

Efeitos do envelhecimento acelerado sobre o gesso beta com a adição de hidrorrepelente de massa

Effects of accelerated aging on beta plaster with the addition of mass water repellent

Sheila Daiane de Souza Rodrigues 

José Getúlio Gomes de Sousa 

Nelson Cárdenas Olivier 

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar a durabilidade do gesso com a adição de hidrorrepelente quando submetido ao envelhecimento acelerado. Para isso foram utilizados gesso e hidrorrepelente de massa. Foi fixada a relação água/gesso em 0,7 e utilizados os teores de 0,2% e 0,4% de hidrorrepelente em relação à massa de gesso. O gesso de referência (sem hidrorrepelente) e o gesso contendo hidrorrepelente de massa foram avaliados na idade “zero” e após 10 e 20 ciclos de secagem e molhagem. Foram realizados ensaios de dureza, resistência à compressão, absorção por imersão total, absorção por capilaridade e análise de MEV e EDS. Aos 20 ciclos de envelhecimento acelerado, houve redução das propriedades mecânicas; em contrapartida, manteve-se uma redução considerável, tanto da absorção por imersão, quanto da absorção por capilaridade nos corpos de prova contendo o hidrorrepelente em comparação aos corpos de prova de referência. Em relação à microestrutura, mesmo aos 20 ciclos, foi possível identificar a presença do hidrorrepelente formando um “filme” sobre os cristais de gesso, tendo sido identificado um percentual maior do hidrorrepelente na região mais superficial do corpo de prova. Tais resultados mostram a eficácia do hidrorrepelente como barreira de proteção diante do envelhecimento acelerado.

Palavras-chave: Gesso. Sulfato de cálcio hemidratado. Silano. Siloxano. Durabilidade.

Abstract

This paper aims to evaluate the durability of plaster with the addition of water repellent, when subjected to accelerated aging. For this process, plaster and water repellent were used. The water/plaster ratio was set at 0.7 and contents of 0.2% and 0.4% of water repellent were used, in relation to the plaster mass. The prototype plaster (without water repellent) and the plaster containing mass water repellent were evaluated at “zero” age, after 10 and 20 drying and wetting cycles. Tests of hardness, compressive strength, total immersion absorption, capillary absorption and SEM, and EDX analysis were performed. At 20 accelerated aging cycles, there was a reduction in mechanical properties; at the same time, there was considerable reduction in both immersion absorption and capillary absorption in the specimens containing the water repellent, compared to the prototype specimens. Regarding the microstructure, even at 20 cycles, it was possible to identify the presence of water repellent forming a “film” above the plaster crystals, with a higher percentage of water repellent being identified in the most superficial region of the specimen. These results show the effectiveness of water repellent as a protective barrier against accelerated aging.

Keywords: Plaster. Calcium sulfate hemihydrate. Silane. Siloxane. Durability.

¹Sheila Daiane de Souza Rodrigues

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro - BA - Brasil

²José Getúlio Gomes de Sousa

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro - BA - Brasil

³Nelson Cárdenas Olivier

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro - BA - Brasil

Recebido em 14/12/21
Aceito em 03/01/22

Introdução

Os produtos de gesso têm sido amplamente usados como componentes de construção interna devido a suas características estéticas, facilidade de fabricação, isolamento acústico e térmico, entre outras características, além de ser um material não tóxico, que não oferece risco à vida humana. Ademais, por apresentar temperatura de calcinação muito mais baixa do que o cimento, a energia necessária para sua produção acaba sendo menor, conservando, assim, os recursos energéticos (GARG; PUNDIR; SINGH, 2016).

Por ser um aglomerante aéreo, ao entrar em contato com a água após o endurecimento, parte do material se dissolve, o que pode levar a um aumento na quantidade de poros interligados e na taxa de absorção de água do material (WANG, 2012), afetando, por conseguinte, as propriedades mecânicas do material. Segundo Hribar *et al.* (2002), quando há películas de água entre os cristais de di-hidrato, a resistência mecânica tende a cair se, na matriz, estiverem presentes substâncias capazes de desestabilizar as ligações de hidrogênio entre as moléculas de água. Essa questão se deve ao fato de que é necessário certo grau de estruturação das moléculas entre as camadas para resultar em uma forte adesão, causada pela película.

Desse modo, a resistência dos materiais à base de gesso diminui gradualmente após ciclos de secagem e molhagem. Para contornar essa limitação, quanto à sensibilidade do gesso à umidade, faz-se necessário o uso de aditivos hidrorrepelentes, com o intuito de aumentar a resistência do gesso à água. Esses aditivos hidrorrepelentes são incorporados à água de amassamento do gesso, ainda na etapa da mistura.

No estudo desenvolvido por Santos (2017), observou-se que um teor de hidrorrepelente nos percentuais de 0,3%, 0,5% e 0,7% resultou na redução do coeficiente de absorção por capilaridade, permitindo classificar o material como “quase impermeável”, segundo a norma alemã, DIN 52617 (DEUTSCHES..., 1987), citada pela autora. Para Li *et al.* (2021), foi possível perceber que, em uma faixa de adição de hidrorrepelente variando entre 0% e 2%, os melhores resultados foram os correspondentes à adição de 0,3%, 0,5% e 1%, e que, a partir de 1%, havia aumento da absorção quando comparado à adição de 1%. Em ambas as pesquisas, o hidrorrepelente utilizado era específico para gesso, entretanto o material hidrofugado não foi submetido a processos de degradação, para avaliar a eficácia do hidrorrepelente ao longo do tempo.

Apesar das vantagens associadas ao uso dos aditivos hidrorrepelentes conhecidos pelo mercado de produção, principalmente de blocos de gesso para alvenaria, ainda são incipientes o conhecimento da vida útil e a durabilidade dos materiais com esse tipo de aditivo (SILVA, 2018). A durabilidade é um dos fatores importantes para que haja confiabilidade nas características tecnológicas de um novo material e, por isso, é fundamental o conhecimento de suas condições de uso e de sua vida útil (FARIAS FILHO, 2007). Nesse cenário, os métodos de pesquisa sobre os processos de envelhecimento baseiam-se principalmente na análise das alterações nas propriedades dos materiais com base em observações em condições naturais ou artificiais. Há tendência crescente na realização de testes de curto prazo para avaliar a durabilidade, os chamados testes de envelhecimento acelerado (YIU; HO; LO, 2007).

Os ensaios acelerados de laboratório visam simular artificialmente a ação dos agentes de degradação durante o período de serviço, permitindo avaliar a ação direta de determinado fator no comportamento do material. Esses testes ganham importância quando comparados com resultados de campo, pelo fato de ser difícil a extrapolação dos resultados de laboratório (CHOON CHAI, 2011). O processo de envelhecimento acelerado pode se dar por meio do uso de câmaras climáticas (ALAIMO; ENEA, 2011), ciclos de gelo e degelo (ÇOLAK, 2002), ciclos de molhagem e secagem (DURGUN, 2020) ou ciclos de aquecimento e resfriamento (PIRES SOBRINHO, 2021). Pires Sobrinho (2021) investigou o processo de degradação de blocos de gesso do tipo standard (comum) e hidro (com a adição de 2,5% de hidrorrepelente à base de silicone), causado pelo choque térmico, por meio de 10 ciclos acelerados de aquecimento e resfriamento, de modo que os desgastes superficiais registrados nos blocos hidro mostraram velocidade de degradação bem inferior quando comparado aos dos blocos standard.

Com base nos aspectos acima citados, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do hidrorrepelente adicionado em baixas dosagens (0,2% e 0,4%) nas propriedades do gesso beta de fundição, cuja aplicação é, entre outras, a produção de blocos de vedação hidrofugados. O material com a adição do hidrorrepelente será submetido a ciclos de secagem e molhagem com o intuito de contribuir para o conhecimento acerca da durabilidade desse elemento, visto que o gesso apresenta alta solubilidade quando em contato com a água, o que acarreta a degradação do material.

Materiais e métodos de ensaio

Materiais

Gesso beta

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada uma amostra de gesso (sulfato de cálcio hemi-hidratado) de fundição, obtido no Polo Gesseiro do Araripe, em Araripina, PE. O gesso do estudo foi caracterizado quanto a granulometria, massa unitária e teores de água livre e de cristalização. A caracterização do gesso beta pode ser observada na Tabela 1.

Hidrorrepelente de massa

Além do gesso, foi utilizado um hidrorrepelente de massa para gesso. Em relação ao hidrorrepelente, foi realizada a determinação da massa específica seguindo o procedimento estabelecido pela NBR 11768-3 (ABNT, 2019b) – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 3: Ensaio de caracterização. A utilização dessa norma justifica-se em razão da ausência de uma norma para a determinação da massa específica de aditivos para gesso; outro ponto é que o método apresentado possibilita o ensaio quando o aditivo utilizado é líquido, como no caso do aditivo usado na pesquisa. Desse modo, obteve-se uma massa específica de 1,00 g/cm³. Além da determinação da massa específica, foi realizada uma análise por espectroscopia de absorção na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para identificação dos grupos funcionais característicos dos componentes do polímero, visto que tal informação não constava na embalagem do produto.

O uso do FTIR é empregado quando se deseja verificar se duas substâncias são idênticas, pois os padrões no infravermelho em duas moléculas de estruturas diferentes não serão idênticos. Outro uso diz respeito à obtenção de informações estruturais de uma molécula, tendo em vista que a absorção de cada tipo de ligação é encontrada geralmente em regiões específicas do infravermelho vibracional (PAVIA *et al.*, 2010). A partir da absorção de cada tipo de ligação, obteve-se o espectro presente na Figura 1.

Na Figura 1, pode-se fazer a identificação das bandas obtidas por meio do FTIR realizado com o hidrorrepelente de massa. A banda localizada em 2.966 cm⁻¹ deve-se à vibração de alongamento de -CH₃, indicando que o hidrorrepelente em questão tem uma estrutura de silicone contendo o grupo funcional metil (CAMPOS, 2012; ZHANG *et al.*, 2020). Em 2.168 cm⁻¹ está presente uma banda forte ocasionada pela presença de Si-H (PAVIA *et al.*, 2010). Em 769, 1.261 e 1.405 cm⁻¹ ocorre a vibração assimétrica no plano de CH₃ e a vibração de alongamento do Si-C, a vibração de deformação simétrica de Si-CH₃ ou Si-(CH₃)₂ e a vibração de flexão de CH em Si-CH₃ respectivamente (LI *et al.*, 2021). O pico presente em 837 cm⁻¹ é referente à vibração de flexão do Si-H. Já a banda de absorção característica do Si-O apareceu em torno de 1.099 cm⁻¹ (PAVIA *et al.*, 2010; SILVA, 2019; ZHANG *et al.*, 2020). As bandas identificadas indicam que o hidrorrepelente de massa contém silano/siloxano.

Definição das dosagens

Foi utilizada a relação água/gesso de 0,7 com o intuito de manter as características de fabricação comercial dos blocos de gesso do Polo Gesseiro do Araripe (SILVA, 2018). Foram produzidos corpos de prova de referência (sem hidrorrepelente) e corpos de prova com a adição do hidrorrepelente de massa. Em relação ao hidrorrepelente, as proporções utilizadas foram definidas de acordo com a massa de gesso utilizada, adotadas com base na recomendação do fabricante. A identificação dos corpos de prova e a dosagem do hidrorrepelente estão descritas na Tabela 2.

Tabela 1 - Caracterização do gesso beta

Propriedade	Valor encontrado	Valor normativo NBR 13207 (ABNT, 2017)	Método de ensaio
Granulometria (% passante) # 0,29 mm	97,53 (±0,74)	≥ 90%	NBR 12127 (ABNT, 2019a)
Massa unitária (kg/m ³)	550 (±0,01)	≥ 600	NBR 12127 (ABNT, 2019a)
Água livre (%)	1,00 (±0,03)	≤ 1,3	NBR 12130 (ABNT, 1991a)
Água de cristalização (%)	4,59 (±0,55)	4,2 a 6,2	NBR 12130 (ABNT, 1991a)

Figura 1 - Espectro FTIR do hidrorrepelente

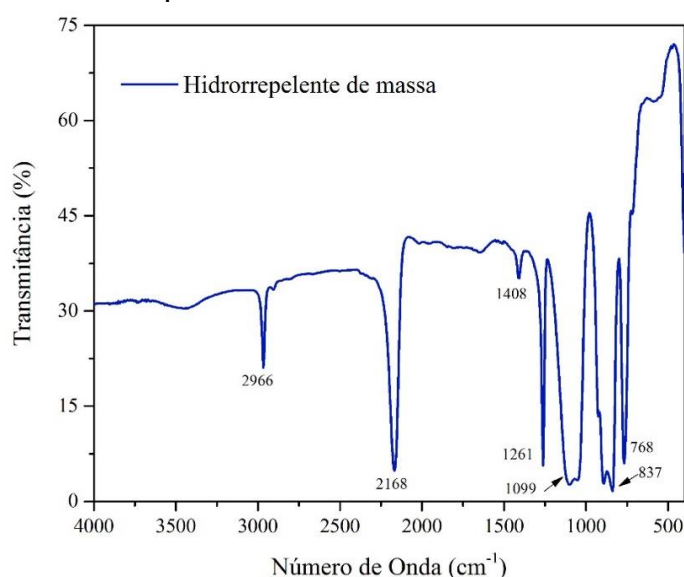


Tabela 2 - Identificação dos corpos de prova

Identificação	Tipo	Hidrorrepelente de massa (ml/kg de gesso)
GR	Referência	0
G2ml/kg	Hidrorrepelente de massa	2
G4ml/kg	Hidrorrepelente de massa	4

Métodos de ensaio

Moldagem dos corpos de prova

Para as análises das propriedades do material antes e após o envelhecimento acelerado, foram moldados corpos de prova (CP) tanto com a pasta de gesso de referência (GR), que foi preparada conforme o item 4.3.2 da NBR 12129 (ABNT, 2019c), quanto corpos de prova contendo o hidrorrepelente de massa (G2ml/kg e G4ml/kg), seguindo mesmo procedimento da pasta de referência, com a ressalva de que houve a adição do hidrorrepelente à água de amassamento do gesso. As proporções utilizadas estão indicadas na Tabela 2.

Os corpos de prova foram avaliados na idade “zero” (antes do processo de envelhecimento), e após 10 e 20 ciclos de envelhecimento. Para tal, foram moldados em quantidade suficiente para serem avaliados quanto a dureza superficial, resistência à compressão axial, absorção por imersão total e absorção por capilaridade. Para os ensaios de dureza, resistência e absorção por imersão total foram moldados corpos de prova cúbicos, (5x5x5) cm, enquanto, para a avaliação da absorção por capilaridade, foram moldados corpos de prova prismáticos, (4x4x16) cm. Para cada tipo analisado (GR, G2ml/kg e G4ml/kg), foram moldados 36 corpos de prova, totalizando 108 corpos de prova.

Propriedades avaliadas

As propriedades avaliadas antes e após o envelhecimento acelerado foram a dureza superficial, a resistência à compressão axial, a absorção de água por imersão total e a absorção de água por capilaridade, consoante os métodos indicados no Quadro 1.

Para a análise da resistência à compressão, optou-se pelo uso da NBR 12129 (ABNT, 1991b), que é versão antiga da norma que traz a determinação das propriedades mecânicas do gesso para a construção civil, pelo fato de que a versão atual trata apenas do procedimento de ensaio e expressão dos resultados da dureza superficial.

Os resultados obtidos ao longo dos ciclos de envelhecimento acelerado foram comparados aos auferidos na idade “zero”, que corresponde aos primeiros corpos de prova ensaiados antes do início do envelhecimento. Os corpos de prova utilizados na determinação das propriedades na idade “zero” e após 10 e 20 ciclos foram sorteados aleatoriamente entre os grupos, três CP para cada ensaio.

Além dos ensaios já listados, foi feita uma avaliação da micromorfologia por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e uma análise semiquantitativa das amostras, obtida através de análise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS). As amostras foram extraídas dos corpos de prova de referência (GR) e dos corpos de prova com a adição de hidrorrepelente (G4ml/kg), em que foi avaliada a dureza superficial. As amostras não passaram pelo processo de metalização.

Na Tabela 3 está esquematizado um resumo dos ensaios realizados e da quantidade de corpos de prova por ciclo de envelhecimento e por ensaio.

Ciclo do envelhecimento acelerado

A definição do ciclo de envelhecimento acelerado foi feita com base em estudos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Técnicas Construtivas da UNIVASF, onde se observou que a submersão do gesso em água por tempos prolongados (24 h) leva a uma degradação brusca do material e que a secagem a uma temperatura de 40 °C proporciona a estabilização da massa seca, apenas após 3 dias (SOUZA, 2015). Assim, houve uma adaptação do ciclo de envelhecimento acelerado, de modo a torná-lo mais curto e menos abrupto, possibilitando a evolução gradual do processo de degradação. Desse modo, foi fixado um tempo de submersão de 2 h, usando-se como referência a NBR 16495 (ABNT, 2016), que trata de método de ensaio para blocos de gesso de vedação.

Cada ciclo ocorreu como esquematizado na Figura 2. O primeiro ciclo se iniciou com os corpos de prova na estufa a 50 °C. Após 45 h na estufa, os corpos de prova foram retirados e ficaram em temperatura ambiente por 30 min, para não haver uma mudança repentina de temperatura no corpo de prova. Após esse tempo, foram colocados em recipientes contendo água, onde permaneceram submersos por 2 h. Após o tempo de submersão, foram colocados novamente em temperatura ambiente por 30 min. Depois disso, voltaram para a estufa a 50 °C, finalizando o primeiro ciclo. Os demais ciclos seguiram o mesmo procedimento.

Quadro 1 - Ensaios realizados antes e após o envelhecimento

Propriedade	Método de ensaio
Dureza superficial (N/mm)	NBR 12129 (ABNT, 2019c)
Resistência à compressão axial (MPa)	NBR 12129 (ABNT, 1991b)
Absorção por imersão total (%)	NBR 16495 (ABNT, 2016)
Absorção por capilaridade (kg/m .s)	C1794-15 (AMERICAN..., 2015)

Tabela 3 - Resumo dos ensaios e quantidade de amostras ensaiadas

Ensaio	Tipo	Quantidade de corpos de prova			
		CP ensaiados na idade "zero"	CP ensaiados após 10 ciclos	CP ensaiados após 20 ciclos	Total de CP ensaiados
Dureza superficial	GR	3	3	3	9
	G2ml/kg	3	3	3	9
	G4ml/kg	3	3	3	9
Resistência à compressão axial	GR	3	3	3	9
	G2ml/kg	3	3	3	9
	G4ml/kg	3	3	3	9
Absorção por imersão total	GR	3	3	3	9
	G2ml/kg	3	3	3	9
	G4ml/kg	3	3	3	9
Absorção por capilaridade	GR	3	3	3	9
	G2ml/kg	3	3	3	9
	G4ml/kg	3	3	3	9
Total		36	36	36	108

Figura 2 - Ciclo de envelhecimento acelerado

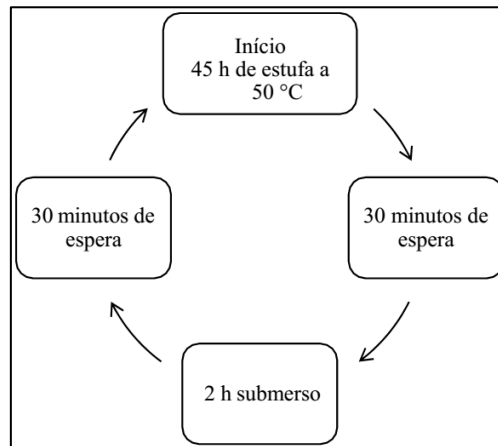
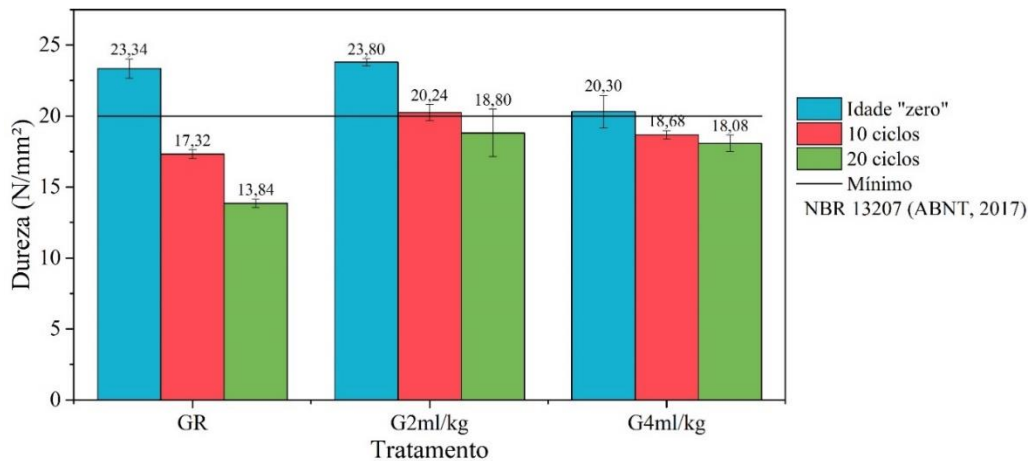


Figura 3 - Variação da dureza do gesso ao longo do envelhecimento acelerado



Resultados e discussões

Envelhecimento acelerado

Na análise dos dados foi realizado o teste de Duncan para comparação de médias. A leitura da significância estatística, ao longo do trabalho, deve ser feita na sequência idade “zero” → 10 ciclos → 20 ciclos para cada tratamento.

Dureza superficial

Na Figura 3 observa-se que os corpos de prova de referência (GR) mostraram maior variação, em termos gerais, nos valores alcançados. Apesar de os tratamentos G2ml/kg e G4ml/kg terem diminuição da dureza ao longo dos ciclos, apresentaram valores superiores aos dos corpos de prova de referência (GR) após 20 ciclos. No caso dos corpos de prova de referência (GR), esse comportamento pode estar ligado ao aumento da porosidade superficial do corpo de prova durante o processo de envelhecimento, sendo uma consequência da dissolução do gesso (Figuras 4 a 6). No entanto, com a adição do hidrorrepelente de massa, o desgaste superficial foi menor, o que pode justificar o fato de que, embora haja diminuição, a dureza após 20 ciclos para G2ml/kg e G4ml/kg foi maior do que para GR.

Na Figura 4, é possível visualizar a presença de muitos poros devido à dissolução do material após o processo de submersão. Além disso, notou-se que as demais faces apresentaram poros maiores (Figura 4a), se comparados aos presentes na face inferior (Figura 4b).

Em relação à Figura 5, a região que ficou em contato direto com o fundo do recipiente contendo água (Figura 5b), durante a etapa de submersão, apresentou desgaste maior em relação às demais faces (Figura 5a).

Por meio da Figura 6 é possível verificar que com o tratamento G4ml/kg o desgaste foi menor do que com o tratamento G2ml/kg (Figura 5).

O teste de Ducas, presente na Tabela 4, indicou que o valor de dureza obtido após 20 ciclos, tanto com os corpos de prova de referência (GR) quanto com os tratamentos G2ml/kg e G4ml/kg, apresentou diferença estatística em relação à idade “zero”.

Após 20 ciclos, os corpos de prova tiveram uma queda no valor da dureza, não atendendo ao valor mínimo exigido por norma ($\geq 20 \text{ N/mm}^2$).

Figura 4 - Aspecto do corpo de prova de referência (GR) após de 20 ciclos de envelhecimento acelerado: (a) Imagem da face superior e lateral do corpo de prova e (b) Face inferior do CP

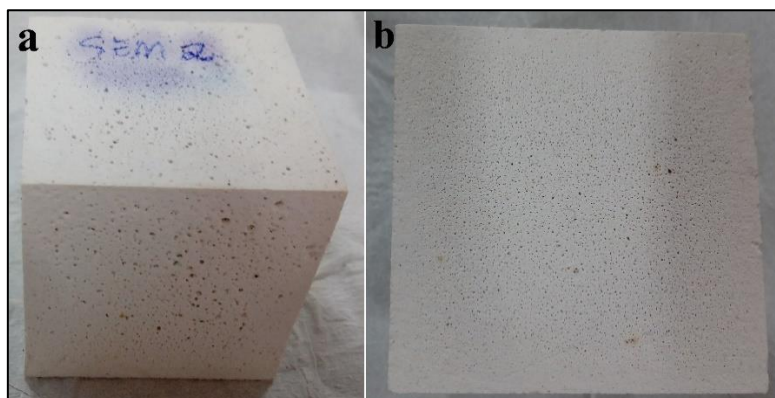


Figura 5 - Aspecto do corpo de prova com o tratamento G2ml/kg após 20 ciclos de envelhecimento acelerado: (a) Face superior e lateral CP e (b) Face inferior do CP

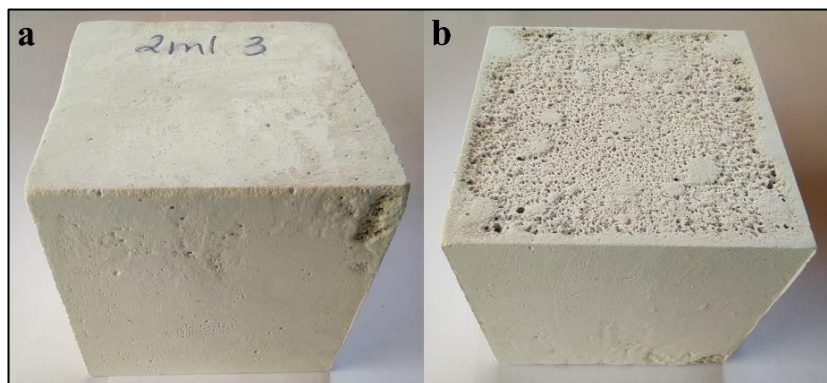


Figura 6 - Aspecto do corpo de prova com o tratamento G4ml/kg após 20 ciclos de envelhecimento acelerado: (a) Face superior e lateral do CP e (b) Face inferior do CP

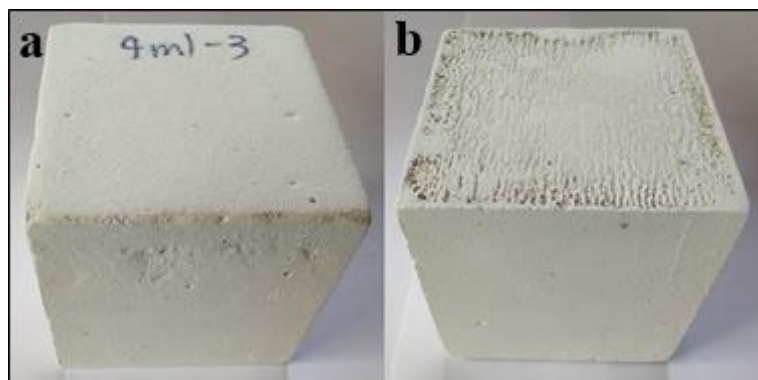


Tabela 4 - Valores médios de dureza no envelhecimento acelerado*

Tratamento	Dureza (N/mm ²)		
	Idade “zero”	10 ciclos	20 ciclos
GR	23,34 ^a (±0,68)	17,32 ^b (±0,29)	13,84 ^c (±0,29)
G2ml/kg	23,80 ^a (±0,25)	20,24 ^b (±0,56)	18,80 ^b (±1,67)
G4ml/kg	20,30 ^a (±1,16)	18,68 ^b (±0,30)	18,08 ^b (±0,58)

Nota: *valores com letras iguais (que estão sobrescritas aos valores) representam médias estatisticamente iguais.

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão alcançada pelos corpos de prova ficou entre 8,55 MPa e 10,11 MPa, como mostra a Figura 7.

Após 10 ciclos de secagem e molhagem houve redução na resistência à compressão nos corpos de prova de referência (GR), que pode ser devido à dissolução do gesso quando submetido a um processo acelerado e contínuo de degradação.

A introdução do hidrorrepelente na mistura pode ter influenciado na diminuição da velocidade da crescimento dos cristais de di-hidrato, contribuindo também na formação de pontos de fragilidade dentro da microestrutura devido à presença do produto, levando a uma menor resistência média em relação aos demais tratamentos, na idade zero, sendo 9,76 MPa em G2ml/kg e 8,55 MPa em G4ml/kg, resultando em uma menor resistência média à medida que a concentração do hidrorrepelente aumentou.

A análise estatística, presente na Tabela 5, permite inferir que os corpos de prova GR e G4ml/kg não apresentam diferença estatística significativa em relação à resistência alcançada na idade “zero” e após 20 ciclos de envelhecimento.

Analisando sob valores normativos, a NBR 13207 (ABNT, 1994) recomendava uma resistência à compressão mínima de 8,40 MPa para um gesso de construção produzido com a relação água/gesso na consistência normal. Assim, mesmo após o envelhecimento acelerado, todos os tratamentos atenderam ao valor estabelecido em norma.

Absorção por imersão total em água

Na Figura 8 infere-se que após 20 ciclos o tratamento G2ml/kg reduziu a absorção em 29,04%; já o tratamento G4ml/kg reduziu em 73,09% a absorção por imersão total, ambos em relação aos corpos de prova de referência (GR).

O desgaste constante, devido aos ciclos, leva à perda do hidrorrepelente de massa, o que resulta em um aumento da absorção ao longo do tempo, de modo que o efeito do hidrorrepelente, em G2ml/kg, foi se reduzindo ao longo dos ciclos. No entanto, o tratamento G4ml/kg mostrou um bom resultado após 20 ciclos em comparação aos corpos de prova de referência (GR).

Os corpos de prova de referência (GR) alcançaram valores de absorção total semelhantes aos obtidos por Silva *et al.* (2016). Já com o tratamento G2ml/kg e G4ml/kg, aos 20 ciclos os valores de absorção por imersão total ficaram próximos aos valores testados pelo autor nas dosagens de 0,4% e 0,6% de hidrorrepelente de massa respectivamente. Porém, no trabalho desenvolvido por Silva *et al.* (2016) não foi feito ensaio de envelhecimento acelerado. Souza (2015) realizou ciclos de secagem e molhagem com a adição de hidrorrepelente de massa, no entanto, após 10 ciclos, a absorção foi superior à identificada neste trabalho.

Com base na Tabela 6, verifica-se que os corpos de prova de referência (GR) obtiveram a maior absorção percentual, sem diferença estatística significativa ao longo dos ciclos. Em relação ao hidrorrepelente de massa, houve aumento da absorção ao longo do envelhecimento, no entanto a absorção permaneceu inferior à absorção dos corpos de prova de referência (GR).

Do ponto de vista estatístico, houve diferença do percentual de absorção obtido após 20 ciclos em relação à idade “zero” em G2ml/kg e G4ml/kg.

Segundo a norma EN 520 (DEUTSCHES..., 2009), norma europeia, que diferencia os tipos de placa de gesso acatornado de acordo com suas características, entre elas a redução de absorção de água, as placas de gesso do tipo H2 têm absorção máxima de 10%, o que permite seu uso tanto em áreas secas, quanto em ambientes com a umidade controlada, como em cozinhas e banheiros. Com base nessa classificação, o tratamento G4ml/kg atende ao valor estabelecido pela referida norma.

Figura 7 - Resistência à compressão ao longo do envelhecimento acelerado

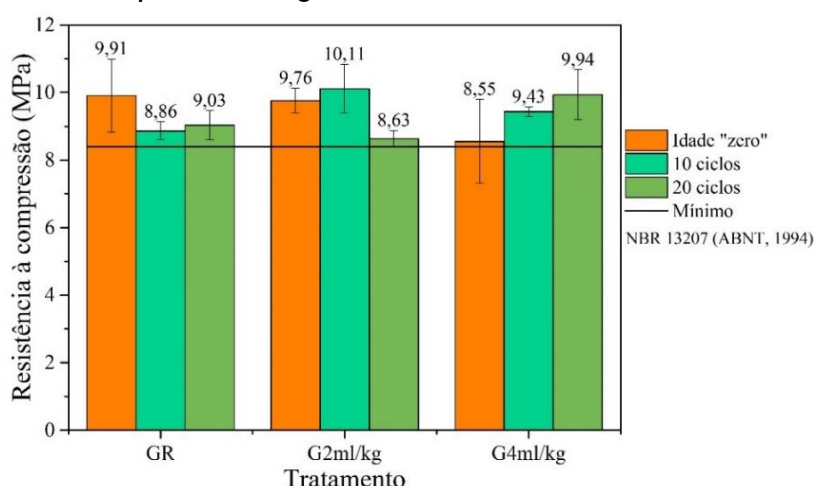


Tabela 5 - Valores médios de resistência à compressão no envelhecimento acelerado*

Resistência à compressão axial (MPa)			
Tratamento	Idade "zero"	10 ciclos	20 ciclos
GR	9,91 ^a (±1,08)	8,86 ^a (±0,27)	9,03 ^a (±0,43)
G2ml/kg	9,76 ^{ab} (±0,37)	10,11 ^a (±0,72)	8,63 ^b (±0,24)
G4ml/kg	8,55 ^a (±1,24)	9,43 ^a (±0,14)	9,94 ^a (±0,74)

Nota: *valores com letras iguais (que estão sobrescritas aos valores) representam médias estatisticamente iguais.

Figura 8 - Absorção por imersão total ao longo do envelhecimento acelerado

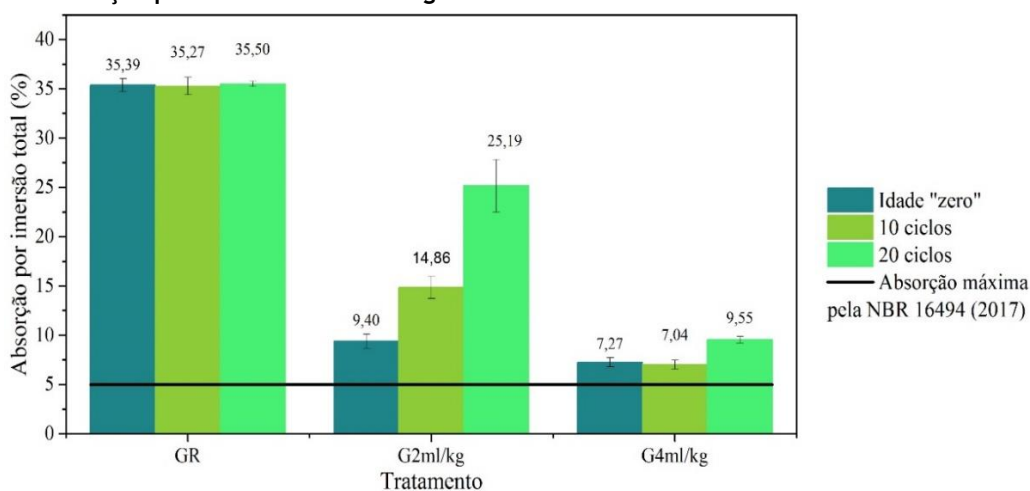


Tabela 6 - Valores médios da absorção por imersão total no envelhecimento acelerado*

Absorção por imersão total (%)			
Tratamento	Idade "zero"	10 ciclos	20 ciclos
GR	35,39 ^a (±0,63)	35,27 ^a (±0,89)	35,50 ^a (±0,28)
G2ml/kg	9,40 ^c (±0,72)	14,86 ^b (±1,13)	25,19 ^a (±2,66)
G4ml/kg	7,27 ^b (±0,46)	7,04 ^b (±0,44)	9,55 ^a (±0,32)

Nota: *valores com letras iguais (que estão sobrescritas aos valores) representam médias estatisticamente iguais.

Absorção por capilaridade

O coeficiente de absorção por capilaridade foi se tornando cada vez maior ao longo dos ciclos com tratamento G2ml/kg. Entretanto, a capacidade de ação do hidrorrepelente no tratamento G4ml/kg permaneceu ao longo do envelhecimento acelerado, como mostra a Figura 9.

A Figura 10 mostra o aspecto dos corpos de prova ao longo dos ciclos de envelhecimento acelerado.

Nos corpos de prova de referência (a e b), a quantidade de poros é menor na face que ficou em contato direto com a superfície do recipiente, durante a submersão, em detrimento das demais faces. Já nos tratamentos G2ml/kg (c e d) e G4ml/kg (d e f), a face mais degradada foi a que ficou em contato direto com o recipiente. No entanto, notou-se que a adição de maior quantidade de hidrorrepelente levou a um menor desgaste da superfície.

No trabalho desenvolvido por Santos (2017), os teores de hidrorrepelente à base de silicone variaram de 0,08% a 0,5%, e o menor coeficiente de capilaridade foi de 155×10^{-4} ($\text{kg/m} \cdot \text{s}^{0,5}$), com a adição de 0,5% de hidrorrepelente. O valor encontrado para o tratamento G4ml/kg foi semelhante ao de Santos (2017) para a dosagem de 0,25% de um silicone com propriedades repelentes, em que se obteve um coeficiente de capilaridade de 253×10^{-4} ($\text{kg/m} \cdot \text{s}^{0,5}$).

De acordo com a Tabela 7, aplicando o teste de Duncan, verifica-se que, para os tratamentos G4ml/kg e G2ml/kg, houve diferença estatística entre 10 e 20 ciclos.

Figura 9 - Coeficiente de capilaridade ao longo do envelhecimento acelerado

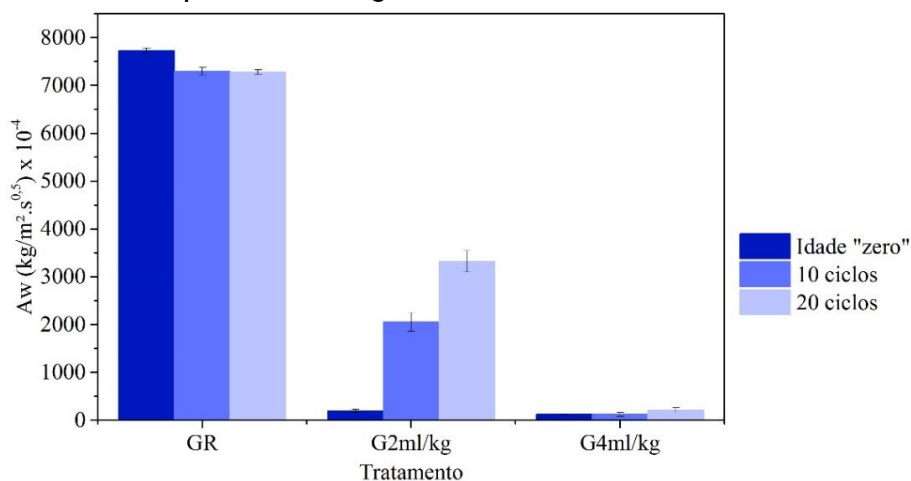


Figura 10 - Face superior e face inferior dos corpos de prova de referência GR e com os tratamentos G2ml/kg e G4ml/kg respectivamente, após 20 ciclos de envelhecimento acelerado

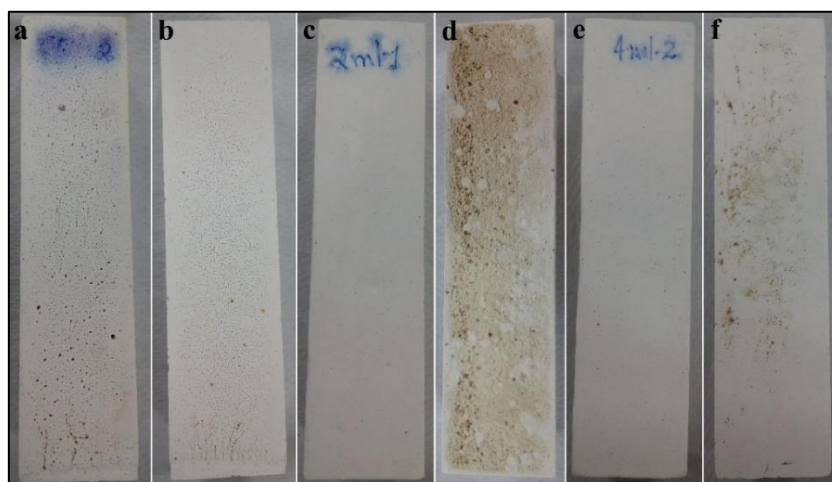


Tabela 7 - Valores médios do coeficiente de capilaridade após o envelhecimento acelerado*

Tratamento	Coeficiente de capilaridade ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0,5}$) $\times 10^{-4}$		
	Idade “zero”	10 ciclos	20 ciclos
GR	7726,37 ^a ($\pm 56,14$)	7298,67 ^b ($\pm 77,51$)	7281,48 ^b ($\pm 48,91$)
G2ml/kg	195,55 ^c ($\pm 33,12$)	2057,36 ^b ($\pm 193,98$)	3322,48 ^a ($\pm 224,74$)
G4ml/kg	122,05 ^b ($\pm 2,27$)	121,48 ^b ($\pm 39,67$)	207,74 ^a ($\pm 51,79$)

Nota: *valores com letras iguais (que estão sobrescritas aos valores) representam médias estatisticamente iguais.

De acordo com a norma DIN 52617 (DEUTSCHES..., 1987), citada por Santos (2017), o tratamento G4ml/kg é dito “preventivo contra a água”, visto que o coeficiente de capilaridade (A_w) é menor do que $333 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}^{0,5}$, e os corpos de prova de referência (GR) e com o tratamento G2ml/kg são classificados como de “sucção rápida”, visto que $A_w > 333 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}^{0,5}$.

Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS)

A análise foi realizada na amostra de referência (GR) na idade “zero” e nas amostras com a adição de hidrorrepelente (G4ml/kg) na idade “zero” e após 20 ciclos. As características microestruturais das amostras permitiram identificar a morfologia dos cristais e o arranjo microestrutural. Foram feitas análises em GR e G4ml/kg, por serem a amostra de referência e a amostra que obteve os melhores resultados entre as propriedades avaliadas respectivamente.

A análise de EDS foi realizada em uma amostra retirada da região central do corpo de prova do gesso de referência (GR). Em relação ao tratamento G4ml/kg, as amostras foram retiradas tanto na região central, quanto na superfície do corpo de prova, para termos de comparação quanto à presença de silício, haja vista a importância da distribuição uniforme do hidrorrepelente por toda a matriz do corpo de prova, para a proteção do material contra a ação da água, e não somente na região mais superficial. A Figura 11 indica o ponto de retirada da amostra na superfície do CP contendo o hidrorrepelente.

Na Figura 12 é possível observar a presença de tufo de cristais aciculares e do entrelaçamento entre os cristais. Além disso, pode-se notar a presença de vazios que influenciam diretamente na resistência à compressão do material e que são ocasionados pela perda de água excedente após o processo de cristalização.

Na Figura 13 é possível notar a presença do hidrorrepelente envolvendo os cristais após 20 ciclos de envelhecimento. No caso do uso de hidrorrepelente de massa, em um estudo feito por Jakobsmeier (2000), notou-se, por meio da microscopia eletrônica de varredura, que, quanto maior a concentração do agente hidrorrepelente, mais frequentemente os cristais com cantos arredondados e superfícies próximas cobertas por um “filme” eram identificadas. Grupos de cristais individuais que davam a impressão de “aderência” tornavam-se mais frequentes à medida que mais hidrorrepelente de massa era adicionado.

Nos trabalhos de Jakobsmeier (2000) e Silva (2019), em que foram utilizados hidrorrepelentes de massa à base de silicone, houve presença marcante do polímero na microestrutura do gesso, no entanto em ambos estudos a quantidade de polímero utilizado foi maior do que no estudo em questão. Desse modo, a dificuldade em se identificar o hidrorrepelente na matriz pode estar relacionada tanto com a remoção do material durante o processo de envelhecimento quanto pela quantidade reduzida de hidrorrepelente em relação à massa de gesso.

A representação gráfica da análise de EDS dos espectros das amostras dos corpos de prova GR, G4ml/kg na idade “zero” e G4ml/kg após 20 ciclos é mostrada na Figura 14, e a análise elementar está tabulada na Tabela 8.

Da análise elementar, percebe-se que a quantidade de silício é maior na região mais superficial do corpo de prova G4ml/kg do que no centro. Além disso, não há distribuição uniforme do material, haja vista que as amostras extraídas na região mais superficial mostraram um percentual após 20 ciclos consideravelmente superior ao obtido na idade “zero” para o mesmo tratamento (G4ml/kg). A análise de EDS é semiquantitativa; desse modo, o percentual encontrado é referente a uma amostra, e não necessariamente a todo o material.

Figura 11 - Corpo de prova com o tratamento G4ml/kg indicando a região de onde foi extraída a amostra superficial

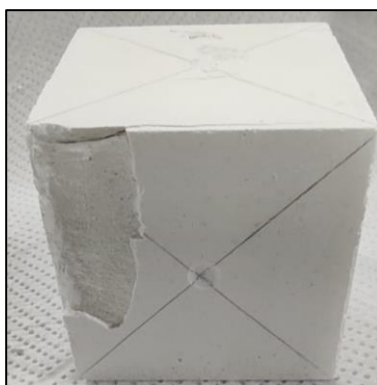


Figura 12 - Micrografia do corpo de prova GR, com ampliação de 1.000x

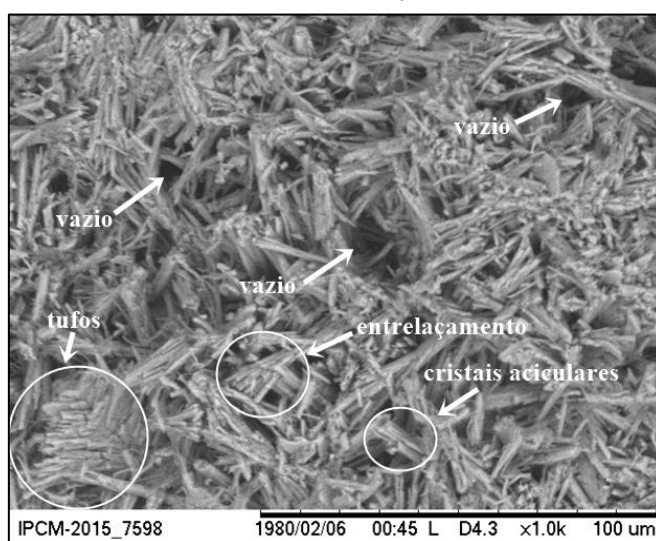


Figura 13 - Micrografia do corpo de prova G4ml/kg após 20 ciclos, com ampliação de 2.000x

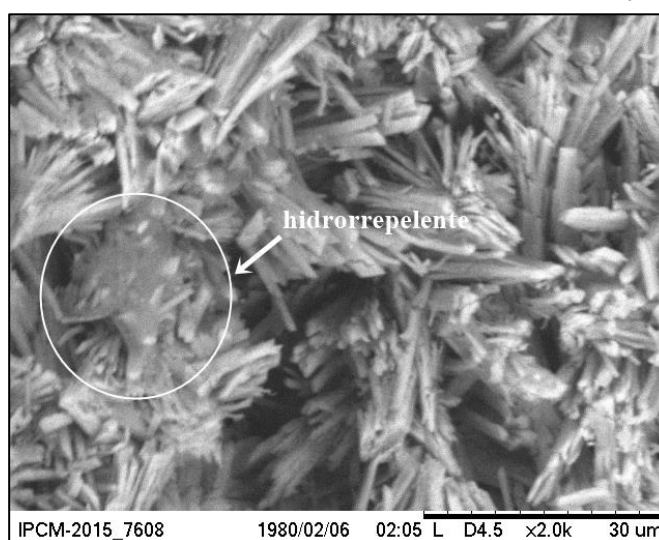


Figura 14 - Representação gráfica da análise de EDS: (a) CP GR na idade “zero”, região central; (b) CP G4ml/kg na idade “zero”, região central; (c) CP G4ml/kg na idade “zero”, região superficial; e (d) CP G4ml/kg após 20 ciclos, região superficial

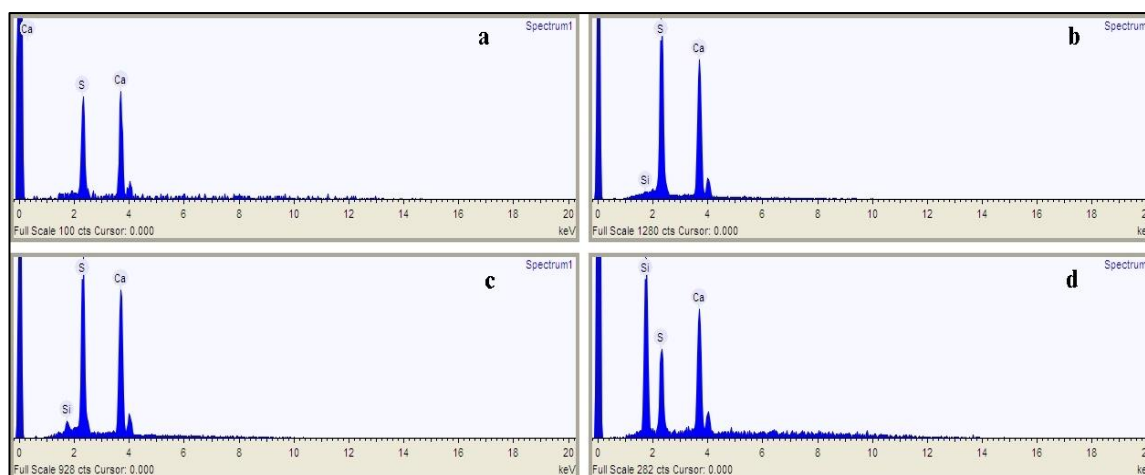


Tabela 8 - Porcentagem elementar após a análise de EDS das amostras de corpos de prova GR e G4ml/kg

Elemento	GR ¹ (% em massa)	G4ml/kg ¹ (% em massa)	G4ml/kg ² (% em massa)	G4ml/kg ³ (% em massa)
Silício	-	0,4	2,1	32,9
Enxofre	36,8	42,4	39,4	22,1
Cálcio	63,2	57,2	58,5	45,1

Nota: ¹Idade “zero”, região central; ²Idade “zero”, região superficial; e ³Após 20 ciclos, região superficial.

Conclusão

Com base nos resultados deste trabalho, pode-se concluir que:

- os corpos de prova contendo hidrorrepelente obtiveram maiores valores de dureza superficial em relação aos corpos de prova de referência (GR);
- mesmo após 20 ciclos de secagem e molhagem, os valores de resistência permaneceram superiores ao mínimo de 8,4 MPa, que era exigido na norma NBR 13207 (ABNT, 1994);
- a adição de hidrorrepelente reduziu expressivamente a absorção tanto por imersão total quanto por capilaridade;
- a absorção por imersão total e a absorção por capilaridade foram elevadas nos corpos de prova de referência (GR) desde a idade “zero”, não havendo, portanto, aumento considerável ao longo dos ciclos, enquanto nos corpos de prova com os tratamentos G4ml/kg e G2ml/kg a absorção foi crescente ao longo dos ciclos. Entretanto, após 20 ciclos de envelhecimento acelerado, a absorção por imersão total foi menor que 10%, e o coeficiente de capilaridade foi inferior a $333 \times 10^{-4} \text{ kg/m} \cdot \text{s}^{0,5}$ nos corpos de prova com o tratamento G4ml/kg, o que permite classificar esse tratamento como “preventivo contra a água”; e
- foi possível identificar a presença de hidrorrepelente formando um “filme” sobre os cristais após 20 ciclos. Porém, a distribuição do hidrorrepelente se dá majoritariamente na superfície do corpo de prova e de maneira não uniforme.

Dessa forma, percebe-se que, embora o hidrorrepelente funcione como mecanismo de proteção, sua eficácia está diretamente ligada à porcentagem e à presença do material de maneira uniforme. Por se tratar de uma contribuição ao estudo do comportamento do material submetido ao envelhecimento acelerado, é importante que sejam feitos estudos que avaliem os efeitos do hidrorrepelente no longo prazo e em diferentes ambientes.

Referências

- ALAIMO, G.; ENEA, D. Experimental evaluation of plasters durability aimed at maintenance planning and scheduling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS, 12., Porto, 2011. **Proceedings [...]** Porto, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **C1794**: standard test methods for determination of the water absorption coefficient by partial immersion. West Conshohocken, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-3**: aditivos químicos para concreto de cimento Portland: parte 3: ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2019b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**: gesso para construção: determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2019a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 1991b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: gesso para construção: determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2019c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12130**: gesso para construção: determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrito. Rio de Janeiro, 1991a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: gesso para construção civil: requisitos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**: gesso para construção civil: requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16495**: bloco de gesso para vedação vertical: métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.
- CAMPOS, R. P. S. **Modificação de poli (dimetilsiloxano) para aplicações em microssistemas de análise total**. Campinas, 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- CHOON CHAI, C. V. V. **Previsão da vida útil de revestimentos de superfícies pintadas em paredes exteriores**. Lisboa, 2011. 276 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.
- ÇOLAK, A. The long-term durability performance of gypsum: Portland cement: natural pozzolan blends. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 109-115, 2002.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 520**: europäische Normung für Gipsplatten. Berlin, 2009.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 52617**: determination of the water absorption coefficient of construction materials. Berlin, 1987.
- DURGUN, M. Y. Effect of wetting-drying cycles on gypsum plasters containing ground basaltic pumice and polypropylene fibers. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101801, 2020.
- FARIAS FILHO, J. **Estudo da durabilidade de argamassas alternativas produzidas de resíduos de construção e granito**. Campina Grande, 2007. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade de Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- GARG, M.; PUNDIR, A.; SINGH, R. Modifications in water resistance and engineering properties of b-calcium sulphate hemihydrate plaster-superplasticizer blends. **Materials and Structures**, v. 49, p. 3253-3263, 2016.
- HRIBAR, B. *et al.* How ions affect the structure of water. **Journal of the American Chemical Society**, v. 124, n. 41, p. 12302-12311, 2002.
- JAKOBSMEIER, L. **Reaktivität und Wechselwirkungen siliciumorganischer Verbindungen in einer CaSO₄·2H₂O – Matrix**. Munique, 2000.140 f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculdade de Química, Universidade Técnica de Munique, Munique, 2000.
- LI, Z. *et al.* Study on mechanical strength and water resistance of organosilicon waterproofing agent blended recycled gypsum plaster. **Case Studies in Construction Materials**, v. 14, p. 1-12, 2021.
- PAVIA, D. L. *et al.* **Introdução à espectroscopia**. Bellingham: CENGAGE Learning, 2010.

- PIRES SOBRINHO, C. W. A. **Durabilidade das alvenarias de blocos de gesso**: limites de sua utilização. Porto, 2021. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2021.
- SANTOS, A. N. **Comportamento higrotérmico de paredes em gesso**: avaliação da adequabilidade a zonas climáticas do Brasil. Porto, 2017. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.
- SILVA, D. B. P. **Efeito do aditivo hidrofugante nas propriedades e na durabilidade das pastas de gesso de fundição**. Juazeiro, 2018. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.
- SILVA, D. B. P. *et al.* Avaliação das propriedades do gesso de fundição aditivado com hidrofugante. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Paulo, 2016. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2016.
- SILVA, T. K. S. **Síntese do compósito gesso-silicone com incorporação de nanopartículas de prata**. Juazeiro, 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2019.
- SOUZA, P. R. C. **Avaliação das propriedades do gesso hemidrato aditivado de composto hidrófugo**. 2015. 64 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2015.
- WANG, O. G. Sorptivity of porous construction gypsum plasters. **Applied Mechanics and Materials**, v. 193/194, p. 440-443, 2012.
- YIU, C. Y.; HO, D. C.; LO, S. M. Weathering effects on external wall tiling systems. **Construction and Building Materials**. v. 21, n. 3, p. 594-600, 2007.
- ZHANG, W. *et al.* Preparation and properties of waterborne polyurethane modified by aminoethylaminopropyl polydimethylsiloxane for fluorine-free water repellents. **Progress in Organic Coatings**, v. 139, p. 105-407, 2020.

Sheila Daiane de Souza Rodrigues

Colegiado de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais | Universidade Federal do Vale do São Francisco | Av. Antônio C. Magalhães, 510, Country Club | Juazeiro - BA - Brasil | CEP 48902-300 | Tel.: (74) 2102-7645 | E-mail: sheila-dsr@hotmail.com

José Getúlio Gomes de Sousa

Colegiado de Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Vale do São Francisco | Tel.: (74) 2102-7624 | E-mail: getulio.univasf@gmail.com

Nelson Cárdenas Olivier

Colegiado de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais | Universidade Federal do Vale do São Francisco Tel.: (74) 2102-7645 | E-mail: nelson.cardenas@univasf.edu.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
www.scielo.br/ac
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.