultados.

Para traços com letras iguais na coluna de significância, a diferença entre as médias não é estatisticamente significativa enquanto letras diferentes representa que a diferença entre as médias é estatisticamente significativa.

4.3.1 Resistência

Utilizando os valores de resistência à tração para cada traço tanto na condição inicial, isto é, após a cura, mas sem a presença de fissuras no corpo de prova, quanto nas condições de exposição aos ambientes por 28 dias, executou-se o cálculo da

análise de variância com auxílio do Software Excel (Tabela 11), para verificação da existência de diferenças significativas entre os dados amostrais.

Tabela 11 - Dados para análise de variância de fator duplo com repetição

RESUMO	Inicial	28 Ar	28 Sub	Total	RESUMO	Inicial	28 Ar	28 Sub	Total
<i>REF</i>					<i>S10</i>				
Contagem	4	4	4	12	Contagem	4	4	4	12
Soma	26,736	1,190	0,970	28,896	Soma	27,268	3,160	6,300	36,728
Média	6,684	0,298	0,243	2,408	Média	6,817	0,790	1,575	3,061
Variância	0,040	0,010	0,001	9,988	Variância	0,010	0,002	0,008	7,814
<i>M10</i>					<i>SM5</i>				
Contagem	4	4	4	12	Contagem	4	4	4	12
Soma	25,746	1,460	1,340	28,546	Soma	24,852	3,990	6,100	34,942
Média	6,437	0,365	0,335	2,379	Média	6,213	0,998	1,525	2,912
Variância	0,055	0,018	0,045	9,013	Variância	0,044	0,027	0,079	6,036
<i>Total</i>									
Contagem	16	16	16						
Soma	104,602	9,800	14,710						
Média	6,538	0,613	0,919						
Variância	0,087	0,102	0,452						

Fonte: O autor (2022)

A partir disso, o software calculou os valores de base para utilização na análise estatística, relacionados na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados amostrais

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	4,355169	3	1,451723	51,5403	4,1E-13	2,8662656
Colunas	356,0886	2	178,0443	6321,078	1,4E-46	3,2594463
Interações	4,250716	6	0,708453	25,15209	1,7E-11	2,363751
Dentro	1,014003	36	0,028167			
Total	365,7085	47				

Fonte: O autor (2022)

Assim, calculou-se o valor da diferença mínima significativa e, por meio do Teste de Tukey, verificou-se se a diferença amostral superava esse valor, comparando as amostras de mesma idade em pares (Tabela 13).

Tabela 13 - Teste de Tukey para comparação de médias de resistência

dms 0,320		
Comparativo - Condição Inicial		
Traço	Média	Significância
REF	6,6841	AB
S10	6,8169	A
M10	6,4365	BC
SM5	6,2131	C
Comparativo - 28 Dias Ao Ar		
Traço	Média	Significância
REF	0,2975	A
S10	0,7900	B
M10	0,3650	A
SM5	0,9975	B
Comparativo - 28 Dias Submerso		
Traço	Média	Significância
REF	0,2425	A
S10	1,5750	B
M10	0,3350	A
SM5	1,5250	B

Fonte: O autor (2022)

Com base nos resultados do comparativo realizado, o retorno de igualdade de relação entre os traços REF e M10 em todas as condições e exposições, verificou-se que, assim como já relatado, a adição de metacaulim não teve ação significativa no cenário de autocicatrização e recuperação de resistência quando aplicada isoladamente na matriz, já que suas características se assemelham às do traço de referência, sem adições, independentemente da idade do corpo de prova ou ambiente a que foi submetido.

Outro fato que se observa, para o cenário após a cicatrização, é a relação de igualdade estatística entre os traços S10 e SM5, indicando que ambas tiveram resultados próximos. Isso mostra que, mesmo com a adição de metacaulim não ser eficiente de maneira isolada, sua combinação com a sílica ativa mantém propriedades parecidas com as do compósito apenas com sílica, mesmo com a redução de sua proporção de 10 para 5%.

4.3.2 Autocicatrização

Seguindo os mesmos critérios e métodos de cálculo da Seção 4.3.1, foi realizada a análise de variância de fator duplo com repetição também para os resultados de fissuração e autocicatrização. As Tabelas 14 e 15 contêm os resultados dessas análises para as diferentes exposições.

Tabela 14 - Teste de Tukey para comparação das médias de aberturas de fissuras na condição inicial e após cicatrização ao ar
dms 0,018

Comparativo - Condição Inicial		
Traço	Média	Significância
REF	0,1130	A
S10	0,1275	A
M10	0,1130	A
SM5	0,0693	B
Comparativo - 28 Dias Ao Ar		
Traço	Média	Significância
REF	0,0970	A
S10	0,1011	A
M10	0,0970	A
SM5	0,0397	B

Fonte: O autor (2022)

Tabela 15 - Teste de Tukey para comparação das médias de aberturas de fissuras na condição inicial e após cicatrização submersa
dms 0,016

Comparativo - Condição Inicial		
Traço	Média	Significância
REF	0,1215	A
S10	0,1136	A
M10	0,1215	A
SM5	0,0717	B
Comparativo - 28 Dias Submerso		
Traço	Média	Significância
REF	0,0791	A
S10	0,0100	B
M10	0,0791	A
SM5	0,0398	C

Fonte: O autor (2022)

Considerando os dados expostos pela Tabela 14 é possível visualizar que realmente os estados de fissuração e cicatrização ao ar foram melhores para o traço

SM5, sendo o único divergente para a primeira análise de variância, por possuir amplitude de fechamento de fissura grande, resultando em um valor acima da diferença mínima significativa desse teste.

Por outro lado, a Tabela 15 deixa claro que, por ser o único que se assemelhou com as características de cicatrização do traço REF nessa análise de variância, o traço M10 não se fez eficiente para a cicatrização em ambientes com menores teores de umidade.

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados discutidos, é possível visualizar que os melhores resultados tanto no quesito cicatrização quanto na recuperação de resistência foram melhores para os dois traços que continham sílica ativa em sua composição. O traço S10 apresentou 23,11% de recuperação mecânica média em relação ao esforço solicitante inicial e taxa de fechamento de fissura de 91,16%, ambas para o ambiente submerso. Já o traço SM5 apresentou uma taxa de 24,66% de recuperação mecânica média e 44,54% de taxa de autocicatrização, ambas para o ambiente submerso.

Foi nítido, pela semelhança de resultados entre o traço REF e o traço M10 que a adição de metacaulim, quando aplicada de maneira isolada em uma matriz cimentícia, não proporciona de maneira eficiente as características de autocicatrização e recuperação de resistência.

Apesar de isoladamente a adição de metacaulim não ter proporcionado bons resultados, quando combinada com a adição de sílica ativa as características de cicatrização e recuperação de resistência ao ar foram significativamente influenciadas. Para o traço SM5 houve um acréscimo de 28,63% na eficiência de fechamento de fissuras e de 10,38% na recuperação de resistência em relação ao traço M10. Para o traço SM5 em exposição ao ar a taxa de recuperação mecânica média foi de 16,08% e a taxa de fechamento de fissuras de 42,79%, sendo esta última maior que o dobro do traço mais próximo.

Portanto, verifica-se que é válida a aplicação conjunta das duas adições referidas pela potencialização das características de autocicatrização autógena do compósito bem como aumento da recuperação de resistência mecânica independentemente do ambiente de exposição em que este está submetido.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M. S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252–2261, 2011.
- ALSHAAER, M. Synthesis and characterization of self-healing geopolymer composite. **Construction and Building Materials**, v. 245, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579**: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11582**: Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland: Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho: Parte 1 - Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta: Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16606**: Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607**: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973**: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021d.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125-18**: Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates, 2018.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 1

BILAL, H. et al. Influence of silica fume, metakaolin & SBR latex on strength and durability performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 275, 2021.

BREDY, P.; CHABANNET, M.; PERA, J. Microstructure and Porosity of Metakaolin Blended Cements. **MRS Online Proceedings Library**, v. 137, p. 431–436, 1988.

CARMO, J. B. M. DO; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, p. 309–318, 2008.

CARVALHO, J. D. N. DE. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, v. 17, p. 19–28, 2008.

CHRIST, R. et al. Conceitos e aplicações de concreto de ultra alto desempenho: Panorama nacional e internacional. **Diálogos: Economia e sociedade**, n. 1, p. 89–102, 2019.

DANE, J. H.; TOPP, C. G. Specific Surface Area. Em: **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. [s.l.] Access, 2002. p. 295–315.

DEJA, J.; ULIASZ-BOCHENCZYK, A.; MOKRZYCKI, E. CO₂ emissions from Polish cement industry. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 4, n. 4, p. 583–588, 2010.

DIAMOND, S.; SAHU, S. **Densified silica fume: Particle sizes and dispersion in concrete**. Materials and Structures/Materiaux et Constructions. **Anais...**Springer Netherlands, 2006.

DRY, C. Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. **Smart Materials and Structures**, v. 3, p. 118, 1994.

DUARTE, H. S.; BARBOSA, M.; FARIAS, B. M. DE. Fissuras em estruturas de concreto armado: Um estudo de caso. Em: **Construção Civil: Engenharia e Inovação**. 1. ed. Rio de Janeiro: Epitaya LTDA, 2019. v. 3p. 41–91.

FILHO, J. H. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.

HASHIN, Z. Analysis of Composite Materials - A Survey. **Journal of Applied Mechanics**, v. 50, p. 481–505, 1983.

HUANG, H.; YE, G.; PEL, L. New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests. **Materials and Structures**, v. 49, n. 7, p. 2509–2524, 2016.

JAROENRATANAPIROM, D.; SAHAMITMONGKOL, R. Effects of Different Mineral Additives and Cracking Ages on Self-Healing Performance of Mortar. **Annual Concrete Conference 6**, p. 550–556, 2010.

KAN, L. et al. Self-healing of Engineered Geopolymer Composites prepared by fly ash and metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 125, 2019.

LI, V. C.; LIM, Y. M.; CHAN, Y.-W. Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. **Composites Part B: Engineering**, v. 29, n. 6, p. 819–827, 1998.

LIAO, K. Y. et al. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 977–989, 2004.

LIN, B.; ZHANG, Z. Carbon emissions in China's cement industry: A sector and policy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1387–1394, 2016.

LISBOA, E. DE S.; ALVES, E. DOS S.; MELO, G. H. A. G. DE. **Materiais de Construção: Concreto e Argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: Grupo A, 2017.

MARTINS, R. DE A.; FERREIRA, R. R. **Contágio: história da prevenção das doenças transmissíveis**. São Paulo: Moderna, 1997.

MAURY, M. B.; BLUMENSCHNEIN, R. N. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 1, p. 75–96, 2012.

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

MOLITERNO, A. **Caderno de estruturas em alvenaria e concreto simples**. [s.l.] Editora Blucher, 1995.

MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland - contribuição aos processos de autocicatrização**. Brasília: Universidade de Brasília, 2016.

NAMNOUM, C. Y. et al. Determination of the origin of the strength regain after self-healing of binary and ternary cementitious materials including slag and metakaolin. **Journal of Building Engineering**, v. 41, 2021.

NEVILLE, A. M. Autogenous Healing: A Concrete Miracle? **Concrete International**, v. 24, n. 11, p. 76–82, 2002.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology**. 2. ed. New York City: Pearson Education Limited, 2010.

SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 6, p. 441–454, 2001.

ŞAHMARAN, M. et al. Self-healing of mechanically-loaded self consolidating concretes with high volumes of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 872–879, 2008.

SALGADO, J. C. P. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 4. ed. [s.l.] Editora Saraiva, 2018.

SALVI MALACARNE, C. et al. Environmental and technical assessment to support sustainable strategies for limestone calcined clay cement production in Brazil. **Construction and Building Materials**, v. 310, 2021.

SÁNCHEZ BERRIEL, S. et al. Assessing the environmental and economic potential of Limestone Calcined Clay Cement in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 361–369, 2016.

SCRIVENER, K. et al. Calcined clay limestone cements (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, 2018.

SILVA, D. M. G. DA et al. Calcium hydroxide influence in autogenous self-healing of cement-based materials in various environmental conditions. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 2, p. 209–224, abr. 2021.

SITTER, W. R. DE. **CEB-RILEM Workshop on Durability of Concrete Structures**. Costs of service life optimization “The Law of Fives”. **Anais...**Copenhagen: Comité Euro-International du Béton, 1984.

SOUZA, V. C. M. DE; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2009.

VAN OSS, H. G.; PADOVANI, A. C. Cement Manufacture and the Environment Part I: Chemistry and Technology. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 1, p. 89–105, 2002.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. Self-Healing in Cementitious Materials - A review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 2013.

YAJUN, J.; CAHYADI, J. H. Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 10, p. 1543–1548, 2003.

ANEXO A - Laudos técnicos dos materiais

Laudo técnico cimento CPV

REFERÊNCIA	Cimento Portland	CPVSac	DATA DE EMISSÃO	29/09/2021
REFERENCE	Portland Cement Ciment Portland		DATE	
FÁBRICA	Adrianópolis	DATA DE ANÁLISE	09/08/2021	a 31/08/2021
PLANT USINE		PRODUCTION DATE DATE DE PRODUCTION		

ENSAIOS MECÂNICOS	NORMA	ANÁLISE QUÍMICA	NORMA
MECHANICAL TESTS ESSAIS MECANIKUES	NBR 16697	CHEMICAL ANALYSIS ANALYSE CHIMIQUE	NBR 16697

IDADE AGE	Resistência à Compressão Compressive Strength Résistance à la Compression		
1 dia day jour	MPa	22,5	≥ 14
3 dias days jours	MPa	37,3	≥ 24
7 dias days jours	MPa	42,1	≥ 34
28 dias days jours	MPa		--

ENSAIOS FÍSICOS	NORMA
PHYSICAL TESTS ESSAIS PHYSIQUES	NBR 16697

Massa Específica (g/cm ³) Specific Weight Masse Volumique	3,12			
Peso Litro (g/l) Bulk Density Densité Apparent	NA			
Resíduo de Peneiração (%) Sieve Residue Residue de Tamisage	90 µm	NA		
	75 µm		≤ 6,0	
	45 µm			
	32 µm	6,93		
Sup. Específica de Blaine (cm ² /g) Blaine Spec. Surface Surface spécif. Blaine			≥ 3000	
Água na Pasta Normal (%) Water Demand Eau de Gâchage	28,58			
Tempo de Pega (min) Setting Time Temps de Prise	Início Initial Debut	246	≥ 60	
	Fim Final Fin	310	≤ 600	
Expansibilidade (mm) Soundness Expansion			≤ 5,0	

Obs.

Perda ao Fogo Loss on Ignition Perte au Feu	%	--	8,1	≤ 6,5
Resíduo Insolúvel Insoluble Residue Résidu Insoluble	%	--	1,9	≤ 3,5
Óxido de Silício Silicon Oxide Oxyde de Silicium	%	SiO ₂	18,3	
Óxido de Alumínio Aluminium Oxide Oxyde de Aluminium	%	Al ₂ O ₃	4,6	
Óxido de Ferro Ferric Oxide Oxyde de Fer	%	Fe ₂ O ₃	3,2	
Óxido de Cálcio Calcium Oxide Oxyde de Calcium	%	CaO	58,8	
Óxido de Magnésio Magnesium Oxide Oxyde de Magnésium	%	MgO	6,0	≤ 6,5
Sulfatos Sulfates Sulfates	%	SO ₃	2,3	≤ 4,5
Óxido de Potássio Potassium Oxide Oxyde de Potassium	%	K ₂ O	0,91	
Óxido de Sódio Sodium Oxide Oxyde de Sodium	%	Na ₂ O	0,15	
Cloretos Chloride Chlorures	%	Cl	0,0	
Anidrido Carbônico Carbon dioxide Dioxyde de Carbon	%	CO ₂	5,0	≤ 5,5
Cal Livre Free Lime Chaux Libre	%		0,8	
Fator de Saturação da Cal Lime Saturation Factor Depot de Chaux			100,0	
Módulo de Silica Silica Ratio Indice Silicieux			2,4	
Módulo de Alumina Alumina-iron Ratio Indice Alumineux			1,5	

ANÁLISE MINERALÓGICA		XRD
MINEROLOGICAL ANALYSIS ANALYSE MINÉRALOGIQUE		

Silicato Tricálcico Tricalcium Silicate Silicate Tricalcique	%	C3S	54,26	
Silicato Bicálcico Dicalcium Silicate Silicate Bicalcique	%	C2S	7,25	
Aluminato Tricálcico Tricalcium Aluminate Aluminate Tricalcique	%	C3A	3,10	
Ferro-aluminato Tetracálcico Tetracalcium Aluminoferrite Ferraluminat Tetracalcique	%	C4AF	9,85	

Fonte: Supremo Secil Cimentos (2022)

Laudo técnico metacaulim HP ultra

**METACULIM
HP ULTRA**

Coloração		Creme claro
Propriedades Físico-Químicas	Valores típicos	Valores limites (NBR 15.894)
SiO ₂	57%	44% a 65%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%
SO ₃	< 0,1%	< 1%
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%
Fe ₂ O ₃	2%	-
TiO ₂	1,5%	-
Umidade	0,5%	< 2%
Perda ao Fogo	3%	< 4%
Resíduo #325	6%	< 10%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) ₂ /g	> 750mg Ca(OH) ₂ /g
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g
Massa Específica	2,56kg/dm ³	-

Fonte: Metacaulim do Brasil (2022)

Laudo técnico sílica ativa

Características Físicas e químicas

Massa Específica	2.220 kg/m ³
Teor de SiO ₂	> 90%
Superfície Específica (B.E.T)	~ 19.000 m ² /kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 µm

Massa unitária

Não Densificado	< 350 kg/m ³
Densificado	> 350 kg/m ³

Comparativo de finura de alguns materiais

Sílica ativa	~19.000 m ² /kg
Fumaça do cigarros	~10.000 m ² /kg
Fly Ash (Pozolana)	400 a 700m ² /kg
Cimento Portland300 a 500m ² /kg

Fonte: Grupo Tecnosil (2022)