



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ATAQUE DE SULFATOS EXTERNO EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS
ESTABILIZADOS COM CIMENTO**

WESLEY VÍTOR DANTAS DE CARVALHO BEZERRA

João Pessoa – PB

2018

WESLEY VÍTOR DANTAS DE CARVALHO BEZERRA

**ATAQUE DE SULFATOS EXTERNO EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS
ESTABILIZADOS COM CIMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do curso de Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal da Paraíba como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Givanildo Alves de Azeredo

João Pessoa – PB

2018

B469a Bezerra, Wesley Vítor Dantas de Carvalho

Ataque de sulfatos externo em blocos de terra comprimidos estabilizados com cimento./ Wesley Vítor Dantas de Carvalho Bezerra. – João Pessoa, 2018.

39f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I – UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Ataque de sulfatos 2. Blocos de terra 3. Capilaridade I. Título.

BS/CT/UFPB

CDU: 2.ed. 624(043)

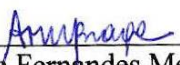
FOLHA DE APROVAÇÃO

WESLEY VÍTOR DANTAS DE CARVALHO BEZERRA

ATAQUE DE SULFATOS EM BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS ESTABILIZADOS COM CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso em 05/11/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

 _____ Givanildo Alves de Azeredo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>APROVADO</u>
 _____ Gibson Rocha Meira Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba	<u>APROVADO</u>
 _____ Cibelle Guimarães Silva Severo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB	<u>Aprovado</u>



Prof.ª Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Matrícula Siape: 1668619
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico esse trabalho:

À minha família pelo suporte dado durante minha vida de estudante;

Ao professor Givanildo pelas inúmeras orientações e palavras incentivadoras;

Ao professor Gibson pelas contribuições que tornaram esse trabalho possível;

Aos meus amigos pelo apoio;

Ao Laboratório de Reologia (UFPB) e ao Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME-UFPB) pelo espaço sempre disponível para ensaios e estudos;

Ao Laboratório de Sedimentação Rápida (LSR-UFPB) e ao Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM-UFPB) pela ajuda na realização dos ensaios de microestrutura;

E ao Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (LAPAV-UFPB) pela ajuda na realização dos ensaios de índice de consistência do solo.

RESUMO

O ataque de sulfatos externo é conhecido por causar danos à materiais cimentícios devido ao ingresso de íons sulfato provenientes do ambiente externo. Esse processo causa perda de coesão, aumento na porosidade, expansão local, lascamento e fissuras. Os objetivos desse trabalho foram estudar a influência do tempo de absorção capilar e estudar a influência da concentração de íons sulfato expondo blocos de terra comprimidos estabilizados com cimento (BTCEC) ao ataque de sulfatos. Os blocos foram submetidos à ciclos em solução de sulfato de sódio por absorção capilar e secagem. No primeiro conjunto de procedimentos, o tempo de absorção capilar foi variado. No segundo, a concentração de sulfato de sódio foi variada. Os blocos usados possuíam a mesma porcentagem de terra, cimento e água e para cada procedimento 3 amostras foram testadas. As massas foram medidas imediatamente após tirar as amostras da solução e depois de 2 semanas de secagem, sendo esse um processo cíclico para cada procedimento. A temperatura ambiente e a umidade relativa permitiram cristalização de thenardita e mirabilita. Granulometria, DRX, FRX e MEV foram usados para identificar os materiais. Os resultados mostraram que o tempo de absorção capilar e a concentração de sulfatos influenciam no desgaste dos BTCEC.

Palavras chave: Ataque de sulfatos, blocos de terra, capilaridade.

ABSTRACT

External sulfate attack is known to damage cementitious materials due to ingress of sulfate ions from external environment. This process causes loss of cohesion, increase in porosity, local expansion, spalling and cracking. The objectives of this research were to study the influence of the capillary absorption time and to study the sulfate ions concentration using compressed stabilized earth blocks (CSEB) exposed to sulfate attack. The CSEB were exposed to aqueous sodium sulfate solution by cycles of capillary absorption and drying. Two sets of procedures were used to evaluate the wear of the samples. In the first set of procedures, the wetting time was varied. In the second one, the sodium sulfate concentration was varied. The CSEB used had the same dosage of earth, cement and water and for each procedure 3 samples were tested. The masses were measured after taking the samples out of the solution and after a 2-week drying time, being that a cyclic process for each procedure. The room temperature and relative humidity allowed crystallization of thenardite and mirabilite. Granulometry, XRD, XRF and SEM tests were used to identify the materials. The results showed that capillary absorption time and sulfate concentration influences the wear of the compressed stabilized earth blocks.

Keywords: Sulfate attack, earth blocks, capillarity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Granulometria da terra.....	17
Figura 2: Difração de raios X da terra.....	18
Figura 3: Dimensões das amostras.....	19
Figura 4: Tempo de absorção capilar e concentração de sulfatos para cada procedimento. S = Sulfato de sódio.....	19
Figura 5: Ensaio de capilaridade em recipientes de PVC.....	20
Figura 6: Perda de massa das amostras do Grupo A.....	24
Figura 7: Perda de massa média por procedimento do Grupo A.	24
Figura 8: Desgaste superficial das amostras. Da esquerda para a direita: Bloco 2 (90 dias, procedimento 1); Bloco 5 (84 dias, procedimento 2); Bloco 9 (84 dias, procedimento 3); Bloco 11 (75 dias, procedimento 4).	25
Figura 9: Eflorescência em etapas de secagem e absorção capilar, respectivamente.	26
Figura 10: Seção transversal das amostras mostrando um precipitado esbranquiçado nas porções centrais.	26
Figura 11: Difração de raios X da eflorescência.....	26
Figura 12: Difração de raios X da porção central do bloco 6 (procedimento 2).....	27
Figura 13: Imagem de MEV da superfície de um bloco mostrando predominância de thenardita e mirabilita desidratada.....	28
Figura 14: Imagem de MEV da superfície de um bloco mostrando a forma dos cristais de thenardita e mirabilita desidratada.....	28
Figura 15: Imagem de MEV da seção interna de um bloco mostrando areia siltosa com precipitados de sulfato de sódio.	28
Figura 16: Imagem de MEV de porção interna de um bloco mostrando mirabilita desidratada e traços de cristais de etringita.....	28
Figura 17: Perda de massa dos blocos do Grupo B.....	29
Figura 18: Perda de massa média por procedimento do Grupo B.....	30
Figura 19: Desgaste superficial dos blocos. Esquerda: Bloco 14 (294 dias, procedimento 5); Direita: Bloco 16 (294 dias, procedimento 6).	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Frações dos tamanhos de partículas.	13
Tabela 3: Fluorescência de raios X da terra.	18
Tabela 4: Perda de massa das amostras do procedimento 1. \bar{M} = perda de massa média das 3 amostras; σ = desvio padrão da perda de massa das 3 amostras.	22
Tabela 5: Perda de massa das amostras do procedimento 2.	23
Tabela 6: Perda de massa das amostras do procedimento 3.	23
Tabela 7: Perda de massa das amostras do procedimento 4.	23
Tabela 8: Fluorescência de raios X da efluorescência.	26
Tabela 9: Fluorescência de raios X das amostras das porções centrais.	27
Tabela 10: Perda de massa das amostras do procedimento 5.	30
Tabela 11: Perda de massa das amostras do procedimento 6.	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 A TERRA COMO MATERIAL DA CONSTRUÇÃO	11
2.2 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS ESTABILIZADOS COM CIMENTO (BTCEC).....	12
2.3 O ATAQUE DE SULFATOS.....	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	17
3.1 MATERIAIS.....	17
3.2 PRODUÇÃO DOS BLOCOS.....	18
3.3 PRODECIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1 GRUPO A: ESTUDO DE TEMPOS DE ABSORÇÃO CAPILAR	22
4.2 GRUPO B: ESTUDO DE CONCENTRAÇÕES.....	29
5. CONCLUSÃO	32
6. REFERÊNCIAS	33
APÊNDICE A	37

1. INTRODUÇÃO

O ataque de sulfatos é um conjunto de danosas reações físicas e químicas entre íons sulfato e componentes de materiais cimentícios endurecidos. As consequências dessas reações incluem expansão, fissuração, lascamento, perda de resistência mecânica e diminuição coesiva dos produtos de hidratação cimentícios (MEHTA & MONTEIRO, 2006).

Várias estruturas construídas com materiais cimentícios, principalmente concreto, deterioradas por ataque de sulfatos foram mencionadas em estudos anteriores. Na Suíça, ROMER *et al.* (2003) reporta danos causados em estruturas de túneis em contato com água subterrânea com sulfatos. No Reino Unido, CRAMMOND (2003) cita desgaste por sulfatos em uma variedade de construções, de fundações de casas domésticas e pontes rodoviárias até revestimento de túneis e escadarias portuárias. Na Alemanha, BELLMANN *et al.* (2012) discute 20 diferentes casos, incluindo fundações e paredes estruturais de pontes de rios, revestimentos de túneis, canais de água, um reservatório de água, uma bacia de processamento de água residual de mineração e um bueiro de esgoto. Vários outros exemplos de ataque de sulfatos em diferentes países foram citados também por CRAMMOND (2002).

O ataque de sulfatos em concretos, argamassas e pastas cimentícias tem sido estudado extensivamente nas últimas décadas (HAYNES *et al.*, 2008; BASSUONI & NEHDI, 2009; EL-HACHEM *et al.*, 2012; MASSAAD *et al.*, 2016), mas dados insuficientes estão disponíveis quando testando materiais cimentícios alternativos como os blocos de terra comprimidos estabilizados com cimento (BTCEC), material que usa a terra como principal matéria prima.

Como as interações solo-estrutura têm papel fundamental na durabilidade dos materiais, é fundamental saber quais fatores externos podem danificar as construções, como, por exemplo, altas concentrações de sais como cloretos e sulfatos.

Blocos de terra comprimidos estabilizados com cimento foram expostos à solução aquosa de sulfato de sódio em ciclos de absorção capilar e secagem. Com isso, esse trabalho teve como objetivo: estudar a influência do tempo de absorção capilar no desgaste das amostras; e entender o desgaste nos blocos quando a concentração de sulfato de sódio varia.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A TERRA COMO MATERIAL DA CONSTRUÇÃO

A terra *in natura* é um material de construção natural que tem sido usado desde tempos antigos, assim como a madeira e a pedra (ALAM *et al.*, 2015; PIATTONI *et al.*, 2011). Embora não haja consenso de quando o homem começou a usar a terra para fins construtivos, não está longe da verdade afirmar que construções de terra começaram com as sociedades agricultoras, entre 12000 e 7000 a.C. (PACHECO-TORGAL & JALALI, 2012).

Com o aumento populacional e a problemática do déficit de moradia, a construção com terra se torna uma solução eficiente devido ao seu baixo custo e disponibilidade local (BRADLEY *et al.*, 2017; IZEMMOUREN *et al.*, 2015; OLOTUAH, 2002). Além disso, ao fim da vida útil da construção, a terra pode ser facilmente reusada ou retornada ao solo sem nenhuma interferência ao meio ambiente (OTI *et al.*, 2009).

O gasto de energia necessário para produção de materiais da construção, incluindo produção e transporte de matérias primas, também é um importante indicador de sustentabilidade ambiental. Em termos desse gasto de energia, os materiais de construção de terra ainda são incomparáveis com os principais materiais de construção convencionais (SCHROEDER, 2016). Isso é ainda mais verdade quando aditivos de alta energia incorporada são utilizados (SCHROEDER, 2016).

Entretanto, a maioria dos solos nas suas condições naturais carecem de certas propriedades para construções, como resistência mecânica, estabilidade dimensional, durabilidade e resistência à água (WALKER, 1995; ALAM *et al.*, 2015). Para superar esse fato, técnicas de estabilização que reduzem porosidade e permeabilidade, e que aumentam resistência mecânica podem ser aplicadas. Segundo RIGASSI (1985), existem 3 tipos de processos de estabilização:

- a) Estabilização mecânica: As propriedades do solo são modificadas tratando sua estrutura. O processo mais usual é a compactação, que modifica a densidade, a resistência mecânica, a compressibilidade, a permeabilidade e a porosidade.

- b) Estabilização física: Consiste no tratamento da textura do solo, geralmente controlando as percentagens das várias frações de partículas, ou seja, fazendo correções granulométricas.
- c) Estabilização química: Consiste na adição de outros materiais ou produtos químicos ao solo para modificar suas propriedades, como aglomerantes, pozolanas e aditivos químicos.

Com suas propriedades melhoradas, os materiais de construção de terra podem durar várias décadas. Por exemplo, as construções de adobe¹ no estado da Turíngia (Alemanha), mesmo após 100 anos, perderam apenas poucos centímetros de espessura devido ao intemperismo nas paredes externas (SCHROEDER, 2016). Já na região de Bangalore (Índia), construções de adobe com aproximadamente 200 anos resistiram grandes quantidades de precipitação sem danos, pois são feitas manutenções regulares (SCHROEDER, 2016). Segundo HEATHCOTE (2002), talvez a estrutura de terra mais antiga é o Pueblo em Taos, no Novo México, que tem aproximadamente 900 anos de idade. Uma combinação de clima seco e manutenções periódicas contribuíram para sua conservação.

O bloco de terra comprimido foi um dos vários materiais da construção desenvolvidos para atender aos requisitos de resistência e durabilidade nas construções (TAALLAH & GUETTALA, 2016), sendo usualmente estabilizado quimicamente com cimento ou cal (PINTO, 2013; NAGARAJ *et al.*, 2014).

2.2 BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDOS ESTABILIZADOS COM CIMENTO (BTCEC)

O bloco de terra comprimido estabilizado com cimento é um material constituído por terra, cimento e água. Esses materiais devem ser adequadamente misturados antes da compactação, que por sua vez pode ser feita com prensas mecânicas ou hidráulicas.

Devido à grande diversidade de tipos de solos existentes, algumas propriedades como distribuição do tamanho das partículas, índices de consistência e teor de matéria orgânica são importantes para o BTCEC.

¹ O adobe é um material composto de terra crua, água, palha e/ou fibras vegetais, geralmente moldado em forma de tijolos.

Para obtenção da distribuição dos diâmetros das partículas do solo pode-se fazer ensaios de granulometria com peneiras para fração grossa e difração a laser para fração fina. Com esses diâmetros, é possível caracterizar as frações presentes. Para isso, existem várias tabelas de referência disponíveis, como por exemplo a Tabela 1 da International Standard Organization que tem abrangência internacional.

Tabela 1: Frações dos tamanhos de partículas.

Grupo de solos	Frações de tamanho de partículas	Intervalo do tamanho de partículas (mm)
Solo muito grosso	Matacão largo	> 630
	Matacão	> 200 até ≤ 630
	Seixo	> 63 até ≤ 200
Solo grosso	Cascalho	> 2 até ≤ 63
	Cascalho grosso	> 20 até ≤ 63
	Cascalho médio	> 6,3 até ≤ 20
	Cascalho fino	> 2,0 até ≤ 6,3
	Areia	> 0,063 até ≤ 2,0
	Areia grossa	> 0,63 até ≤ 2,0
	Areia média	> 0,20 até ≤ 0,63
	Areia fina	> 0,063 até ≤ 0,20
Solo fino	Silte	> 0,002 até ≤ 0,063
	Silte grossa	> 0,02 até ≤ 0,063
	Silte média	> 0,0063 até ≤ 0,02
	Silte fina	> 0,002 até ≤ 0,0063
	Argila	≤ 0,002

Fonte: ISO 14688-1:2017.

Além da distribuição granulométrica, os limites de consistência do solo também podem ser usados para o caracterizar. Com o limite de liquidez, o limite de plasticidade, o índice de plasticidade e o resultado da distribuição das partículas, pode-se classificar o tipo de solo de acordo com o Quadro 1 do Sistema de Unificado de Classificação de Solos.

Quadro 1: Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

Critérios para atribuir símbolos de grupo e nomes de grupo usando testes de laboratório				Classificação do solo	
				Símbolo do grupo	Nome do grupo
Solos de grãos grossos Mais de 50% retido na peneira 200	Cascalho > 50% da fração grossa retida na peneira N° 4	Cascalho puro	$Cu \geq 4$ e $1 \leq Cc \leq 3$	GW	Cascalho bem graduado
		< 5% de finos	$Cu < 4$ e/ou $Cc < 1$ ou $Cc > 3$	GP	Cascalho mal graduado
			Finos classificados como ML ou MH	GM	Cascalho siltoso
			Cascalho com finos > 12% de finos	Finos classificados como CL ou CH	GC
	Areias > 50% da fração grossa passa na peneira N° 4	Areias puras	$Cu \geq 6$ e $1 \leq Cc \leq 3$	SW	Areia bem graduada
			$Cu < 6$ e/ou $Cc < 1$ ou $Cc > 3$	SP	Areia mal graduada
		Areias com finos > 12% de finos	Finos classificados como ML ou MH	SM	Areia siltosa
			Finos classificados como CL ou CH	SC	Areia argilosa
Solos de grãos finos Mais de 50% passa na peneira 200	Siltos e Argilas Limite de liquidez < 50	Inorgânico	IP > 7 e plota em ou acima da Linha "A"	CL	Argila magra
			IP < 4 e plota abaixo da linha "A"	ML	Silte
		Orgânico	Limite de liquidez—seco em estufa < 0.75	OL	Argila orgânica
			Limite de liquidez—Não seco	OL	Silte orgânico
	Siltos e Argilas Limite de liquidez > 50	Inorgânico	IP plota em ou acima da linha "A"	CH	Argila gorda
			IP plota abaixo da linha "A"	MH	Silte elástico
		Orgânico	Limite de liquidez—seco em estufa < 0.75	OH	Argila orgânica
			Limite de liquidez—Não seco	OH	Silte orgânico
Solos altamente orgânicos				PT	Turfa

Fonte: ASTM D-2487 (2006).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, $Cu = D_{60}/D_{10}$; $Cc = (D_{30})^2 / D_{10} \times D_{60}$; e a Linha "A" está presente no gráfico de plasticidade (limite de liquidez x índice de plasticidade). Para mais detalhes, consultar a norma ASTM D-2487-06.

De acordo com a NBR 10833 (2013), para fabricação de BTCEC recomenda-se que o solo tenha as seguintes propriedades:

- 100% das partículas menores que 4,8 mm;
- Entre 10% e 50% de partículas menores que 0.075 mm (#200);
- Limite de liquidez $\leq 45\%$;
- Índice de plasticidade $\leq 18\%$.

A mistura dos materiais – cimento, terra e água – deve ser feita de forma que resulte em uma distribuição mais homogênea possível. Após a prensagem, a cura dos blocos deve ser feita em ambiente úmido o suficiente para permitir que as reações de hidratação do cimento ocorram de forma adequada.

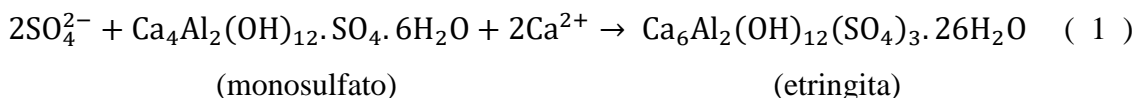
2.3 O ATAQUE DE SULFATOS

O ataque de sulfatos consiste em um conjunto de reações químicas e físicas entre íons sulfato e componentes da pasta endurecida de cimento. Ele é usualmente classificado de acordo com sua origem, externo ou interno, e com sua natureza, físico ou químico.

O ataque de sulfatos externo (ASE) ocorre quando o sulfato presente em ambiente externo penetra materiais porosos. Alguns exemplos desses ambientes são solos, água subterrânea, efluentes industriais e matéria orgânica em degradação (MEHTA & MONTEIRO, 2006; COLLEPARDI, 2003). O ataque de sulfatos interno (ASI) ocorre quando a fonte de sulfatos está dentro do material, usualmente proveniente do cimento com alta concentração de sulfatos ou de agregados contaminados com gesso (COLLEPARDI, 2003). Além disso, o agregado em si pode conter concentrações danosas de sulfato, como por exemplo a Pirita (FeS_2) (BELLMANN *et al.*, 2012).

O ataque físico de sulfatos (AFS) ocorre devido ao crescimento contínuo de sais cristalinos dentro dos poros do material (BASSUONI & RAHMAN, 2016) com alternância entre cristais de thenardita (Na_2SO_4) e mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) que geram elevada pressão (HAYNES & BASSUONI, 2011). Quando a tensão causada pelo crescimento de cristais em poros pequenos excede a resistência à tração do aglomerante, microfissuras ocorrem (MÜLLAUER *et al.*, 2013). Em caso de cristalização em grandes poros, não é gerado pressão suficiente para causar danos.

Por fim, o ataque químico de sulfatos (AQS) ocorre devido às reações entre íons sulfato e os principais componentes da pasta hidratada de cimento (BASSUONI & RAHMAN, 2016). Alguns exemplos dessas reações são a precipitação adicional de etringita e gesso (WHITTAKER & BLACK, 2015). Segundo SKALNY *et al.* (2003), essas reações de precipitação de etringita e gesso são (1) e (2), respectivamente.



Sulfatos ocorrem naturalmente em intervalos de concentrações entre 0,015 – 1% em corpos hídricos, 0,0003 – 2% em água subterrânea e aproximadamente 0,26% em água marinha (BELLMANN *et al.*, 2012; CANFIELD & FARQUHAR, 2009; MITTERMAYR *et al.*, 2013; ROMER *et al.*, 2003; SWENSON, 1971; VAN DEN BRAND *et al.*, 2015; ACI 318M, 2005). Entretanto, nessas concentrações a falha dos materiais testados pode levar vários anos para ocorrer. Em laboratório, as concentrações de sulfato usadas ficam entre 0,1% – 30,0% e os experimentos duram de 2 meses até mais de 3 anos (BASSUONI & NEHDI, 2009; BASSUONI & RAHMAN, 2016; EL-HACHEM *et al.*, 2012; HAYNES *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2012; MASSAAD *et al.*, 2016; MÜLLAUER *et al.*, 2013; STROH *et al.*, 2015; ZHUTOVSKY & HOOTON, 2017). As Tabelas A.1 e A.2 em apêndice especificam concentrações naturais de sulfatos que causaram danos às construções e concentrações em laboratório usadas em experimentos de durabilidade, respectivamente.

Entre as consequências do ataque por sulfatos, pode-se destacar: desagregação, fissuração, lascamento, perda de resistência mecânica, aumento na porosidade, e em alguns casos até a desintegração do material. Alguns dos principais fatores que influenciam a severidade do desgaste por sulfatos são teor de C₃A do cimento, concentração de sulfatos no meio externo ou no material, temperatura e umidade relativa do ambiente (BASSUONI & NEHDI, 2009; BASSUONI & RAHMAN, 2016; MÜLLAUER *et al.*, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

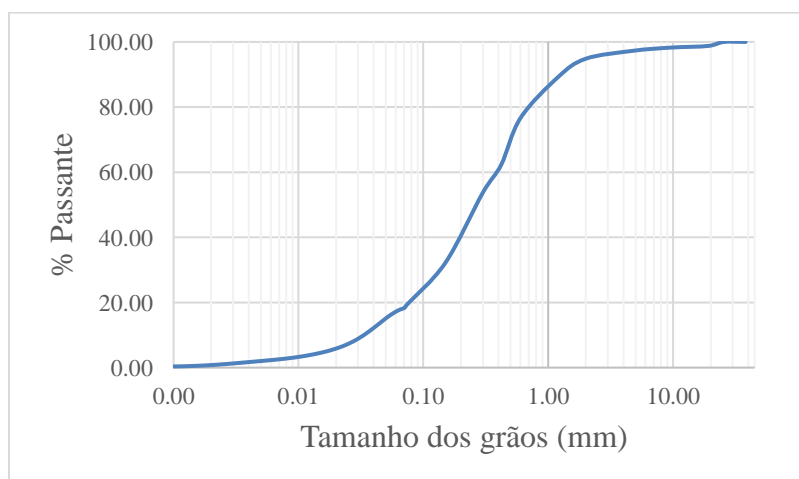
3.1 MATERIAIS

Areia siltosa, cimento Portland CP II-Z-32 e água concessionária local foram usados para produzir os blocos de terra comprimidos estabilizados.

O CP II-Z-32 contém 6 – 14% de material pozolânico e 0 – 10% de material carbonático. A pozolana deve ter pelo menos 75% de atividade aos 28 dias e o material carbonático deve ser composto de pelo menos 85% CaCO_3 . A porcentagem remanescente é composta de clínquer e sulfatos de cálcio.

A distribuição granulométrica do solo (Figura 1) foi obtida com uso de peneiras de 76 mm até 0,075 mm e granulometria por difração a laser, para sua fração grossa ($d > 0,075$ mm) e fração fina ($d < 0,075$ mm), respectivamente. Os resultados indicaram que a terra é composta por: 5,15% de cascalho, 77,29% de areia, 16,78% de silte e 0,78% de argila (ISO 14688-1:2017). Antes do uso, a terra passou por uma peneira de 4.8 mm e a fração retida foi descartada.

Figura 1: Granulometria da terra.



Fonte: Próprio autor.

Os índices de consistência do solo obtidos foram: limite de liquidez de 28,64%, limite de plasticidade de 18,62% e índice de plasticidade de 10,02%. Pela classificação do Sistema Unificado (ASTM D-2487-06), o solo usado foi classificado como areia argilosa. Entretanto, devido à predominância da fração de silte sobre a de argila, optou-se por manter a classificação de

areia siltosa, de acordo com as frações da ISO 14688-1:2017. Segundo a NBR 10833 (2013), essas propriedades atendem os requisitos para fabricação de blocos solo-cimento prensados.

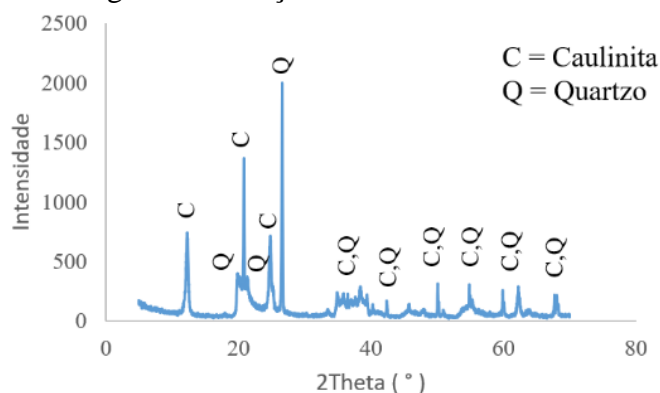
A caracterização dos minerais presentes na terra foi realizada por meio de fluorescência de raios X (FRX) e difração de raios X (DRX). O FRX apresentou predominância de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Tabela 2). O DRX indicou presença de quartzo e caulinita (Figura 2).

Tabela 2: Fluorescência de raios X da terra.

Composto	Porcentagem
SiO_2	62,27
Al_2O_3	23,97
Fe_2O_3	9,96
TiO_2	3,13
ZrO_2	0,21
SO_3	0,12
Outros	0,34

Fonte: Próprio autor.

Figura 2: Difração de raios X da terra.

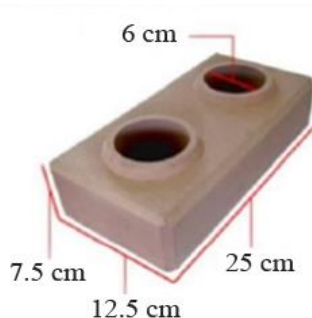


Fonte: Próprio autor.

3.2 PRODUÇÃO DOS BLOCOS

A terra usada foi secada ao ar livre para obter umidade higroscópica. O teor de cimento Portland e água foi de 12% e 4,5% em massa, respectivamente. Segundo RIGASSI (1985), pelo menos 5-6% de cimento deve ser usado para obter resultados satisfatórios. Com proporções entre 2-3% alguns solos têm desempenho pior do que quando sem cimento. O teor de água, por sua vez, foi adicionado até obter a compactação ótima. As dimensões dos blocos estão indicadas na Figura 3. Os blocos foram curados durante 14 dias em local coberto, protegido da chuva e da luz solar. No processo de cura, os blocos foram umedecidos duas vezes ao dia para contribuir com o processo de hidratação do cimento.

Figura 3: Dimensões das amostras.

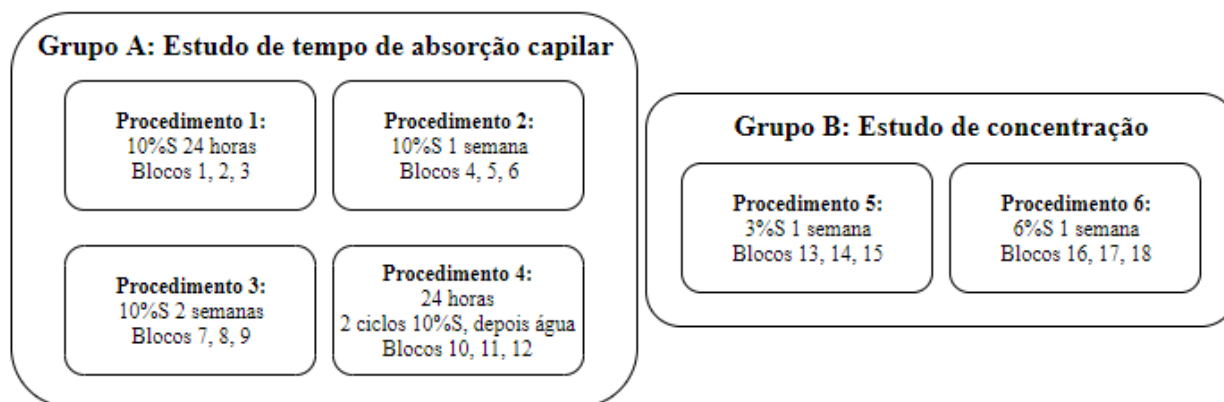


Fonte: Adaptado de QUEIROGA (2016).

3.3 PRODECIMENTO EXPERIMENTAL

Dezoito blocos foram submetidos a dois conjuntos diferentes de procedimentos (Figura 4). No primeiro conjunto (Grupo A), estudou-se a influência do tempo em contato com solução aquosa de sulfato de sódio – tempo de absorção capilar. No segundo (Grupo B), a influência da concentração de sulfato de sódio foi estudada usando o tempo de absorção capilar ótimo do Grupo A. O tempo de secagem foi de 2 semanas para todos os procedimentos.

Figura 4: Tempo de absorção capilar e de concentração de sulfatos para cada procedimento. S = Sulfato de sódio.



Fonte: Próprio autor.

Para remover a umidade excessiva, os blocos ficaram 24 horas em estufa térmica a 100 °C. Depois disso, foram separados e postos à temperatura ambiente. Os blocos foram então colocados em recipientes de PVC em barras de suporte de alumínio e a solução aquosa de sulfato de sódio

foi gradualmente adicionada até uma altura de 2 cm (Figura 5). A solução foi reposta à medida que seu nível diminuiu devido à absorção e evaporação.

Figura 5: Ensaios de capilaridade em recipientes de PVC.



Fonte: Próprio autor.

Para testar o desgaste dos BTCEC expostos a sulfato de sódio, a RILEM TC 127-MS-A.1 (1998) foi usada como base. Este relatório recomenda absorção capilar e subsequente imersão de blocos de alvenaria utilizando sulfato de sódio a 10% de concentração em massa como procedimento acelerado. Neste estudo utilizou-se apenas absorção capilar, tomando como referência também a NBR 9779 (1995), que trata de ensaios de capilaridade em amostras endurecidas de concreto e argamassa.

Grupo A – Estudo de tempos de absorção capilar:

- Procedimento 1:
 - a) Os blocos 1, 2 e 3 foram colocados dentro do recipiente nas barras de suporte de alumínio e solução aquosa de sulfato de sódio a 10% de concentração em massa foi gradualmente adicionada até atingir uma altura de 2 cm da base do bloco. Este tempo foi registrado como tempo zero ($t = 0$ horas);
 - b) Em $t = 4$ horas, a solução foi reabastecida até 2 cm;
 - c) Em $t = 24$ horas, os blocos foram tirados da solução e pesados, obtendo-se M_{w1} (em gramas);
 - d) O recipiente foi esvaziado e limpo. Em seguida, os blocos foram postos dentro dos recipientes com as barras de suporte para secagem. As amostras permaneceram em uma sala fechada com temperatura e umidade relativa de $27,5 \pm 0,5$ °C e $71,5 \pm 5,0\%$, respectivamente;

- e) Após 2 semanas, os blocos foram sutilmente escovados até que as partículas livres fossem removidas da superfície. Após isso, foram novamente pesados, obtendo-se M_{d1} ;
- f) Os passos a) – e) foram repetidos até a falha dos blocos.
- Procedimento 2: Os blocos 4, 5 e 6 foram submetidos às mesmas etapas do procedimento 1, com exceção do tempo de absorção capilar que foi de 1 semana (etapa c).
 - Procedimento 3: Os blocos 7, 8 e 9 foram submetidos às mesmas etapas do procedimento 1, com exceção do tempo de absorção capilar que foi de 2 semanas (etapa c).
 - Procedimento 4: Os blocos 10, 11 e 12 passaram pelas mesmas etapas do procedimento 1, exceto que os blocos foram inicialmente submetidos à solução aquosa de sulfato de sódio a 10% de concentração em massa por 24 horas nos dois primeiros ciclos. A partir do terceiro ciclo, água da concessionária local foi usada para substituir a solução de sulfato de sódio.

Grupo B – Estudo de concentrações:

Do Grupo A, o procedimento ideal foi 1 semana em solução e 2 semanas de secagem (procedimento 2), conforme discutido na página 24. Todos os blocos do Grupo B foram submetidos a esse procedimento, exceto que os blocos 13, 14 e 15 foram testados com solução aquosa de sulfato de sódio a 3% e os blocos 16, 17 e 18 com solução aquosa de sulfato de sódio a 6%. Os valores de temperatura e umidade relativa do ambiente no qual os blocos do Grupo B foram expostos foram de $26,0 \pm 2,0$ °C e $75,0 \pm 8,5\%$, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No final das etapas de absorção capilar e secagem, as amostras foram pesadas e fotografadas para análise de desgaste causada pela solução de sulfato de sódio. Os testes foram realizados até a falha das amostras. Considerou-se que os blocos falharam quando ocorreu intenso fissuração e/ou lascamento.

Os blocos apresentaram peso médio de 3310 ± 100 g. Além disso, os procedimentos passaram a ser cíclicos somente após o primeiro ciclo de absorção capilar e secagem. Portanto, para os cálculos, a massa inicial foi considerada a massa da primeira etapa de secagem (M_{d1}).

4.1 GRUPO A: ESTUDO DE TEMPOS DE ABSORÇÃO CAPILAR

A perda de massa das amostras está presente nas Tabela 3 Tabela 4 Tabela 5 Tabela 6 e foi calculada usando a Equação 3:

$$\Delta M_{ij}(\%) = (M_{ij} - M_{d1})/M_{d1} \times 100 \quad (3)$$

Onde i = w (absorção capilar) ou d (secagem) e j = 1, 2, 3...

Tabela 3: Perda de massa das amostras do procedimento 1. \bar{M} = perda de massa média das 3 amostras; σ = desvio padrão da perda de massa das 3 amostras.

	$\Delta M_{\text{Bloco1}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco2}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco3}} (\%)$	$\bar{M} (\%)$	$\sigma (\%)$	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15
M_{w2}	10,8	11,7	13,5	12,0	1,4	16
M_{d2}	1,8	2,3	1,3	1,8	0,5	30
M_{w3}	10,9	12,0	12,1	11,7	0,6	31
M_{d3}	-0,1	0,6	-1,5	-0,3	1,1	45
M_{w4}	10,4	12,4	11,2	11,3	1,0	46
M_{d4}	-3,2	-1,8	-5,1	-3,4	1,6	60
M_{w5}	6,3	9,0	6,8	7,4	1,4	61
M_{d5}	-6,6	-4,7	-8,9	-6,7	2,1	75
M_{w6}	2,7	5,4	2,1	3,4	1,7	76
M_{d6}	-7,4	-4,3	-8,6	-6,8	2,2	90

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4: Perda de massa das amostras do procedimento 2.

	$\Delta M_{\text{Bloco4}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco5}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco6}} (\%)$	$\bar{M} (\%)$	$\sigma (\%)$	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21
M_{w2}	10,8	12,3	11,2	11,4	0,8	28
M_{d2}	-0,9	-0,9	-2,0	-1,3	0,6	42
M_{w3}	10,1	9,1	9,7	9,6	0,5	49
M_{d3}	-3,6	-4,2	-4,5	-4,1	0,5	63
M_{w4}	8,5	8,0	7,8	8,1	0,3	70
M_{d4}	-8,5	-9,8	-7,8	-8,7	1,0	84
M_{w5}	0,7	-1,0	1,7	0,5	1,3	91
M_{d5}	-10,8	-11,4	-9,0	-10,4	1,3	105

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5: Perda de massa das amostras do procedimento 3.

	$\Delta M_{\text{Bloco7}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco8}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco9}} (\%)$	$\bar{M} (\%)$	$\sigma (\%)$	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28
M_{w2}	10,1	10,8	10,1	10,3	0,4	42
M_{d2}	-2,5	-3,6	-2,8	-3,0	0,5	56
M_{w3}	9,0	9,5	10,6	9,7	0,8	70
M_{d3}	-7,3	-10,2	-11,3	-9,6	2,1	84
M_{w4}	1,7	-0,9	-3,0	-0,7	2,3	98
M_{d4}	-7,6	-11,3	-12,2	-10,4	2,4	112

Fonte: Próprio autor.

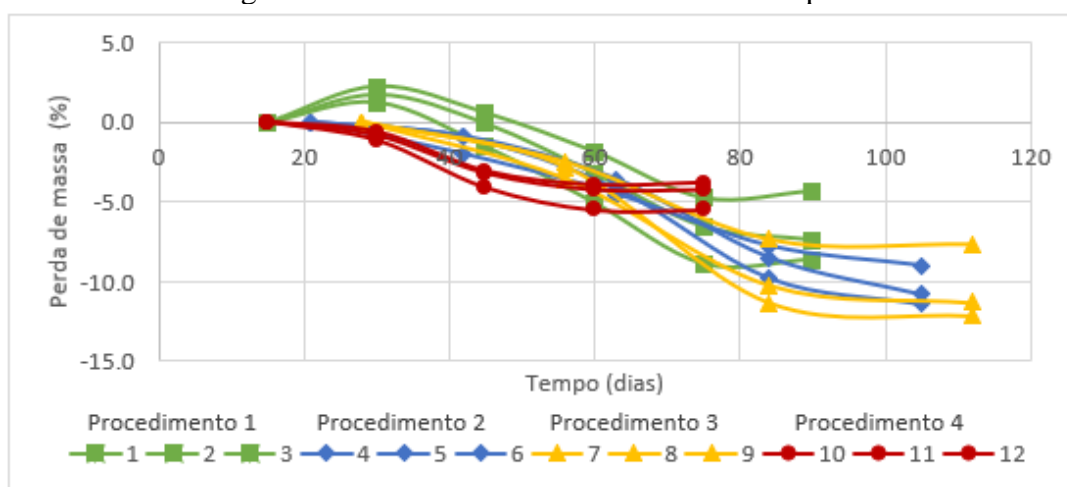
Tabela 6: Perda de massa das amostras do procedimento 4.

	$\Delta M_{\text{Bloco10}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco11}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco12}} (\%)$	$\bar{M} (\%)$	$\sigma (\%)$	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15
M_{w2}	10,0	9,9	10,2	10,0	0,1	16
M_{d2}	-1,1	-0,8	-0,6	-0,9	0,3	30
M_{w3}	9,3	9,1	9,6	9,3	0,2	31
M_{d3}	-4,1	-3,2	-3,1	-3,4	0,5	45
M_{w4}	6,5	7,2	7,7	7,2	0,6	46
M_{d4}	-5,5	-4,2	-4,0	-4,5	0,8	60
M_{w5}	5,1	6,2	6,8	6,1	0,8	61
M_{d5}	-5,5	-4,2	-3,8	-4,5	0,9	75

Fonte: Próprio autor.

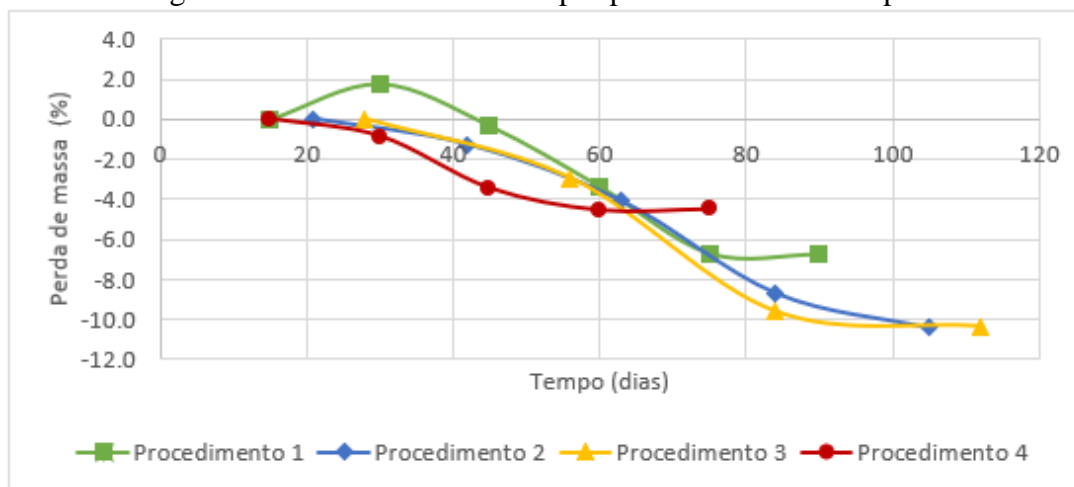
A distribuição da perda de massa ao longo do tempo é mostrada nas Figura 6 e Figura 7. Em geral, os procedimentos com amostras expostas por períodos mais longos nas etapas de absorção capilar resultaram em maior perda de massa, sendo os aumentos decrescentes. O procedimento de tempo de absorção capilar de 2 semanas (procedimento 3), apesar de ser o mais agressivo, resultou em perda de massa semelhante em comparação com o procedimento de tempo de absorção capilar de 1 semana (procedimento 2). Além disso, esses últimos procedimentos foram os únicos capazes de levar amostras à falha, ambos em 84 dias. Dito isso, o procedimento 2 foi selecionado como o mais eficaz porque foi capaz de resultar na falha das amostras com um histórico de degradação mais detalhado (mais ciclos). O desgaste superficial nas amostras é mostrado na Figura 8.

Figura 6: Perda de massa das amostras do Grupo A.



Fonte: Próprio autor.

Figura 7: Perda de massa média por procedimento do Grupo A.



Fonte: Próprio autor.

Figura 8: Desgaste superficial das amostras. Da esquerda para a direita: Bloco 2 (90 dias, procedimento 1); Bloco 5 (84 dias, procedimento 2); Bloco 9 (84 dias, procedimento 3); Bloco 11 (75 dias, procedimento 4).



Fonte: Próprio autor.

A altura da solução de 2 centímetros (a partir da base das amostras) foi suficiente para molhar completamente os blocos por absorção capilar. Observou-se eflorescência progressiva tanto nas etapas de secagem quanto de absorção capilar (Figura 9). Após o final dos ciclos de exposição, amostras foram retiradas de depósitos de eflorescência, de porções da superfície e da parte central de seções transversais (Figura 10) para testes de DRX, FRX e MEV (microscópio eletrônico de varredura). Das amostras da eflorescência, o DRX (Figura 11) e o FRX (Tabela 7) mostram que ela é composta principalmente de thenardita e mirabilita. Segundo BASSUONI & NEHDI (2009), existe uma frente de secagem na camada superficial dos corpos de prova que permite a supersaturação e cristalização da thenardita. Nas etapas de secagem, a eflorescência e a desagregação superficial foram mais intensas. Provavelmente por causa do fato de nas etapas de absorção capilar os blocos estarem saturados, a estabilidade dimensional era maior quando comparada às etapas de secagem, nas quais havia ocorrência de retração.

Figura 9: Eflorescência em etapas de secagem e absorção capilar, respectivamente.



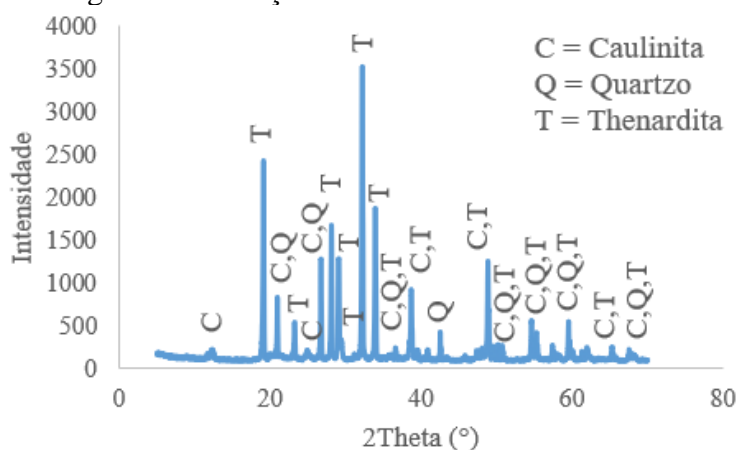
Fonte: Próprio autor.

Figura 10: Seção transversal das amostras mostrando um precipitado esbranquiçado nas porções centrais.



Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Difração de raios X da eflorescência.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7: Fluorescência de raios X da eflorescência.

Eflorescência	
SO ₃	44,206
Na ₂ O	36,797
SiO ₂	8,852
Al ₂ O ₃	4,456
CaO	3,252
Fe ₂ O ₃	1,603
TiO ₂	0,372
Outros	0,462

Fonte: Próprio autor.

Nas amostras da porção central (Figura 10), uma criptoflorescência de precipitado esbranquiçado (cristais de sulfato de sódio) foi observada internamente nas seções transversais, enquanto as camadas externas tiveram concentrações mais baixas de sulfatos devido à eflorescência carregar os precipitados para o ambiente externo. Até 1 semana de tempo de absorção capilar, o tempo de exposição mais longo a soluções de sulfato de sódio resultou em taxas de precipitação mais elevadas de cristais de sulfato de sódio nas amostras (Tabela 8). Esperava-se uma maior concentração de sulfato no procedimento 3 (tempo de absorção capilar de 2 semanas), mas os resultados foram semelhantes ao procedimento 2 (tempo de absorção capilar de 1 semana). Isso ratifica a perda de massa semelhante entre os procedimentos 2 e 3, assim como ambos provocarem falha nas amostras ao mesmo tempo (84 dias). Além disso, também condiz com o

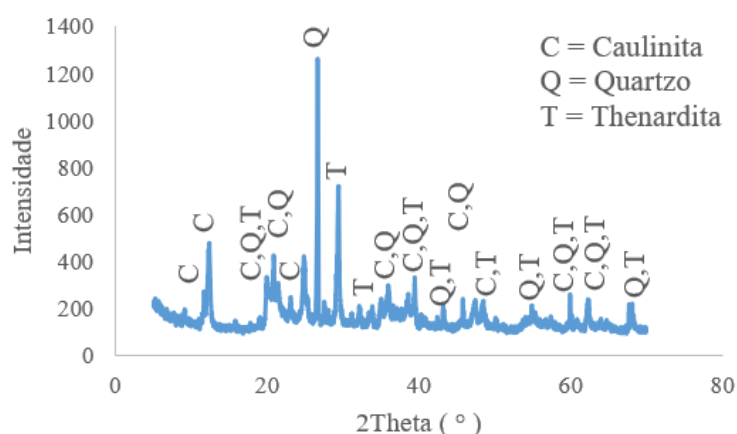
aumento da perda de massa entre o procedimento 1 e os procedimentos 2 e 3. O DRX indicou presença de thenardita, caulinita e quartzo (Figura 12).

Tabela 8: Fluorescência de raios X das amostras das porções centrais.

Procedimento 1	Procedimento 2	Procedimento 3	Procedimento 4
SiO ₂ 40,115	SiO ₂ 39,983	SiO ₂ 39,521	SiO ₂ 44,823
Al ₂ O ₃ 19,814	Al ₂ O ₃ 19,477	Al ₂ O ₃ 19,285	Al ₂ O ₃ 22,135
CaO 16,244	CaO 15,211	CaO 16,032	CaO 13,983
SO ₃ 8,043	SO ₃ 8,837	SO ₃ 8,934	Fe ₂ O ₃ 7,901
Fe ₂ O ₃ 7,454	Fe ₂ O ₃ 7,328	Fe ₂ O ₃ 7,367	SO ₃ 5,073
Na ₂ O 5,111	Na ₂ O 6,113	Na ₂ O 5,786	Na ₂ O 2,842
TiO ₂ 1,778	TiO ₂ 1,772	TiO ₂ 1,787	TiO ₂ 1,989
Outros 1,439	Outros 1,279	Outros 1,288	Outros 1,253

Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Difração de raios X da porção central do bloco 6 (procedimento 2).

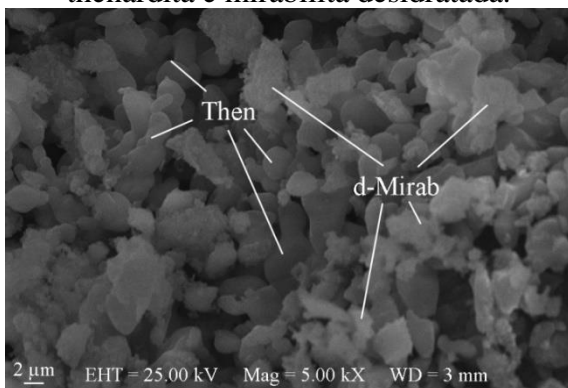


Fonte: Próprio autor.

As amostras de MEV passaram por um processo de secagem a 100 ° C por 24 horas antes dos testes. Na superfície dos blocos, a ocorrência e a forma dos cristais de thenardita (Then) e mirabilita desidratada (d-Mirab) são mostradas nas Figura 13 e Figura 14. A thenardita identificada tem dimensões na ordem de micrômetros / sub micrômetros, em forma de cristais sem faces definidas. Cristais semelhantes de thenardita foram observados por RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.* (2000) e AYE *et al.* (2010) em condições laboratoriais e de campo. Os autores relataram que a thenardita se dissolve na solução e subsequentemente cristaliza nas fases de thenardita e mirabilita após a secagem (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2000; FLATT & SCHERER, 2002). Durante os experimentos, os BTCEC estavam sob condições de temperatura e umidade relativa de

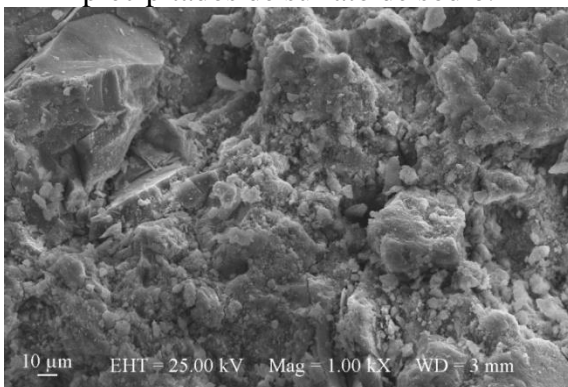
$27,5 \pm 0,5$ ° C e $71,5 \pm 5,0\%$, respectivamente. Estas condições permitem a precipitação de ambas thenardita e mirabilita de acordo com FLATT & SCHERER (2002) e HAYNES & BASSUONI (2011).

Figura 13: Imagem de MEV da superfície de um bloco mostrando predominância de thenardita e mirabilita desidratada.



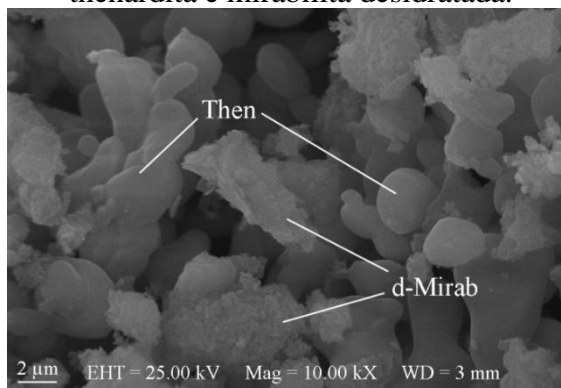
Fonte: Próprio autor.

Figura 15: Imagem de MEV da seção interna de um bloco mostrando areia siltosa com precipitados de sulfato de sódio.



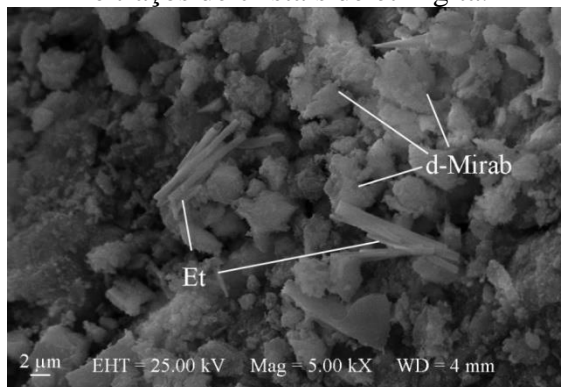
Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Imagem de MEV da superfície de um bloco mostrando a forma dos cristais de thenardita e mirabilita desidratada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 16: Imagem de MEV de porção interna de um bloco mostrando mirabilita desidratada e traços de cristais de etringita.



Fonte: Próprio autor.

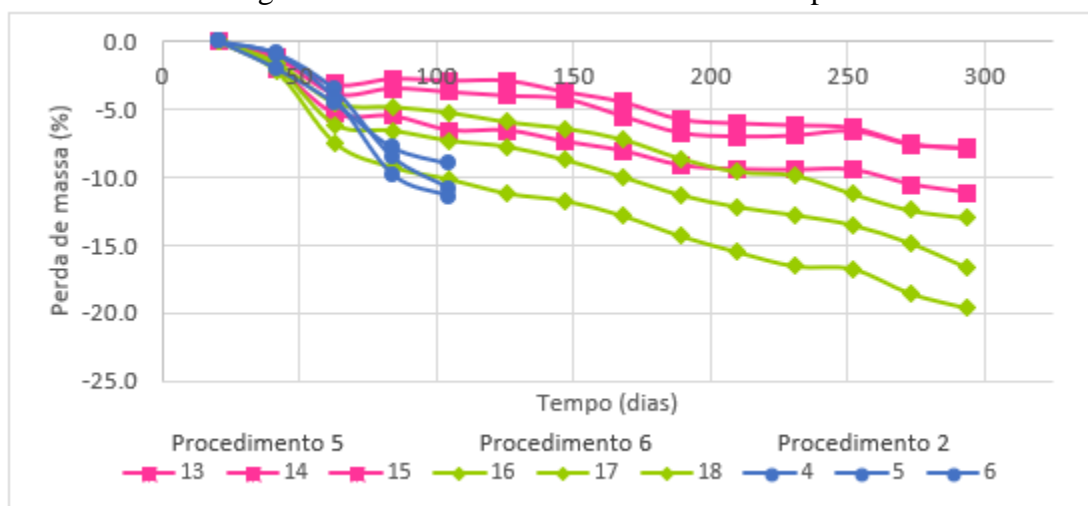
Nas porções internas dos blocos, ocorreu predominância de mirabilita desidratada (Figura 15). Embora a etringita não seja estável em temperaturas acima de 65 °C (MEHTA & MONTEIRO, 2006), dois aglomerados de agulhas de etringita ($C_6AS_3H_{32}$) (Figura 16) foram identificados indicando possível ocorrência simultânea de ataque de sulfato químico. Maiores taxas de supersaturação da solução facilitam a precipitação de thenardita (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2000). Como os ciclos de absorção capilar dos blocos foram feitos por capilaridade, a superfície exposta formou uma frente de secagem e apresentou maior taxa de supersaturação em relação às seções internas. Além disso, a maioria dos danos ocorreu nas

camadas externas dos blocos. Essa poderia ser uma possível explicação para a abundância de thenardita na superfície e escassez nas seções internas.

4.2 GRUPO B: ESTUDO DE CONCENTRAÇÕES

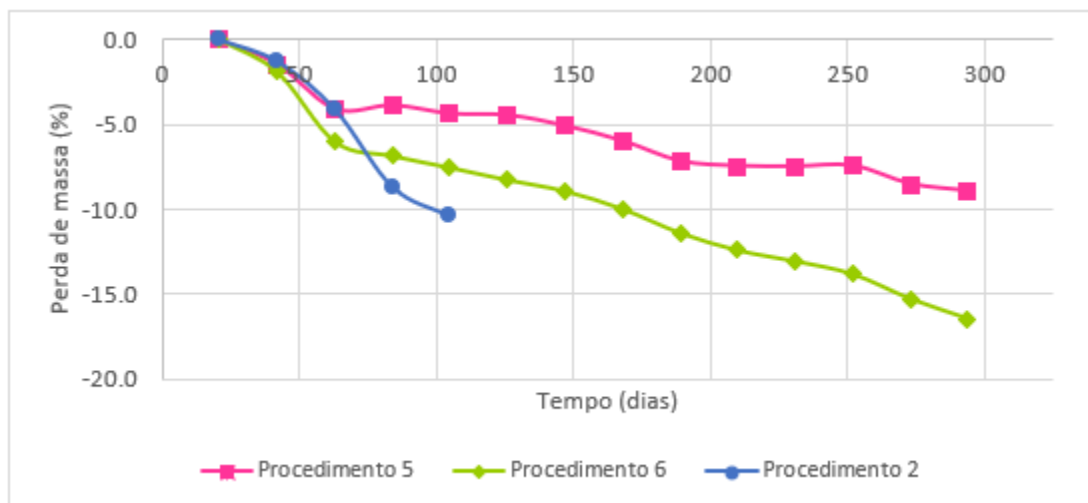
Semelhante ao Grupo A, a cada etapa foram realizadas pesagens e a Equação 3 foi usada para determinar a perda de massa. Os resultados ao longo do tempo são apresentados nas Figura 17 e Figura 18 e nas Tabela 9 e Tabela 10. Como esperado, quanto maior a concentração de sulfatos, maior a taxa de desgaste. Química e fisicamente, há mais precipitação e cristalização de sulfatos em microporos. Os valores locais de temperatura e umidade relativa – $26,0 \pm 2,0$ ° C e $75,0 \pm 8,5\%$, respectivamente – permitiram a precipitação de thenardita e de mirabilita (FLATT & SCHERER, 2002; HAYNES & BASSUONI, 2011). Isso resultou em microfissuração, bem como na lixiviação de materiais cimentícios, causando diminuição da coesão e perda de agregados (MASSAAD *et al.*, 2016). Embora os procedimentos de ataque com sulfato de sódio a 3% e 6% tenham apresentado taxas de desgaste mais lentas que o procedimento de 10%, o sulfato de sódio a 6% resultou em maior perda de massa média total sem falha (ocorreu perda intensa de agregado superficial, mas nenhuma fissura ou lascamento superficial foi identificado). Isso pode ser explicado pela maior precipitação e taxa de cristalização dos sulfatos no procedimento de concentração de 10%, resultando em maior geração de pressão nos microporos e levando as amostras à falha. O desgaste da superfície dos blocos é mostrado na Figura 19.

Figura 17: Perda de massa dos blocos do Grupo B.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18: Perda de massa média por procedimento do Grupo B.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 9: Perda de massa das amostras do procedimento 5.

	$\Delta M_{\text{Bloco13}}$ (%)	$\Delta M_{\text{Bloco14}}$ (%)	$\Delta M_{\text{Bloco15}}$ (%)	\bar{M} (%)	σ (%)	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21
M_{w2}	9,2	10,6	9,6	9,8	0,7	28
M_{d2}	-1,1	-2,0	-1,2	-1,4	0,5	42
M_{w3}	8,9	9,6	9,4	9,3	0,3	49
M_{d3}	-3,1	-5,3	-3,9	-4,1	1,1	63
M_{w4}	8,1	7,1	8,5	7,9	0,7	70
M_{d4}	-2,7	-5,5	-3,4	-3,9	1,4	84
M_{w5}	7,7	5,8	7,6	7,0	1,1	91
M_{d5}	-2,8	-6,5	-3,7	-4,4	1,9	105
M_{w6}	7,7	5,8	8,1	7,2	1,2	112
M_{d6}	-2,8	-6,5	-4,0	-4,5	1,9	126
M_{w7}	7,1	4,9	7,2	6,4	1,3	133
M_{d7}	-3,7	-7,4	-4,2	-5,1	2,0	147
M_{w8}	7,0	4,6	6,9	6,1	1,4	154
M_{d8}	-4,4	-8,1	-5,5	-6,0	1,9	168
M_{w9}	7,0	4,1	6,6	5,9	1,6	175
M_{d9}	-5,7	-9,1	-6,7	-7,2	1,8	189
M_{w10}	6,7	4,1	6,3	5,7	1,4	196
M_{d10}	-6,0	-9,4	-7,0	-7,5	1,8	210
M_{w11}	5,4	2,7	5,4	4,5	1,5	217
M_{d11}	-6,1	-9,5	-6,9	-7,5	1,7	231
M_{w12}	5,0	2,7	5,2	4,3	1,4	238
M_{d12}	-6,3	-9,5	-6,6	-7,5	1,7	252
M_{w13}	4,2	1,9	4,7	3,6	1,5	259
M_{d13}	-7,4	-10,5	-7,6	-8,5	1,7	273
M_{w14}	3,9	1,9	4,6	3,5	1,4	280
M_{d14}	-7,8	-11,1	-7,9	-8,9	1,9	294

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10: Perda de massa das amostras do procedimento 6.

	$\Delta M_{\text{Bloco16}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco17}} (\%)$	$\Delta M_{\text{Bloco18}} (\%)$	$\bar{M} (\%)$	$\sigma (\%)$	Dias cumulativos
M_{d1}	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21
M_{w2}	8,2	8,5	8,5	8,4	0,2	28
M_{d2}	-1,5	-2,2	-1,9	-1,9	0,3	42
M_{w3}	6,9	7,6	7,6	7,4	0,4	49
M_{d3}	-4,5	-7,5	-6,1	-6,0	1,5	63
M_{w4}	5,2	3,3	4,6	4,4	1,0	70
M_{d4}	-4,8	-9,2	-6,5	-6,9	2,2	84
M_{w5}	4,1	0,4	2,8	2,5	1,8	91
M_{d5}	-5,2	-10,1	-7,3	-7,5	2,5	105
M_{w6}	4,5	0,3	3,0	2,6	2,1	112
M_{d6}	-5,9	-11,2	-7,7	-8,3	2,7	126
M_{w7}	3,4	-0,9	2,2	1,6	2,2	133
M_{d7}	-6,4	-11,7	-8,7	-8,9	2,7	147
M_{w8}	2,7	-1,6	1,6	0,9	2,3	154
M_{d8}	-7,2	-12,8	-10,0	-10,0	2,8	168
M_{w9}	2,7	-2,1	0,7	0,4	2,4	175
M_{d9}	-8,6	-14,3	-11,3	-11,4	2,9	189
M_{w10}	2,3	-2,5	0,3	0,0	2,4	196
M_{d10}	-9,6	-15,5	-12,2	-12,4	3,0	210
M_{w11}	0,0	-4,5	-1,2	-1,9	2,3	217
M_{d11}	-9,9	-16,5	-12,8	-13,1	3,4	231
M_{w12}	-1,0	-5,2	-2,1	-2,8	2,2	238
M_{d12}	-11,2	-16,7	-13,5	-13,8	2,8	252
M_{w13}	-1,4	-6,8	-3,4	-3,9	2,7	259
M_{d13}	-12,4	-18,6	-14,9	-15,3	3,1	273
M_{w14}	-2,1	-7,6	-4,0	-4,5	2,8	280
M_{d14}	-13,0	-19,6	-16,7	-16,4	3,3	294

Fonte: Próprio autor.

Figura 19: Desgaste superficial dos blocos. Esquerda: Bloco 14 (294 dias, procedimento 5);
Direita: Bloco 16 (294 dias, procedimento 6).



Fonte: Próprio autor.

5. CONCLUSÃO

Blocos de terra comprimidos estabilizados com cimento foram expostos ao ataque de sulfatos externo por ciclos de absorção capilar e secagem. A maior parte dos danos aos blocos foi causada pelo ataque físico de sulfatos, com thenardita e mirabilita precipitando-se em microporos e gerando pressão. Traços de etringita também foram encontrados, indicando possível ocorrência sutil de ataque químico de sulfatos. A partir deste estudo, foi possível concluir que:

- O tempo de absorção capilar influenciou o desgaste nas amostras. Em geral, intervalos maiores de exposição causaram maiores danos, com aumentos decrescentes. Lascamento e fissuração ocorreram em amostras testadas com tempo de absorção capilar de 1 semana e 2 semanas, utilizando concentração de sulfato de sódio a 10%.
- Maiores concentrações de sulfato causaram maiores danos nas amostras. Entretanto, embora o desgaste da superfície nas amostras testadas com concentrações mais baixas (isto é, 3% e 6% de sulfato de sódio) fosse mais sutil, ocorreu maior perda de massa total no procedimento 6 durante o período de ensaios (294 dias) sem que ocorresse lascamento ou fissuração visível.
- Dentre os procedimentos testados, recomenda-se utilizar o procedimento 2 (ciclos de 1 semana de absorção capilar com solução de 10% de sulfato de sódio e 2 semanas de secagem) para testar BTCEC contra ataque de sulfatos devido a esse ter sido capaz de levar as amostras à falha com um histórico de degradação mais gradual.

Devido ao fato de que concentrações mais baixas de sulfato resultaram em maior perda de massa total sem falhas (lascamento e / ou fissuração) das amostras, é recomendado também monitorar parâmetros adicionais (por exemplo, resistência mecânica) ao testar materiais contra ataque de sulfatos.

6. REFERÊNCIAS

- ALAM, I.; NASEER, A.; SHAH, A. A. Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 154–159, 2015.
- AYE, T.; OGUCHI, C. T.; TAKAYA, Y. Evaluation of sulfate resistance of Portland and high alumina cement mortars using hardness test. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 6, p. 1020–1026, 2010.
- BASSUONI, M. T.; NEHDI, M. L. Durability of self-consolidating concrete to different exposure regimes of sodium sulfate attack. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 42, n. 8, p. 1039–1057, 2009.
- BASSUONI, M. T.; RAHMAN, M. M. Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure. **Cement and Concrete Research**, v. 79, p. 395–408, 2016.
- BELLMANN, F.; ERFURT, W.; LUDWIG, H. M. Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 86–93, 2012.
- BRADLEY, R. A. et al. Steep Catenary Earth-Brick Shells as a Low-Cost Housing Solution. **Journal of Architectural Engineering**, v. 23, n. 2, p. 04016018, 2017.
- CANFIELD, D. E.; FARQUHAR, J. Animal evolution, bioturbation, and the sulfate concentration of the oceans. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 20, p. 8123–8127, 2009.
- COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 4–5 SPEC, p. 401–407, 2003.
- CRAMMOND, N. The occurrence of thaumasite in modern construction - A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 3–4, p. 393–402, 2002.
- CRAMMOND, N. J. The thaumasite form of sulfate attack in the UK. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 8, p. 809–818, 2003.
- EL-HACHEM, R. et al. New procedure to investigate external sulphate attack on cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 3, p. 357–364, 2012.
- FLATT, R. J.; SCHERER, G. W. **Hydration and crystallization pressure of sodium sulfate: a critical review**. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. **Anais...**2002

- HAYNES, H. et al. Salt weathering distress on concrete exposed to sodium sulfate environment. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 1, p. 35–43, 2008.
- HAYNES, H.; BASSUONI, M. T. Physical Salt Attack on Concrete. **Concrete International**, v. 33, n. 11, p. 38–42, 2011.
- HEATHCOTE, K. **An Investigation Into the Erodibility of Earth Wall Units**. [s.l.] University of Technology Sydney, 2002.
- IZEMMOUREN, O.; GUETTALA, A.; GUETTALA, S. Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 33, n. 5, p. 1321–1333, 25 out. 2015.
- LIU, T. et al. The influence of sulfate attack on the dynamic properties of concrete column. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 201–207, 2012.
- MASSAAD, G. et al. Advanced testing and performance specifications for the cementitious materials under external sulfate attacks. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 918–931, 2016.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. **The McGraw-Hill Companies, Inc.**, p. 684, 2006.
- MITTERMAYR, F. et al. Evaporation - A key mechanism for the thaumasite form of sulfate attack. **Cement and Concrete Research**, v. 49, p. 55–64, 2013.
- MÜLLAUER, W.; BEDDOE, R. E.; HEINZ, D. Sulfate attack expansion mechanisms. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 208–215, 2013.
- NAGARAJ, H. B. et al. Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 54–61, 2014.
- OLOTUAH, A. O. Recourse to earth for low-cost housing in Nigeria. **Building and Environment**, v. 37, n. 1, p. 123–129, 2002.
- OTI, J. E.; KINUTHIA, J. M.; BAI, J. Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks. **Engineering Geology**, v. 109, n. 3–4, p. 230–240, 2009.
- PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512–519, 2012.
- PIATTONI, Q.; QUAGLIARINI, E.; LENCI, S. Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p.

2067–2075, 2011.

PINTO, A. R. A. G. **Durabilidade e resistência de matriz de solo estabilizada com resina de mamona e fibras de pupunha para uso em construções com terra crua.** [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013.

RIGASSI, V. **Compressed Earth Blocks : Manual of Production.** [s.l: s.n.]. v. I. 1985.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E.; SEBASTIAN, E. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 1527–1534, 2000.

ROMER, M.; HOLZER, L.; PFIFFNER, M. Swiss tunnel structures: Concrete damage by formation of thaumasite. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 8, p. 1111–1117, 2003.

SCHROEDER, H. **Sustainable Building with Earth.** Cham: Springer International Publishing, 2016.

SKALNY, J. P.; MARCHAND, J.; ODLER, I. **Sulfat Attack on Concrete.** [s.l: s.n.]. 2003.

STROH, J.; MENG, B.; EMMERLING, F. Monitoring of sulphate attack on hardened cement paste studied by synchrotron XRD. **Solid State Sciences**, v. 48, p. 278–285, 2015.

SWENSON, E. G. Concrete in Sulphate Environments. **Canadian Building Digest**, n. 136, 1971.

TAALLAH, B.; GUETTALA, A. The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers.

Construction and Building Materials, v. 104, p. 52–62, 2016.

TSUI, N.; FLATT, R. J.; SCHERER, G. W. Crystallization damage by sodium sulfate. **Journal of Cultural Heritage**, v. 4, n. 2, p. 109–115, 2003.

VAN DEN BRAND, T. P. H. et al. Long-Term Effect of Seawater on Sulfate Reduction in Wastewater Treatment. **Environmental Engineering Science**, v. 32, n. 7, p. 622–630, 2015.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, n. 4, p. 301–310, 1995.

WHITTAKER, M.; BLACK, L. Current knowledge of external sulfate attack. **Advances in Cement Research**, v. 27, n. 9, p. 532–545, 2015.

ZHUTOVSKY, S.; DOUGLAS HOOTON, R. Experimental study on physical sulfate salt attack. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, 2017.

NORMAS:

ACI 318M-05: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, 2005.

ASTM D-2487-06: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials, United States, 2006.

ISO 14688-1: Geotechnical investigation and testing – Identification and classification of soil – Part 1: Identification and description. International Standard Organization, 2nd Edition, 2017.

_____. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 10833:** Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

RILEM TC 127-MS-A.1: Determination of the resistance of wallettes against sulphates and chlorides. RILEM Technical Committees Recommendations, Materials and Structures, 1998.

APÊNDICE A

Tabelas de concentrações de sulfatos naturais e de laboratório

Apêndice A.1 – Concentrações de sulfatos encontradas em condições naturais.

Autores	País	Amostra	Fonte	Composto	mg/l	%
Bellman <i>et al.</i> , 2012	Alemanha	Ponte rodoviária	Água móvel	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	600	0.06
					400	0.04
					800	0.08
					2000	0.2
					2500	0.25
		Bacia de concreto			1000	0.1
		Canal de saída			1000	0.1
		Canal de água			1000	0.1
		Ponte			300	0.03
		Bacia de concreto			400	0.04
		Bueiro de esgoto			14000	1.4
		Bacia de concreto			7400	0.74
		Ponte			-	0.3
		Mastro de rádio			-	0.3
		Solo estabilizado			Salmoura	Gesso (CaSO ₄ .2H ₂ O)
Túnel	Solo e rochas contendo sulfetos	Sulfeto (S ²⁻)	-	0.1		
Túnel			-	0.1		
Canal de água			Pirita (FeS ₂)	-	Até 6%	
Brand <i>et al.</i> , 2014	-	-	Água marinha	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Até 2500	0.25
Canfield & Farquhar, 2009	-	-			28 mM	0.00
Swenson, 1971	-	-			2750 ppm	0.275
Romer <i>et al.</i> , 2003	Suíça	Túnel	Água subterrânea	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	540	0.054
Mittermayr <i>et al.</i> , 2013	Áustria				300	0.03
					1900	0.19
		3			0.0003	
ACI 318M (2005)	-	Solo			545	0.0545
					-	0.1
		Água	-	2		
			150	0.015		
					10000	1

Apêndice A.2 – Concentrações de sulfatos usados em experimentos de durabilidade.

Autores	Amostras	Concentração (%)	Composto	Duração	Procedimento	Resultados (desgaste)
Bassuoni & Nehdi, 2009	Prismas e cilindros de concreto	5	Na ₂ SO ₄	2 anos	Exposição I: Amostras completamente imersas a 20 ± 2 °C	Sem danos significantes
					Exposição II (ciclo de 1 semana): Amostras completamente imersas por 4 dias, seguido de 3 dias de secagem a 45 °C, 35% UR	Sem danos significantes em 1 ano; alguns traços danificados após 2 anos
					Exposição III (ciclo de 1 semana): Amostras parcialmente imersas por 4 dias (com a parte superior expostas à secagem a 22 ± 2 °C, 55% ± 5 UR), seguido de 3 dias de secagem a 45 °C, 35% UR	Eflorescência progressiva na superfície de secagem, maior desgaste nas amostras
Bassuoni & Rhaman, 2016	Cilindros de concreto	10	Na ₂ SO ₄	120 dias	Ciclo de 24 horas: Molhagem a 20 ± 2°C, 90 ± 5% UR, 16 horas; Secagem a 40 ± 2 °C, 35 ± 5% UR, 8 horas	Desgaste significativo em 120 dias
El-Hachem <i>et al.</i> , 2012	Prismas de concreto	0.3	(SO ₄) ²⁻	50 meses	Imersão em condições controladas: temperatura de 20 °C e pH de 7,5	Sem danos significantes
		3		40 meses		Inchamento das amostras com alta porcentagem de a/c e C3A após 1 ano
		0.3		80 dias		O objetivo não foi estudar o desgaste ao longo do tempo
		1		120 dias		
3	180 dias					
Haynes <i>et al.</i> , 2008	Cilindros de concreto	5	Na ₂ SO ₄	até 3,1 anos	Imersão parcial em 5 ambientes: 3 estáveis e 2 cíclicos (transformações de fase entre mirabilita e thenardita)	Maior desgaste das amostras em ambientes cíclicos
Liu <i>et al.</i> , 2012	Cilindros de concreto	10	(SO ₄) ²⁻	120 dias	Ambiente cíclico: 35 °C, 100% UR por 3 horas; depois 45 °C, 0% UR por 3 horas	Diminuição significativa em propriedades dinâmicas comparado à amostras de referência
Massaad <i>et al.</i> , 2016	Argamassas	0.3	(SO ₄) ²⁻	Aprox. 200 dias	Imersão em 20 °C e pH 7.5	O objetivo não foi estudar o desgaste ao longo do tempo
Mullauer <i>et al.</i> , 2013	Cilindros de argamassa	0.15 3	(SO ₄) ²⁻	260 dias	Imersão em 20 °C	Maiores teores de C3A e concentração de sulfato resultaram em maior desgaste
Stroh <i>et al.</i> , 2015	Pastas cimentícias	0.3	Na ₂ SO ₄	18 meses	Imersão em 25 °C	O objetivo não foi estudar o desgaste ao longo do tempo
		1				
		2				
Zhutovski & Hooton, 2017	Prismas de argamassa	30	Na ₂ SO ₄	100 dias	Imersão de 24 horas com ciclos termais entre 5 e 30 °C	Desgaste significativo em todas as amostras (10,77% - 77,8% de perda de massa, dependendo do traço)