

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

CHEILA SIRLENE BEUTLER

**ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DO USO DE AREIA DE FUNDIÇÃO E
CIMENTO SUPERSULFATADO EM BLOCOS DE SOLO-CIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO
2017**

CHEILA SIRLENE BEUTLER

**ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DO USO DE AREIA DE FUNDIÇÃO E
CIMENTO SUPERSULFATADO EM BLOCOS DE SOLO-CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Caroline Angulski da Luz

PATO BRANCO

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA ADEQUABILIDADE DO USO DE AREIA DE FUNDIÇÃO E CIMENTO SUPERSULFATADO EM BLOCOS DE SOLO-CIMENTO

CHEILA SIRLENE BEUTLER

No dia 19 de junho de 2017, às 10h20min, na Sala de Treinamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná– UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº02-TCC/2017.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. CAROLINE ANGULSKI DA LUZ (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Msc. DANILO RINALDI BISCONSINI (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. NEY LYZANDRO TABALIPA (DACOC/UTFPR-PB)

Observação: O TERMO DE REFERÊNCIA devidamente assinado encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo à Deus pelo dom da vida, Seu amor infinito, sem Ele nada seria. Por permitir que tudo isso acontecesse, por ter me concedido saúde e forças para superar as dificuldades encontradas, me guiando até aqui. Não somente nestes anos como universitária, mas ao longo da vida.

Aos meus pais, Valério Beutler e Marli Sirlene Heimann Beutler, a quem amo sem medida, meus maiores exemplos, pelo amor incondicional, incentivo e apoio em todos os momentos. Aos meus irmãos, Sidinei Julio Beutler e Claiton Valério Beutler, sempre me inspirando a ser alguém melhor, por todo carinho e paciência dedicados.

À minha orientadora, Caroline Angulski da Luz, que com muita paciência e atenção investiu tempo à minha orientação, bem como pela oportunidade que me concedeu na área da pesquisa por meio da iniciação científica. Pela contribuição à minha vida acadêmica e pela influência na minha futura vida profissional. Pelos anos de trabalho, aprendizagem e incentivo, terá o meu eterno agradecimento.

Aos amigos que fiz durante minha graduação, pelas alegrias e diversões proporcionadas, bem como pelo incentivo nos momentos de desânimo e cansaço, que fizeram parte dessa fase tão importante e com certeza permanecerão presentes na minha vida. À minha amiga Caroline Francisca Pazetti, com quem morei praticamente durante toda a graduação, pela cumplicidade e paciência com que me ouviu quando eu precisava e pelos conselhos prestados, sempre com muito carinho e respeito.

Aos colegas de laboratório durante o período de realização das atividades, à técnica Claudia Baldin pela disponibilidade e auxílio prestado em todos os momentos, à Janaína Bonini pelo companheirismo e pelo conhecimento compartilhado. Às mestres Sílvia Rubert e Bruna Gracioli que foram de fundamental importância para meu crescimento científico. Aos meus colegas de iniciação científica que por diversas vezes prestaram sua cooperação.

Agradeço a Central de Análises da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco pela realização de análises que contribuíram para este trabalho. Também, ao Laboratório de Física do Solo do curso de Agronomia da UTFPR Pato Branco e ao Professor Jairo Calderari de Oliveira Junior da UTFPR de Dois Vizinhos pelas análises realizadas.

Agradeço também a todos os professores da minha graduação que de alguma forma contribuíram para minha formação profissional.

Hoje vivo uma realidade que antes era um sonho, mas foi necessário muito esforço, dedicação, paciência e perseverança para chegar até aqui, e nada disso eu conseguiria sozinha. Por isso, obrigada a todos, que mesmo não estando citados aqui, direta ou indiretamente colaboraram para a conclusão desta etapa. Esta caminhada não seria a mesma sem vocês.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

Theodore Roosevelt

RESUMO

BEUTLER, Cheila S. **Estudo da adequabilidade do uso de areia de fundição e cimento supersulfatado em blocos de solo-cimento**. 2017. 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2017.

A busca pela produção de materiais construtivos de baixo impacto ambiental e custo reduzido, associada ao aproveitamento de resíduos industriais, é um desafio aos pesquisadores. Este trabalho aborda o aproveitamento de subprodutos industriais como a areia de fundição, escória de alto-forno e fosfogesso para a fabricação de blocos de solo-cimento. A escória de alto forno e o fosfogesso são utilizados na composição do cimento supersulfatado (CSS), uma alternativa que pode reduzir o uso do clínquer, que é a principal causa dos gases de efeito estufa. O solo-cimento fornece inúmeras aplicações interessantes, entre elas, pode ser empregado na composição de blocos para alvenaria de vedação para a construção civil, uma vez que os blocos cerâmicos tradicionais necessitam de queima, elevando o gasto energético e a poluição. Logo, o uso de blocos de solo-cimento dispensaria a necessidade desse processo, pois este faz uso da estabilização à frio. No entanto, os resultados mostraram que, para as dosagens utilizadas, o CSS não apresentou desempenho satisfatório na aplicação em blocos de solo-cimento, pois demonstrou resistência à compressão muito baixa, além de não atender aos critérios normativos de absorção e durabilidade. O objetivo desse trabalho foi estudar o desempenho do CSS e a areia de fundição como material de correção do solo, quando aplicado na composição de blocos de solo-cimento, analisando sua viabilidade quanto a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Seu comportamento foi comparado ao cimento Portland composto com pozolana (CP II – Z 32), foram moldados blocos e submetidos aos ensaios prescritos pelas normas brasileiras.

Palavras chave: Blocos de solo-cimento. Areia de fundição. Cimento supersulfatado.

ABSTRACT

The search for the production of construction materials of low environmental impact and reduced costs, associated with industrial waste reuse, is a challenge to researchers. This project addresses industrial by-products reuse such as: casting sand, blast furnace slag and phosphogypsum in order to produce soil-cement blocks. The blast furnace slag and the phosphogypsum are used in the composition of the super sulphated cement (SSC), an alternative that may eliminate the use of clinker, which is the main cause of greenhouse gases. The soil – cement provides countless interesting applications, one of these is its use in the composition of masonry sealing blocks for construction, since traditional ceramic blocks require burning, which increases energy spendings and pollution. Therefore, the use of soil-cement blocks would dispense the need for this process, as it makes use of cold stabilization. However, the results showed that, for the dosages used, the SSC did not present satisfactory performance when applied in soil-cement blocks, since it demonstrated very low resistance to compression, besides not meeting normative criteria of absorption and durability. The goal of this project was to study the performance of SSC and casting sand as materials for soil correction, when applied in the composition of soil-cement blocks, analyzing their viability regarding their resistance to compression, water absorption and durability. Their behavior was compared to the Portland cement composed with pozolana (CP II – Z 32), blocks were molded and subjected to the testings prescribed by brazilian norms.

Key words: Soil-cement blocks. Casting sand. Supersulfated cement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bloco vazado comum de solo-cimento.....	23
Figura 2 – Tijolo maciço de solo-cimento em planta	24
Figura 3 – Tijolo maciço de solo-cimento em corte	24
Figura 4 - Local de extração do solo	30
Figura 5 - Local de coleta do solo	31
Figura 6 - Difractometria de raios X do solo.....	32
Figura 7 - Equipamento Casa Grande para ensaio de limite de liquidez.....	33
Figura 8 - Gráfico do ensaio de limite de liquidez do solo natural	34
Figura 9 - Gráfico do limite de liquidez do solo corrigido	35
Figura 10 - Ensaio de limite de plasticidade: (a) preparação da amostra; (b) moldagem do cilindro.....	36
Figura 11 - (a) Moinho de bolas; (b) jarro com esferas	42
Figura 12 - Escória de alto-forno básica: (a) granulada; (b) moída	42
Figura 13 - Difractograma de raios X da escória básica – Lote 01.....	43
Figura 14 - Fosfogesso (a) in natura; (b) calcinado à 650°C.....	44
Figura 15 - Difractograma de raios X do fosfogesso in natura e calcinado à 650°C ...	45
Figura 16 - Hidróxido de Potássio em escamas utilizado no trabalho	46
Figura 17 - Areia de fundição utilizada no trabalho	46
Figura 18 - Ensaio do picnômetro	47
Figura 19 - Difractômetro de raios X	48
Figura 20 - Difractograma de raios X da areia de fundição	49
Figura 21 - Organograma da preparação dos materiais.....	50
Figura 22 - Solo secando naturalmente sobre lona plástica.....	50
Figura 23 - Teste da caixa para ensaio de retração	52
Figura 24 - Ensaio da caixa – Mistura 25/75	53
Figura 25 - Ensaio da caixa – Mistura 20/80	53
Figura 26 - Ensaio da caixa – Mistura 10/90	54
Figura 27 - Bloco fragmentado após tentativa de retirada da prensa.....	55
Figura 28 - Sequência da produção dos blocos de solo-cimento.....	57
Figura 29 - Mistura do solo e areia de fundição	59
Figura 30 - Mistura seca dos materiais	59

Figura 31 - Mistura dos materiais: (a) Borrifador de água utilizado; (b) Mistura homogeneizada.....	60
Figura 32 - Teste do bolo com a mão.....	61
Figura 33 - Teste de verificação da mistura para solo-cimento.....	61
Figura 34 - Prensa manual utilizado no trabalho.....	62
Figura 35 - Dimensões do bloco moldado com a prensa manual.....	63
Figura 36 - Moldagem dos blocos: (a) Bloco dentro da prensa; (b) Bloco após compactação extraído da prensa.....	63
Figura 37 - Blocos de solo-cimento: (a) Logo após a moldagem; (b) Preparados para a cura.....	64
Figura 38 - Organograma dos ensaios aplicados nos blocos de solo-cimento.....	65
Figura 39 - Máquina utilizada para ensaio de resistência à compressão.....	66
Figura 40 - Blocos capeados em apenas um dos lados.....	67
Figura 41 - Blocos capeados para ensaio de resistência à compressão.....	68
Figura 42 - Bloco em ensaio de resistência à compressão.....	68
Figura 43 - Organograma dos ensaios de resistência à compressão.....	69
Figura 44 - Blocos secando em estufa.....	70
Figura 45 - Bloco submerso em água em ensaio de absorção.....	71
Figura 46 - Bloco submerso em ensaio de durabilidade.....	72
Figura 47 - Determinação de massa com uso de balança.....	73
Figura 48 - Determinação de volume com uso de paquímetro digital.....	73
Figura 49 - Paquímetro digital utilizado nas medições.....	74
Figura 50 - Escova com cerdas de aço.....	74
Figura 51 - Processo de escovação dos blocos com auxílio de balança.....	75
Figura 52 - Bloco logo após imersão em água no ensaio de absorção.....	80
Figura 53 - Processo de escovação dos blocos com auxílio de balança.....	81
Figura 54 – Blocos de solo-cimento submetidos a cura aberta.....	84
Figura 55 - Gráfico de variação de volume em cada etapa de molhagem e secagem para os blocos moldados com CP II Z-32.....	87
Figura 56 - Gráfico de variação de volume para cada ciclo.....	88
Figura 57 - Bloco minutos depois da imersão em água para ensaio de durabilidade.....	89
Figura 58 - Bloco B1 após ensaio de durabilidade.....	90
Figura 59 - Bloco B2 após ensaio de durabilidade.....	91
Figura 60 - Bloco B3 após ensaio de durabilidade.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cimento supersulfatado.....	19
Tabela 2 – Dimensões nominais de blocos vazados.....	23
Tabela 3 – Tipos e dimensões dos tijolos maciços de solo-cimento	24
Tabela 4 – Tabela-resumo de resistência à compressão e absorção d'água	28
Tabela 5 – Características exigidas pelas normas da ABNT	28
Tabela 6 - Composição granulométrica do solo em estudo	32
Tabela 7 - Características do solo corrigido	37
Tabela 8 - Características químicas do CP-II-Z 32 utilizado	38
Tabela 9 - Características físicas e mecânicas do CP-II-Z 32 utilizado.....	38
Tabela 10 - Características físicas e mecânicas do CP-II-Z 32 utilizado.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Alumina
AF	Areia de fundição
CaO	Óxido de Cálcio
CEPED	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CP	Cimento Portland
CP II Z 32	Cimento Portland composto com pozolana (Classe 32 MPa)
CP II E	Cimento Portland composto com escória de alto-forno
CP III	Cimento Portland de alto-forno
CO ₂	Dióxido de carbono
CSS	Cimento supersulfatado
DRX	Difração de raios X
EN	European Standard
Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico
KOH	Hidróxido de potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
MnO	Óxido de Manganês
Na ₂ O	Óxido de sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
pH	Potencial hidrogênico
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Óxido sulfúrico
TiO ₂	Dióxido de Titânio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 Objetivo Geral.....	9
1.1.2 Objetivos Específicos.....	9
1.2 JUSTIFICATIVA.....	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	12
2.2 PROPRIEDADES DO SOLO	13
2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO	15
2.3.1 Umidade ótima.....	15
2.4 REAÇÕES QUÍMICAS ENTRE O SOLO E O CIMENTO	16
2.4.1 Valor do pH do solo	17
2.5 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF).....	17
2.6 CIMENTO SUPERSULFATADO.....	18
2.7 DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO.....	20
2.8 BLOCOS DE SOLO-CIMENTO	21
2.8.1 Fabricação	26
2.8.2 Forma e dimensões	27
2.8.3 Resistência à compressão.....	27
2.8.4 Absorção de água.....	28
2.8.5 Durabilidade.....	29
3 METODOLOGIA	30
3.1 MATERIAIS.....	30
3.1.1 Solo	30
3.1.1.1 Composição granulométrica	32
3.1.1.2 Limites de consistência.....	33
3.1.2 Cimento Portland.....	37
3.1.3 Cimento Supersulfatado	39
3.1.3.1 Escória de alto forno.....	41
3.1.3.2 Sulfato de cálcio	44
3.1.3.3 Ativador alcalino	45

3.1.4	Areia de fundição.....	46
3.1.5	Água	49
3.2	MÉTODOS.....	49
3.2.1	Preparação do solo.....	50
3.2.2	Correção do solo	51
3.2.2.1	Ensaio de retração e secagem	51
3.2.3	Definição das dosagens do solo-cimento	54
3.2.3.1	Determinação do pH do solo natural e do solo corrigido	56
3.2.4	Produção dos blocos	57
3.2.4.1	Mistura dos materiais.....	58
3.2.4.2	Moldagem e cura dos blocos.....	61
3.2.5	Caracterização mecânica dos blocos de solo-cimento	64
3.2.5.1	Resistência à compressão simples (NBR 10836/1994).....	65
3.2.6	Ensaio de absorção de água (NBR 10836/1994)	70
3.2.7	Durabilidade por molhagem e secagem (NBR 13554/1996).....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1	ABSORÇÃO.....	78
4.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	80
4.3	DURABILIDADE	86
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	94

1 INTRODUÇÃO

A indústria de materiais de construção está em constante pressão para reduzir a energia utilizada na produção do cimento Portland e o efeito estufa associado ao processo.

O principal material que constitui o cimento Portland é o clínquer, que é o grande responsável pelas emissões de CO₂. A moagem e o tratamento térmico das matérias-primas do clínquer geram 0,95 toneladas de CO₂ por tonelada de cimento Portland produzido (O'ROURKE; MCNALLY; RICHARDSON, 2009).

Diante disso, a indústria do cimento tem investido em melhorias no sistema a fim de reduzir as emissões, entretanto a substituição das matérias-primas por materiais que apresentem características semelhantes também se mostra necessária. Como a maioria das emissões de CO₂ são provenientes do processo de produção do clínquer, uma medida adequada seria substituí-lo, assim será possível produzir aglomerantes menos prejudiciais em termos de emissões de gases poluentes.

Nos últimos anos, houve um crescimento significativo nas pesquisas realizadas a nível internacional para o desenvolvimento de aglomerantes alternativos. Além disso, o cimento Portland não é um ligante ideal para todos os tipos de aplicações, uma vez que sofre problemas de durabilidade em ambientes particularmente agressivos. Vários ligantes alternativos já estão sendo desenvolvidos, no entanto não têm sido utilizados. Neste trabalho um aglomerante promissor disponível como alternativa para o cimento Portland é discutido, trata-se do cimento supersulfatado (CSS). Contudo, ainda existem questões não respondidas quanto às suas aplicações, descrevendo assim, novos desafios científicos (JUENGER *et al.*, 2011).

Os principais constituintes do CSS são a escória granulada de alto-forno, sulfato de cálcio e pequenas quantidades de um ativador alcalino, podendo ser utilizado o próprio cimento Portland (JUENGER *et al.*, 2011). A escória de alto-forno é um subproduto da indústria siderúrgica, gerada a partir da fabricação do ferro-gusa. O sulfato de cálcio pode ter diferentes fontes, mas o uso do fosfogesso, intensifica sua importância ambiental, pois ele é um subproduto oriundo da indústria de fertilizantes agrícolas.

O incentivo à utilização de subprodutos para a produção de novos materiais contribui para a preservação dos recursos naturais e na redução de resíduos sólidos que poderiam ser descartados na natureza de forma inadequada ou então sendo estocados em depósitos muitas vezes a céu aberto, contaminando o solo, o ar, como também as águas.

Esforços têm sido direcionados ao desenvolvimento de combinações de materiais que visem utilizar subprodutos industriais em substituição de algumas matérias-primas. O CSS tem uso recente, não é utilizado no Brasil ainda, apenas na Europa, mas tem aplicações semelhantes ao Cimento Portland Composto com Escória (CP II-E) e Cimento Portland de Alto-forno (CP III), que possuem baixo calor de hidratação. O baixo impacto ambiental gerado na produção desse aglomerante quando associado ao solo-cimento torna-se uma combinação promissora, visto que o solo-cimento além de dispor de benefícios ambientais, utiliza pouco cimento em sua composição, elevando o custo-benefício.

Os blocos de solo-cimento são uma alternativa aos tijolos convencionais tendo em vista que não requerem queima para propiciar resistência mecânica. A desvantagem é a grande variedade de solos, pois não é todo tipo de solo que é adequado para o uso em blocos de solo-cimento, sendo muitas vezes necessária correção granulométrica do solo a ser utilizado. No entanto, o bloco de solo-cimento apresenta grande potencialidade para incorporação de resíduos em sua composição, que podem servir como materiais de correção da granulometria do solo.

Um princípio ideal seria a redução dos resíduos gerados nos processos industriais, mas como nem sempre isso é possível, são precisos estudos que visem formas de reaproveitamento desses materiais em outras atividades, como é o caso da indústria de fundição, que apresenta sérios problemas devido aos resíduos sólidos gerados, formados basicamente por areias usadas na produção dos moldes (ANGST; VENDRUSCOLO, 2008).

Este trabalho propõe servir-se da areia de fundição para produção de blocos de solo-cimento destinando sua empregabilidade à alvenaria de vedação. Para tanto, o estudo dos materiais a serem utilizados será baseado em pesquisa bibliográfica e caracterização através de ensaios laboratoriais. A empregabilidade do bloco será analisada mediante ensaios de resistência mecânica, absorção de água e durabilidade.

1.1 OBJETIVOS

Para este trabalho apresenta-se os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a adequabilidade do cimento supersulfatado e da areia de fundição em blocos de solo-cimento visando alvenaria de vedação.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- Verificar a adequabilidade do cimento supersulfatado (CSS) como aglomerante em blocos de solo-cimento;
- Analisar a adequabilidade da areia de fundição (AF) como material de correção de solo em blocos de solo-cimento;
- Determinar a conformidade de blocos de solo-cimento obtidos com CSS e AF com as normas vigentes;
- Avaliar a durabilidade dos blocos de solo-cimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil é uma das principais responsáveis pelos impactos ambientais, gerando uma grande quantidade de resíduos e exploração de recursos naturais (SEGANTINI; WADA, 2011).

A produção do cimento Portland gera cerca de 5% das emissões globais de CO₂ na atmosfera (O'ROURKE; MCNALLY; RICHARDSON, 2009). Em vista de sua crescente demanda, esse é um dos motivos para investimentos em pesquisas que buscam alternativas mais sustentáveis na fabricação de cimento, grande destaque é dado ao cimento supersulfatado, já utilizado em décadas passadas tornou a chamar a atenção de pesquisadores nos últimos anos, pois utiliza como materiais resíduos de processos industriais. A transformação desses resíduos em produtos para a indústria cimenteira gera um baixo custo energético de produção e redução de gases

poluentes, além de reduzir os impactos ambientais causados pela extração de matérias-primas (JUENGER *et al.*, 2011).

O cimento supersulfatado é composto basicamente por 80-85% de escória granulada de alto forno, 15-20% de sulfato de cálcio e até 5% de ativador alcalino (EN 15743, 2010). A fonte de sulfato de cálcio pode ser obtida através de fontes naturais ou então a partir de fontes alternativas, como é o caso do fosfogesso, formado a partir do ácido fosfórico (SCHAEFER, 2013).

Segundo dados do IBS-Instituto Brasileiro de Siderurgia, em 2013, cada tonelada de aço produzida gerou 594kg de resíduos, gerando um total de 17,7 milhões de toneladas. A geração de escória de alto forno representou 37% e a escória de aciaria, 29%. O restante foram os finos, pós, lamas e outros, resultantes dos processos e sistemas de tratamento (IBS, 2014). E em 2015, foram produzidos no Brasil 65,3 milhões de toneladas de cimento Portland (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – SNIC, 2015).

No Brasil, a estimativa é que são geradas 5 toneladas de fosfogesso para cada tonelada de ácido fosfórico produzido, chega-se a uma geração de 5,6 milhões de toneladas anuais de fosfogesso. A produção anual no mundo já ultrapassa 170 milhões de toneladas que deverão ser estocadas por ano. O subproduto é pouco utilizado, o que causa sérios riscos ambientais (FERNANDES *et al.*, 2010).

A indústria cimenteira tem potencial para a resolução de problemas ambientais, pois exhibe a possibilidade de incorporar subprodutos oriundos de outras indústrias, como é o caso de siderúrgicas, na utilização da escória granulada de alto-forno, que é um subproduto da fabricação do aço, e da indústria de fertilizantes agrícolas, na utilização do fosfogesso, viabilizando a diminuição de custos e a redução do uso de materiais nobres.

Neste sentido, a escassez de matérias-primas, a busca por custos menores e o desenvolvimento sustentável, permite associar o uso do cimento supersulfatado na composição de solo-cimento, pois também confere padrões ambientais, intensificando as vantagens econômicas e ambientais.

O solo cimento é um produto endurecido, resultante da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem, conforme NBR 12023 (ABNT, 1992).

Devido a existência de poucos estudos referentes a aplicação do cimento supersulfatado, objetivou-se neste trabalho avaliar o desempenho da empregabilidade

do cimento supersulfatado na composição do solo-cimento, visando sua aplicação na confecção de blocos prensados para alvenaria de vedação.

Os blocos de solo-cimento são uma alternativa ao desenvolvimento sustentável para a construção civil, pois carecem de pouco cimento em sua composição, demandam baixo consumo de energia na extração da matéria-prima, não necessitam do processo de queima e reduzem os custos com transporte, uma vez que o solo pode ser extraído no próprio local da obra. Além disso, o fato dos blocos serem vazados possibilita a redução de desperdício e proporciona a racionalização do processo construtivo, pois exclui a necessidade de rasgos na parede para passagem dos eletrodutos e da tubulação hidráulica; minimiza o consumo de argamassa de assentamento e de revestimento e ainda promove melhor desempenho térmico e acústico quando comparado a construções convencionais (SEGANTINI; ALCANTARA, 2007 *apud* SEGANTINI; WADA, 2011).

O trabalho visa aliar a empregabilidade do solo que é uma matéria-prima natural com o uso do cimento supersulfatado e da areia de fundição, que são tratados como subprodutos industriais. A viabilidade técnica e econômica do presente estudo é garantida em virtude da disponibilidade dos materiais necessários, laboratórios e equipamentos. A escolha do assunto é fundamentada na singularidade da pesquisa, sendo que ainda não foi estudado o uso do CSS na composição de solo-cimento, tão pouco em blocos de solo-cimento. Pretende-se assim, contribuir para verificar o uso do cimento supersulfatado e, da areia de fundição como material de correção do solo, na fabricação de blocos de solo-cimento destinados à alvenaria de vedação, valorizando os materiais descartados da indústria siderúrgica, metalúrgica e indústria de fertilizantes, conferindo-lhes características de materiais nobres. Os blocos de solo-cimento elaborados a partir do cimento supersulfatado e da areia de fundição contribuem para a preservação dos recursos naturais, minimizando os impactos ambientais que é uma das grandes preocupações mundiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os pontos principais dos seguintes tópicos: solo-cimento, cimento supersulfatado, areia de fundição e blocos de solo-cimento.

2.1 SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A terra crua foi um dos primeiros materiais de construção utilizados pelo homem. Estima-se que há cerca de dez mil anos começaram a ser construídas as primeiras moradias que já faziam uso da terra para proteger e abrigar o homem. No país essa prática também é remota principalmente com a utilização da terra no adobe, pau-a-pique e taipa de pilão (MILANI, 2005).

Com a adoção de materiais de construção industrializados, sobretudo o concreto e o aço, a terra crua se tornou um material construtivo secundário, com baixo valor comercial e cultural. Contudo, atualmente a terra crua tem se tornado novamente um material de interesse particularmente para países industrializados e em desenvolvimento (HOUBEN; BOUBEKEUR, 1998). De acordo com Santos (2009) o que justifica o uso do solo como material de construção é a necessidade de obter soluções que minimizem o custo energético, que tem impacto relevante em produtos como cimento e tijolos queimados.

Conforme a ABCP (2000) o solo-cimento é um produto obtido pela mistura, em proporções adequadas, de solo, aglomerante e água, que após compactação e cura úmida resulta em um material com resistência mecânica e durabilidade através das reações de hidratação do cimento.

O solo-cimento é uma evolução de técnicas construtivas, como o adobe e a taipa. Apresenta-se como uma solução interessante na construção de casas populares, pois os próprios moradores podem produzir os tijolos no local com máquinas simples e de baixo custo. Também se destacam em empreendimentos que prezam pela sustentabilidade, pois geram habitações com conforto térmico, contribuindo na redução do uso de ar condicionado e sistemas de calefação, ajudando a preservar o meio ambiente (CAMPOS, 2008).

Souza (2011) afirma que o uso do solo-cimento aliado a tecnologias apropriadas tem grande potencial para atenuar os problemas habitacionais no mundo

todo, principalmente por se tratar de uma alternativa de baixo custo de energia. Além de ser resistente fornece conforto interno em razão da porosidade do material, que possibilita a interação entre o meio interno e externo da construção.

O solo-cimento tem inúmeras aplicações, entre elas pode ser usado em:

- a) construção de pisos, que se refere a uma extensão da aplicação do solo-cimento na pavimentação de estradas;
- b) paredes e painéis monolíticos, que é uma evolução da taipa de pilão;
- c) Blocos e tijolos maciços, produzidos com o uso de prensas a fim de compactar a mistura fresca;
- d) Solo-cimento ensacado, utilizado na contenção de encostas, revestimentos de canais, cabeceiras de pontes, ou seja, onde se deseja evitar a erosão causada pela água.

No Brasil as primeiras aplicações do solo-cimento foram em pavimentações de estradas que datam do início da década de 40 (ABCP, 1996). A partir do final da década de 1940, com pesquisas mais avançadas sobre a estabilização do solo-cimento, este passou a ser utilizado como material de construção alternativo, através de instituições como a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Camaçari/BA – CEPED e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT (MILANI, 2005).

2.2 PROPRIEDADES DO SOLO

Caputo (1988) define o solo como material que resulta do intemperismo, por desintegração mecânica ou decomposição química.

O solo, geralmente, é o material presente em maior quantidade na mistura de solo-cimento, mas deve ser selecionado de modo a requerer uma menor proporção de cimento. As características do solo recomendadas pela ABCP (2000) e pela NBR 10833/2012 devem atender os seguintes requisitos:

- a) 100% de material que passa na peneira com abertura de malha 4,75 mm, de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1;
- b) 10% a 50% de material que passa na peneira com abertura de malha 75 μm , de acordo com a ABNT NBR NM ISO 3310-1;
- c) Limite de liquidez menor ou igual a 45%;
- d) Índice de plasticidade menor ou igual a 18%.

Segundo Souza *et al.* (2008), os solos mais adequados para a confecção de blocos de solo-cimento são os solos arenosos, pois conferem resistência mecânica mais elevada com menor consumo de cimento se comparados a solos argilosos e siltosos. Contudo, a presença de argila é importante na mistura para garantir a coesão necessária quando umedecida e compactada, e dessa forma possibilitar a desmoldagem e o manuseio dos tijolos após a prensagem (ABCP, 2000).

A ABCP (2000) afirma que o solo a ser usado pode ser extraído do próprio local da obra e qualquer tipo de solo pode ser utilizado, somente os solos que contêm matéria orgânica em sua composição que não podem ser utilizados, pois interferem na hidratação do cimento e de modo conseqüente na estabilização do solo.

A escolha do solo para a fabricação dos blocos deve ser feita por meio de ensaios de laboratório, utilizando os seguintes procedimentos:

- a) Preparação de amostra de solo para ensaio de compactação e ensaio de caracterização (NBR 6457)
- b) Determinação da massa específica dos grãos de solos (NBR 6508)
- c) Solo – Determinação do limite de liquidez (NBR 6459)
- d) Solo – Determinação do limite de plasticidade (NBR 7180)
- e) Solo – Análise granulométrica (NBR 7181).

Os solos adequados, conforme a ABCP (1996), são aqueles que apresentam uma quantidade de areia que varia de 50% a 90% da massa total da amostra. Solos arenosos estabilizam-se mais facilmente que os solos argilosos e produzem solo-cimento com maior durabilidade, demandam menos cimento para sua estabilização e permitem uma mistura mais homogênea com o cimento pelo fato de serem menos coesos. É possível adicionar uma fração de areia aos solos que não apresentam a quantidade adequada, as adições indicadas são da ordem de 5% a 30% da massa de solo a corrigir.

Como o solo tende a ser o material presente em maior proporção na composição do solo-cimento, deve ser selecionado de maneira que faça uso da menor quantidade admissível de cimento. O solo ideal seria aquele que contém 15% de silte mais argila, 20% de areia fina, 30 % de areia grossa e 35% de pedregulho (SOUZA *et al.*, 2008). Já a Portland Cement Association (PCA, 1969) julga interessante solos contendo de 65% a 90% de areia e 10% a 35% de silte mais argila.

2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO

Os solos são constituídos essencialmente por argila, areia e silte, sendo que os grãos de areia apresentam dimensões de 4,8mm à 0,05mm, o silte entre 0,05mm à 0,005mm e a argila possui grãos inferiores à 0,005mm (CAPUTO, 1988).

Como os solos argilosos compreendem os grãos menores, possuem maior superfície de contato, o que requer maior quantidade de água na mistura. Os solos arenosos dispõem de grãos maiores por terem mais areia em sua composição, isso reduz a superfície de contato, fazendo-os estabilizar com menos água (BAUER, 2000).

Segundo Bauer (2000), o tamanho dos grãos também influencia na quantidade de cimento a ser adicionada. A argila e o silte são materiais pulverulentos que preenchem os vazios permeáveis da areia, gerando uma película em torno do grão que prejudica a aderência do cimento aos grãos.

As propriedades físico-mecânicas do sistema solo-cimento, como a resistência a compressão, absorção d'água e durabilidade, estão estreitamente associadas com as condições de cura, relacionados a umidade e temperatura. Por esse motivo, deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno da umidade ótima.

2.3.1 Umidade ótima

Para Caputo (1988), a compactação do solo é o processo que reduz o volume de vazios, aumentando assim sua resistência. Conforme é reduzido o volume de vazios aumenta-se a massa específica aparente. O teor de umidade que gera a maior massa específica é denominado umidade ótima. Além disso, reduzindo-se o volume de vazios melhora-se outras características além da resistência, como a permeabilidade, compressibilidade e absorção d'água.

Por isso, segundo Grande (2003), o estudo da umidade ótima é considerado relevante, pois o ensaio de compactação além de verificar a umidade ótima permite mensurar a densidade do material compactado, o que colabora na obtenção de uma granulometria que proporcione também uma estabilização física à mistura, com

melhor empacotamento dos grãos, principalmente no caso de solos argilosos que requerem a adição de areia.

As pesquisas que abrangem o solo-cimento apresentam valores baseados na umidade ótima para solos arenosos, tendo em vista que o solo está presente em maior proporção na mistura e que o solo arenoso é o mais indicado. Entretanto, normalmente, a umidade ótima é determinada de forma empírica e visualmente (OLIVEIRA, 2011).

A verificação da umidade, empiricamente, é feita através de procedimentos simplificados, baseados na coesão apresentada pela massa fresca. Tomando-se uma porção de solo na mão e apertando-a entre os dedos e a palma da mão, o bolo deverá manter a marca deixada pelos dedos, pois quando a amostra está seca não ocorre a formação de um bolo compacto. Outro método complementar utilizado compreende em soltar o bolo de uma altura de aproximadamente 1 m, ao chocar-se com a superfície ele deverá esfarelar-se, caso contrário a mistura estará muito úmida (ABCP, 2000).

2.4 REAÇÕES QUÍMICAS ENTRE O SOLO E O CIMENTO

As reações que ocorrem na estabilização do solo-cimento consistem basicamente na hidratação de silicatos e aluminatos presentes no cimento, e o que proporciona a resistência inicial é uma espécie de gel que se forma e une os grãos do solo. No decorrer do tempo, formam-se compostos hidratados que fornecem propriedades como resistência, durabilidade e estabilidade volumétrica (MILANI, 2005).

A existência de matéria orgânica no solo inibe as reações de hidratação do cimento, o que ocasiona redução da resistência mecânica e da durabilidade, e conseqüentemente da qualidade do produto final. A ABCP (1996) defende que solos com matéria orgânica são geralmente encontrados nas camadas superficiais e devem ser descartados. Uma das principais características desse tipo de solo é a coloração mais escura, no entanto, esse aspecto pode não ser identificado.

A água utilizada também deve ser isenta de matéria orgânica e outras impurezas que sejam nocivas à hidratação do cimento, conforme NBR 15900-1. Geralmente, são consideradas adequadas as águas potáveis (ABCP, 1996).

2.4.1 Valor do pH do solo

Um estudo feito por Yang *et al.* (2013) sobre a influência do valor do pH em solo-cimento, mostrou que os blocos de solo-cimento apresentaram corrosão grave em ambientes ácidos (pH = 2,0), ocorrendo quebra severa e passivação, além disso a perda de volume se torna seriamente correspondente. Os blocos que foram curados em ambiente neutro não obtiveram nenhuma mudança notória. Em ambiente alcalino os blocos são conservados e não existe degradação das arestas, mas há pequenas fissuras na superfície dos blocos. Ele concluiu que quanto maior o índice de acidez ou alcalinidade, menor será a resistência a compressão do solo-cimento e que o ambiente de cura neutro fornece maior resistência a compressão, o que demonstra que o valor do pH tem interferência na resistência mecânica e na durabilidade.

A hidratação do cimento em ambientes ácidos é menor e a ligação com o solo não é bem formada. Sob ambiente neutro, os produtos de hidratação são bem formados e a massa de cimento e solo são bem aglomerados. Em ambiente alcalino, os produtos formados são abundantes porque o ambiente alcalino estabiliza alguns dos produtos alcalinos de hidratação do cimento, no entanto, a estrutura apresenta numerosas fissuras e poros, ocorrendo perda de resistência do solo-cimento (ZHANG *et al.*, 2009).

O aumento do teor de cimento pode reduzir a influência do valor do pH, aumentando a capacidade dos solos de resistir a erosão em ambientes poluídos, isto é, com valores de pH muito altos ou muito baixos. Em ambiente neutro a resistência do solo-cimento pode encontrar seu maior valor. O autor destaca ainda, que em casos de ambientes com valores extremos de pH recomenda-se o uso de cimentos de escória, que tem efeito antipoluição, podendo ser mais utilizados nestes casos (YANG *et al.*, 2013).

2.5 AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO (ADF)

A moldagem em areia é o método mais utilizado no mundo para a fabricação de peças fundidas. Estima-se que mais de 80% das peças fundidas são feitas com moldes formados de areia. No entanto, depois de alguns ciclos de operação as características da areia se modificam tornando-se inadequada para a moldagem. A

partir de então, a areia precisa ser renovada originando o resíduo de areia de fundição (ARMANGE *et al.*, 2005).

A disposição da areia descartada em aterros colabora, segundo Armange *et al.* (2005), com o agravamento dos problemas ambientais, representando uma ação potencialmente poluidora do solo, águas superficiais e subsolo. No entanto, regulamentações ambientais têm obrigado as fundições a destinarem seus resíduos para aterros adequados, geralmente distantes da fundição tornando os custos notavelmente mais onerosos. Além disso, tem-se perdas econômicas em função do não aproveitamento desses materiais. Em geral, segundo a NBR 10004/2004 da ABNT, esses materiais são classificados como classe II, sendo não perigosos. Logo, esses resíduos apresentam potencial para inúmeras aplicações.

Solos argilosos podem ser usados na produção de solo-cimento desde que corrigidos granulometricamente com areia (ABCP, 1986) e, a adição de areia de fundição melhora as propriedades granulométricas do solo, tornando-o mais arenoso e mais apropriado para a confecção do solo-cimento.

A necessidade de preservar os recursos naturais e reduzir os impactos ambientais destaca a reciclagem e o aproveitamento de materiais oriundos de outros processos, por isso neste trabalho propõe-se utilizar, ao invés de areia natural, a areia descartada de fundição como adição ao solo-cimento, visando sua correção.

2.6 CIMENTO SUPERSULFATADO

Desde o surgimento do cimento Portland, há mais de 175 anos atrás, ele se tornou o ligante dominante usado no concreto. Os resultados da produção de cimento Portland (CP) são cerca de 0,87 t de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido, sendo responsável por 5% das emissões globais (JUENGER *et al.*, 2011).

Juntamente com a preocupação em buscar menor consumo de energia e baixas emissões de CO₂, está o interesse em encontrar uma reutilização para resíduos provenientes de outras indústrias.

Novos cimentos estão sendo desenvolvidos que prometem reduzir o impacto ambiental da construção civil, usar maior proporção de materiais residuais e melhorar o desempenho do concreto. E uma das possíveis alternativas, apresentadas nesse trabalho, é o cimento supersulfatado. (JUENGER *et al.*, 2011).

O cimento supersulfatado é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico, finamente moído que quando misturado com água, forma uma pasta que endurece por meio de reações e processos de hidratação, e que, após o endurecimento, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo sob água (EN 15743, 2010).

O CP já acomoda uma ampla variedade de materiais residuais usados como complementação no cimento, incluindo cinzas volantes da combustão do carvão, sílica ativa da produção do silício e escória granulada de alto forno da produção de ferro. No entanto, estes são usados para substituir uma pequena porção do cimento, normalmente, na ordem de 10-50%, embora algumas vezes usados em maiores quantidades. Há interesse em criar cimentos feitos inteiramente ou quase inteiramente a partir de materiais residuais. Uma motivação adicional para explorar alternativas para o CP são originadas da sua deficiência em certas aplicações e ambientes, como por exemplo, condições ambientais com elevada acidez ou com altas concentrações de sulfato, que podem causar degradação substancial do concreto de cimento Portland. Para esses casos há demanda de alternativas para o CP (JUENGER *et al.*, 2011).

Os cimentos supersulfatados consistem basicamente de escória de alto forno e sulfato de cálcio, Tabela 1. No CSS, a escória é ativada principalmente pelo sulfato de cálcio, mas podem ser adicionados constituintes adicionais (EN 15743, 2010).

Tabela 1 – Cimento supersulfatado

Notação		Composição (Porcentagem em massa)			
		Principais constituintes		Constituintes adicionais	
		Escória granulada de alto-forno	Sulfato de cálcio	Clínquer de cimento Portland	Outros
		E	Sc	C	A
Cimento Supersulfatado	CSS	$E \geq 75$	$5 \leq Sc \leq 20$	$0 \leq C \leq 5$	$0 \leq A \leq 5$

Fonte: EN 15743 (2010).

O uso do CSS como matéria prima na produção de blocos de solo-cimento contribui com o desenvolvimento sustentável, tornando-se uma alternativa para o uso de subprodutos como a escória, além de colaborar na redução de consumo de cimento, valorizando econômica e ambientalmente o produto final.

Em muitas aplicações, particularmente em condições ambientais severas, a escolha do cimento tem influência na durabilidade do concreto, da argamassa e dos agregados. O CSS de acordo com os requisitos da EN 15743 é considerado resistente a sulfatos, muitos países aplicam restrições adicionais à produção de concretos a serem usados em ambientes contendo sulfatos como teor mínimo de cimento e/ou relação água/cimento mínima dependendo do tipo e intensidade do sulfato (EN 15743, 2010).

Nesse contexto, pesquisadores têm estudado o retorno do uso do solo como material construtivo perante a perspectiva de aplicação da engenharia, direcionando esforços para a fabricação de um produto com menores consequências ambientais. A utilização simultânea de resíduos e novas matrizes cimentantes apresenta-se como uma tendência eficaz, uma vez que além de reduzir o descarte de materiais, acabam substituindo totalmente ou parcialmente algumas matérias-primas convencionais (MILANI, 2005).

2.7 DOSAGEM DO SOLO-CIMENTO

A alternativa de usar o bloco de solo-cimento para construção em alvenaria é viável considerando que pode apresentar resistência mecânica equivalente à de tijolos cerâmicos. No entanto, quanto maior for a quantidade de cimento empregada maior é a resistência mecânica. (ABCP, 2000). Porém, a proporção de cimento deve ser limitada com o interesse de manter a qualidade sem elevar o custo.

Segundo a NBR 10834:1994, quanto aos aspectos físicos esta norma determina que o bloco deve ter arestas vivas ou chanfradas e não deve apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que possam prejudicar o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria. A ABCP (1996) afirma que, quando o solo-cimento é compactado com umidades acima da umidade adequada, fica sujeito a fissuras nos elementos produzidos em poucos dias.

A dosagem do solo-cimento consiste em uma série de ensaios executados com uma mistura definida de solo, cimento e água. Na sequência é realizada a análise dos resultados através de especificações predeterminadas, fixando-se então esses parâmetros.

Segundo a ABCP (1986) a experiência brasileira fundamenta-se basicamente nos métodos de dosagem da Portland Cement Association (PCA), mas falta-lhe o que seria a maior recomendação da mesma, a certificação dos resultados a partir de um elevado número de obras executadas e em uso, com a grande variedade de solos disponíveis nas mais diferentes origens e regiões.

Sobre o procedimento de dosagem, a NBR 10833/2012 prescreve os seguintes passos:

- a) Preparar três traços de solo-cimento;
- b) De cada traço, moldar no mínimo 20 tijolos ou blocos na própria prensa e curá-los. Retirar aleatoriamente dez unidades e enviá-las ao laboratório;
- c) Ensaiai os corpos de prova de acordo com a NBR 8492 ou NBR 10836, tratando-se de tijolo ou bloco de solo-cimento, respectivamente. A partir dos resultados obtidos, escolher o traço mais econômico, que atenda aos requisitos físicos-mecânicos prescritos nas especificações estabelecidas na NBR 8491 ou NBR 10834, conforme o caso (ABNT, 2012).

2.8 BLOCOS DE SOLO-CIMENTO

Para Fay *et al.* (2014) em razão do crescente processo de industrialização a indústria da construção seguiu as mesmas leis de produção de outras indústrias, e o uso da terra foi gradualmente substituído por materiais cada vez mais sofisticados, como o aço, concreto, alumínio e plásticos. No entanto, a terra tem se revelado como um material com grande potencial para reintroduzir hábitos construtivos tradicionais e econômicos.

O solo bruto e resíduos industriais podem ter sua resistência mecânica aumentada pela adição de outros materiais com função estabilizadora, mesmo em pequenas quantidades como cal, cimento e aditivos químicos. Essa técnica é hoje chamada de estabilização fria, isto é, sem queima. Desde o início dos anos 80, numerosos estudos têm sido realizados na substituição de materiais tradicionais para a fabricação de componentes para a construção (FAY *et al.*, 2014).

Com o objetivo de estabelecer uma padronização na produção de blocos e tijolos de solo-cimento, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), publicou as seguintes normas técnicas:

- NBR 8491 (1984) – Tijolo maciço de solo-cimento: Especificação;
- NBR 8492 (1984) – Tijolo maciço de solo-cimento: Determinação da resistência à compressão e da absorção de água - Método de ensaio;
- NBR 10832 (1989) – Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual – Procedimento;
- NBR 10833 (1989) – Fabricação de tijolo-maciço e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica – Procedimento;
- NBR 10834 (1994) – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Especificação.

Quanto ao tipo os blocos de solo-cimento são classificados da seguinte forma:

1) Blocos vazados de solo-cimento

a) Blocos comuns: possuem formato retangular e dimensões nominais definidas conforme NBR 10835/1994.

b) Blocos especiais: possuem formas e dimensões nominais diferentes das que constam na NBR 10835/1994. As especificações são feitas em comum acordo entre o fabricante e o comprador.

2) Tijolos maciços de solo cimento

Componente maciço de solo-cimento, de formato retangular e com reentrância, com dimensões que constam na NBR 8491/1984

A NBR 10834, de outubro de 1994, define o bloco vazado de solo-cimento como componente para alvenaria de seção transversal útil entre 40 e 80% da seção transversal total, Figura 1, constituído por uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e eventualmente aditivos, em proporções que permitam atender às exigências dessa norma. A seção transversal total corresponde a área compreendida pelo contorno externo do bloco e a seção transversal útil refere-se a área total descontada a área dos furos.

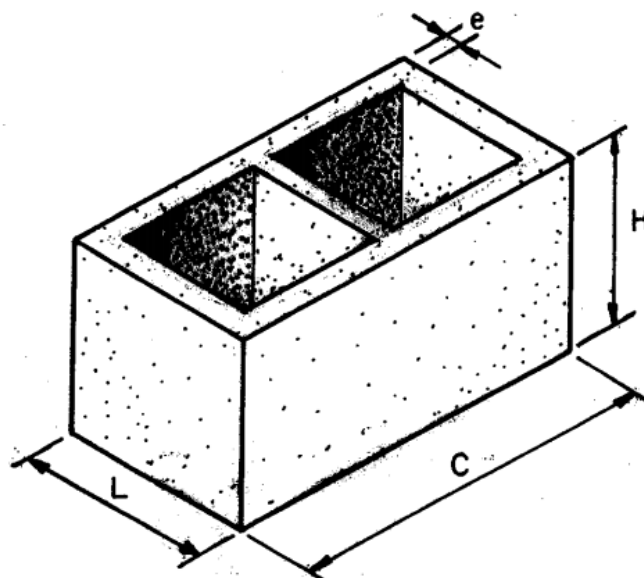


Figura 1 – Bloco vazado comum de solo-cimento

Fonte: NBR 10835 (1994).

As dimensões nominais de blocos comuns vazados, definidas pela NBR 10835 (1994) devem ter os valores indicados na Tabela 2, sujeitas às tolerâncias indicadas na NBR 10834 (1994).

Tabela 2 – Dimensões nominais de blocos vazados

Tipo	Dimensões nominais (mm)		
	Largura (L)	Altura (H)	Comprimento (C)
A	90	140	390/190
B	140	140	390/190
C	190	140	390/190

Fonte: NBR 10834 (1994).

O tijolo maciço de solo-cimento, conforme a NBR 8491 de abril de 1984, define-se como um tijolo com volume real não inferior a 85% de seu volume total bruto, Figuras 2 e 3.

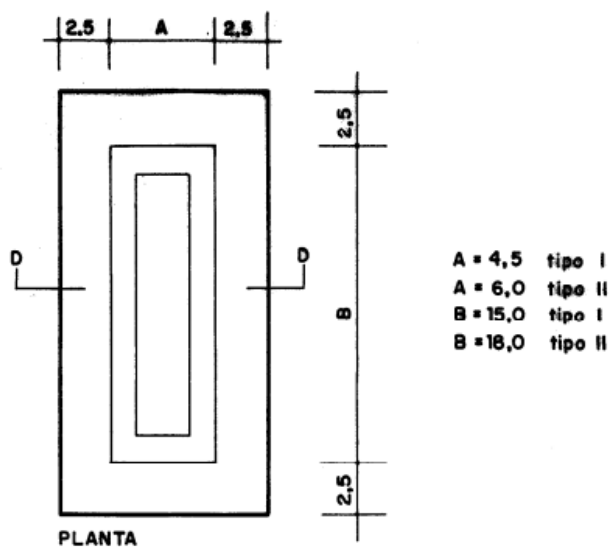


Figura 2 – Tijolo maciço de solo-cimento em planta
Fonte: NBR 8491 (1984).

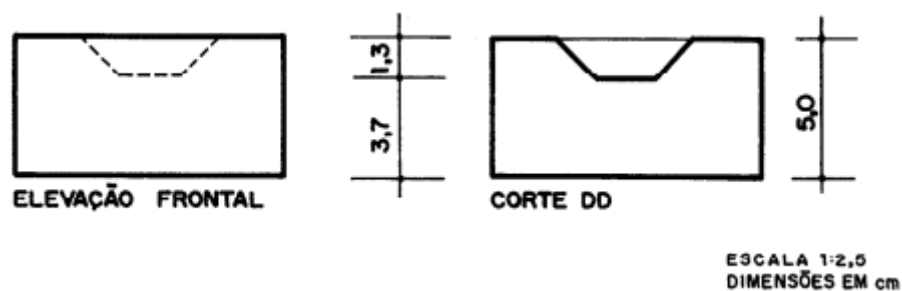


Figura 3 – Tijolo maciço de solo-cimento em corte
Fonte: NBR 8491 (1984).

As dimensões nominais que os tijolos devem atender, pela NBR 8491 (1984) constam na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos e dimensões dos tijolos maciços de solo-cimento

Tipos e dimensões nominais (unid.: cm)			
Designação	Comprimento	Largura	Altura
Tipo I	20	9,5	5
Tipo II	23	11	5

Fonte: NBR 8491 (1984).

Os blocos de solo cimento, quando se quebram, podem ser triturados e reutilizados na produção de novos blocos, evitando a geração de resíduos e desperdícios na sua confecção (SEGANTINI; WADA, 2011). Ainda segundo Segantini et. al. (2011), os blocos de solo cimento promovem uma redução de 30 a 40% do custo total da obra se comparado a utilização de blocos convencionais.

Na fabricação do bloco de solo cimento, o solo é misturado ao cimento e a água em dosagens adequadas, essa mistura é colocada em uma prensa de onde resulta o bloco prensado. Ao contrário do bloco cerâmico que vai ao forno, o bloco de solo cimento é curado a frio, na sombra por 7 dias (SEGANTINI; WADA, 2011).

Walker (1995) fez blocos de solo estabilizado com cimento Portland, corrigindo um solo argiloso com areia natural a fim de melhorar as condições de estabilização e trabalhabilidade. Depois de prensados manualmente, os blocos foram umedecidos durante os 7 primeiros dias e cobertos com plástico até os 28 dias. O autor comparou o índice de plasticidade do solo com a quantidade de cimento apropriada para adquirir certa resistência à compressão dos blocos saturados. O autor citado concluiu que o aumento da porcentagem de cimento eleva a resistência mecânica e a durabilidade dos blocos, mas essas propriedades diminuem com o aumento do teor de argila.

O solo-cimento trata-se de uma compactação do solo, o qual se introduziu uma pequena quantidade de cimento Portland para estabilizá-lo. A função do cimento na mistura é auxiliar na redução da retração, bem como aumentar sua resistência (MERRIL, 1949 *apud* SANTOS, 2009). Conforme explica Eijk (2005), a adição de cal ou cimento na mistura, além de proporcionar maior resistência à compressão é responsável por melhorar a resistência a intempéries. Em solos com presença de montmorilonita, a cal é mais eficaz e em solos com presença de caolinas, o cimento é o estabilizante mais indicado. Segundo Walker (1995), solos que utilizam mais de 10% de cimento para sua estabilização tornam-se antieconômicos e solos com menos de 5% são demasiadamente quebradiços para manuseio.

A conformação do solo por prensagem a seco é um dos processos mais simples e baratos, o solo, com baixo teor de umidade e contendo aglomerante, preenche um molde metálico sobre o qual é aplicada pressão para formar uma massa compacta. A conformação é uma das partes mais importantes, pois é responsável pela formação dos componentes e pela definição da sua função (FAY *et al.*, 2014).

A pressão de compactação é o fator que determina as propriedades dos blocos. Independentemente do estabilizador utilizado, as propriedades de compactação do

solo variam linearmente e estão relacionadas diretamente com a pressão de compactação.

2.8.1 Fabricação

a) Preparação do solo

De acordo com Oliveira (1994), o processo típico de produção dos blocos de solo-cimento inclui: identificação e extração do solo, armazenamento das matérias-primas, processo de desintegração de torrões e peneiramento, dosagem do solo, a adição de estabilizadores e/ou aditivos e água, a homogeneização e conformação da mistura, seguido por secagem e cura do produto final. E finalmente, o controle de qualidade e certificação do produto.

O solo normalmente é retirado de jazida e transportado ao depósito, desagregam-se os torrões e elimina-se o material retido na peneira ABNT 4,8mm. A fim de prepará-lo, posterior ao peneiramento o solo deve ser homogeneizado. Além disso, no processo de fabricação dos tijolos recomenda-se que o solo seja armazenado de modo a conter baixa umidade (ABCP, 2000).

b) Preparação da mistura

A mistura, em geral, é feita de forma manual. Pela ABCP (2000), após o solo ser destorroado e peneirado é então disposto sobre uma superfície plana e limpa, e espalhado numa camada de cerca de 20 cm de espessura. Depois o cimento é distribuído sobre esta camada e com auxílio de ferramentas apropriadas é realizada a mistura do solo com o cimento, até ser atingida uma coloração uniforme. Se for preciso, adicionar água aos poucos até adquirir a umidade ideal. Quando a mistura alcançar a umidade pretendida, aconselha-se realizar um novo peneiramento a fim de proporcionar a homogeneização entre a água e o solo-cimento.

No estado fresco, a mistura apresenta aspecto de farofa úmida, com coloração uniforme e levemente mais escura devido a maior presença de água.

c) Fabricação do tijolo

Anterior ao procedimento de prensagem é importante regular a máquina, para se obter as dimensões exatas pretendidas para os tijolos. Na ocorrência de tijolos fora das especificações durante a regulagem, eles poderão ser destorroados e reaproveitados mediante novo adensamento (ABCP, 2000).

Após a regulagem da prensa, os tijolos produzidos são retirados do molde com cuidado protegendo as arestas e transferidos em bandejas para o local de cura.

d) Cura

A ABCP (2000) recomenda que depois de seis horas de moldagem e durante os 7 primeiros dias, os tijolos devem ser umedecidos constante e frequentemente com regador dotado de chuveiro, com o propósito de assegurar a cura necessária. Se eventualmente não for possível garantir condições de cura em área coberta sugere-se cobrir com uma lona. A NBR 10833/2012 determina que os tijolos ou blocos devem ser utilizados após 14 dias de fabricação.

2.8.2 Forma e dimensões

Os requisitos normalizados referentes aos tipos e dimensões nominais encontram-se na NBR 10835/1994 – Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural (Forma e dimensões).

De acordo com a NBR 10835, os blocos vazados de solo-cimento podem ser classificados em comuns e especiais, de acordo com suas formas e dimensões.

Quanto a blocos especiais, a norma NBR 10835 afirma que eles podem ser fabricados com formas e dimensões diferentes das dos blocos comuns, devendo as suas especificações ser objeto de acordo entre as partes. Quando houver questões não explicitadas, devem prevalecer as prescrições dessa norma e das NBR 10833, NBR 10834 e NBR 10836.

2.8.3 Resistência à compressão

Em relação a resistência à compressão, a NBR 10836:1994 determina que a amostra ensaiada deve apresentar a média dos valores igual ou maior que 2,0 Mpa e valores individuais iguais ou maiores que 1,7 Mpa, aos 28 dias de idade.

A seguir, a Tabela 4 resume os valores de resistência à compressão e absorção de água apresentado pela NBR 10834:

Tabela 4 – Tabela-resumo de resistência à compressão e absorção d'água

Valores-limite (aos 28 dias)	Média	Individual
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$	$\geq 1,7$
Absorção de água (%)	≤ 20	≤ 22

Fonte: NBR 10836 (1994).

Segundo a NBR 10836/1994, o resultado deve apresentar:

- a) O valor médio de cada uma das dimensões reais dos blocos;
- b) A resistência à compressão, expressa em MPa, de cada corpo de prova, obtida dividindo-se a carga máxima, em N, pela média das áreas das duas faces de trabalho, em mm²;
- c) A resistência média dos corpos de prova, obtida pela média das tensões de ruptura.

2.8.4 Absorção de água

De acordo ainda com a norma NBR 10834 (ABNT, 1994), a amostra ensaiada deve apresentar a média dos valores de absorção de água igual ou menor que 20% e valores individuais iguais ou menores que 22%, aos 28 dias de idade.

A Tabela 5, apresenta as características recomendadas pela norma para o solo a ser empregado na mistura de solo-cimento.

Tabela 5 – Características exigidas pelas normas da ABNT

Características	Condições (%)
% de solo que passa pela peneira ABNT 4,8 mm (n.º 4)	100
% de solo que passa pela peneira ABNT 0,075 mm (n.º 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Fonte: Adaptado de NBR 10832 (1989).

2.8.5 Durabilidade

A fim de se evitar problemas com os blocos, deve-se tomar alguns cuidados em relação a temperatura do ambiente, o bloco não deve ser exposto ao sol antes de completar o período de cura. O ideal é que a temperatura se mantenha constante durante esse período, visto que a expansão e contração das argilas pode gerar trincas e fissuras. Também o excesso de umidade durante a cura pode provocar o surgimento de fungos.

A durabilidade dos blocos foi estudada mediante aplicação de ensaio da NBR 13554/1996.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados para confecção dos blocos de solo-cimento feitos a partir de cimento supersulfatado e corrigidos com areia de fundição, além da metodologia utilizada para a confecção dos mesmos. Os ensaios são necessários para a verificação da viabilidade dos materiais para o fim proposto.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Solo

O solo em estudo foi coletado nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco. A Figura 4 indica a região de onde foi extraída a amostra.

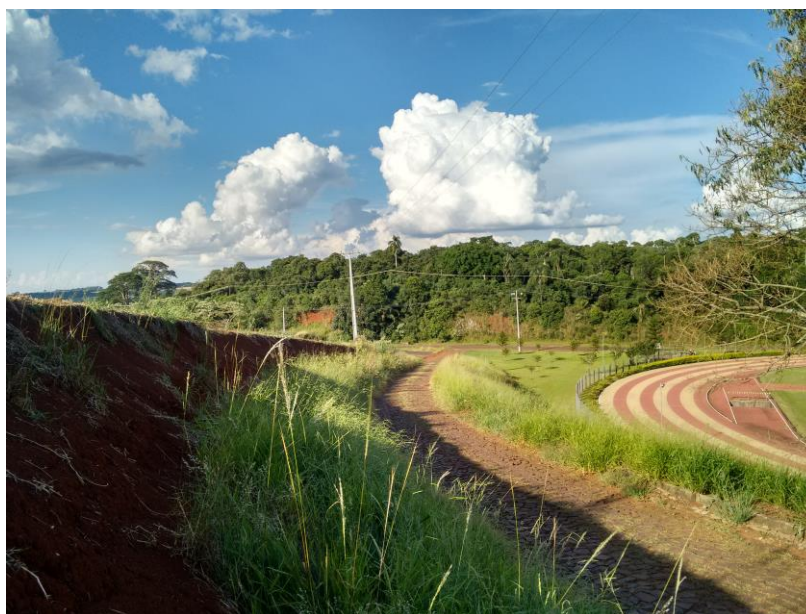


Figura 4 - Local de extração do solo

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os dados da tabela de materiais silto-argilosos do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (BRASIL, 2006) classifica o solo como A-7-5, que corresponde a solo argiloso.

A composição granulométrica do solo utilizado era teoricamente conhecida, devido a estudos efetuados por Silva *et al.* (2010), com solo coletado nessa mesma região. O ensaio granulométrico identificou a composição de 56,4% de argila, 33,8% de silte e 9,8% de areia.

O solo foi coletado em uma área de escavação, em profundidade, para evitar camadas compostas com matéria orgânica e então submetido a alguns ensaios fundamentais para avaliar seus efeitos na qualidade do bloco de solo-cimento, como análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e ensaio de retração por secagem. Conforme pode ser observado na Figura 5, o solo foi retirado de uma área de corte.



Figura 5 - Local de coleta do solo
Fonte: Acervo pessoal (2017).

O difratograma de raios X (DRX) do solo, que caracteriza o mesmo quanto a composição mineralógica, é apresentado na Figura 6.

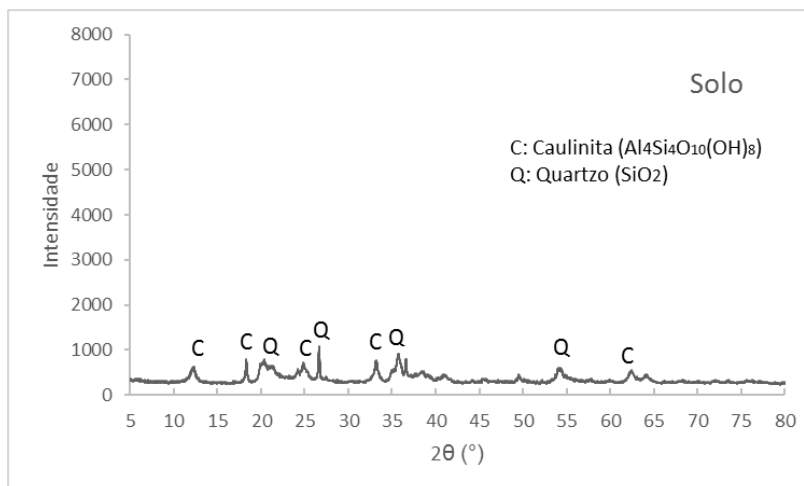


Figura 6 - Difratomia de raios X do solo
 Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Conforme análise do difratograma, o solo é composto basicamente por argila caulínica e quartzo.

3.1.1.1 Composição granulométrica

O ensaio para determinação da composição granulométrica foi realizado no Laboratório de Física do Solo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco (PB) e também no Laboratório de Solos do Departamento de Agronomia do Câmpus Dois Vizinhos (DV). Ambos os resultados, são apresentados na Tabela 6. A amostra necessária foi preparada de acordo com o proposto pela NBR 6457/1986.

Tabela 6 - Composição granulométrica do solo em estudo

Material	Câmpus	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo	PB	2,2	17,8	80,0
	DV	8,0	16,0	76,0

Fonte: Laboratórios de Solos UTFPR – Câmpus Pato Branco e Dois Vizinhos (2017).

3.1.1.2 Limites de consistência

A determinação dos limites de consistência ou limites de Atterberg, que tratam do limite de liquidez e limite de plasticidade dos solos foram realizados segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984.

Os limites de consistência são as variáveis que expressam a trabalhabilidade, ou seja, as condições de menor ou maior capacidade de os solos serem moldados, sob condições certas de umidade, sem variação de volume. Valores elevados levam a maiores dificuldades de secagem e destorroamento como também no processo de mistura dos materiais (PINHEIRO; SOARES, 2010). A ABCP recomenda que o limite de liquidez seja inferior a 45% e que o índice de plasticidade seja inferior a 18%.

3.1.1.2.1 Limite de liquidez

O limite de liquidez estabelece o teor de umidade em que o solo passa do estado plástico para o líquido, devendo ser um valor superior ao limite de plasticidade. O ensaio foi executado através do aparelho Casagrande, conforme Figura 7, no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco. A realização deste ensaio se deu pela secagem prévia da amostra, conforme indicado pela NBR 6457/1986.



Figura 7 - Equipamento Casa Grande para ensaio de limite de liquidez
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Neste ensaio, a amostra de solo, com diferentes teores de umidade, é posta em um recipiente côncavo do equipamento denominado Casa Grande. Inicialmente é feito um corte em bisel (1 cm de altura, 2 mm de largura e 60° de inclinação das

paredes). Para cada nível de umidade, anota-se o número de batidas, até que as paredes do corte em bisel se juntem em uma espessura de 1 polegada. Esse procedimento é feito de maneira a se obter um conjunto de dados que relacione o número de batidas com a umidade. É aconselhável que o conjunto de dados atenda uma faixa de número de batidas entre 18 e 32. Os dados são plotados em um gráfico, onde se estima a umidade que corresponda a um número de 25 batidas.

O resultado do limite de liquidez para o solo coletado não se mostrou satisfatório às indicações normativas da ABNT, segundo a NBR 10832 (1989), apresentando $LL = 68,70\%$, sendo que a norma recomenda que o solo aconselhável para a fabricação de tijolos de solo cimento deve apresentar valor igual ou inferior a 45%, o que comprova que o solo natural coletado não é adequado para a confecção de blocos de solo-cimento e necessita ser corrigido granulometricamente.

A Figura 8 mostra o gráfico para o ensaio de limite de liquidez.

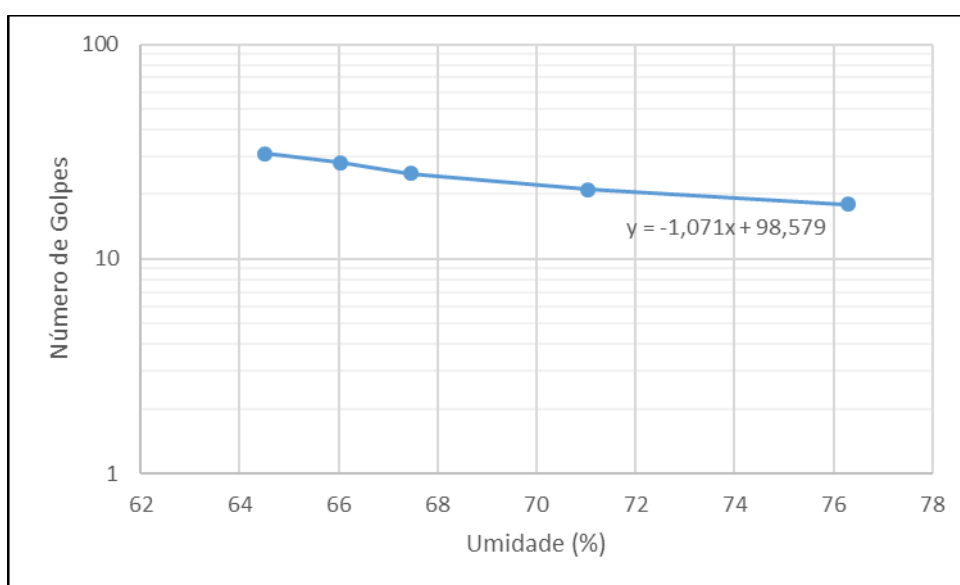


Figura 8 - Gráfico do ensaio de limite de liquidez do solo natural

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Sendo a equação da reta $y = -1,071x + 98,579$, para $y = 25$ golpes, têm-se $LL = 68,70\%$.

O solo para ser utilizado na moldagem dos blocos recebeu correção granulométrica com areia de fundição, a substituição do solo pela areia foi da ordem de 70%, ou seja, a mistura final foi composta por 70% de areia de fundição e 30% de solo natural. O solo corrigido apresentou limite de liquidez descrito na Figura 9:

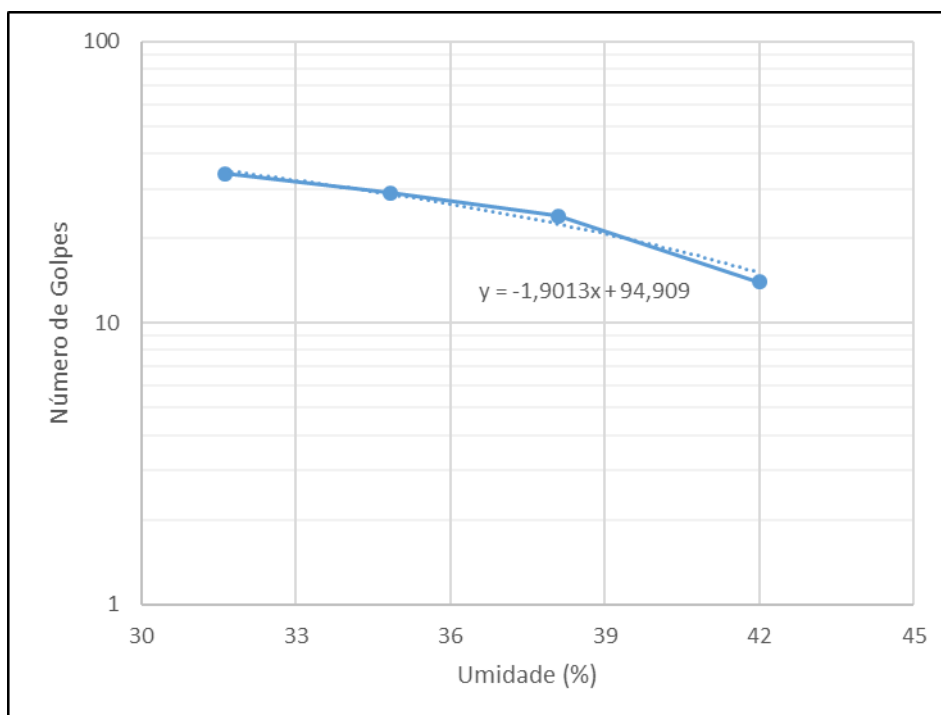


Figura 9 - Gráfico do limite de liquidez do solo corrigido

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Sendo a equação da reta $y = -1,9013x + 94,909$, para $y = 25$ golpes, têm-se LL = 36,80%.

3.1.1.2.2 Limite de plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade determina o teor de umidade no qual o solo começa a apresentar comportamento plástico. Foram seguidos os procedimentos estabelecidos pela NBR 7180/1984, com secagem prévia da amostra, conforme NBR 6457/1986. Este ensaio também foi realizado no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco.

O limite de plasticidade foi determinado através de amostras de solo fino e seco, que após umedecidas, Figura 10(a), foram moldadas em cilindros de 3 a 4 mm de diâmetro, Figura 10(b). Conforme a metodologia, a umidade relacionada ao limite de plasticidade é alcançada quando os cilindros, devido ao trabalho em uma superfície lisa, começam a apresentar rachaduras. O resultado final, referente a média de pelo menos três valores de umidade, deve ser expresso em porcentagem, aproximado para o valor inteiro mais próximo.

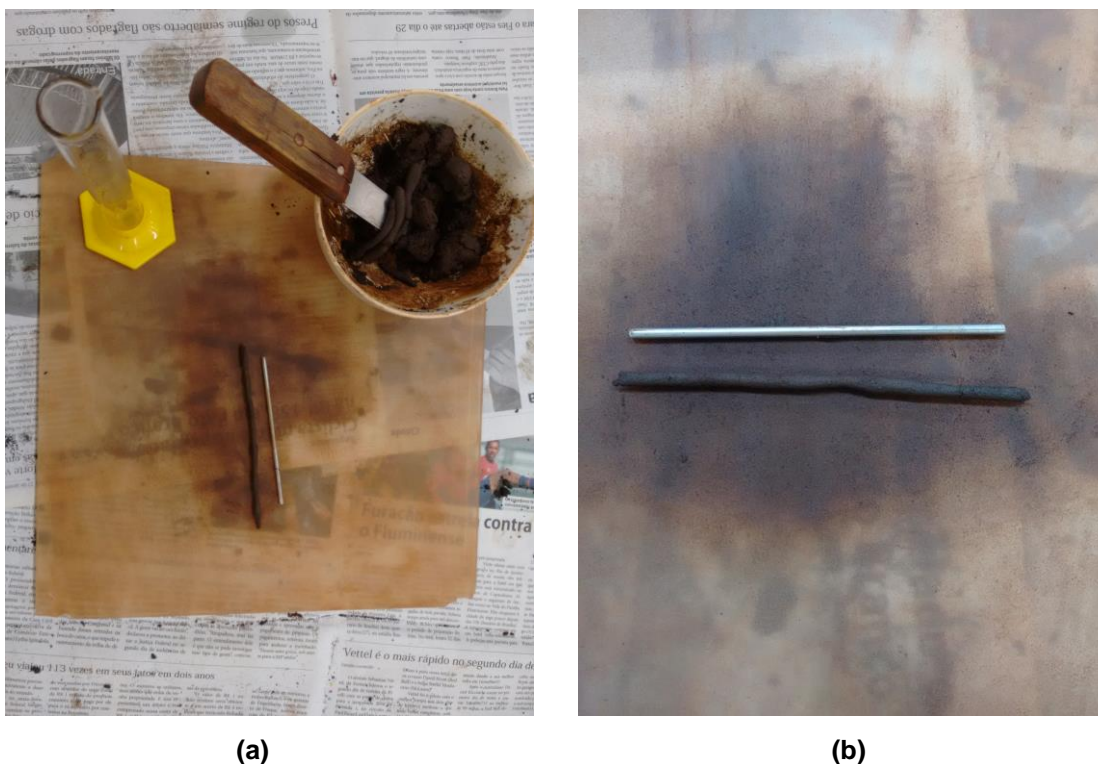


Figura 10 - Ensaio de limite de plasticidade: (a) preparação da amostra; (b) moldagem do cilindro

Fonte: Acervo pessoal (2017).

3.1.1.2.3 Índice de plasticidade

O índice de plasticidade (IP) do solo atendeu a norma NBR 10832 (1989) que prescreve valores iguais ou inferiores a $IP = 18\%$, sendo que o IP é objetivo pela diferença entre o LL e LP ($IP = LL - LP$). Os resultados para o ensaio de limite de plasticidade apresentaram $LP = 56,0$, obtendo-se assim o seguinte índice de plasticidade:

$$IP (\%) = LL - LP$$

$$IP (\%) = 68,70 - 56,00$$

$$IP (\%) = 12,70.$$

Enquanto que para o solo corrigido o LP foi de $30,0\%$, assim sendo, o índice de plasticidade é:

$$IP (\%) = LL - LP$$

$$IP (\%) = 36,80 - 30,00$$

$$IP (\%) = 6,80.$$

Portanto, os resultados de correção de solo atendem as recomendações da norma NBR 10833 (2012) quanto a limite de liquidez e plasticidade, conforme resumido na Tabela 7.

Tabela 7 - Características do solo corrigido

Características	Solo natural	Solo corrigido	Solo normativo
Material passante na peneira 4,75mm (%)	100	100	100
Material passante na peneira 0,075mm (%)	97,8	52,2	10 - 50
Limite de liquidez (%)	68,7	36,8	≤45
Índice de plasticidade (%)	12,7	6,8	≤18

Fonte: Acervo pessoal (2017).

Os índices de consistência satisfazem a norma de solo-cimento, sendo que solos com índices de plasticidade e limite de liquidez mais baixos demandam menores proporções de cimento para sua estabilização (MILANI, 2005).

Quanto ao material passante na peneira 0,075mm, o percentual obtido para o solo corrigido corresponde a 52,2%, Tabela 7, o que ultrapassa o limite proposto pela norma. Isto se deve ao atraso na realização dos ensaios de granulometria, a ausência dessas informações levou à adoção de uma proporção de finos que não atendeu ao limite de 50% de material passante na peneira 0,075mm. No entanto, para trabalhos futuros, já de posse da análise granulométrica, recomenda-se os devidos cálculos a fim de atingir os teores normativos.

3.1.2 Cimento Portland

Nesse estudo foi utilizado o cimento CP II Z-32 (cimento Portland com adição de pozolana cuja resistência aos 28 dias é, por norma, no mínimo 32 MPa) da marca Itambé. A escolha desse tipo de cimento foi sobretudo devido ao fato de ser facilmente encontrado no mercado e por se tratar de um cimento com baixo calor de hidratação, o que facilita a comparação com o cimento supersulfatado.

Segundo a fabricante, o cimento Portland composto com pozolana, classe 32, empregado nas atividades, apresenta as especificações químicas expressas na Tabela 8 e características físicas e mecânicas indicadas na Tabela 9.

Tabela 8 - Características químicas do CP-II-Z 32 utilizado

Componente	Teor (%)	Limite da Norma
MgO	3,24	≤6,5
SO ₃	2,67	≤4,0
Perda ao fogo (PF)	5,13	≤6,5
Resíduo insolúvel (RI)	11,02	≤16

Fonte: ITAMBÉ (2017).

Tabela 9 - Características físicas e mecânicas do CP-II-Z 32 utilizado

Características	Teor	Limite da Norma
Finura #200 (%)	1,9	≤12,0
Blaine (cm ² /g)	3570	≥2600
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	≥20
	28 dias	≥32

Fonte: ITAMBÉ (2017).

Ainda, com o intuito de caracterizar mecanicamente o cimento Portland utilizado, foram moldadas argamassas na proporção 1: 2,75 : 0,485 (aglomerante : areia : água).

Os resultados de resistência à compressão e flexão obtidos constam na Tabela 10.

Tabela 10 - Características físicas e mecânicas do CP-II-Z 32 utilizado

Amostras	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à flexão (Mpa)
	7 dias	28 dias	7 dias
Amostra 1	21,65	27,07	4,24
Amostra 2	22,42	28,61	4,75
Amostra 3	23,09	28,29	4,47
Média	22,39	27,99	4,49

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.1.3 Cimento Supersulfatado

A estabilização foi feita utilizando o cimento supersulfatado (CSS) produzido no Laboratório de Materiais da Universidade. Atualmente, no Brasil ainda não há nenhuma normatização que padronize o CSS para comercialização. A norma mais recente que se tem para esse cimento especial é uma norma europeia de 2010 (EN 15743, 2010), que apresenta a composição, especificações e conformidades.

O CSS foi adotado para verificar suas características no desempenho do bloco de solo-cimento. Este cimento deve atender algumas exigências físicas, químicas e mecânicas prescritas na Tabela 11, conforme estabelecido pela norma europeia.

Tabela 11 - Exigências mecânicas e físicas (valores característicos)

Classe de resistência	Resistência à compressão (MPa)			Força padrão	28 dias
	Resistência inicial		Força padrão		
	Dois dias	Sete dias			
32,5 L	--	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	
32,5 N	--	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	
42,5 L	--	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 N	≥ 10,0	--	≥ 42,5	≤ 62,5	
52,5 L	≥ 10,0	--	≥ 52,5	--	
52,5 N	≥ 20,0	--	≥ 52,5	--	

Fonte: EN 15743 (2010).

As proporções dos materiais utilizados, em percentagem, na produção do CSS constam na Tabela 12.

Tabela 12 - Proporção dos materiais do cimento supersulfatado

Proporção dos materiais para CSS (%)

Escória	Sulfato de cálcio (fosfogesso)	Ativador alcalino (KOH)
85	15	0,5

Fonte: Rubert (2015).

A proporção de escória, sulfato de cálcio e ativador utilizados na confecção de argamassas para ensaio de resistência à compressão foi a mesma proporção utilizada na confecção dos blocos, isto é, o cimento supersulfatado continha 85% de escória, 15% de sulfato de cálcio, a quantidade de ativador alcalino corresponde a 0,5% da massa da mistura de escória e fosfogesso.

A fim de caracterizar o cimento supersulfatado mecanicamente, foram realizados ensaios de resistência à flexão (7 dias) e resistência à compressão (7 e 28 dias). Foram moldadas argamassas e a quantidade dos materiais são apresentadas na Tabela 13, com o mesmo traço das argamassas produzidas com cimento Portland (1:2,75:0,485).

Tabela 13 - Proporção dos materiais para argamassas de cimento supersulfatado

Materiais	Massa (g)
Escória	408
Fosfogesso	72
KOH	2,4
Areia de ensaio	1320
Água	232,8

Fonte: Rubert (2015).

Os resultados de resistência mecânica apresentam-se na Tabela 14.

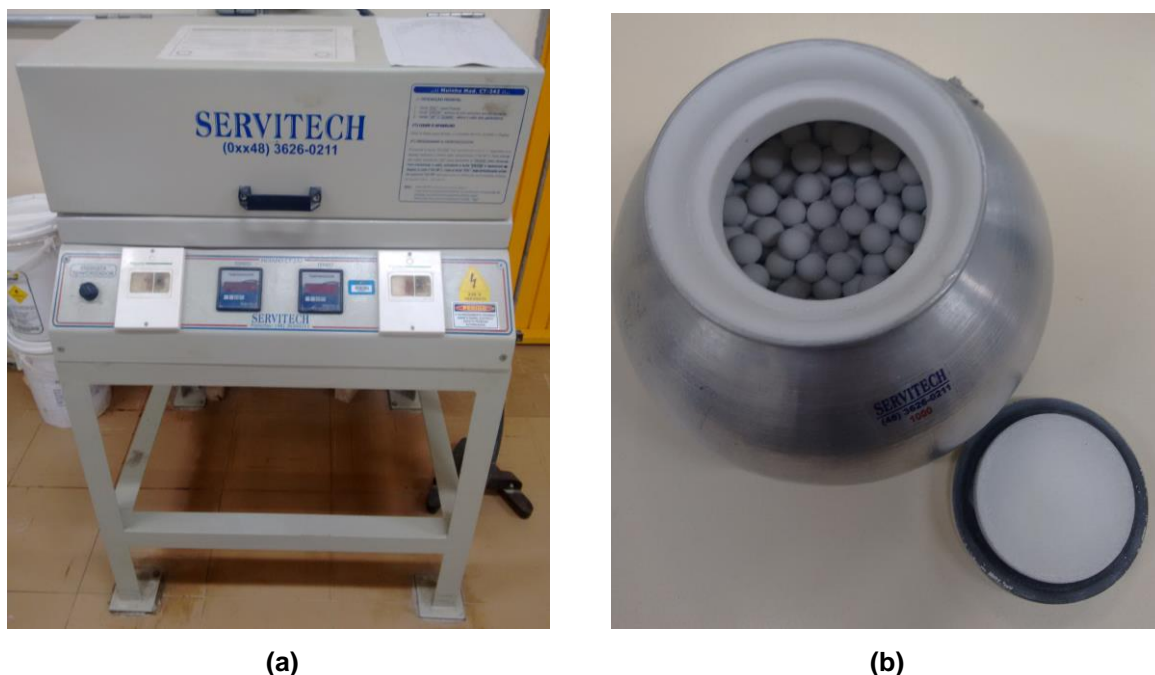
Tabela 14 - Características físicas e mecânicas do CSS utilizado

Amostras	Resistência à compressão (MPa)		Resistência à flexão (Mpa)
	7 dias	28 dias	7 dias
Amostra 1	11,94	22,03	3,77
Amostra 2	10,88	19,21	3,77
Amostra 3	11,08	19,03	2,81
Média	11,30	20,09	3,45

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.1.3.1 Escória de alto forno

A preparação da escória compreendeu o mesmo procedimento adotado por Rubert (2015) e Gracioli (2016). Inicialmente, a escória foi seca em estufa por 24 horas a uma temperatura controlada de 105 °C. Em seguida, a escória foi submetida a moagem durante 3 horas em moinho de bolas da marca Servitech, modelo CT 242, Figura 11(a). A proporção de escória e esferas, em gramas, utilizada no jarro (Figura 11(b) em cada ciclo de moagem foi de 1:1,373 (escória:esferas).



(a) (b)
Figura 11 - (a) Moinho de bolas; (b) jarro com esferas
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A Figura 12 apresenta a escória básica antes e depois de triturada, respectivamente.



(a) (b)
Figura 12 - Escória de alto-forno básica: (a) granulada; (b) moída
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A Tabela 15 apresenta a composição química da escória do lote 01, obtida por fluorescência de raios X (FRX). No entanto, para os testes foi utilizada escória do lote 02, que possui composição semelhante.

Tabela 15 - Composição química da escória básica - Lote 01

Oxides	Slag B	EM15743
SiO ₂	32.2	-
Al ₂ O ₃	8.2	-
Fe ₂ O ₃	0.8	-
CaO	49.5	-
MgO	5.0	-
SO ₃	1.4	-
Na ₂ O	0.1	-
TiO ₂	0.6	-
MnO	1.3	-
CaO+MgO+SiO ₂	86.7	≥66.7
(CaO+MgO)/SiO ₂	1.7	≥1.0
CaO/SiO ₂	1.54	-

Fonte: Rubert (2015).

A escória de alto forno empregada no estudo possui categoria básica, o que pode ser comprovado a partir da sua composição química. A relação CaO/SiO₂ é igual a 1,54, ou seja, é maior que 1,0. A norma europeia EN 15743/2010 não faz uso dessa relação, mas indica que a soma dos teores dos principais óxidos que compõem a escória (CaO+MgO+SiO₂) seja igual ou superior a 66,7% e a relação (CaO+MgO)/SiO₂ deve ser superior a 1,0.

Além disso, efetuou-se a análise de difração de raios X, exibida na Figura 13.

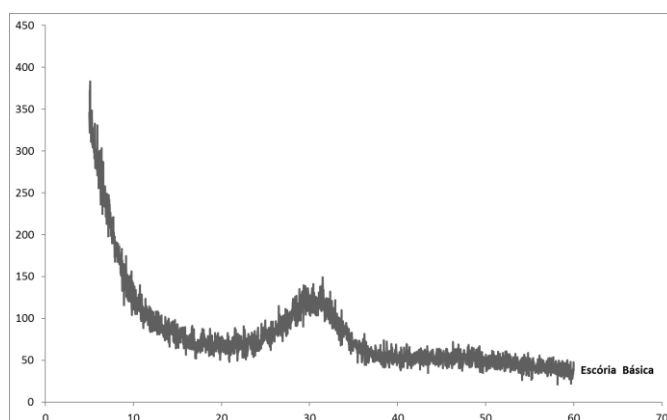


Figura 13 - Difratograma de raios X da escória básica – Lote 01

Fonte: Rubert (2015).

A análise mineralógica da escória de alto forno básica demonstra que esta é um material amorfo, pois não apresenta picos definidos. O fato de ser um material não cristalino aumenta sua empregabilidade em matrizes de CSS (GRACIOLI, 2016).

3.1.3.2 Sulfato de cálcio

O cimento supersulfatado a ser testado neste estudo tem como fonte de sulfato de cálcio o fosfogesso, apontado por Gracioli (2016) como alternativa e a preparação do mesmo foi baseada em seus estudos. Material resultante da produção de ácido fosfórico, o fosfogesso já é moído, então apenas é passado na peneira 150 μ m e depois calcinado em mufla a temperatura de 650 °C durante 1 hora, com taxa de aquecimento de 50°C/min, a fim de atingir a forma anidra. As Figuras 14 (a) e (b) mostram o fosfogesso *in natura*, isto é, antes da calcinação, e o fosfogesso calcinado à 650°C, respectivamente.



(a) (b)
Figura 14 - Fosfogesso (a) in natura; (b) calcinado à 650°C
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Com o propósito de confirmar a formação de anidrita após a calcinação realizou-se a análise de DRX do fosfogesso, antes e depois do processo de calcinação, representadas na Figura 15.

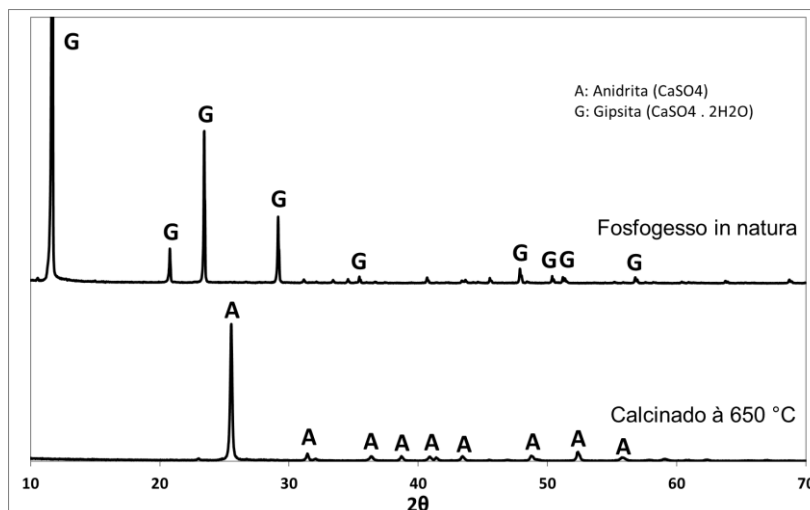


Figura 15 - Difratoograma de raios X do fosfogesso in natura e calcinado à 650°C
 Fonte: Gracioli *et al.* (2015).

Os difratogramas comprovam o desaparecimento dos picos de gipsita e a formação de picos característicos de anidrita, o que corresponde a transição do material da fase di-hidratada para a fase anidra.

3.1.3.3 Ativador alcalino

Nos ensaios realizados foi utilizado como reagente o Hidróxido de Potássio (KOH), Figura 16, baseado em estudos feitos por Gruskovnjak *et al.* (2008) e devido a bons resultados obtidos por Rubert (2015) e Gracioli (2016). Além disso, apesar do cimento Portland comumente ser usado como ativador (GRUSKOVNJAK *et al.*, 2008), o uso do KOH elimina completamente a utilização de clínquer na composição do CSS.

O ativador alcalino empregado nesta pesquisa é da marca Alphatec, na forma de escamas, cuja massa molar é 56,11g.mol⁻¹ e teor mínimo de pureza de 90%.

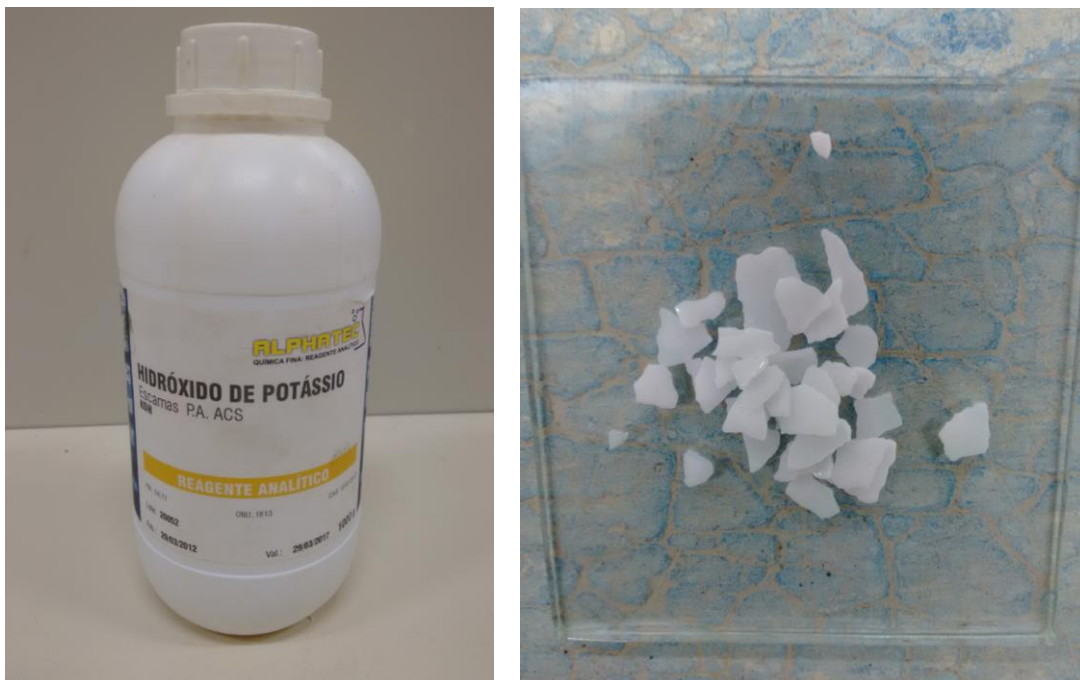


Figura 16 - Hidróxido de Potássio em escamas utilizado no trabalho
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.1.4 Areia de fundição

A areia de fundição foi adquirida de uma empresa metalúrgica do município de Pato Branco-PR, Figura 17. Foi realizado ensaio granulométrico do resíduo sólido e ensaio para determinação da densidade real dos grãos.



Figura 17 - Areia de fundição utilizada no trabalho
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A areia descartada de fundição (ADF) foi utilizada na presente pesquisa como material para correção do solo, e assim também como o solo, foi utilizada apenas o material passante na peneira 4,8mm, e semelhantemente, com a finalidade de adquirir padronização da umidade da areia de fundição esta também foi seca em estufa, durante 24 horas, com temperatura controlada de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$.

A massa específica da areia de fundição foi encontrada através do ensaio que utiliza o método do picnômetro, Figura 18, baseado na NBR NM 52/2009, obtendo valor de $1,96\text{ g/cm}^3$.



Figura 18 - Ensaio do picnômetro
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A caracterização granulométrica da areia de fundição foi realizada pelo Laboratório de Física do Solo do curso de Agronomia do Câmpus Pato Branco e também pelo Laboratório de Solos do curso de Agronomia do Câmpus Dois Vizinhos, ambos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Os resultados dos laudos de análise granulométrica, apresentam-se descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Análise granulométrica da areia de fundição utilizada

Material	Câmpus	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Areia de fundição	PB	67,3	12,7	20,0
	DV	86,0	4,0	10,0

Fonte: Laboratórios de Solos UTFPR – Câmpus Pato Branco e Dois Vizinhos (2017).

A areia de fundição apresenta uma granulometria média menor e um teor de finos e argila superior a areia convencional de construção civil.

A areia de fundição foi caracterizada por difratometria de raios X (DRX), utilizando um equipamento difratômetro de raios X da marca Rigaku, modelo Miniflex 600 (Figura 19), com velocidade de varredura de 3°/min e intervalo de leitura de 5° a 80° (2 θ).



Figura 19 - Difratômetro de raios X

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

As análises foram realizadas no laboratório Central de Análises situado no prédio do POLITEC da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco. A amostra foi previamente seca em estufa por 24 horas, em temperatura de 105°C, e peneirada na peneira 0,150mm. A caracterização teve como objetivo identificar a composição mineralógica da areia de fundição, apresentada na Figura 20.

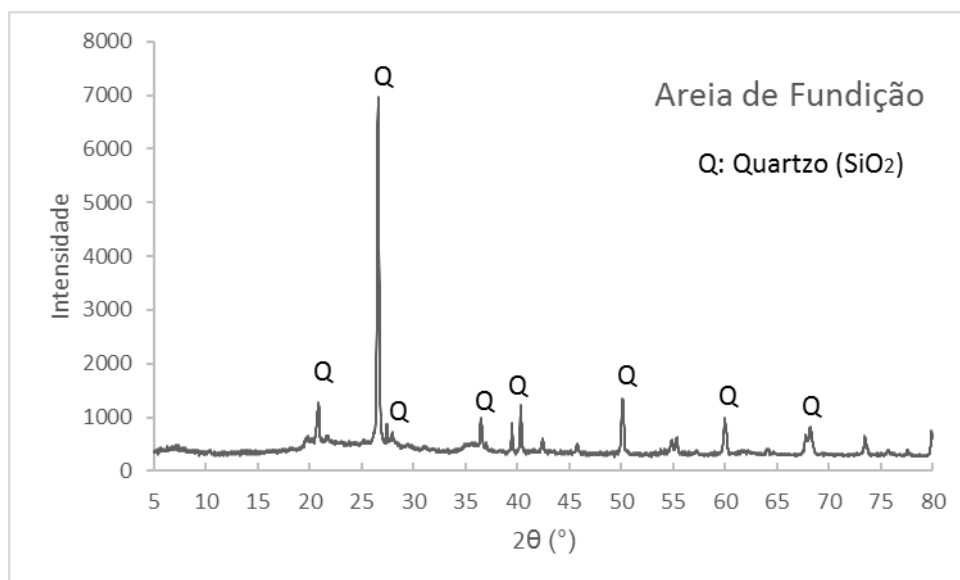


Figura 20 - Difratograma de raios X da areia de fundição
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A areia de fundição é composta basicamente de sílica, na sua forma mais elementar, grãos de quartzo.

3.1.5 Água

A água utilizada foi a mesma distribuída pela companhia estadual de abastecimento público, fornecida na Universidade, classificada como potável, portanto, em acordo com as normas estabelecidas para a produção do bloco de solo-cimento.

3.2 MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Pato Branco.

A preparação dos materiais seguiu os passos descritos na Figura 21.

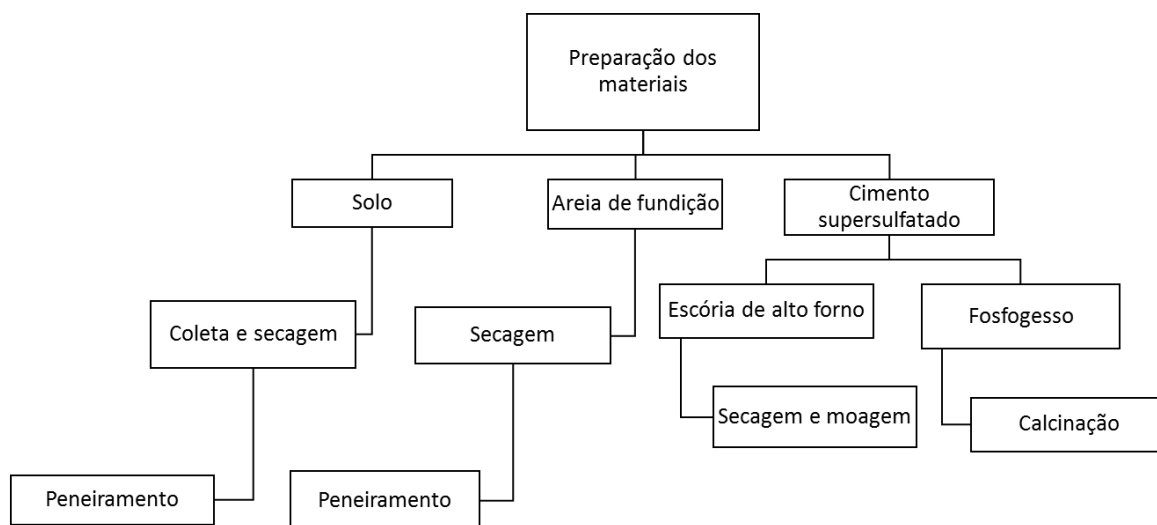


Figura 21 - Organograma da preparação dos materiais
 Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.1 Preparação do solo

O armazenamento do solo requer um local coberto, protegido da chuva, pois caso o solo estiver muito úmido, será mais demorado secá-lo de forma natural e uniforme. É recomendável colocá-lo sobre lona plástica, como apresentado na Figura 22.



Figura 22 - Solo secando naturalmente sobre lona plástica
 Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Inicialmente o solo deve ser peneirado, de forma a se trabalhar apenas com o material passante na peneira 4,8 mm (NBR 12023/1992). Durante todo o experimento foi utilizado solo passante na peneira 4,8 mm, e as amostras após peneiradas foram previamente secas ao ar para depois serem levadas para estufa com temperatura de $60\pm 5^{\circ}\text{C}$ com o objetivo de padronizar a umidade do solo.

3.2.2 Correção do solo

O solo coletado, devido sua granulometria e limite de liquidez, por norma, não é indicado para uso em solo-cimento, conforme a caracterização apresentada anteriormente. Por isso, o solo natural necessitou ser corrigido, sua correção, inicialmente, foi baseada no estudo de retração da caixa.

Segundo Grande (2003), se não surgir variação de volume trata-se de solo arenoso, se surgirem muitas fissuras com grande variação de volume trata-se de solo com argila ativa, o que provoca grande absorção de água.

O ensaio de retração é pertinente para indicar a qualidade do solo, uma vez que o mesmo pode prejudicar o bloco após a secagem com a manifestação de fissuras e desagregação. Quando o solo apresentar resultados inadequados no teste de retração é necessário corrigi-lo. No caso em estudo, por se tratar de solo muito argiloso é necessário fazer sua correção com adição de areia, porém essa mistura geralmente limita-se a fatores técnicos e econômicos, o que não é caso do presente trabalho, pois fez-se uso da areia de fundição, considerada resíduo do processo metalúrgico, o que torna a solução viável economicamente e ambientalmente.

3.2.2.1 Ensaio de retração e secagem

O ensaio de retração e secagem é indicado para especificar a presença de argilas expansivas que podem comprometer o desempenho devido a retração na secagem do material, proposto pela ABCP (1996). As argilas expansivas absorvem muita água e após a secagem provocam o surgimento de fissuras e trincas.

Neste ensaio, a amostra de solo passante na peneira 4,8 mm foi umedecida até se obter uma consistência plástica, sendo colocada posteriormente em uma caixa (60 cm de comprimento, 8 cm de largura e 3,5 cm de espessura), Figura 23.



Figura 23 - Teste da caixa para ensaio de retração
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Realizou-se adensamento manual e a amostra ficou à sombra repousando durante 7 dias. Após esse tempo, mediu-se a retração no sentido de comprimento da caixa, tendo como critérios que a soma das leituras deve ser inferior a 2 cm e a amostra não deve apresentar nenhuma fenda transversal na parte central da amostra (CEPED, 1984).

Inicialmente, baseado em estudos feitos por Kolling *et al.* (2012), utilizou-se a correção de solo composta por 25% de solo natural e 75% de areia de fundição, mas após 7 dias, apresentou retração superior a 20mm e fissuras transversais, como pode ser observado na Figura 24.



Figura 24 - Ensaio da caixa – Mistura 25/75
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Em seguida, procurou-se aumentar o teor de areia, testando-se a proporção 20% de solo e 80% de areia de fundição, mas esta também não atendeu as especificações, conforme pode ser visto na Figura 25.



Figura 25 - Ensaio da caixa – Mistura 20/80
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Em seguida, foi testada nova proporção, contendo 10% de solo e 90% de areia de fundição, Figura 26, e esta não apresentou fissuras transversais e a retração foi inferior a 20mm. Portanto, adotou-se, inicialmente esta proporção para a correção do solo.



Figura 26 - Ensaio da caixa – Mistura 10/90
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.3 Definição das dosagens do solo-cimento

Os traços das misturas foram definidos considerando-se estudos semelhantes realizados anteriormente (Kolling *et al.*, 2012), onde usualmente se destaca que teores de 4% a 10% de cimento são suficientes para a estabilização do solo-cimento para resultados satisfatórios de resistência dos blocos. O teor inicialmente adotado foi 1:10, em massa, visando economia de cimento. É importante destacar que o objetivo do trabalho não foi encontrar a melhor dosagem, cabendo como sugestão para trabalhos futuros.

Inicialmente, baseado no ensaio da caixa, adotou-se a mistura de 10% de solo argiloso e 90% de areia de fundição, com traço correspondente a 1:10 (cimento:solo corrigido). No entanto, esta mistura não se mostrou adequada para a retirada do bloco da prensa, ao tentar retirá-lo, este se fragmentava facilmente, Figura 27.



Figura 27 - Bloco fragmentado após tentativa de retirada da prensa
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Em função disso, aumentou-se a proporção de cimento na mistura, alterando-se o traço de 1:10 para 1:8. Mas não foi possível ainda retirar o bloco da prensa sem fragmentá-lo.

Uma nova tentativa, fez uso do traço 1:6, na mesma correção (10/90) do solo, que também não apresentou resultados aceitáveis. Não há limitação para o uso da areia de fundição, pois se trata do uso de um resíduo, no entanto, a utilização de um grande percentual de areia de fundição acabou reduzindo a coesão.

É necessária a presença de argila objetivando fornecer coesão suficiente a mistura quando umedecida e compactada, a fim de permitir sua retirada imediata da forma. Como a mistura foi composta por 90% de areia, a quantidade de argila presente pode não ter sido capaz de garantir a coesão necessária (FERREIRA, 2003).

Em seguida adotou-se um traço intermediário, no valor de 1:6, e alterou-se a proporção do solo corrigido, usando a relação de 50/50, isto é, 50% de solo e 50% de areia de fundição. Essa condição permitiu o desmolde do bloco sem causar-lhe danos. Mas como a proporção 50/50 ultrapassava demasiadamente a quantidade de

silte+argila recomendada, optou-se por utilizar a relação 30/70, que foi a proporção padronizada para os ensaios e a mesma utilizada por Kolling *et al.* (2012).

Neste estudo, como o objetivo foi analisar o uso do cimento supersulfatado (CSS) não houve uma preocupação quanto a utilização de baixos teores de cimento devido ao fato do CSS possuir composição livre de clínquer e ser produzido a partir de subprodutos industriais. O mesmo teor de cimento foi utilizado para os blocos feitos com cimento Portland a fim de promover um comparativo.

Ferreira (2003) afirma que a energia de compactação fornecida pela prensa manual é menor que a energia do ensaio de Proctor. Ou seja, a energia de compactação obtida pela prensa não é a mesma obtida em laboratório pelo ensaio de Proctor. O adequado seria a realização de um estudo aprofundado que fornecesse uma compatibilização entre essas energias.

Esse fato pode ser uma das hipóteses para a não viabilização da retirada dos blocos da prensa sem fraturá-los, pois a massa específica máxima do ensaio de Proctor não foi atendida pela pressão exercida pela máquina, logo não se reduziu suficientemente o volume de vazios. Quanto menor a energia de compactação, maior é o teor de umidade para alcançar a mesma massa específica, então é provável que, como foi utilizada a mesma quantidade de água obtida no ensaio da umidade ótima para a moldagem dos blocos, a mistura ficou pouco coesa.

Nos novos testes, não foi realizado o ensaio de compactação para verificação da umidade ótima, como fora feito inicialmente para a mistura de 10% de solo e 90% de areia de fundição. Um estudo preciso sobre a umidade adequada para a mistura levaria mais tempo. Logo, a umidade de moldagem foi obtida conforme a trabalhabilidade no momento da mistura por métodos empíricos, com a utilização do teste da mão.

3.2.3.1 Determinação do pH do solo natural e do solo corrigido

O ensaio para determinação do pH tem como objetivo apontar o grau de alcalinidade ou acidez do solo. A análise do pH do solo é importante pois quanto mais ácido for o solo, maior será a quantidade de aditivos necessários para sua estabilização.

A medição de pH foi realizada no Laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, realizada com água na proporção, em massa, de 1:2,5 (solo seco: água destilada).

O aparelho usado nessa medição é o pHmêtro, provido de eletrodo de vidro, calibrado com soluções tampão (padrões) de pH 4,0 e pH 7,0. Em seguida, faz-se a leitura do pH na amostra de solo. Os valores obtidos para o pH constam na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de pH na solução 1:2,5

Materiais	pH (solução 1:2,5)
Areia de fundição	7,13
Solo natural	5,07
Solo corrigido	6,65

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.4 Produção dos blocos

A produção dos blocos seguiu a sequência apresentada na Figura 28.

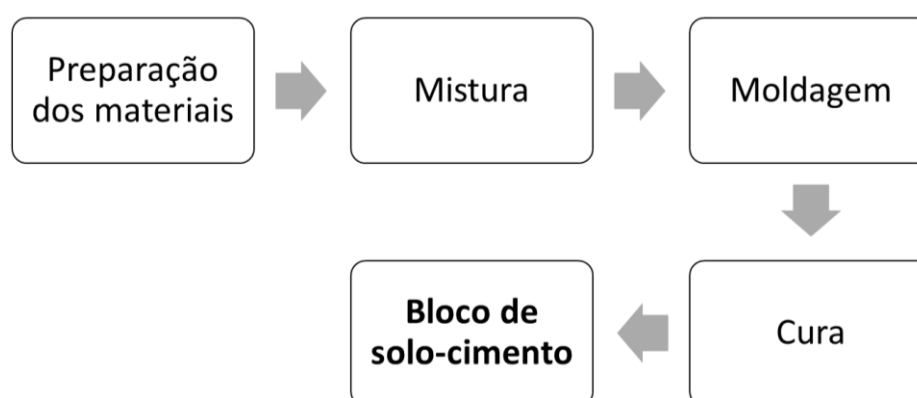


Figura 28 - Sequência da produção dos blocos de solo-cimento

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Com o objetivo de padronizar a massa dos blocos e a pressão exercida pela prensa, utilizou-se a mesma quantidade de material por bloco. Após a mistura de todos os materiais, tomava-se 2550 gramas da mistura úmida para inserir no molde.

A relação de materiais e as quantidades usadas para a confecção de um bloco de solo-cimento, encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 - Proporção dos materiais utilizados para confecção de um bloco

Materiais	Massa (g)	Proporção (%)
Solo	557,7	21,85
Areia de fundição	1301,5	51,05
CSS/CP	311,4	12,22
Água	379,4	14,88
Total	2550	100

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os ensaios que foram aplicados aos blocos de solo cimento, encontram-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Ensaios aplicados nos blocos com as respectivas normas utilizados

Ensaio	Normas de referência
Resistência à compressão	NBR 10836 (1994)
Absorção	NBR 10836 (1994)
Durabilidade	NBR 13555 (1996)

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.4.1 Mistura dos materiais

A preparação do solo corresponde à primeira etapa do processo produtivo, a qual compreende o destorroamento do material (desaglomeração), seguida do peneiramento, de modo a garantir que a granulometria seja inferior a 4,8 mm.

Após o peneiramento, a areia de fundição é adicionada, homogeneizando-se manualmente, com auxílio de uma colher de pedreiro, Figura 29.



Figura 29 - Mistura do solo e areia de fundição

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Em seguida adicionou-se o cimento e procedeu-se com homogeneização novamente, até que atinja coloração uniforme, Figura 30.



Figura 30 - Mistura seca dos materiais

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Depois adicionou-se água aos poucos, com auxílio de um borrifador, Figura 31(a) até que a argamassa atingisse consistência adequada para moldagem, Figura

31(b). As medidas certas de cada material, solo, areia de fundição e cimento, foram pesados previamente, de acordo com a proporção de cada material.



(a) Borrifador de água utilizado; (b) Mistura homogeneizada
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A quantidade de água usada foi definida através de verificação da consistência da argamassa mediante teste manual e visual. Água foi inserida até que a massa adquirisse consistência suficiente para que quando uma porção da mistura é pressionada com a mão, após abri-la ficam as marcas dos dedos nitidamente, Figura 32, e após partir ao meio o bolo não deve esfarelar. Se o bolo se esfarelar ao parti-lo ao meio significa que a mistura está precisando de mais água e se a mão ficar suja e com uma certa umidade, então está com excesso de água. Ainda, após largar o bolo pressionado com as mãos ao chão, de uma altura aproximada de 1m de altura, ele deve se despedaçar ao se chocar com a superfície (Figura 33).



Figura 32 - Teste do bolo com a mão
Fonte: Acervo Pessoal (2017).



Figura 33 - Teste de verificação da mistura para solo-cimento
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.4.2 Moldagem e cura dos blocos

A moldagem dos corpos de prova seguirá a norma da ABNT NBR 10833 (1989).

Nesta etapa foram moldados os blocos de solo-cimento com a utilização de prensa manual, respeitando a dosagem definida neste estudo. Para a moldagem, seguiu-se as especificações apresentadas pela NBR 8491/1984.

A prensa manual utilizada para a fabricação dos blocos é da marca Mix Máquinas, modelo PTE-6000 (Figura 34), projetada para fabricar blocos com as

dimensões 25 x 12,5 x 6,5 cm. Essa prensa é classificada como manual mecânica e possui uma tensão de compactação (a taxa de compactação corresponde à relação entre os volumes da mistura no estado solto e em estado compactado, sendo diretamente proporcional à tensão de compactação) que varia de 1,5 MPa a 2,0 MPa, (GRANDE, 2003).

A forma e dimensões do bloco produzido não são as mesmas do modelo apresentado pelas normas de solo-cimento, considerando que a prensa utilizada produz outro modelo de bloco e as normas são antigas. O bloco em estudo tem as dimensões apresentadas na Figura 35.



Figura 34 - Prensa manual utilizado no trabalho
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

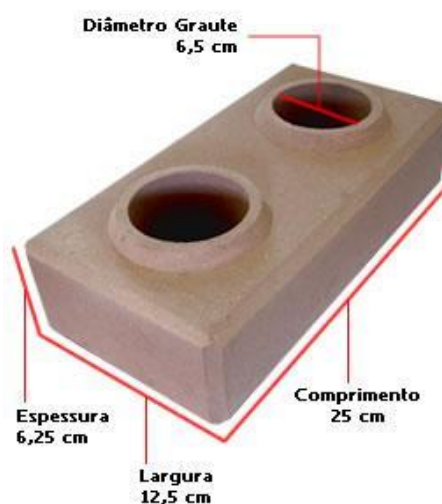


Figura 35 - Dimensões do bloco moldado com a prensa manual
 Fonte: Mix Máquinas (2017).

Após a mistura dos materiais, a massa foi colocada no molde e então foi executada a prensagem manual, que apresenta baixa pressão quando comparada a prensas hidráulicas. Depois da prensagem os tijolos foram tirados com cuidado da prensa (Figura 36), uma vez que logo após a prensagem eles apresentam baixa resistência.



(a) **(b)**
Figura 36 - Moldagem dos blocos: (a) Bloco dentro da prensa; (b) Bloco após compactação extraído da prensa

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Após a moldagem, os blocos foram colocados sobre superfície lisa, plana e seca, Figura 37(a), e alocados dentro de sacos plásticos vedados a fim de evitar a perda de umidade para o ambiente, durante o período de cura, Figura 37(b), e

permaneceram em câmara úmida com temperatura controlada de 23 °C até a realização dos ensaios.

O método de cura proposto pelo manual de *Fabricação de Tijolos de Solo-cimento com a Utilização de Prensas Manuais* da ABCP consiste em armazená-los em local aberto, protegidos do sol, vento e chuva e umedecê-los durante os 7 primeiros dias com água, por meio de um regador. No entanto, é importante ressaltar que não foi utilizado o método de cura recomendado pela ABCP (2000), pois os primeiros testes utilizando esse método não se mostrou uma técnica eficiente, visto que os blocos apresentaram pequenas fissuras. Além disso, não seria possível completar os 7 dias de cura em virtude dos dias úteis disponíveis. Assim sendo, optou-se por armazenar os blocos dentro de sacos plásticos vedados, a fim de manter a umidade. Os blocos foram mantidos dentro dos sacos plásticos até a idade dos ensaios.



(a) (b)
Figura 37 - Blocos de solo-cimento: (a) Logo após a moldagem; (b) Preparados para a cura
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.5 Caracterização mecânica dos blocos de solo-cimento

Os ensaios realizados nos blocos estão apresentados na Figura 38.

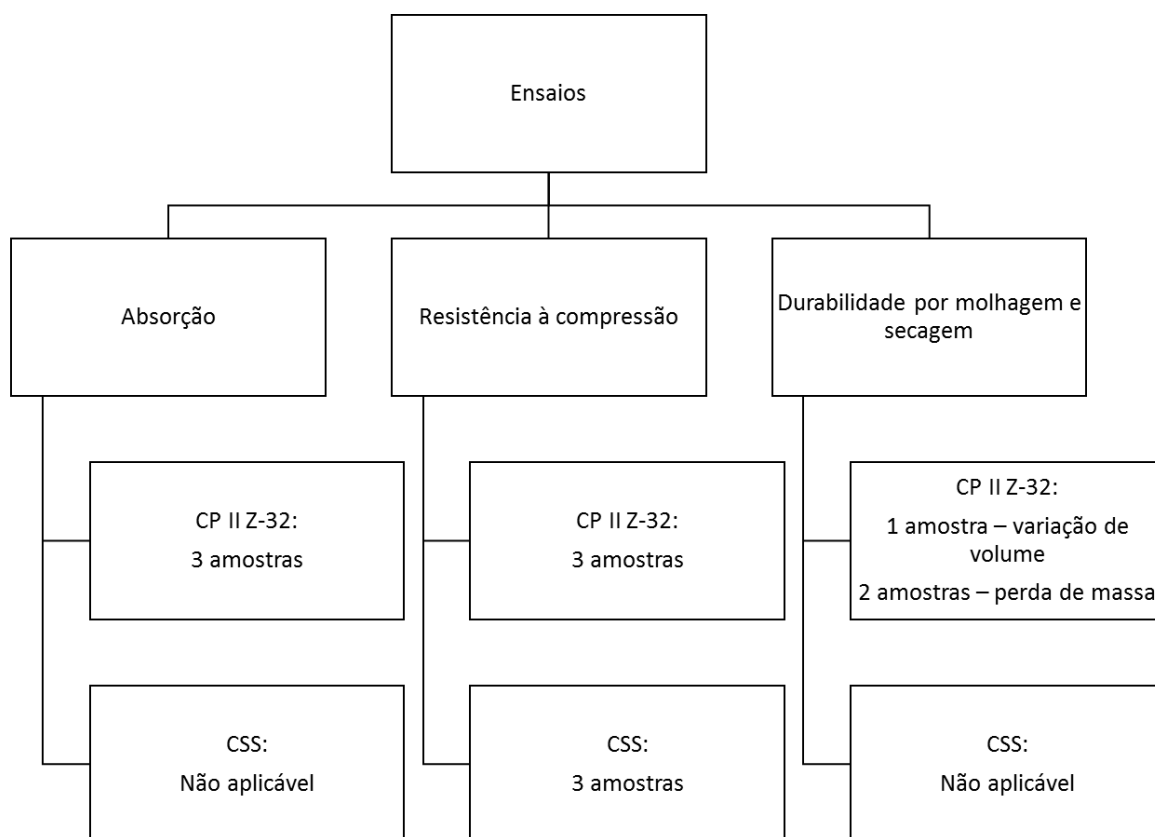


Figura 38 - Organograma dos ensaios aplicados nos blocos de solo-cimento

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.5.1 Resistência à compressão simples (NBR 10836/1994)

Os ensaios de resistência a compressão simples dos blocos foram realizados aos 28 dias de idade, seguindo as recomendações da NBR 10836/1994. A prensa utilizada no ensaio (Figura 39) foi uma máquina hidráulica, da marca EMIC, modelo DL-30000, com célula de carga de 300kN, com velocidade de carregamento de 1,0 mm/min.



Figura 39 - Máquina utilizada para ensaio de resistência à compressão

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Civil da UTFPR – Pato Branco. A preparação do ensaio iniciou com o capeamento das faces inferior e superior dos blocos, Figura 40, com pasta de cimento Portland, em bancadas com superfície de vidro niveladas. As amostras foram capeadas a fim de regularizar e nivelar as superfícies para que a transferência de carga seja uniforme para todo o bloco durante o ensaio de resistência à compressão.



Figura 40 - Blocos capeados em apenas um dos lados
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Após endurecimento da pasta de capeamento, Figura 41, os corpos de prova não foram imersos em água pelo período de 24 horas conforme determinado pela norma a fim de serem ensaiados saturados, mas foram diretamente submetidos ao ensaio de resistência a compressão. Através dos testes iniciais de durabilidade realizados, verificou-se que os blocos de CSS não apresentavam resistência à água, desmanchando-se quando submersos. Por isso, a fim de se manter um comparativo entre os blocos de CSS e cimento Portland, optou-se por realizar adaptação à norma quanto aos procedimentos do ensaio de resistência à compressão e ensaiar os blocos secos. Considerando que o ensaio de durabilidade visa estudar o comportamento do bloco na pior situação, assim, o ensaio de resistência à compressão com os blocos secos permite observar o resultado na melhor situação.



Figura 41 - Blocos capeados para ensaio de resistência à compressão
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os blocos foram ensaiados de maneira que a direção da carga aplicada esteja paralela ao eixo dos furos, conforme Figura 42.



Figura 42 - Bloco em ensaio de resistência à compressão
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os resultados foram calculados individualmente para cada bloco, a resistência à compressão foi obtida pela divisão da carga de ruptura pela área de trabalho. Foram utilizados três blocos em cada análise, a resistência média foi determinada pela média das tensões de ruptura dos blocos.

Os ensaios de resistência à compressão realizados nos blocos de solo-cimento estão apresentados na Figura 43, com a indicação do tipo de cimento, e as respectivas idades e quantidades de amostras ensaiadas.

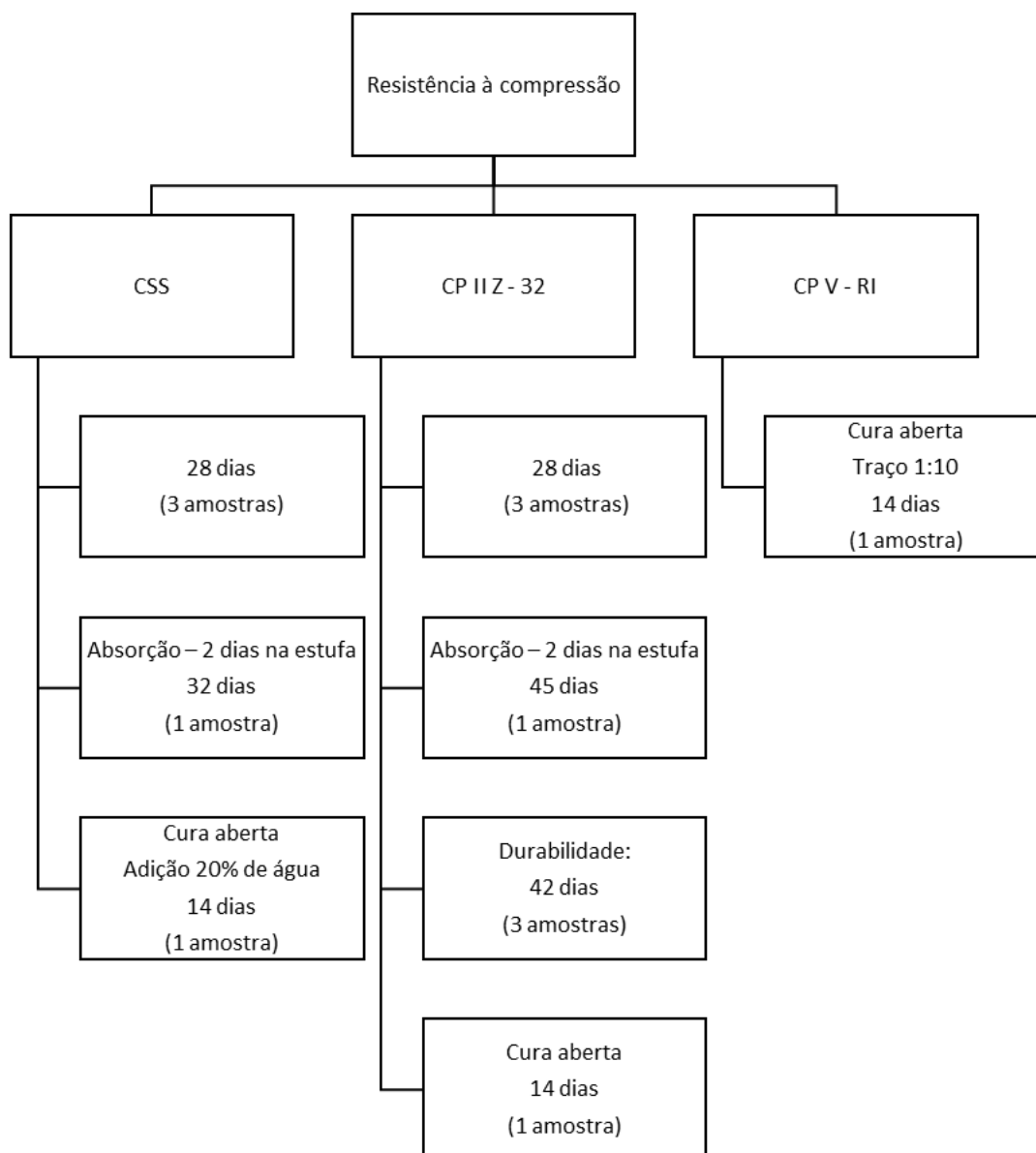


Figura 43 - Organograma dos ensaios de resistência à compressão

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

3.2.6 Ensaio de absorção de água (NBR 10836/1994)

Na realização do ensaio de absorção de água em blocos de solo-cimento utilizou-se como base a NBR 10836/1994. Inicialmente, três blocos com idade de 28 dias de cura foram secos em estufa elétrica, Figura 44, com temperatura entre 105°C e 110°C até constância de massa, obtendo-se assim, a massa seca das amostras.



Figura 44 - Blocos secando em estufa
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Em seguida, os blocos foram imersos em água por um período de 24 horas (Figura 44).



Figura 45 - Bloco submerso em água em ensaio de absorção

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Após a retirada dos blocos da água, fez-se rápida secagem superficial com pano e foi obtida a massa saturada. Os valores individuais de absorção foram obtidos pela Equação 1 e a absorção média foi determinada através da média de três blocos, expressos em porcentagem.

$$A (\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que:

A = absorção d'água (%);

M₁ = massa do bloco seco em estufa (g);

M₂ = massa do bloco saturado (g).

3.2.7 Durabilidade por molhagem e secagem (NBR 13554/1996)

Foram realizados ensaios de durabilidade nos corpos de prova pelo processo de degradação acelerado por ciclos de molhagem e secagem, com escovação, a partir da idade de 7 dias, a fim de se avaliar os resultados do envelhecimento referentes a variação de volume e perda de massa.

Para esse tipo de ensaio a norma indica a moldagem de corpos de prova cilíndricos, conforme a NBR 12024/1992, no entanto, nesse estudo o ensaio de durabilidade foi realizado diretamente nos blocos. Foram moldados três blocos, onde o bloco 1 foi usado para obter a variação de volume durante o ensaio, e os blocos 2 e 3 foram usados para obter a perda de massa durante o ensaio. Inicialmente, os corpos de prova foram colocados imersos em água durante 5 horas, Figura 46. Após 5 horas, retirou-se os blocos da água, determinando a massa e o volume.



Figura 46 - Bloco submerso em ensaio de durabilidade
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A norma determina que os blocos devem ser colocados na estufa com temperatura de $(71 \pm 2)^\circ\text{C}$ durante 42 horas. Retirá-los e determinar a massa (Figura 47) e o volume dos blocos (Figura 48). Os blocos 2 e 3 tiveram sua superfície escovada com escova de aço, conforme processo descrito pela norma.



Figura 47 - Determinação de massa com uso de balança
Fonte: Acervo Pessoal (2017).



Figura 48 - Determinação de volume com uso de paquímetro digital
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

As medidas do bloco para determinação do volume foram feitas com paquímetro digital, Figura 49.



Figura 49 - Paquímetro digital utilizado nas medições
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A escovação foi realizada com escova de aço (Figura 50) apenas nos corpos de prova n° 2 e n° 3, aplicada paralela ao eixo longitudinal do bloco e paralelo às suas bases, de maneira a cobrir toda a superfície do corpo de prova. Aplicada em todo as faces do bloco com uma escovação firme correspondente a 15N.



Figura 50 - Escova com cerdas de aço
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Essa força foi medida colocando-se um corpo de prova sobre uma balança e observando-se a leitura da mesma, de forma que ao aplicar à escova uma força necessária para causar 15N sobre o corpo de prova, a leitura da balança corresponderia a 1,5 Kg, Figura 51.



Figura 51 - Processo de escovação dos blocos com auxílio de balança
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

O procedimento completo constitui um ciclo de 48 horas, porém, não foi possível seguir exatamente as horas de permanência dos blocos na estufa, ficando na maioria das vezes mais de 42 horas, pois esse período precisou ser ajustado ao calendário acadêmico.

O cálculo de variação de volume ocorrida nos corpos de prova entre o período de cura de 7 dias e os volumes obtidos após cada ciclo, expressas em porcentagem do volume inicial (V_i), é feito pela Equação 2.

$$V_{v,n} = \frac{(V_i - V_n)}{V_i} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

$V_{v,n}$ = variação de volume do corpo de prova nº 1, em cada etapa, em %

V_i = volume inicial do corpo de prova n° 1

V_n = volume do corpo de prova n° 1 em cada etapa

No cálculo de perda de massa, a quantidade relativa de água nos corpos de prova n° 2 e n° 3 após atingir massa constante é igual à de água retida no corpo de prova n° 1, calculada conforme a Equação 3:

$$A = \frac{(M_{f(1)} - M_{i(1)})}{M_{i(1)}} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

A = água retida no corpo de prova n° 1, em %;

$M_{f(1)}$ = massa seca final do corpo de prova n°1 após atingir massa constante, em g;

$M_{i(1)}$ = massa seca inicial calculada, por ocasião da molda do corpo de prova n° 1, em g.

Em seguida, corrige-se as massas secas dos corpos de prova n° 2 e n° 3, descontando a água que reagiu com o cimento e o solo durante o ensaio e que ficou retida no corpo de prova n° 1 a 110°C, conforme a Equação 4:

$$M_{fc(2,3)} = \frac{M_{f(2,3)}}{(A+1,0)} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

$M_{fc(2,3)}$ = massa seca final corrigida dos corpos de prova n° 2 e n° 3, em g;

$M_{f(2,3)}$ = massa seca final dos corpos de prova n° 2 e n° 3 após atingir massa constante, em g;

A = água retida no corpo de prova n° 1, em %

Para calcular a perda de massa dos blocos n° 2 e n° 3 como porcentagem da massa seca inicial, utiliza-se a Equação 5:

$$P_{m(2,3)} = \frac{(M_{i(2,3)} - M_{fc(2,3)})}{M_{i(2,3)}} \times 100 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

$M_{i(2,3)}$ = massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem dos corpos de prova n° 2 e n° 3, em g

$M_{fc(2,3)}$ = massa seca final corrigida, dos corpos de prova n°2 e n°3, em g

$P_{m(2,3)}$ = perda de massa dos corpos de prova n°2 e n°3, em %

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ABSORÇÃO

Segundo a NBR 10834 (1994), os valores para absorção não devem ser superiores a 20% para valores médios e nem superiores a 22% para valores individuais. Observa-se na Tabela 20, os resultados obtidos para a absorção de água aos 28 dias, dos blocos moldados com cimento CP II Z-32.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de absorção para os blocos feitos com CP II Z 32

Blocos	Absorção (%)
B1	29,1
B2	29,3
B3	29,3
Média	29,2

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

O valor médio encontrado foi de 29,2% para os blocos de solo-cimento na proporção 30/70 de solo/areia e com teor de cimento 1:6 (cimento:solo corrigido), feitos a partir de cimento Portland composto com pozolana. Verifica-se que os blocos não atenderam essa especificação da norma que recomenda absorção média inferior a 20% e absorção individual menor que 22%.

A mistura em estudo contendo 30% de solo e 70% de areia de fundição, isto é, o solo corrigido, tem em sua composição final (considerando resultados fornecidos pelo Laboratório de Solos do curso de Agronomia da UTFPR Pato Branco) a seguinte composição granulométrica:

- Argila – 38%
- Silte – 14,23%
- Areia – 47,77%.

A areia de fundição incorporada à mistura é de granulometria fina, por isso da proporção total adicionada, 32,7% corresponde a granulometria de silte e argila, e

somando-se a argila e silte presente no solo, essa porcentagem sobe para 52,23% de silte e argila presente no solo corrigido.

Para Milani (2005) misturas com elevado teor de argila apresentam valores de absorção de água mais elevados, devido à grande quantidade de finos, menores valores de absorção são encontrados quando utilizados solos arenosos.

Além da composição granulométrica da mistura, o que pode ter contribuído para a alta absorção é a baixa taxa de compactação do bloco. Em um estudo feito por Oliveira *et al.* (2014), os blocos que não atenderam à resistência mecânica também não seguiram os critérios de absorção. E segundo o autor, as hipóteses levantadas são a alta porosidade em consequência da baixa compactação na fabricação do tijolo, e a baixa umidade relativa do ar durante o período de moldagem, o que propiciou rápida evaporação da água presente na mistura, não havendo a água necessária para reagir com os grãos de cimento.

A resistência mecânica e a absorção de água são fortemente influenciadas não só pela porcentagem de cimento incorporada, mas também pelo teor de umidade (GRANDE, 2003). Normalmente, o valor da umidade ótima tende a aumentar conforme aumenta-se o teor de cimento, pois há maior quantidade de finos na mistura. Além disso, a obtenção de blocos mais compactados é capaz de gerar blocos mais resistentes, com menos absorção de água e mais duráveis, pois há maior massa específica (SOUZA *et al.*, 2008).

Segundo Motta *et al.* (2014), deve-se utilizar maior percentual de cimento na mistura quando se deseja obter melhor resistência mecânica, absorção de água e durabilidade do solo-cimento. Além disso, a qualidade do solo-cimento depende de fatores como tipo de solo, umidade de moldagem, tipo de prensa, proporção de solo/cimento, tipo de estabilizante químico e o processo de cura.

A redução da absorção de água ocorre com o aumento do tempo de cura, onde no processo de hidratação as partículas do cimento Portland preenchem os vazios, reduzindo a porosidade dos blocos (SOUZA, 2011). Portanto, sugere-se que a elevada absorção esteja relacionada a baixa resistência à compressão.

Em trabalho desenvolvido por Oliveira *et al.* (2014) utilizando resíduos sólidos na produção de tijolos de solo-cimento, o autor obteve resultados de absorção média entre 36,23% para tijolos com 15% de resíduo e 40,91% para tijolos com 0% de resíduo. Então concluiu em seu trabalho que tijolos de solo-cimento que apresentaram maior resistência mecânica foram os que apresentaram menor absorção.

Como os blocos de solo-cimento produzidos com CP II-Z não atenderam a recomendação normativa quanto a absorção de água, os blocos podem ser indicados para uso em ambientes internos, protegidos das intempéries ou em paredes revestidas ou tratadas com produtos hidrofugantes.

Não foi possível a aplicação do ensaio de absorção nos blocos de solo-cimento feitos a partir de CSS, pois os mesmos se desmanchavam minutos após sua imersão em água, Figura 52.



Figura 52 - Bloco logo após imersão em água no ensaio de absorção
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Portanto, em termos de absorção, os blocos de cimento Portland se mostraram superiores aos blocos de CSS, promovendo melhor desempenho frente a ação da água.

4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Tabela 21 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias, tanto para blocos feitos com CP-II-Z quanto para os blocos de CSS.

Tabela 21 - Resultados de resistência à compressão para CP-II-Z e CSS

Resistência à compressão (MPa) - 28 dias		
Blocos	CP II - Z - 32	CSS
B1	1,98	0,36
B2	1,95	0,36
B3	1,56	0,34
Média	1,83	0,35

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os resultados são representados graficamente pela Figura 53.

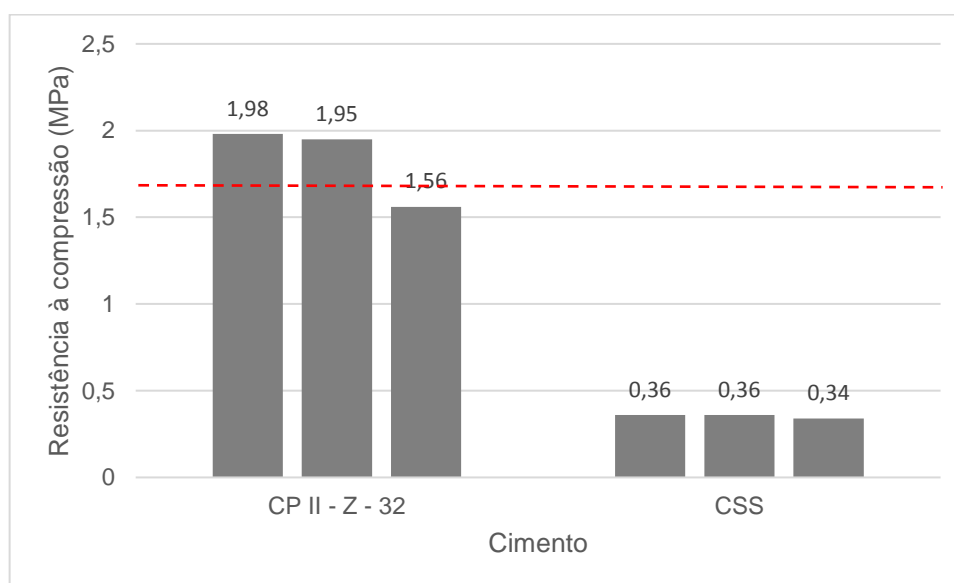


Figura 53 - Processo de escovação dos blocos com auxílio de balança

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Para o ensaio de resistência à compressão em blocos estabilizados com cimento Portland, dois dos três blocos ensaiados apresentaram resistência individual acima de 1,7 MPa, mas a média se manteve abaixo do recomendado (2,0 MPa). Já

os blocos elaborados com CSS apresentaram resultados muito baixos, não atendendo a norma, tanto em valores individuais quanto médios.

A única variação do ensaio de resistência a compressão foi o tipo de cimento empregado. Os blocos de solo-cimento feitos com cimento Portland apresentaram resistência à compressão superior aos blocos feitos a partir de cimento supersulfatado. A média para o CP foi de 1,83 MPa enquanto que para o CSS foi de 0,35 MPa, ambos para idade de 28 dias.

As características físico-mecânicas de blocos de solo-cimento são dependentes de diversas variáveis, entre elas:

- Tipo de solo (granulometria, teor de argila);
- Tipo e teor do estabilizante utilizado;
- Condições de cura (temperatura e umidade);
- Compactação.

Conforme Picchi *et al.* (1990) *apud* Milani *et al.* (2006), a resistência à compressão e absorção de água em blocos de solo-cimento estão diretamente relacionadas com as condições de cura, como umidade e temperatura, e com a compactação.

Callister (2006) *apud* Dantas *et al.* (2014) afirma que a ligação entre o cimento e as partículas dos agregados depende de adição adequada de água, visto que a quantidade de água e cimento, capazes de formar uma pasta, deve ser suficiente para revestir todos os grãos de argila e areia, caso contrário a cimentação será irregular. Além disso, as proporções de argila (agregado fino) e areia (agregado grosso) deve propiciar contato interfacial apropriado, a fim de que os grãos finos da argila preencham os espaços deixados pelos grãos de areia, assim é possível melhorar as condições de resistência mecânica.

Um dos blocos com cimento Portland, que havia sido utilizado no ensaio de absorção, foi levado em estufa durante 48 horas, juntamente com um bloco feito a partir de CSS que seria submetido ao ensaio de absorção, mas que não foi possível devido sua pouca resistência. O bloco de CP utilizado no ensaio de absorção estava na data do rompimento com idade de 45 dias e o bloco de CSS estava com 32 dias. As amostras permaneceram dois dias na estufa a uma temperatura de 105 à 110°C, depois levaram dois dias para serem capeados (um dia para capeamento do primeiro lado e outro dia para o segundo lado) e então sujeitos ao ensaio de compressão, conforme resultados da Tabela 22.

Tabela 22 - Resistência à compressão para o teste com 2 dias em estufa

Resistência à compressão - Dois dias em estufa	
Blocos	Resistência (MPa)
CP - 45 dias - absorção	2,96
CSS - 32 dias	0,58

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

O resultado para o bloco de CP foi de 2,96 MPa e se encontra acima do valor mínimo estabelecido pela norma. Já para o caso do CSS a resistência ainda foi baixa (0,58 MPa) quando comparada ao CP, mas teve significativo aumento em relação aos primeiros testes, onde a resistência alcançada correspondeu a 0,35 MPa, o aumento foi de 65,7%.

Apenas os blocos moldados com CP apresentaram potencialidade para atender às especificações da NBR 10834 (1994).

Os blocos de CP apresentaram resistência maior, sobretudo, em virtude do aumento da idade de cura, pois o aumento da resistência é proporcional a evolução da idade. Porém, observando-se o resultado obtido para o CSS, pode-se atribuir também o aumento da resistência ao fato dos blocos estarem secos, pois o solo argiloso quando seco torna-se muito resistente à compressão, por isso maiores resistências podem ser atribuídas a solos com maiores teores de argila (LIMA, 2006).

Após o ensaio de durabilidade, os blocos de cimento Portland foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Houve um aumento da resistência, devido ao processo de hidratação do cimento, que promove maior estabilização química com o aumento da idade.

A Tabela 23 apresenta os resultados de resistência a compressão para os blocos que foram usados no ensaio de durabilidade.

Tabela 23 - Resistência à compressão dos blocos utilizados no ensaio de durabilidade

Blocos do Ensaio de Durabilidade	
Resistência à compressão (MPa) - 42 dias	
Blocos	CP II - Z - 32
B1	2,28
B2	2,17
B3	2,65
Média	2,37

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Ainda, realizaram-se novos testes de resistência a compressão com o objetivo de verificar a influência do processo de cura, tipo de cimento, traço e teor de umidade.

A fim de examinar a interferência do processo de cura adotado optou-se por realizar nova moldagem de blocos e não aplicar o método de cura em saco plástico fechado, apenas deixá-los cobertos com plástico, em local com temperatura controlada, e protegidos de sol, chuva e vento, Figura 54.



Figura 54 – Blocos de solo-cimento submetidos a cura aberta

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Além de testar a influência do tipo de cura, também optou-se por utilizar outro tipo de cimento, no caso em estudo utilizou-se o CP-V-ARI com traço 1:10, diferente dos blocos confeccionados anteriormente que utilizaram proporção 1:6.

Também, com o intuito de analisar a influência do teor de umidade para os blocos de CSS, visando melhorar seu comportamento, aumentou-se a quantidade de água adicionada em 20%, mantendo-se o mesmo traço 1:6.

Porém, como não haveria tempo suficiente para analisar os resultados aos 28 dias em função do prazo de conclusão do trabalho, os blocos foram ensaiados aos 14 dias.

A Tabela 24 apresenta os resultados de resistência a compressão dos blocos que foram mantidos em cura aberta, isto é, sem permanecerem em saco plástico fechado.

Tabela 24 - Resistência à compressão para testes com cura aberta

Cura aberta	
Resistência à compressão - 14 dias	
Blocos	Resistência (MPa)
CP-V-ARI - 1:10	1,62
CP-II-Z - 1:6	1,43
CSS - 1:6 - adição de água	0,33

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Através dos resultados alcançados aos 14 dias, verifica-se que o tipo de cura adotado tem influência sob a resistência a compressão dos blocos. A cura aberta, aos 14 dias, propiciou valores de resistência próximos aos valores obtidos aos 28 dias com cura fechada. Logo, o processo inicial utilizado não se mostrou vantajoso, visto que não possibilitou a secagem do bloco, mantendo-o úmido por longo período. No entanto não é possível garantir que os blocos atendam a resistência mínima de norma, porque foram ensaiados aos 14 dias.

Esse aumento da resistência mecânica indica a formação de compostos cimentantes que melhoraram as propriedades mecânicas do material compactado.

Comparando-se os blocos, o efeito de estabilização do solo foi mais influenciado pelo processo de cura adotado e pelo tipo de cimento.

O procedimento adotado para manter o mesmo padrão de moldagem, isto é, colocar sempre a mesma quantidade de material a ser prensada, não possibilitou verificar a influência da energia de compactação, a verificação desse fator seria possível somente mediante variação dessa energia.

Porém, de forma geral, o fato dos blocos atingirem resistência baixa, em ambos os cimentos, pode sim estar relacionada a energia de compactação, por se tratar de prensa manual é difícil estimar e assegurar uma compressão eficiente, o que pode gerar compactação inferior a necessária.

A produção de blocos de solo-cimento com resultados adequados depende de uma compactação capaz de assegurar que o material atinja máxima massa específica, o que contribui para garantir resistência mecânica às suas aplicações (GRANDE, 2003). Para Silveira (1966) *apud* Siqueira *et al.* (2016) uma diminuição de 5% na massa de material compactado gera cerca de 15% de redução na resistência para uma mesma proporção de cimento. Quanto menos vazios no sistema solo-aglomerante, melhor será a interação e conseqüentemente maiores resistências serão alcançadas (MILANI, FREIRE; 2006). A compactação é responsável por promover a estabilização mecânica do bloco de solo-cimento, pois visa reduzir o volume de vazios, tornando-o mais estável e conseqüentemente mais resistente.

4.3 DURABILIDADE

Quanto aos blocos de solo-cimento a NBR 13554 (1996) trata apenas de ensaio de durabilidade por ciclos de molhagem e secagem. Essa norma descreve apenas a metodologia utilizada para analisar o comportamento quanto a perda de massa e variação de umidade e volume.

De acordo com a NBR 13553 (1996), após o término dos ciclos de molhagem e secagem, a variação de volume não deve ser superior a 1% e a perda de massa deve respeitar os seguintes limites:

- Solos A-1-b, A-2-4, A-2-5 14%
- Solos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5 10%
- Solos A-6, A-7 7%.

Na Figura 55 constam os resultados obtidos quanto a variação de volume para os blocos produzidos com CP-II-Z-32, em porcentagem, em cada ciclo de molhagem e secagem. O primeiro ciclo iniciou logo após a cura de 7 dias e os blocos se apresentavam com determinada umidade natural.

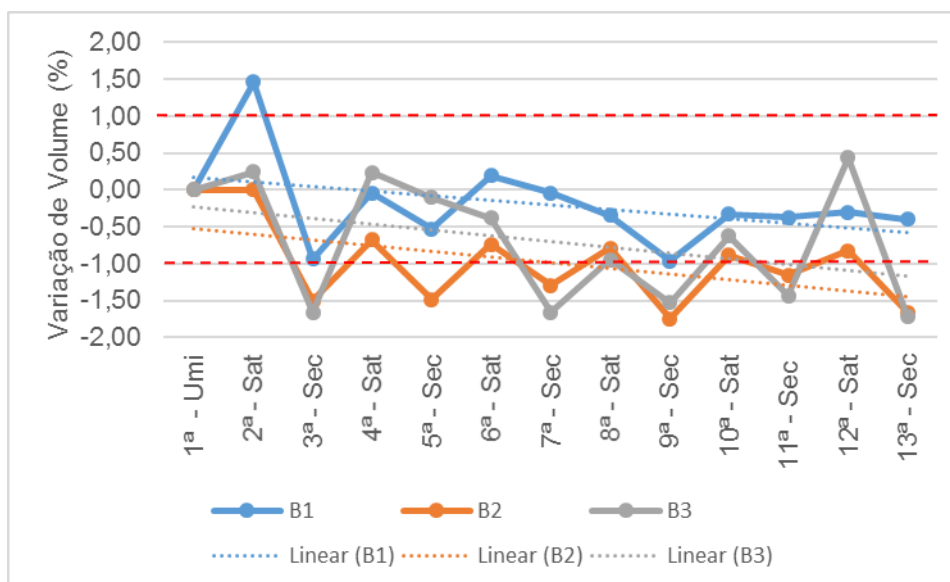


Figura 55 - Gráfico de variação de volume em cada etapa de molhagem e secagem para os blocos moldados com CP II Z-32

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

A Figura 56 apresenta as variações volumétricas dos blocos de solo-cimento a partir de CP-II-Z. Observou-se que no decorrer dos ciclos de molhagem e secagem, os resultados apresentaram variação de volume oscilante ao longo dos ciclos, ora reduzindo e ora aumentando. No entanto, analisando a Figura 55, as linhas de tendência inclinam-se a uma redução da variação de volume ao longo dos ciclos.

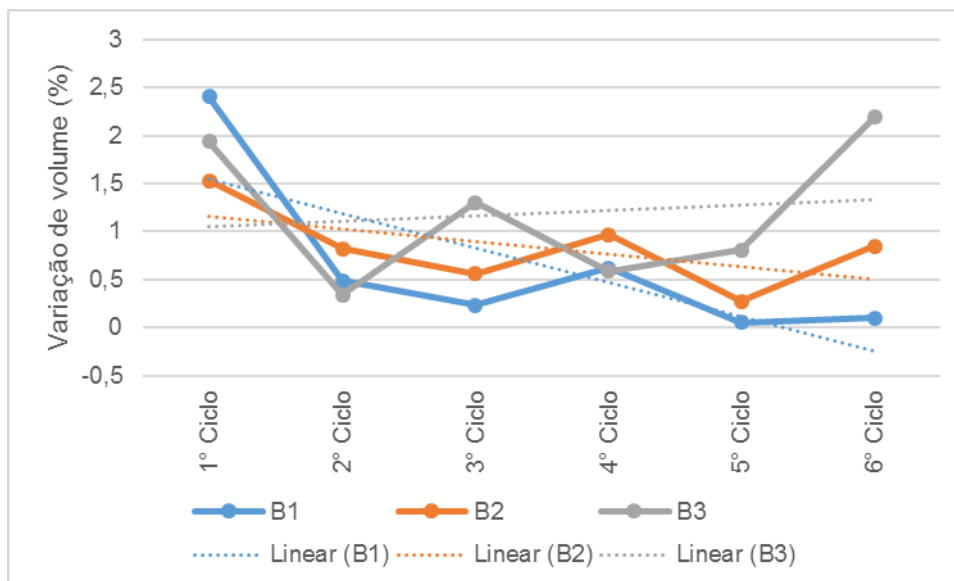


Figura 56 - Gráfico de variação de volume para cada ciclo

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

No estudo da durabilidade foi realizada adaptação a NBR 13553 (1996), pois os ensaios foram realizados com blocos e não com corpos de prova cilíndricos como prescreve a norma. O ensaio foi iniciado aos 7 dias de cura após a moldagem, conforme recomendação normativa e encerraram aos 40 dias.

Como a variação de volume não pode ser superior a 1%, os blocos apresentaram valores de variação de volume insatisfatórios, pois ultrapassaram 1%.

Quanto a perda de massa, os valores obtidos para os blocos 2 e 3, submetidos ao ensaio de durabilidade, são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultado do ensaio de perda de massa para blocos com CP-II-Z

Blocos	Perda de massa (%)
Bloco 2	0,85
Bloco 3	0,46
Média	0,66

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

O solo corrigido é classificado, de acordo com o manual do DNIT (BRASIL, 2006), como do tipo A-4. Por isso, segundo a ABCP (1986), no ensaio de durabilidade,

a perda de massa por ciclos de molhagem e secagem não deve ser superior a 10%. Constatou-se que as amostras de CP foram aprovadas em relação a esse limite, sendo que a média entre os blocos foi de 0,66%. Não foi possível fazer comparação com os blocos de CSS, pois estes não possuíam resistência suficiente no período de aplicação do ensaio, como mostrado na Figura 57, ao deixá-los submersos se desmanchavam na água.



Figura 57 - Bloco minutos depois da imersão em água para ensaio de durabilidade
Fonte: Acervo Pessoal (2017).

Os blocos submetidos ao ensaio de durabilidade apresentaram perda de massa ao longo da execução dos ciclos, provavelmente devido a escovação, responsável pelo desgaste dos blocos durante o processo de envelhecimento acelerado.

A resistência a compressão dos blocos submetidos aos ciclos de molhagem e secagem (aos 42 dias) é maior do que para os blocos do ensaio de compressão (28 dias). O mesmo aconteceu em estudo feito por Carneiro *et al.* (2001) *apud* Grande (2003), o autor presume que o processo de molhagem e secagem provoca modificações no processo de hidratação, melhorando a resistência mecânica dos blocos. Malhotra e Tehri (1995) em seu estudo utilizando solo arenoso e escória de alto forno, submeteram os tijolos a diferentes regimes de cura e concluíram que os ciclos de molhagem e secagem, mesmo em idades elevadas, são capazes de

propiciar a formação de hidróxido de cálcio e a presença de material pozolânico forma silicato de cálcio hidratado.

A partir da análise dos resultados obtidos para a durabilidade, os blocos de cimento Portland apresentaram variação de volume acima do valor permitido por norma. Entretanto, na durabilidade por perda de massa, os blocos de CP demonstraram reagir bem, visualmente, às variações de umidade e temperatura, inclusive ocorreu aumento de resistência nos blocos ensaiados.

De modo geral, os blocos se comportaram bem na simulação de variações bruscas de umidade e temperatura com choques térmicos, apresentando apenas pequenas fissuras, Figuras 58, 59 e 60, esse fato permite observar que os blocos podem atender a requisitos de projeto.



Figura 58 - Bloco B1 após ensaio de durabilidade

Fonte: Acervo Pessoal (2017).



Figura 59 - Bloco B2 após ensaio de durabilidade

Fonte: Acervo Pessoal (2017).



Figura 60 - Bloco B3 após ensaio de durabilidade

Fonte: Acervo Pessoal (2017).

O estudo da durabilidade é de fundamental importância na avaliação de novos materiais, e visa analisar as condições de utilização ao longo da vida útil e sua degradação. A forma mais eficaz de avaliar a durabilidade é o ensaio de durabilidade em situações reais de uso, entretanto requer um longo período de acompanhamento para obtenção dos resultados. Por isso, no caso em estudo, foi utilizado ensaio de degradação acelerada.

Os corpos de prova submetidos a escovação não sofreram perda de massa significativa. As condições de molhagem e secagem conferiram maior resistência ao envelhecimento para os blocos. A pesquisa evidencia a dificuldade em estudar os processos de durabilidade, o que constitui um desafio para o estudo de materiais.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de novas soluções baseadas na eficiência energética e na proteção do meio ambiente tem se tornado uma das condições primordiais. Nessa perspectiva, o estudo sobre a aplicação de resíduos resultantes dos mais variados processos industriais é essencial para um modelo produtivo capaz de consumir esse conjunto de matérias-primas.

Logo, o presente estudo objetivou contribuir no desenvolvimento de materiais capazes de absorver esses subprodutos industriais, a escória de alto-forno, o fosfogesso e a areia de fundição.

Os ensaios desenvolvidos fazem parte de um estudo inicial e em termos de utilização do cimento supersulfatado na produção de blocos de solo-cimento não foram alcançados resultados satisfatórios dentro das características de dosagem, teor de cimento, umidade ótima, correção do solo e energia de compactação utilizados. Os blocos elaborados com cimento Portland se mostraram superiores aos blocos que utilizaram CSS, em relação a resistência à compressão, absorção de água e durabilidade. Os blocos obtidos a partir de cimento supersulfatado obtiveram resistências muito baixas, não atendendo às normas de solo-cimento.

Há indicativos de melhora no material após correção do solo natural com 70% de areia de fundição, nas misturas estudadas, principalmente quando os blocos são submetidos a cura aberta (sob temperatura controlada e protegidos do sol, vento e chuva). O tipo de cura influenciou os resultados de resistência a compressão, uma vez que blocos curados com regime de cura aberto apresentaram valores de resistência superiores se comparados àqueles curados em sistema fechado.

A hipótese mais provável para o comportamento não esperado dos blocos de CSS é o baixo teor de umidade da mistura de solo-cimento, visto que, diferente do cimento Portland, o CSS necessita de maior quantidade de água para dissolver o ativador para que assim a solução alcalina dissolva a escória. A mistura de solo-cimento é mais seca que o concreto plástico e argamassas em geral, o que não propicia um bom desenvolvimento de resistência para blocos com cimento supersulfatado.

Outra hipótese corresponde ao pH da mistura de solo e areia de fundição, o potencial hidrogeniônico se mostrou levemente ácido, o que pode prejudicar a

hidratação do CSS, visto que este precisa de um pH alto. O meio alcalino favorece a solubilização da escória e propicia o ganho de resistência do CSS. No entanto seriam necessários mais ensaios para comprovar as hipóteses.

O processo de cura adotado propiciou a hidratação do cimento, mas não possibilitou a secagem da argila, pois o solo argiloso quando seco fornece maior resistência. Logo, é necessário um período inicial de cura para potencializar a hidratação do cimento e um período posterior para que ocorra a secagem da argila presente na mistura, e dessa forma promover a resistência mecânica.

Os resultados obtidos nesse trabalho evidenciaram o potencial de utilização da areia de fundição como material de correção do solo para aplicação em blocos de solo-cimento. Contribuem também para o desenvolvimento de informações quanto ao comportamento de cimentos supersulfatados em blocos de solo-cimento e demonstra a necessidade de mais estudos quanto aos parâmetros de resistência à compressão, absorção e durabilidade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar diferentes proporções de solo e areia de fundição e variando os teores de cimento, a fim de avaliar o efeito dessas variáveis no comportamento dos blocos de solo-cimento;
- Considerar outros materiais com granulometria maior para a correção do solo, como por exemplo, realizar uma combinação da areia de fundição e o solo com a areia de britagem, a fim de obter diferentes faixas granulométricas;
- Analisar a influência do teor umidade e viabilizar análises para estudo da interferência do equipamento na produção dos blocos, testando outros tipos de prensas com outros métodos de compactação, como por exemplo a vibro-compactação;
- Verificar as propriedades mecânicas em diferentes condições de cura e armazenamento.

REFERÊNCIAS

ANGST, M.; VENDRUSCOLO, M. A. **Aproveitamento da areia de fundição na produção de tijolos**. II Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS), 2008.

ARMANGE, L. C.; NEPPEL, L. F.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N. H. A. Utilização de areia de fundição residual para uso em Argamassa. **Revista Matéria**, v. 10, n. 1, p. 51-62, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais**. Boletim técnico 111 (BT-111), São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **O solo-cimento e suas aplicações rurais**. Boletim técnico 117 (BT-117), São Paulo, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Dosagem das misturas de solo-cimento: normas de dosagem e métodos de ensaio**. Estudo Técnico 35 (ET-35), São Paulo, SP.1986, 51p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Tijolo maciço de solo-cimento**: NBR 8491. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Tijolo maciço de solo-cimento – Determinação da resistência à compressão e da absorção d' água**: NBR 8492. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo-cimento – Ensaio de compactação**: NBR 12023. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos**: NBR 12024. Rio de Janeiro. 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual**: NBR 10832. Rio de Janeiro. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento:** NBR 10833. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural:** NBR 10834. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Forma e dimensões:** NBR 10835. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Determinação da resistência à compressão e da absorção de água:** NBR 10836. Rio de Janeiro. 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural:** NBR 13553. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem:** NBR 13554. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização:** NBR 6457. Rio de Janeiro. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica:** NBR 6508. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do Limite de Liquidez:** NBR 6459. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade:** NBR 7180. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Solo – Análise**

granulométrica: NBR 7181. Rio de Janeiro. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Resíduos sólidos - classificação:** NBR 10004. Rio de Janeiro. 2004.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** 5 ed. revisada, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de pavimentação.** 3 ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274p. (IPR. Publ., 719).

CAMPOS, I. M. **Solo-cimento, Solução para Economia e Sustentabilidade.** Fórum Mundial da construção. IBDA – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento de Arquitetura, 2008 - <http://www.forumdaconstrucao.com.br>.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações, fundamentos.** 6 ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1988.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO. **Manual de construção com solo-cimento.** São Paulo: CEPED, 1984.

DANTAS, V. B.; GOMES, U. U.; REIS, E. P.; VALCACER, S. M.; SILVA, A. S. **Desenvolvimento de blocos de solo-cimento com três intervenções: solo natural, solo corrigido com areia e solo mais materiais de mudança de fase (MMFs).** 21º CBECIMAT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, Mato Grosso, 2014.

EIJK, D. V. **Restauo de taipa de pilão – Aspectos de materiais, técnicas construtivas, patologias e restauração.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Niterói: Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal Fluminense, 2005.

EN 15743, **Supersulfated cement-composition, specification and conformity criteria,** European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010.

FAY, L.; COOPER, P.; MORAIS, H. F. Innovative interlocked soil–cement block for the construction of masonry to eliminate the settling mortar. **Construction and Building Materials,** Amsterdam, v. 52, p. 391-395, 2014.

FERNANDES, F. R. C.; BENVINDO DA LUZ, A.; CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil**. p. 380, 2010.

FERREIRA, R. C. **Desempenho físico-mecânico e propriedades termofísicas de tijolos e minipainéis de terra crua tratada com aditivos químicos**. 204 f. Tese (Doutorado em Construções Rurais) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

GRACIOLI, B. **Influência da temperatura de calcinação do fosfogesso no desempenho de cimentos supersulfatados**. 108 f. Dissertação – Programa de Pósgraduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

GRANDE, F. M. **Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

HOUBEN, H., BOUBEKEUR, S. **Compressed Earth Blocks: Standards**. CRATerreEAG – International Centre for Earth Construction - School of Architecture of Grenoble and CDI – Center for the Development of Industry, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO de SIDERURGIA – IBS. **Relatório de sustentabilidade 2014**. AÇO BRASIL, 2014.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1232–1243, 2011.

KOLLING, E. M.; TROGELLO, E.; MODOLO, A. J. Avaliação da resistência mecânica de diferentes traços de solo-cimento estabilizados com areia. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos (REMAP)**, v. 7.3 (2012) 185-191.

LIMA, R. C. O. **Estudo da durabilidade de paredes monolíticas e tijolos de solo-cimento incorporados com resíduo de granito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010. 107f.

LIMA, T. V. **Estudo da produção de blocos de solo-cimento com matérias-primas do núcleo urbano da cidade de Campos de Goytacazes-RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Campos dos Goytacazes, 2006. 107f.

MALHOTRA, S. K.; TEHRI, S. P. 1995. **Building materials from granulated blast furnace slag-some new prospects**, Indian J. Eng. Mater. Sci., 2, 80–82.

MILANI, A. P. S. **Avaliação Físico-Mecânica de Tijolos de Solo-Cimento e de Solo-Cal Adicionados de Casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MILANI, A. P. S.; FREIRE, W. J. Características físicas e mecânicas de misturas de solo, cimento e casca de arroz. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.1-10, jan./abr., 2006.

MOTTA, J. C. S. S.; MORAIS, P. W. P.; ROCHA, G. N.; TAVARES, J. C.; GONÇALVES, G. C.; CHAGAS, M. A.; MAGESTE, J. L.; LUCAS, T. P. B. Tijolo de solo-cimento: análise das características físicas e viabilidade econômica de técnicas construtivas sustentáveis. **E-xacta**, v. 7, n. 1, p. 13-26, 2014.

OLIVEIRA, L. C. D. **A estabilização de solos aplicada à habitação, um estudo de misturas de solo-cimento**. Dissertação (Mestrado). 236p. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

OLIVEIRA, C. R. **Avaliação de solo-cimento reforçado com fibras de coco de babaçu para produção de tijolo modular ecológico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Federal do Pará, Câmpus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2011.

OLIVEIRA, J. R.; AMARAL, A. G.; SCHNEIDER, R. M. Incorporação de resíduos sólidos de torneiras mecânicas na fabricação de tijolos solo-cimento. **Revista Nativa**, Sinop, v. 2, n. 1, p. 53-57, 2014.

O'ROURKE, B.; MCNALLY, C.; RICHARDSON, M. G. Development of calcium sulfate-ggbs-Portland cement binders. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p.

340–346, 2009.

OSSORIO, M.; VAN DRIESSE, A. E. S.; PÉREZ, P.; GARCÍA-RUIZ, J. M. **The gypsum - anhydrite paradox revisited. Chemical Geology**, v. 386, p. 16-21, 2014.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. Utilização de solos arenosos para obtenção de tijolos de solo-cimento. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 15, n. 5/6, p.30-36, dez. 2010.

Portland Cement Association - PCA. **Soil-cement construction handbook**. Illinois, 1969. 42p.

RUBERT, S. **Contribuição ao estudo de cimentos supersulfatados: formulação e mecanismos de hidratação**. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

SANTOS, M. P. **Fabricação de solo-cimento com adição de resíduos de madeira provenientes da construção civil**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 108f. 2009.

SANTOS, H. P.; ALVARENGA, R. C. S. S.; FASSONI, D. P.; MARQUES, E. A. G.; COUTO, L. G.; MOREIRA, M. S. S.; MAKKAI, J. E. C.; SILVA, R. L. Avaliação experimental de tijolos de solo-cimento. **IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**. p.552-562. 2007.

SCHAEFER, C. O. **Valorização de fonte alternativa de sulfato de cálcio para a produção de argamassas autonivelantes**. UFSC. Tese de Doutorado, p. 387, 2013.

SEGANTINI, A. A. S.; WADA, P. H. Estudo de dosagem de tijolos de solo-cimento com adição de resíduos de construção e demolição. **Acta Scientiarum - Technology**, v. 33, n. 2, p. 179–183, 2011.

SILVA, C. Z.; KOLLING, E. M.; SHIMOSAKA, T. J.; TABALIPA, N. L.; ANGULSKI DA LUZ, C. **Umidade ótima de compactação de solo-cimento para diferentes traços**. XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC, 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório: Números – Produção Regional 2015**. SNIC, 2015.

SIQUEIRA, E.; AMARAL, A. G.; SCHNEIDER, R. M.; ATOATTI, C. **Características mecânicas de tijolos ecológicos com incorporação de resíduo**. *Nativa - Pesquisas Agrárias e Ambientais*, v.4, n.3, p.170-174, mai./jun. 2016.

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 205–212, 2008.

SOUZA, F. A. **Estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com incorporação de casca de arroz**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. Paraíba, 2011.

WALKER, P. J. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks. **Cement & Concrete Composites**, [S.l.], v. 17, p. 301-310, 1995.

YANG, Y.; WANG, G.; XIE, S.; TU, X.; HUANG, X. Effect of mechanical property of cemented soil under the diferente pH value. **Applied Clay Science**. 19-24. 2013.

ZHANG, S.B., WANG, Q., CHEN, J.P., FAN, J.H., 2009. Tests for effect of soil humic acid components on strength of cemented soft soils. **Journal of Engineering Geology** 6, 842–846.