

**BLOCOS DE TERRA COMPACTADA DE SOLO-CIMENTO COM RESÍDUO DE ARGAMASSA DE
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO: CARACTERIZAÇÃO PARA USO EM EDIFICAÇÕES**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Programa de pesquisa e pós-graduação

Curso de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo

Área de concentração: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Paulo Castilho Lima



FABÍOLLA XAVIER ROCHA FERREIRA LIMA

**BLOCOS DE TERRA COMPACTADA DE SOLO-CIMENTO COM RESÍDUO DE ARGAMASSA DE
ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO: CARACTERIZAÇÃO PARA USO EM EDIFICAÇÕES**

Tese apresentada ao Programa de Pesquisa e Pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo

Linha de pesquisa: Técnicas e Processos de Produção do Ambiente Construído

Brasília, 18 de dezembro de 2013

FABIÓLLA XAVIER ROCHA FERREIRA LIMA

BLOCOS DE TERRA COMPACTADA DE SOLO-CIMENTO COM RESÍDUO DE ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO E REVESTIMENTO: CARACTERIZAÇÃO PARA USO EM EDIFICAÇÕES

Tese defendida junto ao Programa de Pesquisa e Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Arquitetura e Urbanismo, em 18 de dezembro de 2013, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof.^o Dr. Paulo Castilho Lima – FAU UnB
(Presidente)

Prof.^o Dr. João da Costa Pantoja – FAET UniCEUB
(Membro externo)

Prof.^o Dr. Paulo Cesar Marques da Silva – ENC UnB
(Membro externo)

Prof.^o Dr. Luiz Alberto de Campos Gouvêa – FAU UnB
(Membro interno)

Prof.^o Dr. Janes Cleiton Alves de Oliveira – FAU UnB
(Membro interno)

Prof.^a Dr.^a Rosa Maria Sposto – ENC UnB
(Suplente)

Dedico este trabalho aos meus queridos avôs, minhas fontes de inspiração,
Antônio Firmino de Lima e Manuel Ferreira Lima,
Meus mestres, meus poetas, andarilhos.

AGRADECIMENTOS

Mesmo que muitas vezes a realização de uma pesquisa signifique percorrer um caminho solitário, ao longo dessa estrada tive quem pudesse me acompanhar, mesmo que por breves momentos; pessoas que, direta ou indiretamente, com gestos ou palavras, contribuíram para que minha dedicação e força de vontade fossem renovados.

De forma muito especial agradeço ao meu orientador, Prof. Paulo Lima Castilho, pela oportunidade concedida, pela sua confiança em meu trabalho, pela orientação sempre paciente e compreensiva.

Aos professores que foram, extraordinariamente, meus coorientadores: Prof. Janes Cleiton Alves Oliveira da Universidade de Brasília, Prof. Daniel de Lima Araújo e Prof. Edgar Bacarji da Universidade Federal de Goiás.

À equipe do Laboratório de Materiais e Estruturas, Prof. Deusair e Agnaldo e do Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Goiás, Elias e Luciano, meus braços na realização dos ensaios.

À equipe do Projeto João de Barro, Gueferson Penha, e da Eco Faber – Tijolos Ecológicos, que com sua imprescindível ajuda e apoio técnico viabilizaram o início do processo experimental da pesquisa, com equipamentos e materiais.

Aos professores da Universidade de Brasília, Prof. Luiz Alberto Gouveia e Prof.^a Marta Adriana Bustos Romero, que no curso das disciplinas ampliaram meus conhecimentos e me prepararam para o que viria.

Às minhas colegas de trabalho na UFG e amigas, que me deram total apoio e cobertura desde o início, Heloína Terezinha Faleiro e Simone Gonçalves Sales Assunção, sem vocês eu não poderia ter me dedicado e chegado até aqui.

Aos meus queridos e maravilhosos amigos pelo que são hoje e sempre serão, Leônidas Albano, Danielly Amatte, Karla Gouveia, Leiliane Santana, Aline Valverde Arrotéia, Carlos Mariano Júnior, Yara Hasegawa, Cleiton Pessoa, Massilla Lopes e Ulisses Queiroz. Vocês foram compreensivos, me deram risos, incentivos e sempre muita força. Como eu conseguiria sem vocês?

Aos meus pais Robledo e Francisca, aos meus irmãos Bruno, Emanuella e André, que mais uma vez compreenderam meu desafio, perdoaram minhas limitações e estiveram sempre presentes. Devolvo a vocês meu crescimento profissional, social, familiar e espiritual. Devolhes minha vida.

E à Deus, meu grande pai, meu refúgio de todas as horas, toda a minha gratidão por ter-me feito entender, esperar o momento certo e “sobreviver” às horas duras em que fraquejei; e absolutamente, sinto-me abençoada por ter colocado todas estas maravilhosas pessoas em meu caminho.

"Dizem que uma vez Deus chamou os anjos e ofereceu-lhes a responsabilidade de tomar decisões; eles muito sabiamente recusaram, preferindo permanecer na sua imutável perfeição de harmonia com o universo. Deus então pediu às montanhas para aceitarem a responsabilidade, mas elas também se recusaram, contentando-se em ficar passivamente a mercê das forças da natureza. Mas quando Deus ofereceu ao homem a dádiva da responsabilidade, a ignorante criatura a aceitou porque não se deu conta do que ela acarretava. Então agora, goste ou não, o homem tem sobre si a responsabilidade que assustou tanto os anjos como as montanhas, e tem a oportunidade de se mostrar superior a ambos."

Hassan Fathy

RESUMO

A ideia para este trabalho surgiu da necessidade de um aprofundamento na pesquisa sobre blocos de solo-cimento como material alternativo de construção, com uma análise a partir da visão da arquitetura, observando o problema da moradia no Brasil e, além disso, em busca de soluções que contribuíssem com a preservação do meio ambiente. Uma vez que para a construção de novas moradias grande quantidade de recursos naturais são extraídos de forma indiscriminada e também causam significativa geração de resíduos, sugere-se a incorporação de resíduo de argamassa de cimento e areia, proveniente do assentamento e revestimento de paredes, na produção de blocos de solo-cimento, denominado BTC (bloco de terra compactada) de SCR (solo-cimento-resíduo), para uso em vedações verticais de moradias de interesse social, por meio de estudos, ensaios e análises de desempenho técnico. Atentando-se para a originalidade da pesquisa, foram estudados traços com 12,5% de cimento e 0%, 20%, 40% e 60% de resíduo em substituição à massa de solo. O procedimento experimental abrangeu a definição das dosagens dos traços, a preparação e caracterização das amostras de solo, cimento e resíduo e a caracterização físico-mecânica dos BTCs-SCR, por meio dos ensaios de absorção e durabilidade, ambos aos 7 dias, e resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias de idade. Os resultados mostram que todos os traços com resíduo são indicados para confecção de BTC, porém, o traço que obteve melhores resultados foi aquele com 20% de resíduo. Em termos gerais, considera-se a substituição do solo pelo resíduo mais uma alternativa econômica e sustentável para a produção de componentes construtivos que atendam aos critérios de coordenação modular, resistência mecânica, capacidade de absorção de água e durabilidade, necessários ao bom desempenho de edificações, especialmente moradias de baixo custo.

Palavras-chave: Blocos. Solo-cimento. Resíduo. Edificações.

ABSTRACT

The idea of this work came up because of necessity for further research about blocks of soil-cement as alternative building materials. It was analysed from the perspective of architecture and focused on the problem of houses in Brazil and also tried to look for solutions which could contribute to preserv the environment. In order to build new houses, large amount of natural resources are extracted indiscriminately and cause the generation of big amount of waste. It is suggested the incorporation of waste of cement mortar and sand from the settlement and wall cladding to produce blocks of soil-cement, called CEB (compressed earth blocks) of SCW (soil-cement-waste) in order to be used in vertical walls in houses of social interest through studies, experimental testing and analysis of technical performance. Paying attention to the originality of the research, admixtures composed by 12,5% of cement and 0%, 20%, 40% and 60% replacement of soil by waste were studied. The experimental procedure covered, for the samples of soil, cement and waste, the definition about dosage blends, preparation and characterization; for the CEBs-SCW, the physical-mechanic characterization through tests of water absorption and durability, both at 7 days, and simple compressive strength at 7 and 28 days of age. The results show that all the admixtures with waste are indicated for production of CEB; however, the mixture that had the best results was with 20% of waste. In general terms, the replacement of soil by waste is considered one more economic and sustainable alternative for production of buildings componentes which meets the criteria of modular coordination, strength, water absorption capacity and durability, required for the proper performance of buildings, especially of low-cost housing.

Key-words: Blocks. Soil-cement. Waste. Buildings.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Modelos de prensas.....	14
Fig. 2.2 - BTC de solo-cimento 12,5x25x7,5cm (esq.); Tijolo cerâmico 11,5x24x14cm (dir.) ..	18
Fig. 2.3 - Aplicação de argamassa com utilização de bisnaga (esq.); Detalhe filete de argamassa na superfície do bloco (dir.).....	20
Fig. 2.4 - Justaposição dos blocos (esq.); Detalhe da espessura das juntas (dir.)	20
Fig. 2.5 - Comparativo de custos dos serviços de estrutura, vedação e revestimentos	22
Fig. 2.6 - Comparativo de produtividade (horas gastas na execução do serviço)	23
Fig. 3.1 - Coleta do resíduo em obra	57
Fig. 3.2 - Resíduo	57
Fig. 3.3 - Cimento utilizado.....	58
Fig. 3.4 - Preparação do solo	59
Fig. 3.5 - Quarteamento do solo e determinação da umidade	60
Fig. 3.6 - Leituras da sedimentação (esq.); Determinação da umidade (dir.)	60
Fig. 3.7 - Resíduo de argamassa antes e depois da britagem	61
Fig. 3.8 - Preparação do resíduo	62
Fig. 3.9 - Cilindro moldado durante o ensaio de compactação.....	63
Fig. 3.10 - Prensa hidráulica Eco Premium 2600 CH/MA - Eco Máquinas para fabricação de blocos de terra compactada e tijolos de solo-cimento	64
Fig. 3.11 - Blocos moldados (esq.); Cura dos blocos (dir.)	66
Fig. 3.12 - Blocos a serem serrados ao meio (esq.); Primas após o capeamento (dir.)	68
Fig. 3.13 - Primas antes da ruptura (esq.); Primas depois do rompimento (dir.)	69
Fig. 3.14 - Blocos na estufa (esq.); Blocos em imersão (dir.)	70
Fig. 4.1 - Curvas granulométricas do solo, resíduo e solo com resíduo	74
Fig. 4.2 - Curvas de compactação dos traços SRC ₀ , SCR ₂₀ , SCR ₄₀ e SCR ₆₀	79
Fig. 4.3 - Evolução da capacidade de absorção dos traços SRC ₀ , SCR ₂₀ , SCR ₄₀ e SCR ₆₀	81
Fig. 4.4 - Resistência à compressão simples para 7 e 28 dias	84
Fig. 4.5 - Evolução da perda de massa dos traços SRC ₀ , SCR ₂₀ , SCR ₄₀ e SCR ₆₀	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Déficit Habitacional no Brasil em 2008.....	2
Tabela 2.1 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado.....	15
Tabela 2.2 - Comparativo entre BTC de solo-cimento x tijolo convencional.....	19
Tabela 2.3 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.....	25
Tabela 2.4 - Tipo e composição do cimento Portland.....	32
Tabela 2.5 - Produção nacional do cimento.....	32
Tabela 2.6 - Valores de resistência à compressão e de absorção de água.....	35
Tabela 2.7 - Características do solo.....	36
Tabela 2.8 - Composição média dos materiais que saem dos canteiros de obra.....	41
Tabela 2.9 - Variabilidade da composição dos resíduos.....	41
Tabela 2.10 - Composição do lixo de construção e demolição	42
Tabela 2.11 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de cinzas semibeneficiadas do bagaço de cana-de-açúcar.....	45
Tabela 2.12 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas do bagaço de cana-de-açúcar.....	46
Tabela 2.13 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar.....	48
Tabela 2.14 - Valores médios de resistência à compressão simples, absorção de água perda de massa dos tijolos de solo e entulho estabilizados com cimento.....	49
Tabela 2.15 - Porcentagens de entulho que atendem aos critérios de normas nos tijolos de solo e entulho estabilizados com cimento.....	49
Tabela 2.16 - Traços estudados por Silva (2007).....	53
Tabela 2.17 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento e resíduo de sementes do capim braquiária.....	54
Tabela 3.1 - Dosagens das misturas de solo, cimento e resíduo.....	59
Tabela 3.2 - Quantidade total de blocos moldados e ensaiados.....	66
Tabela 4.1 - Resumos das características físico-químicas do solo, resíduo e solo com resíduo.....	72
Tabela 4.2 - Análise química do solo.....	76
Tabela 4.3 - Análise química do resíduo.....	77
Tabela 4.4 - Análise física do cimento.....	77
Tabela 4.5 - Análise química do cimento.....	78
Tabela 4.6 - Valores médios do ensaio de compactação normal.....	79
Tabela 4.7 - Absorção de água dos blocos aos 7 dias.....	81
Tabela 4.8 - Resistência à compressão simples traço SCR ₀ para 7 e 28 dias.....	82

Tabela 4.9 - Resistência à compressão simples traço SCR ₂₀ para 7 e 28 dias.....	82
Tabela 4.10 - Resistência à compressão simples traço SCR ₄₀ para 7 e 28 dias.....	83
Tabela 4.11 - Resistência à compressão simples traço SCR ₆₀ para 7 e 28 dias.....	83
Tabela 4.12 - Durabilidade dos blocos aos 7 dias (média após 6 ciclos).....	85

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 APRESENTAÇÃO E COMPREENSÃO DO TRABALHO.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 HIPÓTESE	7
1.3 OBJETIVOS	8
1.4 METODOLOGIA	8
1.5 ESTRUTURA DA TESE	9
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 SOLO-CIMENTO E ARQUITETURA	11
2.1.1 Histórico do uso de solo-cimento como componente construtivo	12
2.1.2 Coordenação modular para edificações	15
2.1.3 Análise comparativa tijolos convencionais x blocos de BTC de SC	17
2.2 TECNOLOGIA DO SOLO-CIMENTO.....	23
2.2.1 Solos.....	23
2.2.1.1 Origem.....	23
2.2.1.2 Propriedades	24
2.2.2 Estabilização dos solos.....	28
2.2.2.1 Fundamentos de estabilização	29
2.2.2.2 Cimento Portland.....	30
2.2.2.3 Fatores que condicionam a qualidade do solo-cimento.....	32
2.2.2.4 Métodos de dosagem	34
2.2.3 Caracterização de resíduos	36
2.2.4 Avanços na tecnologia do solo-cimento.....	43
2.2.4.1 Tijolos de solo-cimento + cinzas de carvão mineral e casca de arroz	43
2.2.4.2 Tijolos de solo-cimento + cinzas e fibras de bagaço de cana-de-açúcar	44
2.2.4.3 Tijolos de solo-cimento + entulho de construção	48
2.2.4.4 Tijolos de solo-cimento + sílica ativa	49
2.2.4.5 Tijolos de solo-cimento + serragem de madeira	51
2.2.4.6 Tijolos de solo-cimento + resíduo de mármore e granito	52

2.2.4.7 Tijolos de solo-cimento + casca da semente do capim Braquiária	53
2.2.5 Resíduos de argamassa.....	54
CAPÍTULO 3 PRODUÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO	56
3.1 MATERIAIS	56
3.2 MÉTODOS	58
3.2.1 Definição das dosagens das misturas de solo-cimento-resíduo.....	58
3.2.2 Procedimentos aplicados ao solo.....	59
3.2.3 Procedimentos aplicados ao resíduo	61
3.2.4 Procedimentos aplicados aos traços definidos.....	62
3.2.5 Produção e caracterização físico-mecânica dos BTCs-SCR.....	63
3.2.5.1 Ensaio de absorção	66
3.2.5.2 Ensaio de resistência à compressão simples.....	67
3.2.5.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.....	69
CAPÍTULO 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	72
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS COMPONENTES	72
4.1.1 Análise granulométrica e classificação	73
4.1.2 Índices físicos.....	74
4.1.2.1 Massa específica	74
4.1.2.2 Limites de consistência	75
4.1.2.3 Composição química do solo.....	75
4.1.2.4 Composição química do resíduo	76
4.1.2.5 Composições física e química do cimento	77
4.1.3 Ensaio de compactação	78
4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA DOS BLOCOS	80
4.2.1 Ensaio de absorção	80
4.2.2 Ensaio de resistência à compressão simples	81
4.2.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem	85
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	87
5.1 CONSIDERAÇÕES PRINCIPAIS.....	87

5.1.1 Caracterização físico-química dos componentes.....	88
5.1.2 Caracterização físico-mecânica dos blocos.....	88
5.1.3 Conclusões finais	89
5.2 ALGUMAS PROPOSTAS E RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXOS	99

CAPÍTULO 1

APRESENTAÇÃO E COMPREENSÃO DO TRABALHO

1.1 Introdução

Este trabalho dá continuidade à pesquisa sobre tijolos de solo-cimento iniciada no curso de mestrado em Engenharia do Meio Ambiente nos anos de 2005 a 2007, sob orientação dos professores Edgar Bacarji e Regis de Castro Ferreira, da Universidade Federal de Goiás, e que teve como produto a dissertação intitulada *Influência da Adição de Resíduos de Argamassa em Tijolos de Solo-Cimento: Propriedades Térmicas e Mecânicas*. Prosseguindo nesta linha de trabalho, surgiu o desejo de aprofundar-se na questão dos tijolos de solo-cimento como material alternativo de construção, porém partindo da análise sob o ponto de vista da arquitetura, em busca de soluções que atingissem os problemas de habitação e moradia. Assim, dentro da área de concentração do programa de pesquisa e pós-graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília: Tecnologia, Ambiente e Sustentabilidade, e linha de pesquisa: Técnicas e Processos de Produção do Ambiente Construído, dois importantes assuntos poderiam ser desenvolvidos: o déficit de moradias e a preservação do meio ambiente.

O problema – o déficit habitacional de moradias – é decorrente do processo de urbanização do país, entre outros. Ocorrido após a revolução industrial, o número de pessoas nas cidades aumentou muito e, com isso, o déficit habitacional. Paralelamente, o número de favelas, as ocupações de terras e loteamentos irregulares se acentuaram a partir dos anos 1900 em consequência, dentre outros fatores, da contradição entre o poder aquisitivo da maioria da população e o alto preço das edificações. Surgiram moradias localizadas longe dos centros urbanos, próximas a mananciais e nas encostas de morros que, construídas pelos próprios moradores e em condições precárias de saneamento e estrutura, degradam o meio ambiente e o próprio morador. Conforme divulgação feita pelo CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção (Tabela 1.1), o déficit habitacional em 2008 caiu em torno de 7% em relação ao ano anterior, porém a carência ainda era de 5.546 milhões no número de moradias.

Assim, nos cenários da arquitetura, do urbanismo e da construção civil, no que diz respeito à tecnologia da habitação e moradias, a pesquisa justifica-se pelo déficit habitacional que caracteriza o Brasil.

Tabela 1.1 - Déficit habitacional no Brasil em 2008

LOCALIDADE	ANO		LOCALIDADE	ANO	
	2007	2008		2007	2008
Região Norte	610.354	555.130	Região Sudeste	2.226.561	2.046.312
Rondônia	45.669	31.229	Minas Gerais	510.492	474.427
Acre	20.904	19.584	RM Belo Horizonte	130.740	115.689
Amazonas	141.294	132.224	Espírito Santo	93.253	84.868
Roraima	14.679	13.969	Rio de Janeiro	454.530	426.518
Pará	297.924	284.166	RM Rio de Janeiro	353.962	320.091
RM Belém	87.744	83.909	São Paulo	1.168.286	1.060.499
Amapá	28.419	14.277	RM São Paulo	607.374	510.326
Tocantins	61.465	59.681	Região Nordeste	2.095.891	1.946.735
Região Sul	656.796	580.893	Maranhão	458.108	434.750
Paraná	249.414	213.157	Piauí	139.372	124.047
RM Curitiba	83.959	64.635	Ceará	309.058	276.915
Santa Catarina	139.889	140.770	RM Fortaleza	120.685	103.979
Rio Grande do Sul	267.493	226.966	Rio Grande do Norte	115.466	104.190
RM Porto Alegre	127.961	97.133	Paraíba	122.788	104.699
Região Centro-Oeste	399.462	417.240	Pernambuco	274.229	263.958
Mato Grosso do Sul	72.847	77.206	RM Recife	129.349	125.254
Mato Grosso	71.434	73.376	Alagoas	113.430	85.780
Goiás	150.989	162.762	Sergipe	68.728	66.492
Distrito Federal	104.192	103.896	Bahia	494.712	485.904
			RM Salvador	143.678	116.014
Total				2007	2008
BRASIL				5.989.064	5.546.310
Total das RMs				1.785.452	1.537.030
Demais áreas				4.203.612	4.009.280

Fonte: Adaptado de Banco de dados CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção, a partir de Ministério das Cidades/FJP - Fundação João Pinheiro.

Estimativas produzidas pela Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea indicam que o déficit habitacional brasileiro teve queda de 12% em cinco anos. Este déficit, que representava 10% do total de habitações do país no início da série, em 2007, passou para 8,8% em 2011, segundo dados consolidados a partir da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD/IBGE, 2012). Em números absolutos, o índice reduziu de 5,6 milhões de residências para 5,4 milhões. Esta

carência de moradias, e principalmente moradias de qualidade, no Brasil requer a busca constante de métodos alternativos de construção, o que gera o desenvolvimento de novas concepções e de processos construtivos inovadores. E, além de sua busca, sua consolidação. Sendo assim, a construção de moradias para a população de baixa renda pode aliar processos construtivos adequados, bons materiais, baixo custo. Habitações que tenham condições mínimas de conforto e segurança e que também estejam inseridas nos ideais da preservação ambiental, traduzidas em edificações sustentáveis.

As origens do movimento das edificações sustentáveis não advém de um único evento, mas se devem a efeitos cumulativos e convergentes, surgidos desde os primórdios da humanidade. Nossos ancestrais eram muito apegados ao meio ambiente, já que sua sobrevivência dependia dele, então, utilizavam os recursos disponíveis para criar abrigos, caçar e, posteriormente, cultivar a terra e viajar. Ainda que os meios fossem grosseiros e o dia a dia fosse simples, os recursos naturais eram abundantes em relação ao tamanho e densidade da população. Pode-se simplificar e “romantizar” esse período, pressupondo-se um equilíbrio confortável entre os primeiros humanos e o planeta, mas a destruição do meio ambiente, assim como a tradição de habitar uma área reduzida, também faz parte dos primórdios da sustentabilidade.

Apreendeu-se, desde o início, a exaurir os recursos naturais abundantes. Diamond (2005) cita um caminho que resultou na desintegração de determinadas sociedades, sendo que uma de suas facetas é a degradação do meio ambiente. O esgotamento dos recursos naturais, segundo o autor, está entre os fatores que levaram ao colapso de diversas sociedades primitivas, advindas de causas inter-relacionadas: danos ambientais, mudanças climáticas, vizinhos hostis, parceiros comerciais amigáveis e as respostas humanas a tais eventos.

Este e outros estudiosos acreditam que, ao longo da história, desastres naturais e outros tipos de destruição ambiental em diferentes escalas, junto com eventos climáticos extremos e suas consequências, têm dado forma às sociedades e ao meio ambiente. Assim, acredita-se, que a destruição ao meio ambiente continua sendo uma ameaça para a vida contemporânea e é aqui que, reafirma-se, deve ser retomada a busca, dentro dos conceitos ambientalistas, pela sustentabilidade.

Segundo Keeler e Burke (2010), o conceito de edificação sustentável advém da história fértil do ambientalismo:

Durante as décadas de 1960 e 1970, nos Estados Unidos, palavras como geoarquitetura, autossuficiência e ecologia eram associadas às edificações sustentáveis. Hoje em dia, porém, palavras como integrada, eficiente, de alto desempenho, elegante e resiliente são aplicadas a elas com frequência.

A abordagem da edificação integrada, que considera o ciclo de vida em todos os níveis, é essencial para a definição contemporânea de edificação ou construção sustentável (p.49).

Os autores afirmam que, atualmente, existem muitas definições formais para o termo “edificação sustentável”, mas todas têm em comum pelo menos um dentre vários componentes essenciais; além disso, grande parte dos arquitetos concorda que, para ser sustentável, uma edificação precisa solucionar mais do que um problema ambiental, como por exemplo, o esgotamento dos recursos naturais, a lotação dos depósitos de lixo, as emissões de carbono, etc.). Ainda que não possa solucionar todos estes problemas, a edificação sustentável deve:

- Tratar das questões de demolição no terreno e de resíduos da construção, bem como dos resíduos gerados pelos seus usuários;
- Buscar a eficiência na utilização de recursos;
- Minimizar o impacto da mineração e do extrativismo na produção de materiais e contribuir para a recuperação dos recursos naturais;
- Reduzir o consumo de solo, água e energia durante a manufatura dos materiais, a construção da edificação e a utilização por seus usuários;
- Planejar uma baixa energia incorporada durante o transporte dos materiais ao terreno; (...) (p. 49)

Uma vez que as edificações têm grande impacto sobre o meio ambiente por usarem 40% das matérias-primas de todo o mundo (KEELER e BURKE, 2010), aliado ao constante desenvolvimento da tecnologia e industrialização; ao crescimento das cidades e à extração indiscriminada de recursos naturais para construção de moradias (sejam casas isoladas ou edifícios de apartamentos); tem-se como resultado a geração de grande quantidade de resíduos não aproveitados pelo homem. Estes provocam poluição permanente, como por exemplo, enchentes ocasionadas pelo assoreamento dos rios e córregos, prejuízos à paisagem, obstrução dos logradouros públicos (acarretando alagamentos) e proliferação de doenças, além da apresentação de custo significativo para o recolhimento dos resíduos dispostos ilegalmente.

Essa problemática pressupõe muito mais que a adoção de técnicas avançadas de tratamento. Uma concepção moderna e sustentável de gestão de resíduos implica na formação de uma nova cultura e no estabelecimento de uma relação do poder público com a comunidade que promova a participação efetiva da sociedade civil, organizada na constituição de parcerias e/ou processos de educação e mobilização social.

Uma das alternativas seria a absorção dos resíduos na mesma área em que foram gerados, na construção de novas moradias, uma vez que a legislação própria relacionada aos resíduos gerados pelas construções estabelece a responsabilidade pela geração ao que antes era conhecido apenas por entulho ou “bota-fora” de obra. Sendo assim, percebe-se atualmente uma consciência da necessidade de desenvolvimento de materiais e processos construtivos que não causem mais danos ao homem e ao meio ambiente.

O desenvolvimento de materiais, componentes e elementos destinados às edificações envolve aspectos diretamente relacionados com as suas propriedades e o uso a que se destinam, e a outros aspectos, mais genéricos, tais como: a qualidade do processo de produção e do produto, a utilização dos insumos e o comportamento do produto no contexto ambiental (NEVES, 2003).

Nos entulhos de construção são encontrados normalmente restos de argamassa e concreto, materiais cerâmicos, materiais metálicos, madeiras, vidros e materiais plásticos. Os restos de argamassa, concretos e materiais cerâmicos, encontrados em maior volume, que segundo Oliveira (2002) são da ordem de 64%, podem ser adicionados à matrizes de concreto ou solo-cimento e a grande maioria dos outros resíduos pode ser reciclada.

A importância do aproveitamento de resíduos para a produção de moradias, sejam estas de interesse social ou não, deve-se basicamente à possibilidade de desenvolvimento de materiais de boa qualidade e baixo custo, a partir de subprodutos industriais, disponíveis localmente, através da investigação de suas potencialidades (BUSON, 2009).

No que se refere ao processo de construção, diferentes tecnologias e técnicas de projeto têm sido empregadas para amenizar o sobrecarregamento na utilização de recursos naturais, por

meio do uso isolado ou combinado de materiais e técnicas construtivas, convencionais ou não, tais como: terra crua, solo-cimento, argamassa armada, paredes monolíticas, elementos pré-fabricados, bambu, compósitos de biomassa vegetal adicionadas ao cimento etc. Técnicas que visam à racionalização de recursos disponíveis e à diminuição dos custos dos processos construtivos; basicamente o oposto da alta tecnologia, mas que são relevantes para as edificações sustentáveis, quer sejam elas urbanas ou rurais, e para o meio ambiente.

De acordo com Adam e Jones (1995) intensivas pesquisas foram desenvolvidas buscando a melhoria de materiais de construção baseados em terra. Estes trabalhos, em sua grande maioria, tiveram como objetivo principal, o incremento da massa específica aparente seca do solo com vistas ao aumento de sua estabilidade, resistência, durabilidade e melhoria de seu comportamento sob a ação da água.

A construção de edificações para moradia de solo-cimento na forma de tijolos ou blocos tem sido empregada em vários países em desenvolvimento, mas no Brasil, apesar de bastante utilizada na década de 1980, não houve um adequado desenvolvimento da tecnologia, o que pode ser atribuído principalmente a processos inadequados de seleção de jazidas e a falta de controle rigoroso na fabricação de unidades (GUTIERREZ et al, 1994). Atualmente, tem-se conhecimento de pesquisas mais recentes em tijolos e blocos com solo-cimento adicionado a cinzas de carvão mineral, a cinzas de casca de arroz, a cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, a fibras de bagaço de cana-de-açúcar, a sílica ativa, ao bambu, a resíduos de pó de mármore e granito, a serragem de madeira, a fibras de papel *kraft*, e muitas outras.

Dentre as vantagens apresentadas por esta tecnologia está o baixo consumo de energia na produção dos blocos de solo-cimento, no transporte e manutenção e a utilização de mão de obra intensiva, sem exigência de alta qualificação. Por outro lado, a durabilidade é fator de grande importância neste tipo de construção e cuidados especiais devem ser tomados. Sob o aspecto econômico permite, em geral, redução no custo final das edificações em torno de 40% (CORDEIRO et al, 2006).

Ângulo et al (2001b) advertem sobre o processo de reciclagem no que diz respeito à quantidade de materiais e energia necessários, uma vez que a produção de blocos de solo-

cimento que faz uso do aproveitamento de resíduos gerados em obras de construção, assim como qualquer outra atividade que envolva reciclagem, também gera resíduos. Segundo o autor,

A quantidade de materiais e energia necessários ao processo de reciclagem pode representar um grande impacto para o meio ambiente. Todo processo de reciclagem necessita de energia para transformar o produto ou tratá-lo de forma a torná-lo apropriado a ingressar novamente na cadeia produtiva. Tal energia dependerá da utilização proposta para o resíduo, e estará diretamente relacionada aos processos de transformações utilizados. Além disso, muitas vezes, apenas a energia não é suficiente para a transformação do resíduo. São necessárias também matérias-primas para modificá-lo física e/ou quimicamente (p.03).

No caso do tratamento dado à argamassa de cimento e areia recolhida em obra para uso em blocos de solo-cimento, consome-se pouca energia. A argamassa deve ser triturada e peneirada, quando os torrões e grãos recolhidos forem de diâmetro superior a 4,8mm, com uso de peneira simples, a fim de atingirem a granulometria adequada para a composição da massa a ser compactada em forma de tijolos. Em processos manuais de transformação, por exemplo, não há consumo de energia elétrica, porém, torna-se mais demorado.

Neste contexto, este trabalho propõe a incorporação de resíduo de argamassa de cimento e areia proveniente do assentamento e revestimento de paredes na produção de um novo componente de solo com cimento. Apresenta-se o estudo, desenvolvimento e análise de desempenho técnico de um novo material, chamado de BTC (bloco de terra compactada) de SCR (solo-cimento-resíduo), para uso em vedações verticais de edificações em geral e, em particular, de habitações de interesse social.

1.2 Hipótese

A hipótese deste trabalho é que o bloco prensado de solo-cimento adicionado de resíduo de argamassa de cimento e areia é uma alternativa viável, em termos de adequado desenvolvimento e conveniente regularidade na conformidade com as exigências técnicas, para construção de moradias de baixo custo.

Supõe-se que o resíduo de argamassa de cimento e areia, ao substituir a areia e parte do solo, em sua confecção, melhore o componente para construção em termos de propriedades físicas

e mecânicas; seja acessível economicamente, se comparado aos tijolos convencionais (cerâmicos e de concreto) quanto ao seu custo x benefício; e ainda, seja exemplo de destinação correta de resíduo, que anteriormente seria despejado em locais inadequados, o que é contrário à ideia da preservação ambiental. Assim, a hipótese se mostra adequada à área de concentração do programa de pesquisa, inserida nos ramos de tecnologia, ambiente e sustentabilidade.

1.3 Objetivos

O objeto do estudo se concentra no uso de argamassa de cimento e areia, resíduo proveniente das fases de assentamento e revestimento das obras de construção civil, na confecção de novo componente, chamado de BTC (bloco de terra compactada) de SCR (solo-cimento-resíduo).

O objetivo principal da pesquisa foi desenvolver, experimentar e avaliar o seu uso em vedações verticais de edificações em geral e, em particular, de habitações de interesse social.

Os objetivos secundários envolvem a análise e as etapas do processo experimental proposto, como a determinação das propriedades físicas dos materiais isoladamente; determinação da porcentagem entre os materiais que formam o componente, para definição do melhor traço; determinação das propriedades mecânicas e comparação com os blocos existentes no mercado, a fim de:

- Averiguar se o resíduo escolhido se constitui em alternativa para melhorar as propriedades de determinados tipos de solo para a confecção de BTCs;
- Contribuir com os estudos acerca da disposição final dos resíduos gerados pelas obras de construção civil, para colaborar na preservação do meio-ambiente.

1.4 Metodologia

Para comprovação da hipótese e para que os objetivos fossem atingidos, optou-se por realizar grande parte do trabalho em ambiente experimental, com procedimentos realizados em laboratório para que se pudesse avaliar diferentes composições de solo-cimento-resíduo na confecção de BTCs no formato de blocos, com dois furos. Foram realizados ensaios, estudos e

análises para a caracterização do novo componente, bem como para verificação do seu desempenho físico-mecânico.

As variáveis das misturas foram as porcentagens dos materiais para a produção dos BTCs de SCR, ou seja: o solo (matéria-prima), o cimento (estabilizante), a argamassa de cimento e areia (resíduo usado para correção do solo, em substituição à areia) e a água.

Os estudos abrangeram a definição das misturas entre os materiais componentes do BTC-SCR; o processo de preparação e mistura destes materiais; a realização dos ensaios de caracterização física dos materiais isoladamente e das misturas; o processo de confecção dos BTCs com utilização de prensa hidráulica; e o processo de cura e preparação dos mesmos para os ensaios de caracterização mecânica.

Os ensaios de determinação das propriedades físicas dos materiais, e das misturas, foram feitas no Laboratório de Mecânica dos Solos; os ensaios de determinação das propriedades mecânicas dos BTC-SCR, no Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas, ambos da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. Os componentes foram confeccionados na Empresa Eco Faber – Tijolos Ecológicos, localizada em Goiânia - GO.

1.5 Estrutura da tese

Em sua estrutura, a tese divide-se em cinco capítulos.

No capítulo 1 encontram-se os elementos de apresentação e compreensão do trabalho, que consistem na introdução – abordagem sobre o uso de alternativas que amenizem a carência habitacional atual, as vertentes do uso de resíduos neste contexto, a hipótese, objetivo principal e secundários, e estrutura da tese.

O capítulo 2 é subdividido em duas partes, onde é feita uma revisão bibliográfica e embasamento teórico sobre: (2.1) o solo-cimento na arquitetura – seu histórico como componente construtivo, seu uso na construção de moradias, a inserção do componente na norma de coordenação modular para edificações (a NBR 15873), uma análise comparativa

entre tijolos convencionais e o BTC-SCR; e (2.2) uma revisão histórico conceitual da tecnologia do solo-cimento, com a descrição das propriedades físicas dos materiais utilizados na composição do BTC-SCR: o solo, o cimento e o resíduo de argamassa de cimento e areia, e ainda, a descrição de pesquisas que envolvem a incorporação de resíduos no desenvolvimento da tecnologia de componentes feitos de solo com cimento.

No capítulo 3 apresenta-se a metodologia empregada na parte experimental de produção do componente construtivo, onde são descritos os materiais utilizados e, em seguida, os procedimentos, subdivididos em etapas: definição das dosagens das misturas; preparação e caracterização das amostras de solo, cimento e resíduo e a caracterização físico-mecânica dos BTCs-SCR, com a descrição dos ensaios.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios de absorção, resistência à compressão simples e durabilidade, para os materiais e para o componente BTC-SCR.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões, baseadas na revisão bibliográfica e nas análises do capítulo 4, as considerações finais e também algumas recomendações para futuras pesquisas.

Em seguida, tem-se a lista de referências bibliográficas e os anexos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita a revisão bibliográfica e embasamento teórico. Investiga-se o solo-cimento dentro do contexto da arquitetura: seu histórico como componente construtivo, seu uso na construção de moradias, a inserção do componente na norma de coordenação modular para edificações e, também, é feita uma análise comparativa entre tijolos convencionais e o BTC-SC quanto aos custos e a produtividade.

A revisão continua com o histórico conceitual da tecnologia do solo-cimento, onde é feita a descrição das propriedades físicas dos materiais utilizados na composição do BTC-SCR: o solo, o cimento e o resíduo de argamassa de cimento e areia; são descritas pesquisas que envolvem os avanços no desenvolvimento da tecnologia do solo-cimento com a incorporação de resíduos diversos. E, por último, são apresentadas características dos resíduos de argamassa.

2.1 Solo-Cimento e Arquitetura

O solo-cimento é, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (1986), o produto endurecido resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas por meio de dosagem racional, executada de acordo com as normas aplicáveis ao solo em estudo.

Este conceito também consta na NBR 10833 (ABNT, 2012) e o produto resultante deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade. Porém, vários fatores podem influenciar nas características do solo-cimento, os quais podem ser citados: a dosagem do cimento, a natureza do solo, o teor de umidade e o grau de compactação.

2.1.1 Histórico do uso de solo-cimento como componente construtivo

O solo-cimento foi empregado pela primeira vez em 1915 nos EUA, segundo ABIKO (1983), pelo engenheiro Bert Reno, que pavimentou uma rua com uma mistura de conchas marinhas, areia de praia e cimento Portland. Porém, só em 1935 a *Portland Cement Association* (PCA) iniciou pesquisas e estudos sobre essa tecnologia. A *American Society for Testing Materials* (ASTM) e *American Association of State Highway Officials* (AASHO) começaram as normalizações de ensaios com o solo-cimento a partir de 1944 (SEGANTINI e ALCÂNTARA, 2007).

O interesse pelo uso do solo-cimento no Brasil se deu a partir de 1936, quando a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) pesquisou e regulamentou sua aplicação (FERRAZ e SEGANTINI, 2003). A partir daí, seu uso foi consideravelmente ampliado, devido às vantagens técnicas e econômicas que o material oferece, tendo sido empregado principalmente na pavimentação. No entanto, Rocha (1996) relata que são conhecidas utilizações em camadas de fundações e base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos, valetas de drenagem, revestimentos de canais, diques, reservatórios e barragens de terra, estabilização e proteção superficial de taludes, fundações de edifícios, muros de arrimo e, finalmente, em alvenarias de tijolos e blocos prensados ou painéis de paredes monolíticas para construção de moradias.

Em edificações, o solo-cimento pode ser utilizado segundo dois processos construtivos: o de paredes monolíticas e o da produção de tijolos ou blocos prensados. A escolha da técnica a ser utilizada depende das características de cada obra em particular. A sua principal aplicação é na construção de paredes, mas pode ainda ser utilizado na construção de fundações, passeios e contrapisos.

Segundo o Programa de Tecnologia de Habitação – HABITARE (2013), o emprego de solo-cimento na construção de moradias no Brasil teve início em 1948, com a construção de casas do Vale Florido, na Fazenda Inglesa, em Petrópolis - RJ. Porém, só foi amplamente aplicado em moradias por volta de 1978, quando o extinto Banco Nacional da Habitação (BNH), amparado por estudos feitos pelo Instituto de Pesquisas Técnicas (IPT), e pelo Centro de

Pesquisas e Desenvolvimento (CEPED), comprovando o bom desempenho do material e a possibilidade de redução de custos, aprovou a técnica para a construção de habitações populares (FERRAZ, SEGANTINI, 2003). Naquela época, predominavam as construções com paredes monolíticas (FIGUEROLA, 2004).

No Brasil, os tijolos e blocos de solo-cimento compactados (BTCs) foram pesquisados principalmente pelo IPT (GRANDE, 2003) a partir de 1977. Desde então, vários fabricantes desenvolveram prensas manuais e hidráulicas para a fabricação de diversos tipos de tijolos e blocos de solo-cimento compactado (Fig. 2.1).

Segundo Faria (1990), o equipamento utilizado para a moldagem do bloco desempenha papel fundamental, uma vez que condiciona a taxa de compactação do material e suas características, assim, a qualidade do tijolo ou bloco de solo-cimento prensado é função do empacotamento dos grãos do solo depois de compactado. Seu aprimoramento tem contribuído para a racionalização das técnicas de construção, o que possibilita a elaboração de projetos de maior qualidade, tanto em resistência mecânica quanto em estética, e o uso do material em obras de baixo e médio padrão.

A mistura fresca de solo-cimento é colocada dentro da forma da prensa e compactada. Depois de retirado da prensa, o bloco é estocado em local coberto para ser curado. As molhagens são sucessivas durante o período de 7 dias. Este processo de cura influencia diretamente no resultado final do tijolo tanto quanto às suas características de resistência mecânica e estéticas.

Ferraz Junior (1995) comparou as características de diversas prensas existentes no mercado. A Tabela 2.1 apresenta um resumo desse estudo.

Segundo Carneiro et al (2001) as paredes construídas com tijolos de solo-cimento prensados têm comportamento térmico e durabilidade equivalentes às construídas com tijolos ou blocos cerâmicos. Além disso, os blocos de solo-cimento podem ser considerados nos critérios de projeto, que devem ser os mesmos aplicados aos materiais de alvenaria convencional, bem como devem seguir as indicações de cuidados e manutenção do material.



- Produzida para a construção de residências populares pelo MNLM (Movimento Nacional de Luta pela Moradia), essa prensa hidráulica tem capacidade de compactação de até 24t por prensagem e pode produzir 3500 tijolos/dia (dois por operação).
- As prensas manuais da Sahara produzem tijolos maciços para assentamento com argamassa e blocos modulares e vazados de encaixe de solo-cimento, nas dimensões 10x10x12,5cm e 25x15x30cm. Conforme o equipamento, a produção varia de 100 a 300 peças/h (três por operação).
- O modelo MTS-010 pode produzir até 2 mil tijolos ou blocos por dia, 2 peças por ciclo, tanto maciços quanto modulares.
- Criado pelo eng. João de Assis, professor da PUC-MG, e desenvolvido pelo eng. Francisco Chagas, o Tijolito é o principal componente desse sistema. Por meio de prensa hidráulica, a peça é encaixável e tem dimensões de 11x10x22cm.
- Com funcionamento mecânico e alimentação automática de formas, a prensa P6, da Man, produz de 800 a 1200 peças/h, com precisão de 0,3mm. Funciona sozinha e produz tijolos de dimensões variadas.
- A Gutward produz prensas manuais e hidráulicas para tijolos de solo-cimento, com silo alimentador e carrinho espalhador. Também produz peneira vibratória e destorroadores elétricos para preparação da terra.

Fig. 2.1 - Modelos de prensas
Fonte: FIGUEROLA (2004)

Tabela 2.1 - Produtividade das prensas para componentes de solo estabilizado

Tipo de prensa		Energia de compactação (MPa)	Taxa de compactação do solo ¹	Produção (tijolos/dia)
Manual	Mecânica	1,5 – 2,0	1,38	300 a 1200
	Hidráulica	2,0 – 10,0	1,65	2000 a 2800
Motorizada	Mecânica	4,0 – 24,0	> 1,65	1600 a 12000
	Hidráulica	> 20,0	> 2,00	-

Fonte: FERRAZ JUNIOR (1995)

Neves (1989) ainda destaca que o tijolo de solo-cimento, produzido por sistemas manuais ou automatizados, constitui um elemento de viabilidade comprovada em diversos programas habitacionais realizados por mutirão ou por administração direta, fato que demonstra a transferência de tecnologia pela fácil assimilação dos operadores dos equipamentos e também da mão-de-obra já familiarizada com o sistema construtivo de alvenaria.

2.1.2 Coordenação modular para edificações

A coordenação modular na arquitetura é definida como um método ou abordagem de projeto, com elementos construtivos dimensionados a partir de uma unidade de medida comum. A unidade, chamada de módulo, define as dimensões e proporções dos elementos, estabelecendo uma relação de dependência entre eles e o produto final, a edificação (FERREIRA et al, 2008).

A norma brasileira NBR 15873 - Coordenação modular para edificações (ABNT, 2010), que estabelece os requisitos para o instrumento de compatibilização de elementos e componentes na construção civil por meio da coordenação de dimensões a partir de uma medida padrão, o módulo básico de 100 mm, define coordenação modular: “coordenação dimensional mediante o emprego do módulo básico ou de um multimódulo”.

¹ A taxa de compactação do solo corresponde à relação entre os volumes da mistura no estado solto e em estado compactado, sendo diretamente proporcional à energia de compactação (GRANDE, 2003).

Este conceito de coordenação se aplica ao projeto e à construção de edificações de todos os tipos e também à produção de componentes construtivos, e aqui se inclui o bloco de solo-cimento, fazendo parte das ações em apoio e incentivo à industrialização da construção civil.

Segundo especialistas, a construção modular favorece a produtividade e a redução de custo de obras de grande volume, como as de habitação popular. Além disso, dado à confiabilidade nas medidas dos blocos, a modulação das paredes montadas com estes pode atingir grande precisão, levando os projetistas e executores a bons aspectos quanto à forma final das edificações. E, referindo-se ainda a uma montagem modular, a amarração entre elementos (vide Anexo A, disposição dos blocos e sistemas de encaixe) pode ser assegurada resultando tanto em qualidade de montagem quanto em qualidade estética final da alvenaria aparente.

A ideia central da coordenação modular é permitir que os sistemas e componentes tenham medidas padronizadas de forma industrial e sejam compatibilizados desde o projeto. Com isso, a construção se torna mais racionalizada e com alto índice de produtividade. A norma também conceitua o componente construtivo: “unidade distinta de determinado elemento do edifício, com forma definida, com medidas especificadas nas três dimensões e destinada a cumprir funções específicas”, os exemplos são os blocos para alvenaria (cerâmicos, solo-cimento, de concreto), telhas, painéis e outros.

Segundo Esper (ABCP, 2010), o Brasil foi um dos pioneiros na aprovação da norma de coordenação modular decimétrica (módulo de 10 cm), quando na aprovação da NB-25R, em 1950. Ele explica que,

(...) atualmente, o tema volta a ser discutido devido à necessidade de aumento de produtividade aliada à redução de custos. Além disso, contribui para o controle da produção no momento em que usa técnicas pré-definidas, diminui problemas de interface entre os componentes, elementos e subsistemas, e reduz desperdícios e erros de mão-de-obra.

Atualmente, a coordenação modular apresenta uma série de problemas ainda não solucionados, quais sejam: adaptação dos materiais e componentes a um sistema modular único, padronização e unificação do módulo base no mercado mundial e a preparação dos profissionais para a sua utilização. Para que a aplicação da coordenação modular se dê de uma forma abrangente será necessária uma mudança radical das técnicas construtivas,

modificação dos métodos de fabricação e um nível de projeto e detalhamento mais apurado (FERREIRA et al, 2008).

Assim, no que tange à produção de componentes construtivos, o bloco de solo-cimento traz grande contribuição quando compatibilizado em projetos inseridos na coordenação modular para edificações, pois, sem a necessidade de adequações dimensionais em obra, o ritmo da construção torna-se mais rápido, o rendimento e produtividade aumentam e o produto final ganha em qualidade e facilidade de manutenção.

2.1.3 Análise comparativa tijolos convencionais x blocos de BTC de SC

O mercado oferece opções de tijolos e blocos feitos com diferentes matérias-primas e tamanhos. Divididos em duas categorias – estruturais ou de vedação – eles são, em grande parte, responsáveis pela qualidade da construção e pelos gastos gerados na obra. Por isso, é preciso avaliar a relação custo-benefício. Deve-se ponderar o preço e o rendimento do material, tanto quanto sua durabilidade.

Slack, Chambers e Johnston (2002) acreditam que “para as empresas que concorrem diretamente em preço, o custo será seu principal objetivo de produção. Quanto menor o custo de produzir seus bens e serviços, menor pode ser o preço a seus consumidores”. Entretanto, o custo do BTC de solo-cimento não deve ser o objetivo principal, e sim a sustentabilidade que pode proporcionar, uma vez que diminui a retirada de recursos não renováveis da natureza.

A fim de complementar a análise quanto à viabilidade do uso dos blocos de terra compactado de solo-cimento, fez-se um levantamento quanto aos preços e custos para comparação com os tijolos convencionais (Fig. 2.2).

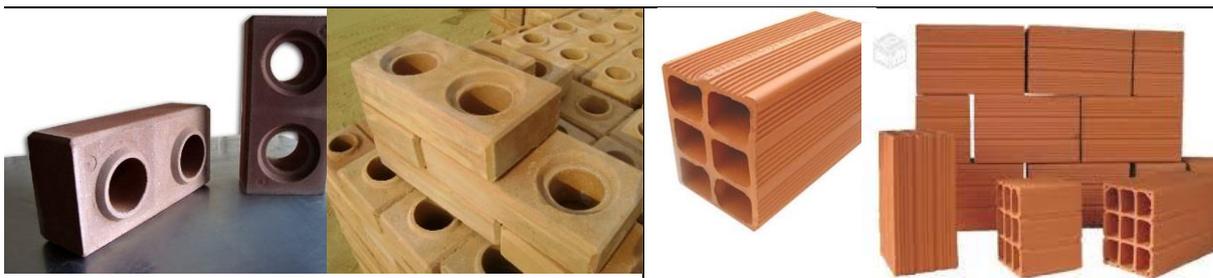


Fig. 2.2 - BTC de solo-cimento 12,5x25x7,5cm (esq.); Tijolo cerâmico 11,5x24x14cm (dir.)

O estudo comparativo, apresentado na Tabela 2.2, teve como parâmetro a execução de uma parede de 2,70 metros de altura por 3,00 metros de comprimento. Não foram considerados gastos com rede elétrica e hidráulica. Os dutos e fios, quando utilizados blocos de solo-cimento vazados, são passados dentro dos furos, o que evita a perda de material pela quebra e “rasgos” na parede. Também não foram computados os gastos com mão-de-obra, uma vez que, em construções com blocos de solo-cimento é muito comum o uso do sistema de “mutirão”, autoconstrução ou na forma de cooperativas.

A Tabela 2.2 mostra que apesar da quantidade de blocos utilizados e do custo do componente de construção, o BTC de solo-cimento, ser maior que o da alvenaria convencional, a construção de uma parede de 8,10m² em BTC de solo-cimento poderia ter o custo total reduzido em aproximadamente 27%. Contribuem neste valor a produtividade do componente; a diminuição do desperdício quando no recorte das paredes para instalações; a economia com revestimento interno (chapisco, emboço e reboco); economia na quantidade de argamassa para assentamento.

Os BTCs podem ser assentados a seco, ou seja, pela simples justaposição devido aos encaixes que permitem a amarração direta entre os componentes. Contudo, Tango (1990) afirma que tal assentamento pode acarretar algumas implicações relacionadas à precisão dimensional e à perfeição dos encaixes, que diminuem o desempenho da alvenaria. Assim, o assentamento pode ser executado usando-se um filete de cola fluida, aplicada com uma bisnaga na superfície dos blocos, com a espessura da junta de assentamento tendo aproximadamente 1mm.

Tabela 2.2 - Comparativo entre BTC de solo-cimento x tijolo convencional

BTC de Solo-cimento de 12,5 x 25 x 7,5cm					Alvenaria convencional 11,5 x 24 x 14 cm				
Material	Un.	Quantid.	Preço	Total	Material	Un.	Quantid.	Preço	Total
1. Parede									
Blocos	pç	360	0,70	252,00	Blocos	pç	235	0,55	129,25
Cimento	kg	12	-	-	Cimento	kg	12	0,30	3,6
Areia	m ³	0,13	-	-	Areia	m ³	0,13	69,90	9,1
Cal	kg	20	-	-	Cal	kg	20	0,20	4,0
2. Pilares dentro dos furos (3 grautes) de 2,90m									
Areia	m ³	0,12	69,7		Areia	m ³	0,12	69,7	8,36
Cimento	kg	8	0,3		Cimento	kg	8	0,3	2,4
Pedrisco	m ³	0,1	55		Pedra	m ³	0,1	59	5,9
Tábua caixaria 15cm	ml	18	-	-	Tábua caixaria 15cm	ml	18	1,99	35,82
Ripa travamento caixaria	ml	3	-	-	Ripa travamento caixaria	ml	3	1,1	3,3
Pregos	kg	0,5	-	-	Pregos	kg	0,5	4,1	2,05
Ferro 8mm armadura	ml	12	1,4	16,8	Ferro 8mm armadura	ml	12	1,4	16,8
Ferrote 4,2mm estribos	ml	6,5	-	-	Ferrote 4,2mm estribos	ml	6,5	0,6	3,9
Arame amarras	kg	0,25	5,9	1,48	Arame amarras	kg	0,25	5,9	1,48
3. Canaleta 0,10 x 0,10 x 3,0 (2 canaletas)									
Areia	m ³	0,02	69,9	1,4	Areia	m ³	0,02	69,9	1,4
Cimento	kg	10,5	0,3	3,15	Cimento	kg	10,5	0,3	3,15
Pedrisco	m ³	0,02	59	1,18	Pedra	m ³	0,02	59	1,18
Tábua caixaria 15cm	ml	24	-	-	Tábua caixaria 15cm	ml	24	1,99	47,76
Ripa travamento caixaria	ml	3	-	-	Ripa travamento caixaria	ml	3	0,6	1,8
Pregos	kg	0,5	-	-	Pregos	kg	0,5	4,1	2,05
Ferro 8mm armadura	ml	6	1,4	8,4	Ferro 8mm armadura	ml	12	1,4	16,8
Ferrote 4,2mm estribos	ml	4,42	-	-	Ferrote 4,2mm estribos	ml	4,42	0,6	2,65
Arame amarras	kg	0,05	5,9	0,3	Arame amarras	kg	0,05	5,9	0,3
4. Reboco 16,20m²									
Areia	m ³	0,58	-	-	Areia	m ³	0,58	69,9	40,54
Cimento	kg	25	-	-	Cimento	kg	25	0,3	7,5
Cal	kg	80	-	-	Cal	kg	80	0,2	16
5. Pintura 16,20m²									
Massa corrida	gl	3	-	-	Massa corrida	gl	3	14,9	44,7
Selador alvenaria	gl	1	-	-	Selador alvenaria	gl	1	17,9	17,9
Tinta ou silicone impermeável	gl	1	40	40	Tinta ou silicone impermeável	gl	1	26,9	26,9
Custo total BTC de solo-cimento				R\$ 332,57	Custo total alvenaria convencional				R\$ 456,57

Geralmente é utilizada uma camada fina de argamassa comum, composta por cimento Portland, cola branca PVA e um solo peneirado de fração bem fina (passado na peneira nº 16, de 1,3mm), apenas nas três primeiras fiadas. Nas demais, utiliza-se apenas a cola branca a

base de PVA. A Fig. 2.3 mostra como é a aplicação feita com auxílio de bisnaga (esq.) e o detalhe do filete (dir.).



Fig. 2.3 - Aplicação de argamassa com utilização de bisnaga (esq.); Detalhe filete de argamassa na superfície do bloco (dir.)

Fonte: GRANDE (2003)

A Fig. 2.4 mostra como fica a justaposição dos blocos (esq.) e o detalhe da espessura das juntas (dir.). Outros detalhes construtivos sobre assentamento de blocos são apresentados no Anexo A.



Fig. 2.4 - Justaposição dos blocos (esq.); Detalhe da espessura das juntas (dir.)

Fonte: GRANDE (2003)

No caso da incorporação do resíduo de argamassa de assentamento e revestimento ao solo-cimento, a aquisição dos resíduos de construção já beneficiados e prontos para utilização, vindos de uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil e, dependendo da distância

de localização da usina fornecedora do resíduo beneficiado até o local onde serão fabricados os blocos, poderá representar um aumento no custo do componente, pois, ainda que diminua o custo com a extração de solo, incorrerá o custo da compra e transporte do material.

Entretanto, com a expansão da capacidade produtiva e no caso de projetos com grande número de edificações a serem construídas, deve-se fazer um planejamento da implantação de maquinário para o beneficiamento dos resíduos (moagem e peneiramento) no mesmo local de fabricação dos blocos, o que reduziria, substancialmente, o custo de sua utilização. Por enquanto, os resíduos oriundos da construção civil são obtidos em parceria com empresas coletoras de entulhos e/ou com construtoras que realizam demolições.

Penteado e Marinho (2011) fizeram uma análise comparativa de custo e produtividade do processo construtivo com blocos de solo-cimento, blocos cerâmicos e blocos de concreto.

A comparação foi feita considerando o custo e o tempo de execução das etapas de estrutura, vedação e revestimentos internos e externos – que juntos, são responsáveis por mais de 44% do valor do imóvel – de uma residência popular de 33m² quadrados executada como modelo em conjuntos habitacionais da COHAB de Curitiba - PR.

Foram realizados estudos de campo dos processos e também feita análise das planilhas orçamentárias e de produção destes sistemas. A Fig. 2.5 apresenta o comparativo dos custos dos serviços de estrutura, vedação e revestimentos, onde observa-se que a soma total dos serviços escolhidos foi menor para o solo-cimento. A Fig. 2.6 apresenta as quantidades de horas necessárias para a execução dos serviços no três sistemas, e mostra que a produtividade também foi mais satisfatória quando utilizado o solo-cimento.

Após a análise comparativa dos três sistemas construtivos através do estudo de produtividade e custo, as autoras afirmam que o sistema construtivo solo-cimento é o mais viável para construção de residências populares, tendo em vista que apresentou os melhores resultados quando comparado ao sistema de blocos cerâmicos e blocos de concreto.

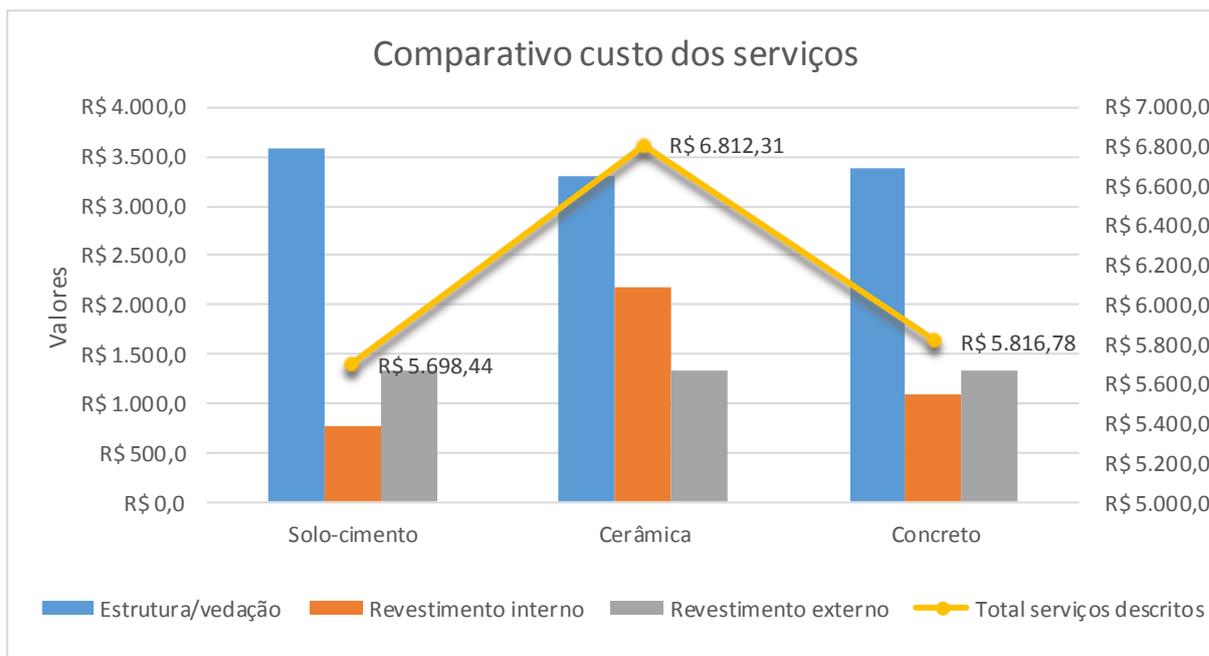


Fig. 2.5 - Comparativo de custos dos serviços de estrutura, vedação e revestimentos
 Fonte: Adaptado de Marinho e Penteado (2011)

A maior diferença foi verificada na etapa do revestimento interno, onde a execução do serviço com solo-cimento gasta 36,73% menos tempo que no sistema de menor produtividade (blocos cerâmicos) e tem custo 16,35% menor que o sistema mais caro (blocos cerâmicos). Na comparação entre o sistema com solo-cimento e o sistema executado com blocos de concreto, as diferenças encontradas foram menores.

De acordo com Penteado e Marinho (2011), a vantagem da obra com blocos de solo-cimento, em relação às outras estudadas, ocorre no que se refere ao tempo de conclusão da obra, ao custo, ao desperdício de material, à poluição ambiental, entre outros, principalmente quando aplicada à construção de várias unidades, como nos programas habitacionais do Governo Federal.

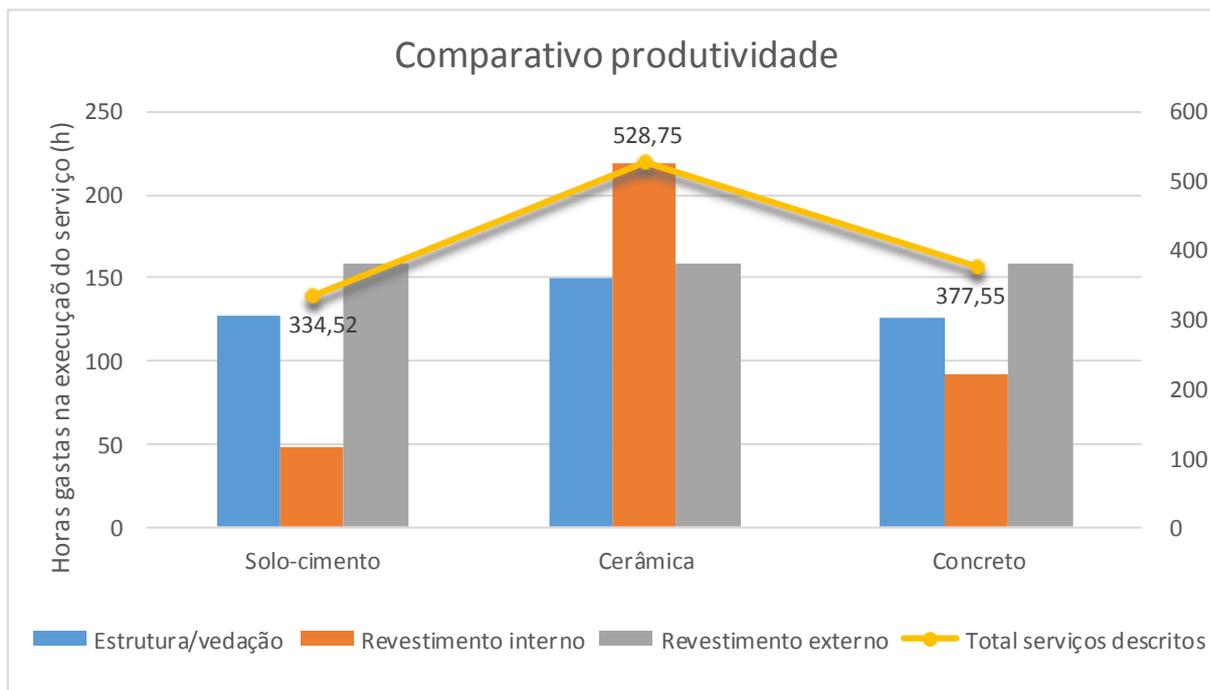


Fig. 2.6 - Comparativo de produtividade (horas gastas na execução do serviço)

Fonte: Adaptado de Penteadó e Marinho (2011)

2.2 Tecnologia do Solo-Cimento

2.2.1 Solos

2.2.1.1 Origem

Segundo Pinto (2006) os solos são constituídos por um conjunto de partículas com água (ou outro líquido) e ar nos espaços intermediários e se originam pela decomposição de rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre. As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para deslocar entre si, sendo que o comportamento dos solos depende da quantidade relativa de cada um dos seus componentes (sólidos, água e ar) e do movimento dessas partículas sólidas.

A decomposição das rochas é decorrente de agentes físicos e químicos. Exemplos de agentes físicos são as trincas e tensões, causadas pelas variações de temperatura que permitem a infiltração de água. A água ataca quimicamente os minerais e, quando congelada, permite sua fragmentação. A presença da fauna e flora também promove o ataque químico, pela

hidratação, hidrólise, oxidação, lixiviação, carbonatação, etc. Segundo Pinto (2006) o conjunto destes processos, que são muito mais atuantes em climas quentes do que em climas frios, leva à formação dos solos que, em consequência, são misturas de partículas pequenas que se diferenciam pelo tamanho e composição química. A maior ou menor concentração de cada tipo de partícula num solo depende da composição química da rocha que lhe deu origem.

2.2.1.2 Propriedades

As propriedades dos solos são diversas, porém para o entendimento desse trabalho e no que diz respeito a ele, foram descritos apenas os principais aspectos: granulometria e classificações, composição mineralógica, estrutura e compactação.

- Granulometria e classificações

A primeira característica que diferencia os solos, segundo Pinto (2006), é o tamanho das partículas que o compõem. Num solo, geralmente convivem partículas de diversos tamanhos; denominações específicas são empregadas para as diversas faixas de tamanhos de grãos; seus limites, entretanto, variam conforme os sistemas de classificação. O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir adequada análise de um problema.

Existem diversas formas de classificar os solos, como pela sua origem, pela sua evolução, pela presença ou não de matéria orgânica, pela estrutura, pelo preenchimento dos vazios. Assim, torna-se importante estabelecer critérios múltiplos para uma adequada classificação dos solos, levando-se em conta o diâmetro da partícula e propriedades físicas, com base no propósito da sua utilização.

De acordo com Vargas² (1981) apud Segantini (2000) a classificação dos solos para fins de engenharia civil deve ser feita considerando-se tanto a granulometria como a plasticidade do

²VARGAS, M. **Identificação e classificação dos solos**. São Paulo, SP. ABCP, 3ª edição, 1981. 28p.

solo. São apresentadas as duas classificações mais utilizadas na Engenharia Civil: a classificação HRB da AASHTO; e a classificação de Casagrande que, atualmente, evoluiu para Classificação Unificada.

O sistema AASHTO, muito empregado na engenharia rodoviária, classifica o solo em sete grupos, tendo em vista seu comportamento em estradas de rodagem. É baseado na granulometria e nos limites de Atterberg (limites de consistência). O sistema da Classificação Unificada tem a vantagem, segundo Freire (1976), de ser sistemático, classificando o solo a partir de propriedades mais gerais, incluindo grupos e subgrupos mais particulares. Pinto (2006) verifica que estes dois sistemas são muito semelhantes, já que consideram a predominância dos grãos graúdos ou miúdos, dão ênfase à curva granulométrica só no caso dos solos graúdos com poucos finos e classificam os solos graúdos com razoável quantidade de finos, e os próprios solos finos com base exclusivamente nos índices de Atterberg.

Os limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos indicados pela NBR 6502 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1998) são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos

Fração	Limites definidos pela Norma ABNT
Matacão	De 25 cm a 1,0 m
Pedra	De 7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	De 4,8 mm a 7,6 cm
Areia grossa	De 2,0 mm a 4,8 mm
Areia média	De 0,42 mm a 2,0 mm
Areia fina	De 0,05 mm a 2,0 mm
Silte	De 0,005 mm a 0,05 mm
Argila	Inferior a 0,005 mm

Fonte: ABNT (1998)

Diferentemente desta terminologia adotada pela ABNT, a separação entre as frações silte e areia é frequentemente tomada como 0,075 mm, correspondente à abertura da peneira nº 200, que é a mais fina comumente usada nos laboratórios. O conjunto de silte e argila é denominado como a fração de finos do solo, enquanto o conjunto areia e pedregulho é denominado como fração grossa. Contudo, a fração argila é considerada, com frequência,

como a fração abaixo do diâmetro de 0,002 mm, que corresponde ao tamanho máximo mais próximo das partículas de constituição mineralógica dos argilominerais. Grande (2003) também aponta esse método, divergente da metodologia apresentada pela ABNT, como sendo a prática real dos laboratórios atualmente.

- Composição mineralógica

Por causa da composição mineralógica, solos com partículas da mesma forma e com estrutura semelhante podem apresentar comportamentos diferentes, mesmo que seu comportamento mecânico dependa da granulometria (GRANDE, 2003), pois as partículas resultantes da desagregação de rochas dependem da composição da rocha matriz (PINTO, 2006).

Algumas partículas maiores, dentre os pedregulhos, são constituídas frequentemente de agregações de minerais distintos. É mais comum, entretanto, que as partículas sejam constituídas de um único mineral. O quartzo, presente na maioria das rochas, é bastante resistente à desagregação e forma grãos de silte e areia. Sua composição química é simples e suas partículas unidimensionais apresentam baixa atividade superficial. (PINTO, 2006).

Os feldspatos são os minerais mais atacados pela natureza, dando origem aos argilominerais, que constituem a fração mais fina dos solos, geralmente com dimensão inferior a 2 mm e de complexa estrutura. Não só o reduzido tamanho, mas principalmente, a constituição mineralógica faz com que estas partículas tenham um comportamento diferenciado em relação ao dos grãos de silte e areia (PINTO, 2006).

Segundo Grande (2003), a origem e ocorrência desses argilominerais dependem das condições ambientais (clima e fatores como drenagem e escoamento das águas no solo). Estes são ativos quimicamente e conferem plasticidade e coesão ao solo.

- Estrutura

Num solo, parte do volume total é ocupado por partículas sólidas, que se acomodam formando uma estrutura. O volume restante é ocupado por água e ar (vazios). O

comportamento de um solo depende da quantidade relativa destes elementos, sendo que, a princípio, as quantidades de água e ar podem variar. Quando diminui o volume de vazios, por exemplo, a resistência aumenta.

A água presente na composição do solo tem papel fundamental na sua estrutura, como apresenta Pinto (2006):

Quando a água se encontra em contato com as partículas argilosas, as moléculas se orientam em direção a elas e aos íons que as circundam. Os íons se afastam das partículas, ficando circundados por moléculas de água. (p.6).

Quando duas partículas de argila, na água, estão muito próximas, ocorrem forças de atração e repulsão entre elas [...]. Da combinação dessas forças é que resulta a estrutura do solo, que se refere à disposição das partículas na massa de solo e às forças entre elas. (p.7).

O conhecimento das estruturas permite o entendimento de diversos fenômenos verificados nos comportamentos dos solos, como por exemplo, a compactidade das areias, a sensibilidade das argilas, a permeabilidade (verificada pelos índices de consistência), etc.

- Compactação

A compactação de um solo é a sua densificação, por meio da redução nos vazios de ar, por meios mecânicos, geralmente por um rolo compactador; embora, em alguns casos, soquetes manuais possam ser empregados. Tem em vista dois aspectos: aumentar a intimidade de contato entre os grãos e tornar o solo mais homogêneo.

O início da técnica de compactação é creditado ao engenheiro norte-americano Proctor que, em 1933, publicou suas observações sobre a compactação em aterros, mostrando que, aplicando-se certa energia de compactação, a massa específica resultante seria função da umidade presente no solo. Quando a compactação é feita com umidade baixa, o atrito entre as partículas é muito alto e não se consegue uma significativa redução dos vazios. Para umidades mais elevadas, a água provoca certo efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se num arranjo mais compacto (PINTO, 2006).

Na compactação, as quantidades de partículas de solo e de água permanecem constantes e o aumento da massa específica corresponde à eliminação de ar dos vazios. “Há, portanto, para a energia aplicada, certo teor de umidade, denominado umidade ótima, que conduz a uma massa específica seca máxima, ou uma densidade seca máxima” (PINTO, 2006).

Assim, quando o solo se encontra com umidade abaixo da ótima, a aplicação de maior energia de compactação provoca aumento da densidade seca, mas quando a umidade é maior do que a ótima, maior esforço de compactação não consegue (ou consegue pouco) provocar o aumento da densidade, por não conseguir expelir o ar dos vazios.

Segundo Ferreira (2003), um baixo teor de umidade dificulta a compactação do solo, obtendo-se baixos valores de massa específica aparente e alto volume de vazios. O aumento do teor de umidade lubrifica o solo e o torna mais trabalhável, proporcionando dessa forma, valores mais altos de massa específica e reduzindo o volume de vazios, até atingir a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótima.

De acordo com Lopes (2002), quando a distribuição em tamanho das partículas do solo é uniforme, a porosidade é mais alta e a sensibilidade à umidade é reduzida, apresentando então uma curva de compactação mais achatada, característica de solos finos. Porém, quando a distribuição em tamanho das partículas é mais ampla e o solo bem graduado, a curva será mais pontiaguda, característica de solos de textura arenosa.

2.2.2 Estabilização dos solos

O emprego do solo como material de construção deve ser realizado com critérios, pois podem ocorrer alguns problemas devidos às propriedades desse material, que por sinal, são muito complexas e heterogêneas, daí a importância do conhecimento acerca dos elementos que promovem a estabilização dos solos.

2.2.2.1 Fundamentos de estabilização

Num sentido amplo, a estabilização do solo consiste em modificar as características do sistema solo-água-ar com a finalidade de se obter propriedades necessárias a uma aplicação particular. Agentes estabilizadores como o cimento, a cal, aditivos químicos, fibras vegetais ou mesmo a estabilização granulométrica, vêm sendo utilizados em larga escala para esta finalidade. A opção, conforme Guimarães³ (1998) apud Grande (2003), pelo tipo adequado de estabilização é influenciada por uma série de fatores como: viabilidade econômica, finalidade da obra, características dos materiais e as propriedades do solo que se deseja corrigir ou adequar.

As alterações nos sistemas solo-estabilizante compactados são o aumento do limite de plasticidade, a diminuição do limite de liquidez e o achatamento das curvas de compactação com aumento do teor ótimo de umidade e diminuição da massa específica aparente seca máxima, conferindo ao produto final estabilidade dimensional, aumento de resistência mecânica para patamares definidos pela utilização, diminuição da permeabilidade, controle da fissuração na retração por secagem, resistência à erosão e abrasão superficial e, conseqüentemente, aumento da durabilidade do material (INGLES; METCALF⁴, 1972 apud GRANDE, 2003). Promove ainda, o preenchimento e a redução do volume de vazios, o que influencia a porosidade e a permeabilidade do solo; a melhoria da aderência entre os grãos, conferindo maior compactidade, ou densidade, ao solo, influenciando diretamente na resistência mecânica.

Convém destacar que, embora quase todos os solos possam ser estabilizados com cimento, somente aqueles que necessitam de teores de cimento relativamente baixos são considerados solos economicamente empregáveis, tendo a ABCP (1972) definido suas características. O acréscimo dos teores de silte e argila bem como a uniformidade da granulometria da areia acarretam uma elevação no teor de cimento (FERREIRA, 2003).

³GUIMARÃES, J. E. P. **A cal – fundamentos e aplicações na construção civil**. São Paulo – SP. Pini, 1998.

⁴INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Butterwords, Sydney, Melbourne, Brisbane, 1972.

De acordo com Milani (2005):

Na estabilização do solo com cimento ocorrem reações de hidratação dos silicatos e aluminatos presentes no cimento, formando um gel que preenche parte dos vazios da massa e une os grãos adjacentes do solo, conferindo a ele resistência inicial; paralelamente, ocorrem reações iônicas que provocam a troca de cátions das estruturas argilominerais do solo com os íons de cálcio, provenientes da hidratação do cimento adicionado. Devido a esta troca, o solo torna-se mais granular, a adesividade é reduzida e a sensibilidade à variação de umidade e à variação volumétrica se tornam menores (p.4).

Estudos apontam que as reações no sistema solo-cimento ocorrem com boa intensidade se a fração argila presente no solo contiver grandes porcentagens de caulinita e ilita, pois estas fixam menos cal, possibilitando melhor hidratação do cimento. Portanto, de forma geral, a ação do cimento traz bons resultados em solos classificados como arenosos (MILANI, 2005).

As características físico-mecânicas (resistência à compressão, absorção de água e durabilidade) do sistema solo-cimento compactado dependem do tipo de solo (granulometria, fração argila, grau de plasticidade), do tipo e teor do agente estabilizante, além das condições de cura (umidade e temperatura) e de compactação, ou seja, deve-se trabalhar com umidades de moldagem em torno do teor ótimo, pois quanto mais denso o sistema, maior sua resistência. Quanto maior o efeito de estabilização do solo, menor deve ser a perda de massa, indicando que o componente construtivo possui durabilidade e resistência.

2.2.2.2 Cimento Portland

A procura por segurança e durabilidade para as edificações conduziu o homem à experimentação de diversos materiais aglomerantes. Os romanos chamavam esses materiais de *caementum*, termo que originou a palavra cimento.

O engenheiro John Smeaton, por volta de 1756, procurava um aglomerante que endurecesse mesmo em presença de água, de modo a facilitar o trabalho de reconstrução do farol de Eddystone, na Inglaterra. Em suas tentativas, verificou que uma mistura calcinada de calcário e argila tornava-se, depois de seca, tão resistente quanto as pedras utilizadas nas construções.

Coube, entretanto, a um pedreiro, Joseph Aspdin, em 1824, patentear a descoberta, batizando-a de cimento Portland, numa referência a *Portlandstone*, tipo de pedra arenosa muito usada em construções na região de Portland, Inglaterra. No pedido de patente constava que o calcário era moído com argila, em meio úmido, até se transformar em pó impalpável. A água era evaporada pela exposição ao sol ou por irradiação de calor através de cano com vapor. Os blocos da mistura seca eram calcinados em fornos e depois finamente moídos.

O cimento é definido como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer, com adição de gesso (para regular o tempo de início de hidratação ou tempo inicial de “pega”) e outras substâncias que determinam o tipo de cimento. O clínquer é o resultado da mistura de calcário, argilas e, em menor proporção, minério de ferro submetido a um processo chamado clinquerização, na qual a matéria-prima é moída, misturada em determinadas proporções e submetida à queima em forno rotativo a elevadas temperaturas (GRANDE, 2003).

A compreensão dos tipos de cimento e suas propriedades tecnológicas, aliada ao correto entendimento das variáveis que constituem os solos, significa ampliar as possibilidades de desenvolvimento do solo-cimento, na busca de um material de elevado desempenho.

No Brasil, têm-se vários tipos de cimento Portland especificados pela ABNT, além do cimento branco. Possuem a seguinte nomenclatura:

- Cimento Portland Comum:
 - CP I – cimento Portland comum;
 - CP I-S – cimento Portland comum com adição;
- Cimento Portland Composto:
 - CP II-E – cimento Portland composto com escória de alto forno;
 - CP II-F – cimento Portland composto com fíler (calcário);
 - CP II-Z – cimento Portland composto com pozolana;
 - CP III – cimento Portland de alto forno;
 - CP IV – cimento Portland pozolânico;
 - CP V-ARI – cimento Portland de alta resistência inicial.

A Tabela 2.4 apresenta as composições dos tipos de cimento Portland e a Tabela 2.5 indica a quantidade produzida de cada tipo e sua participação percentual no mercado brasileiro.

Tabela 2.4 - Tipo e composição do cimento Portland

Tipo	Classe de resistência (MPa)	Composição (%)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória alto forno	Pozolana	Fíler	
CP I	25, 32, 40	100	0			NBR 5732
CP I-S		95-99	1-5			
CP II-E	25, 32, 40	56-94	6-34	0	0-	NBR 11578
CP II-F	25, 32, 40	76-94	0	6-14	0-	
CP II-Z	25, 32, 40	90-94	0	0	6-	
CP III	25, 32, 40	25-65	35-70	0	0-5	NBR 5735
CP IV	25, 32, 40	45-85	0	15-50	0-5	NBR 5736
CPV-ARI	-	95-100	0	0	0-5	NBR 5733

Fonte: ITAMBÉ – Área técnica (2007)

Tabela 2.5 - Produção nacional de cimento

Tipo de cimento	Quantidade produzida <i>t</i>	Participação %
CP I	1.111.649	3,21
CP II	26.674.053	77,10
CP III	3.479.331	10,06
CP IV	2.463.879	7,12
CP V	836.657	2,42
Branco	31.481	0,09

Fonte: SNIC (2007)

2.2.2.3 Fatores que condicionam a qualidade do solo-cimento

Os principais fatores que afetam a qualidade do solo-cimento são: o tipo de solo, o teor de cimento, o método de mistura e a compactação. De acordo com Mercado (1990) o solo, além de ser o elemento de carga, pode determinar, de acordo com sua composição, se a estabilização com cimento é economicamente viável, ou ainda indicar facilidades no manuseio e procedimentos de mistura (peneiramento, homogeneização, moldagem e desmoldagem).

A composição química do solo também é importante, pois, como citado anteriormente, os solos são formados a partir da decomposição das rochas, causada pelo intemperismo, e nesse

processo, a água, ao infiltrar-se no solo, dissolve substâncias orgânicas e inorgânicas. Portanto, a presença de sais solúveis (sulfatos, por exemplo) advindos da hidrólise (mecanismo responsável pela decomposição química dos minerais das rochas) pode causar reações expansivas nas pasta de cimento (GRANDE, 2003).

Quanto ao teor de cimento, estudos indicam que o aumento deste resulta em aumento da resistência à compressão e, conseqüentemente, da durabilidade, independentemente do tipo de solo. Porém, Sabbag (1980) adverte que, se o teor de cimento for muito elevado e as condições de cura forem inadequadas, provavelmente ocorrerão fissuras no material, causadas por retração por secagem.

No que diz respeito ao método de mistura, segundo a ABCP (1986), o procedimento para o solo-cimento na produção de tijolos, blocos ou painéis de parede, deve ser: preparação do solo (que consiste em destorroar e peneirar o solo seco); preparação da mistura (adiciona-se o cimento ao solo preparado e realiza-se a mistura com os materiais secos; após a homogeneização adiciona-se água e mistura-se novamente o material até uniformizar a umidade do solo); moldagem; cura e armazenamento (após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os tijolos devem ser mantidos úmidos por meio de sucessivas molhagens).

Quanto à compactação da mistura, esta é essencial para a obtenção de um solo-cimento satisfatório e, para sua melhor compreensão, é preciso avaliar a influência do teor de umidade na compactação, uma vez que apenas uma boa compactação pode garantir que o material atinja um determinado peso específico (ou densidade aparente), que lhe confira resistência mecânica apropriada para um determinado fim (GRANDE, 2003).

Faria (1990) expõe que mesmo após a estabilização é comum a ocorrência de patologias, tais como: variações volumétricas e aparecimento de fissuras; degradação do material devido à presença de sais solúveis em água, de matéria orgânica, de materiais expansivos ou partículas friáveis; heterogeneidade na série produzida devido à descontinuidade das características da matéria-prima.

2.2.2.4 Métodos de dosagem

Segundo a ABCP (1986) a dosagem de solo-cimento consiste na sequência de ensaios realizados com uma determinada mistura de solo, cimento e água, seguida de uma interpretação dos resultados por meio de critérios pré-estabelecidos. O resultado final de um estudo de dosagem seria obtido pela fixação de três variáveis: a quantidade de cimento, a quantidade de água e a massa específica aparente seca a ser alcançada após a compactação. As duas últimas, entretanto, sofrem pequenas oscilações, dadas as variações de campo que ocorrem nas características do solo. Assim, essas variáveis passaram a servir apenas como elemento de controle e, com isso, o objetivo da dosagem passou a ser, basicamente, a fixação da quantidade adequada de cimento.

O mesmo estudo técnico da ABCP traz a completa descrição das normas de dosagem de solo-cimento propostas pela *Portland Cement Association* – PCA, sendo uma norma geral e uma norma simplificada para os métodos de dosagem. Seus resultados, desde 1932, têm comprovação em inúmeros serviços executados com solos de diversas origens, em diferentes regiões do mundo, inclusive no Brasil, após 1939.

De acordo com a ABCP (1986), a norma geral de dosagem pode ser resumida nas seguintes operações: identificação e classificação do solo; escolha do teor de cimento para o ensaio de compactação; execução do ensaio de compactação; escolha dos teores de cimento para o ensaio de durabilidade; moldagem de corpos-de-prova para o ensaio de durabilidade; execução do ensaio de durabilidade por molhagem e secagem; e, escolha do teor de cimento adequado em função dos resultados do ensaio.

A dosagem do solo-cimento por esta norma geral apresenta a desvantagem prática de requerer muito tempo para a realização de ensaios, principalmente para os de durabilidade, que requerem cerca de 40 dias. Procurou-se, então, correlacionar os resultados dos ensaios com outros de execução mais rápida.

A PCA também apresenta uma norma simplificada de dosagem, resumida nas seguintes operações: ensaios preliminares do solo; ensaio de compactação do solo-cimento;

determinação da resistência à compressão simples aos 7 dias; e, comparação entre a resistência média obtida aos 7 dias e a resistência admissível para o solo-cimento produzido com o solo em estudo.

Segundo a ABCP (1986), o fundamento deste método, comprovado pelos ensaios realizados, é a constatação de que solos arenosos com determinada granulometria e massa específica aparente seca máxima irão requerer, de acordo com o critério de perda de massa no ensaio de durabilidade, o mesmo teor de cimento indicado por este ensaio, desde que alcance resistência à compressão, aos 7 dias, superior a determinado valor mínimo, estabelecido estatisticamente na série de ensaios de comparação realizada. O uso desse método restringe-se aos solos que contenham no máximo 50% de partículas com diâmetro inferior a 0,05 mm (fração silte e argila) e no máximo 20% de partículas com diâmetro inferior a 0,005 mm (fração argila).

Vale ressaltar que o método de dosagem, por mais rigoroso que seja, não implicará necessariamente na obtenção de uma mistura de boa qualidade, uma vez que para isso devem ser observados outros fatores, tais como: teor de umidade da mistura, operações de mistura e compactação, tempo e condições de cura.

Para o solo-cimento destinado à confecção de blocos, tijolos ou paredes monolíticas, a dosagem está condicionada a obedecer às especificações de valores mínimos de resistência à compressão e absorção de água, prescritos pela NBR 8492 (ABNT, 2012) e descritos na Tabela 2.6. Com esta mesma finalidade, consideram-se adequados, os solos que possuam as características descritas na Tabela 2.7, conforme a NBR 10833 (ABNT, 2012).

Tabela 2.6 - Valores de resistência à compressão e de absorção de água

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

Fonte: NBR 8492 (ABNT, 2012)

Tabela 2.7 - Características do solo

Estado	Valor
Passando na peneira 4,8 mm (nº 4)	100%
Passando na peneira 0,075 (nº 200)	10% a 50%
Limite de liquidez	≤ 45%
Índice de plasticidade	≤ 18%

Fonte: NBR 10833 (ABNT, 2012)

2.2.3 Caracterização de resíduos

Os resíduos podem se constituir em problema que acabará por, mais cedo ou tarde, sufocar o homem moderno em sua própria atividade fabril ou, ao contrário, podem constituir fonte de renda e de solução de problemas, com a simultânea defesa do meio ambiente, se convenientemente manejados e aproveitados (CASANOVA, 2004).

Grande parte dos resíduos poluentes, produzidos pela sociedade, pode ser reciclada, de modo a gerar novos materiais e atender à crescente demanda por tecnologias alternativas de construção, mais eficientes e econômicas (CORDEIRO, 2004).

Atualmente a reciclagem de resíduos é uma necessidade para a preservação da natureza, não apenas pelo risco de contaminação do solo e do lençol freático, mas também pela possibilidade de redução do custo e do consumo de energia na produção de materiais de construção civil, além de minimizar a extração de recursos naturais.

Jardim (1995) especifica que o processo de reciclagem envolve uma série de atividades, compreendendo coleta dos resíduos, classificação e processamento, para desta maneira, poderem novamente ser utilizados como matéria-prima na manufatura de bens, que antes eram feitos apenas a partir da matéria-prima virgem. Da mesma forma, com relação à reciclagem de entulho, Levy (1997) afirma que tal processo pode ser entendido como um conjunto de operações, compreendendo a coleta, a seleção, a britagem ou moagem e o peneiramento, de modo que o material resultante apresente granulometria adequada ao uso a que se destina.

Um das medidas mais eficientes para minimizar a extração de recursos naturais é a produção de materiais a partir do uso de materiais reciclados. A utilização de entulho constituído de fragmentos ou restos – de tijolos, concreto, argamassa, madeira e outros materiais usados na construção do edifício (e considerados inertes) – deve ser considerada sempre que possível. De acordo com Pinto (1997), apesar de esses resíduos serem inertes, deve-se atentar para o controle de sua geração e posterior disposição, uma vez que seu volume é significativo.

Buhé (1997) afirma que o setor da construção civil deve ser visto como um campo importante em se considerando a reciclagem, devido à grande variedade de materiais de que ele necessita, aos volumes consumidos e, também, porque resíduos incorporados aos produtos utilizados no setor estão imobilizados por um longo período de tempo, uma vez que a vida útil dos produtos da construção civil é frequentemente muito grande.

John (2001) observa que a incorporação de resíduos na produção de materiais pode reduzir o consumo de energia não só pelo fato de que esses produtos incorporam grandes quantidades de energia, mas também porque se podem reduzir as distâncias de transporte de matérias-primas. Ainda, em alguns casos, a incorporação de resíduos possibilita a produção de materiais com melhores características técnicas, como a adição de microssilica, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica, e da escória de alto-forno, que melhora o desempenho do concreto frente à corrosão por cloretos.

Segundo Lawson (1996) apud Graaham; Eilberg⁵ (2000), estudos sugerem que mais de 75% do total de resíduos poderiam ser reutilizados ou reciclados. Diz ainda, que avaliações feitas na Austrália indicam que mais de 40% dos resíduos de construção e demolição são reutilizados ou reciclados e que a maior parte desse volume é composta por entulho de concreto. Na Suécia, por exemplo, cerca de 90% de toda pedra natural, areia e cascalho do setor de construção e engenharia pesada são reutilizados, enquanto do asfalto são 60% e cerca de 80% de madeira são convertidos em energia (CIB, 2000).

⁵ GRAAHM, P. EILBERG, I. *Resource efficient building program. Proceedings. In: Construction and Environment – CIB Symposium*. Brasil, São Paulo, 2000.

No mundo, o país com melhor índice de aproveitamento de resíduos de construção e demolição é a Holanda, com índices próximos a 80%. Esse reaproveitamento deve-se à escassez de recursos naturais, fazendo, inclusive, com que o país importe areia da Sibéria e resíduos da Inglaterra. Além disso, países com pequenas áreas sofrem da falta de locais para disposição que, se existem, são muito caros, o que leva à existência de um sistema ineficiente de aproveitamento do entulho (AGOPYAN e JOHN, 2001).

No Brasil, a reciclagem de resíduos de construção em escala significativa é prática recente iniciada na década de 80, com o uso de pequenos moinhos em construção de edifícios, por meio dos quais se reaproveitavam resíduos de alvenaria para a produção de argamassas para aplicação em emboço, principalmente (LEVY, 1997).

Na década de 90 iniciou-se a implantação de recicladoras, por administrações de municípios das regiões Sul e Sudeste e vários municípios estudam a implantação. Alguns empresários mostram-se interessados no estabelecimento de parcerias com prefeituras, para reciclagem de resíduos de construção e comercialização de agregados reciclados.

Nos municípios em que a reciclagem já foi implantada são geradas quantidades significativas de agregado reciclado, aplicadas em serviços simplificados como cobertura primária de vias, sub-bases de pavimentos asfálticos, drenagem e controle de erosão. Parte do material é aplicada na produção de concreto, argamassa e na fabricação de componentes para alvenaria, pavimentação e infraestrutura urbana (blocos, briquetes, meios-fios etc.).

A reciclagem tende a avançar, pois o resíduo de construção é gerado em grande quantidade e demanda grandes áreas para sua destinação, as quais estão cada vez mais escassas em várias cidades do país. Além disso, a reciclagem de resíduos de construção pode gerar economia de recursos financeiros, o que é mais um fator de incentivo à sua implementação.

Segundo John (2001) a reciclagem de resíduos de construção pode ser uma oportunidade de transformação de fontes de despesa em faturamento ou de, pelo menos, redução de despesas. As vantagens daí decorrentes são extremamente visíveis, principalmente nos dias atuais.

O processo de reciclagem pode ser classificado em dois tipos: reciclagem primária e reciclagem secundária. A primária é definida como reciclagem do resíduo dentro do próprio processo que o originou, como por exemplo, a do vidro, do aço, das latas de alumínio. A reciclagem secundária é definida como a de um resíduo em um outro processo, diverso daquele que o originou. Este último é bastante verificado na indústria de produção de cimento que utiliza uma gama considerável de resíduos gerados em outras atividades (JOHN, 2001).

Segundo Ângulo et al (2001a), a reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios, entre eles:

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
- Redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. Destaca-se aqui a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos;
- Redução do consumo de energia durante o processo de produção. Destaca-se a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua matéria-prima (co-incineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento;
- Redução da poluição, como por exemplo, também no caso da indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico, utilizando a escória de alto forno em substituição ao cimento.

Os resíduos de construção são em geral formados por vários materiais, que apresentam propriedades diferenciadas, como resistência mecânica, absorção de água, etc. As propriedades dos componentes dos resíduos determinam as propriedades do material reciclado, assim, a composição dos entulhos gerados em uma obra varia em função do seu tipo, da técnica construtiva empregada, da fase em que a obra se encontra e também em função de características socioeconômicas regionais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS⁶ estabelece a classificação dos resíduos sólidos a ser observada em âmbito nacional. Em sua classificação quanto à origem dos resíduos, e que considera a natureza da atividade que ocasionou a geração do resíduo, tem-se que, segundo Silva Filho e Soler (2012), os de construção civil são

(...) aqueles provenientes das obras de engenharia civil, incluindo as construções propriamente ditas, reformas, reparos, demolições, além da preparação e escavação de terrenos destinados às atividades anteriormente listadas (p.54).

De acordo com Pinto (1999), a composição dos resíduos de construção e demolição é diferente em cada país, em função da diversidade de tecnologias construtivas utilizadas. A madeira é muito presente na construção americana e japonesa, tendo presença menos significativa na construção europeia e na brasileira; o gesso é fartamente encontrado na construção americana e europeia e só recentemente vem sendo utilizado de forma mais significativa nos maiores centros urbanos brasileiros. O mesmo acontece com as obras de infraestrutura viária, havendo preponderância do uso de pavimentos rígidos em concreto nas regiões de clima frio.

O autor salienta ainda que no Brasil ocorre predominância de resíduos de construção em relação aos gerados em demolições. Isto ocorre em razão do desenvolvimento recente das áreas urbanas. Nos países já desenvolvidos, onde as atividades de renovação de edificações, infraestrutura e espaços urbanos são mais intensas, os resíduos provenientes de demolições são muito mais frequentes.

Com relação à composição, Pinto (1986) diz que em média o que sai dos canteiros de obra é composto por 64% de argamassa, 30% de componentes de vedação (tijolo maciço, tijolo furado, telhas e blocos) e 6% de outros materiais, como concreto, pedra, areia, materiais metálicos e plásticos, conforme se observa na Tabela 2.8.

⁶ Instituída por meio da Lei Federal nº 12.035, de 2 de agosto de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

De acordo com Oliveira (2002), a composição básica do entulho de obras pode variar em função dos sistemas construtivos e dos materiais disponíveis regionalmente, da tecnologia empregada e qualidade da mão-de-obra existente.

Tabela 2.8 - Composição média dos materiais que saem dos canteiros de obra

Material	%	Material	%
Argamassa	63,67	Pedras	1,38
Tijolos maciços	17,98	Cimento amianto	0,38
Telhas, lajotas, cerâmica	11,11	Solo	0,13
Concreto	4,23	Madeira	0,11
Blocos de concreto	0,11	Papel	0,20
Ladrilhos de concreto	0,39	Matéria orgânica	0,20

Fonte: PINTO (1986)

A variabilidade pode ser confirmada na análise das composições médias obtidas no Brasil, conforme se observa na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Variabilidade da composição dos resíduos

Composição	São Paulo (%)	Salvador (%)
Concreto	8	53
Argamassa	24	-
Materiais cerâmicos	33	15
Solos	30	21
Materiais orgânicos	1	4
Outros	4	7

Fonte: BRITO (1999); CARNEIRO et al (2001) apud ÂNGULO (2000)

Keeler e Burke (2010) também citam, de acordo com pesquisa junto ao EPA⁷, a composição do lixo de construção e demolição, mostrada na Tabela 2.10.

Percebe-se que os resíduos de construção são compostos predominantemente por materiais minerais inertes como cerâmica, areia, pedra e aglomerantes, com presença de outros materiais que podem ser considerados impurezas (plástico, papel, madeira etc.).

⁷ U. S. EPA – Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos, in “*Construction and Demolition (C&D) Materials*”, <http://www.epa.gov/epawaste/conservation/rrr/imr/cdm/index.htm>

A grande maioria dos pesquisadores concorda em relação à falta de uniformidade na composição do entulho, deixando clara a necessidade da caracterização do resíduo para uso como agregado em outros materiais.

Tabela 2.10 - Composição do lixo de construção e demolição

Material	(%)
Concreto e calça	40% a 50%
Madeira	20% a 30%
Gesso cartonado	5% a 15%
Telhas e mantas asfálticas	1% a 10%
Metais	1% a 5%
Tijolos	1% a 5%
Plásticos	1% a 5%

Fonte: KEELER e BURKE (2010)

Quanto ao uso de resíduos em tijolos de solo estabilizado com cimento, Costa et al (2001) exemplificam que esta é uma situação em que o resíduo é aproveitado no mesmo setor que o produz, o que, além de contribuir para a redução dos impactos ambientais, reduz o custo da alvenaria. Além disso, coloca os geradores em conformidade com as resoluções sobre a produção e destinação dos resíduos.

A Resolução nº 448 do CONAMA (que altera alguns artigos da Resolução nº 307), de 19 de janeiro de 2012, já diz em seu Art. 4º:

Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, reutilização, a reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§1º Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos sólidos urbanos, em áreas de “bota fora”, em encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei.

Também diz, no Art. 10:

Os resíduos da construção civil, após triagem, deverão ser destinados das seguintes formas:

I – CLASSE A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de resíduos classe A de reservação da materiais para usos futuros.

Assim, é fundamental um estudo das características físico-químicas e das propriedades dos resíduos, por meio de ensaios e métodos apropriados para que tais informações deem

subsídio para a seleção das possíveis aplicações desses resíduos. Além disso, a compreensão do processo que leva à geração do resíduo fornece informações imprescindíveis à concepção de uma estratégia de reciclagem com viabilidade no mercado.

2.2.4 Avanços na tecnologia do solo-cimento

Segundo Casanova (2004), muitos resíduos minerais, industriais e agrícolas podem ser utilizados para aproveitamento na construção civil. Na fabricação de blocos e tijolos de solo-cimento podem ser utilizados: escória de alto-forno de aciaria (envelhecida); gesso químico; calcário semicalcinado; refugo de moagem de tijolos refratários.

A seguir são descritos alguns exemplos de pesquisas que demonstram avanços na tecnologia do solo-cimento com utilização de resíduos.

2.2.4.1 Tijolos de solo-cimento + cinzas de carvão mineral e casca de arroz

Da Fonseca (1993) estudou a composição de solos com adição de cimento e materiais silicosos, pozolanas do tipo cinza de carvão mineral e cinza de casca de arroz, para a produção de tijolos moldados em prensa manual, comumente usadas para confecção de tijolos de solo-cimento. A autora buscava redução do teor de cimento (mínimo de 10%) adotado na fabricação de tijolos de solo-cimento nas zonas próximas à cidade de Pelotas - RS, pela substituição parcial desse componente por cinza de carvão mineral (resíduo resultante da queima do carvão mineral) e cinza de casca de arroz (resíduo resultante da queima da casca de arroz).

Trabalhando com um solo arenoso (72% de areia, 24% de silte mais argila e aproximadamente 4% de pedregulho), adicionado ao cimento e cinzas, os resultados indicaram que os melhores traços de mistura foram: Traço 1 – 50% de cinza de carvão mineral + 40% de solo + 10% de cimento; Traço 2 – 25% de cinza de carvão mineral + 25% de cinza de casca de arroz + 40% de solo + 10% de cimento; Traço 3 – 40% de cinza de casca de arroz + 50% de solo + 10% de cimento. Com esses traços foram alcançados valores de resistência à compressão simples, aos 28 dias, da ordem de 8,5MPa, 5,3MPa e 4,1MPa, para os traços 1, 2 e 3 respectivamente,

muito superiores àqueles obtidos para tijolos de solo-cimento apenas (3,1MPa). A absorção de água, para todos os traços, esteve sempre abaixo de 20%, valor máximo indicado pela NBR 8491 (1984), utilizada pela autora.

2.2.4.2 Tijolos de solo-cimento + cinzas e fibras de bagaço de cana-de-açúcar

Da queima nas caldeiras do bagaço de cana-de-açúcar, para fins de geração de energia nas indústrias sucroalcooleiras, são produzidas cinzas como material residual. Do total de bagaço queimado, cerca de 2,5% se transformam em cinzas.

Cincotto (1983) analisou a atividade pozolânica⁸ da cinza de bagaço de cana-de-açúcar e concluiu que ela comporta-se como um cimento pozolânico, muito embora a viabilidade de seu uso dependa ainda de outras verificações e estudos.

Freitas (1996) estudou as cinzas resultantes da queima do bagaço de cana em mistura de solo-cimento visando a obtenção de tijolos para uso em construções. Em seu trabalho, a autora propõe que a fração utilizável compreenda cinzas semibeneficiadas – pelo simples peneiramento, para retirada do material não-queimado, utilizando-se a fração passante na peneira nº 16 (malha de 1,2 mm) – e cinzas beneficiadas, passadas primeiramente pelo moinho de bolas, seguido de peneiramento, utilizando-se fração passante na peneira nº 200 (malha de 0,075 mm).

Com as cinzas semibeneficiadas, Freitas (1996) adotou o método proposto pela ABCP em seu Boletim Técnico - BT-111 para a realização dos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água. Os tijolos foram confeccionados nos traços 1:0:12, 1:1:11, 1:2:10, 1:3:9 e 1:4:8 (cimento, cinza e solo), em volume.

⁸ Um material pozolânico é aquele que contém o composto mineral sílica na sua forma ativa (SiO_2). Conforme Grande (2003), a reação pozolânica consiste na combinação de partículas de sílica com hidróxido de cálcio (CH) liberado na hidratação do cimento, resultando em silicatos de cálcio hidratados, principais responsáveis pela resistência mecânica e durabilidade da matriz de cimento.

A autora relatou que, no preparo das misturas, o solo foi destorroado e peneirado em malha de 4,8 mm, e em seguida submetido à secagem natural; das cinzas, foi retirado o bagaço não-queimado, retido na peneira de abertura de 1,2 mm. O cimento, a cinza e o solo foram misturados manualmente até a obtenção de uma mistura de cor uniforme. Para verificação da umidade ideal, a água foi adicionada aos poucos, sendo em seguida, aplicado o teste de esfrelamento no chão (conforme indicado no BT-111). Após a adição de água, a mistura foi novamente peneirada para completa homogeneização dos componentes. Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de cinzas semibeneficiadas do bagaço de cana-de-açúcar

Traço	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)
1:0:12	2,2	20,0
1:1:11	2,6	19,5
1:2:10	3,1	19,2
1:3:9	3,6	18,6
1:4:8	1,9	22,3

Fonte: Adaptado de Freitas (1996)

Com as cinzas beneficiadas, Freitas (1996) pesquisou os seguintes traços 1:0:10, 1:0:11, 1:0:12, 1:1:10, 1:1:11, 1:1:12, 1:2:10, 1:2:11, 1:2:12 (cimento, cinza e solo), em volume. O procedimento adotado para a confecção dos tijolos foi semelhante ao anterior. Após as cinzas serem moídas em moinhos de bolas, separou-se a fração passante na peneira de malha de 0,075 mm. Os resultados destes ensaios são apresentados na Tabela 2.12.

Em suas conclusões, a autora ressaltou que os ensaios realizados com tijolos de solo-cimento e cinzas semibeneficiadas indicaram aumento de até 58% na resistência à compressão, ao mesmo tempo em que houve diminuição no grau de absorção de água em até 7%. Para os tijolos de solo-cimento e cinzas beneficiadas, a adição de cinzas foi satisfatória em todos os traços. Por outro lado, para cada relação solo-cimento, existe uma razão a partir da qual a adição de cinza no solo passa a ser excessiva e ocorreram decréscimos de valores nas propriedades mecânicas do material. Finalmente, a autora destaca que a fabricação de tijolos de solo-cimento com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar representa uma redução no

consumo de cimento e, conseqüentemente, no custo final do tijolo, tendo em vista que as cinzas utilizadas são um resíduo agroindustrial e o custo do solo é, também, inferior ao custo do cimento.

Tabela 2.12 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de cinzas beneficiadas do bagaço de cana-de-açúcar

Traço	Resistência à compressão simples aos 7 dias (MPa)	Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)
1:0:10	2,69	4,73	17,72
1:0:11	2,41	4,40	17,65
1:0:12	1,94	4,23	17,87
1:1:10	2,74	5,51	18,54
1:1:11	2,78	4,81	18,56
1:1:12	2,30	4,61	18,24
1:2:10	2,40	4,25	18,70
1:2:11	2,60	4,57	19,10
1:2:12	2,65	4,02	19,35

Fonte: Adaptado de Freitas (1996)

Mesa Valenciano (1999) também pesquisou os efeitos da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar sobre a resistência à compressão simples e absorção de água em tijolos confeccionados com solo melhorado com cimento.

As cinzas utilizadas foram moídas em moinhos de bolas e, posteriormente, passadas na peneira nº 100 (malha de 0,15 mm), antes de serem adicionadas a dois tipos de solo: um arenoso (16% de silte + argila) e outro argiloso (49% de silte + argila), em substituição parcial ao cimento Portland CP II-E-32, usado na quantidade de 3% em relação à massa de solo seco, para melhorar as características de resistência do material formado. Foram confeccionados tijolos com misturas de solo + 3% de cimento (80% de cimento + 20% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar), prensados em máquina manual e moldados no teor de umidade ótima de compactação.

Os tijolos foram curados em câmara úmida durante 7 dias e conservados ao ar livre e à sombra, até o momento da ruptura por compressão simples, nas idades de 7, 28 e 60 dias.

Alguns exemplares, após 7 dias de cura em câmara úmida, foram submetidos ao ensaio de absorção de água.

Os resultados mostraram que os tijolos moldados com solos arenoso ou argiloso, adicionados de 3% de cimento (com 20% de substituição por cinza de bagaço de cana-de-açúcar) apresentaram baixíssimos valores de resistência à compressão simples, em qualquer das idades consideradas, e valores satisfatórios de absorção de água (por volta de 13%) apenas para o solo arenoso (para o solo argiloso, o valor médio de absorção foi de, aproximadamente, 22%).

Tais resultados insatisfatórios foram atribuídos ao baixo teor de cimento empregado (3%), ainda assim substituído parcialmente por cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

A incorporação de fibras de bagaço de cana-de-açúcar ao solo com cimento foi estudada por Mesa Valenciano (1999), para obtenção de tijolos prensados em prensa manual. Foram utilizadas fibras do bagaço quimicamente “mineralizadas” com silicato de sódio a 5% e sulfato de alumínio a 30%, nas dosagens de 10% e 20% em relação à massa de solo seco. Ao solo arenoso empregado (16% de silte + argila) foram adicionados 3% de cimento Portland CP II-E-32.

Após moldagem e cura em câmara úmida durante 7 dias, os tijolos permaneceram ao ar livre e à sombra, até a ruptura nas idades de 7, 28 e 60 dias, no ensaio de resistência à compressão. Antes de serem rompidos, os tijolos foram imersos em água. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.13. Algumas unidades foram submetidas ao ensaio de absorção de água, que aos 7 dias, consistiu em colocar os tijolos em um recipiente com uma lâmina d'água de 3 cm de altura, durante 24 horas. Foram enxutos, pesados e, por diferença de peso, foi determinado o teor de umidade.

Tabela 2.13 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento com adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar

Traço	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	Absorção de água (%)
Solo+3% de cimento	0,35	0,79	13,09
Solo + 3% de cimento + 10% de fibras	0,46	1,69	22,75
Solo +3 % de cimento + 20% de fibras	0,50	1,89	30,05

Fonte: Adaptado de Mesa Valenciano (1999)

2.2.4.3 Tijolos de solo-cimento + entulho de construção

Costa et al (2001) pesquisou o uso de entulho bruto, produzido na construção de edifícios, reciclado e incorporado em tijolos de solo-cimento. Seu método de pesquisa consistiu em selecionar o solo, identificar a proporção adequada de cimento e, substituindo o solo por proporções variadas de entulho reciclado, determinar as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos componentes produzidos.

Para determinação do traço foram preparados tijolos com 10%, 12% e 14% de cimento, em massa, e determinadas a resistência mecânica e absorção de água. O traço que atendeu às condições de menor consumo de cimento, resistência à compressão maior ou igual a 2MPa e absorção de água menor ou igual a 20%, foi com a porcentagem de 12% de cimento. A partir daí, o solo foi substituído por entulho reciclado nas proporções de 25%, 50%, 75% e 85% em massa, denominados de T1-25%, T2-50%, T3-75% e T4-85%, respectivamente. Foram determinadas as propriedades dos tijolos produzidos de acordo com os procedimentos estabelecidos em normas e outras recomendações técnicas.

A partir dos resultados, os autores puderam comparar os valores obtidos dos tijolos com diferentes proporções de entulho reciclado com os dos tijolos de solo-cimento (0% de entulho) e avaliar a influência de sua utilização. A Tabela 2.14 mostra os resultados dos ensaios de absorção de água, resistência à compressão e perda de massa. A Tabela 2.15 apresenta as proporções de entulho reciclado que podem ser adicionadas ao solo estudado e que atendem aos critérios adotados.

Tabela 2.14 - Valores médios de resistência à compressão simples, absorção de água e perda de massa dos tijolos de solo e entulho estabilizados com cimento

Ensaio		Traços					Tendência
		TR-0%	T1-25%	T2-50%	T3-75%	T4-85%	
Absorção de água (%)		30	21	18	15	13	decrecente
Resistência à compressão (MPa)	Natural	1,5	2,5	3,0	3,0	3,6	crescente
	Pós-ciclo	-	2,7	3,2	3,5	4,8	crescente
Perda de massa (%)		-	8,7	9,3	9,5	11,8	crescente

Fonte: Adaptado de Costa et al (2001)

Tabela 2.15 - Porcentagens de entulho que atendem aos critérios de normas nos tijolos de solo e entulho estabilizados com cimento

Ensaio	Critério	Teor de entulho reciclado				
		0%	25%	50%	75%	85%
Absorção de água (%)	$\leq 20\%$					
Resistência à compressão (MPa)	$\geq 2,0$ MPa					
Perda de massa (%)	$\leq 10\%$	-				

Fonte: Adaptado de Costa et al (2001)

Os autores consideraram que, para o solo utilizado, a proporção de entulho reciclado deveria estar na faixa de 50% a 75% cujo limite inferior foi determinado pelos critérios de resistência à compressão e absorção de água e o limite superior pela durabilidade. Assim, sugerem que, para a máxima utilização de resíduo de entulho utilizado, a proporção deveria ser da ordem de 75%.

O estudo realizado definiu uma metodologia, porém, as características do solo e do entulho são diferentes nas diversas regiões e a proporção de substituição do solo pelo entulho reciclado deve ser analisada em cada caso.

2.2.4.4 Tijolos de solo-cimento + sílica ativa

Grande (2003), por meio de uma metodologia experimental, analisou vários aspectos de tijolos modulares compostos por misturas binárias e ternárias de solo-cimento e solo-

cimento-sílica, produzidos em prensa manual, com a finalidade de se obter parâmetros e diretrizes que proporcionassem melhor desempenho do material.

A sílica ativa, ou fumo de sílica, é a cinza produzida no refino das ligas ferrosilício, um subproduto, material altamente poluente, com características de extrema finura e leveza. Sua adição em concretos, argamassas e nas misturas de solo-cimento, proporciona aumento da resistência à compressão e tração, redução da fluência, melhoria da resistência à abrasão, menor permeabilidade, entre outros benefícios, na produção de componentes de alvenaria.

Foram realizados ensaios em corpos-de-prova cilíndricos de forma complementar, que resultaram no suporte para fundamentação de diversas avaliações sobre as composições dos traços utilizados na fabricação dos tijolos. Os traços, medidos em massa, para os tijolos de solo-cimento foram na ordem de 1:10, 1:7 (traço rico em cimento) e 1:13 (pobre em cimento). A sílica foi adicionada em substituição de 10% em relação à massa de cimento nos três traços.

O processo utilizado pelo autor para a fabricação dos tijolos consistiu na preparação do solo – destorroamento e peneiramento; preparação da mistura – adição do cimento (com e sem a sílica ativa) ao solo e homogeneização da mistura seca, adição de água e nova homogeneização para uniformizar a umidade; moldagem na prensa; cura e armazenamento – após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, foram mantidos úmidos por meio de excessivas moldagens.

Foram produzidos tijolos para verificação dimensional aos 7 dias, verificação da resistência à compressão nas idades de 3, 7, 14, 28, 63, 91 e 120 dias, ensaios de absorção de água aos 7, 28 e 91 dias e, por fim, ensaio de durabilidade com início no 91º dia.

Os resultados demonstraram que o teor de umidade foi tão importante quanto a porcentagem de cimento e que a adoção de sílica ativa na composição da mistura pode ser benéfica, desde que bem dosada e aliada a fatores de controle tecnológico. Os tijolos produzidos foram aprovados em relação aos requisitos de resistência e absorção de água nas normas técnicas disponíveis, apesar de tais normas não serem específicas para tijolos modulares.

2.2.4.5 Tijolos de solo-cimento + serragem de madeira

Silva (2005) estudou tijolos confeccionados com a mistura de solo-cimento e resíduos de madeira (serragem) com o objetivo de determinar a sua resistência em função das características do solo e da dosagem do resíduo.

Foram utilizados dois tipos de solos provenientes do campus da UFMG, cimento CP III-E-32-RS e sobras de serragem extraídas de peças de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. Esta serragem foi peneirada para que fossem utilizados apenas os resíduos contidos entre as peneiras com abertura de 4,75 mm e 2,0 mm.

Visando estabelecer limites de resistência, os solos naturais foram corrigidos de forma que fossem obtidos um solo mais arenoso e um solo mais argiloso e para a determinação da melhor mistura, foram incluídos teores diferenciados de resíduos – 0%, 0,5%, 1%, 2% e 3% – nos dois solos, onde foram avaliados corpos-de-prova, tijolos e prismas em ensaios de compressão simples e compressão diametral.

De acordo com a autora, mediante o estudo, foi possível a determinação da resistência das misturas solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira empregada nas formas acima, relacionando-as. Os valores da resistência à compressão nos tijolos mostraram-se maiores que os dos corpos-de-prova e prismas, independentemente do tipo de solo e da presença ou não de resíduos.

O estudo da inclusão dos resíduos de madeira no compósito mostrou, segundo Silva (2005) que a incorporação de serragem, mesmo em pequenas porcentagens, influencia na resistência de peças confeccionadas com a mistura solo-cimento-resíduos. Para solos mais granulares ou arenosos, ocorre o aumento da resistência até um certo teor. Para solos mais finos, no entanto, ocorre a redução da resistência. Além disso, observou-se o aumento da ductilidade do compósito que, sem resíduos apresentou um comportamento mais frágil, e com a inclusão dos mesmos tornou-se um pouco mais dúctil.

A inclusão de resíduos de serragem de madeira não proporcionou grande aumento na resistência. Apresentando valores bem abaixo dos exigidos pelas normas da ABNT, ficaram entre 0,33 e 1,26 MPa. Porém de acordo com a autora em sua análise, o tijolo de solo-cimento e resíduo de madeira mostra-se promissor concorrente aos tijolos convencionais, necessitando de mais pesquisas.

2.2.4.6 Tijolos de solo-cimento + resíduo de mármore e granito

Miranda (2007) pesquisou sobre a viabilidade técnica da aplicação de resíduo gerado no beneficiamento de mármore e granito em tijolos de solo-cimento, com a finalidade de melhorá-lo.

Na composição das misturas, o resíduo e o cimento foram adicionados em função da massa do solo. A adição do resíduo foi estudada nas porcentagens de 0%, 10%, 15% e 30%, enquanto o cimento foi adicionado nos teores de 5% (traço pobre), 10% e 15% (traço rico), perfazendo o estudo de 12 traços.

Foram realizados ensaios de caracterização química e física do solo e das misturas de solo com o resíduo de mármore e granito; ensaios de compactação, ensaios de absorção de água e resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos e de tijolos, para as idades de 7 e 28 dias.

Os resultados apresentados por Miranda (2007) mostram que os tijolos com os teores de 10% e 15% de cimento atenderam a todos os requisitos exigidos pelas normas, em todas as composições com resíduo, e que as resistências aumentaram à medida que o resíduo foi adicionado. As composições de tijolos moldados com 15% de cimento atingiram, em média, o valor mínimo de 4,5 MPa de resistência à compressão aos 28 dias, podendo ser utilizados, conforme a autora, em alvenaria estrutural. Já os tijolos confeccionados com 5% de cimento, para todos os teores de resíduo de marmoraria, não atenderam aos requisitos mínimos exigidos pelas normas técnicas.

2.2.4.7 Tijolos de solo-cimento + casca da semente do capim Braquiária

Silva (2007) estudou composições da mistura de solo-cimento com resíduos agrícolas. Teve como objetivo principal a determinação de teores máximos de cascas da semente do capim braquiária – *Brachiaria Brizantha*, a serem incorporados em substituição ao estabilizante (cimento Portland CP II-F-32), de forma a obter um tijolo mais leve, de menor condutividade térmica e sem o comprometimento das características mecânicas.

Na composição das misturas os teores de resíduo foram de 0%, 10%, 20%, 30% e 40% em substituição à quantidade de cimento usado na estabilização do solo, conforme a Tabela 2.16. Os traços T2 a T5 correspondem ao estudo, pelo mesmo autor, com cascas de arroz junto ao solo-cimento.

Tabela 2.16 - Traços estudados por Silva (2007)

Traços	Solo	10% de adições	
		Casca de braquiária	Cimento
T1	90%	0%	100%
T6	90%	10%	90%
T7	90%	20%	80%
T8	90%	30%	70%
T9	90%	40%	60%

Fonte: Adaptado de Silva (2007)

Foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos e tijolos para serem avaliados sob compressão simples (aos 7, 28 e 56 dias) e absorção de água (aos 7 dias). Os resultados sugerem, conforme Tabela 2.17, que os valores de resistência à compressão simples foram afetados negativamente pela presença do resíduo vegetal, e também pela diminuição gradativa do teor de cimento nos traços.

Os resultados encontrados – para os que continham o resíduo e para todas as idades ensaiadas – não atenderam às recomendações mínimas das normas técnicas, exceto quanto ao ensaio de absorção de água. E, segundo o autor, o fato se deu porque a estabilização do solo é afetada diretamente pelo teor de cimento presente na mistura solo-cimento-resíduo

vegetal. Assim, quanto menor a quantidade de cimento presente na mistura, menor será a estabilização química do solo.

Tabela 2.17 - Valores médios de resistência à compressão simples e absorção de água dos tijolos de solo-cimento e resíduo de sementes do capim braquiária

Traços	Resistência à compressão simples (MPa)			Absorção de água
	7 dias	28 dias	56 dias	7 dias
T1	0,62	2,90	2,83	12,74
T6	0,56	1,56	1,29	14,22
T7	0,35	0,99	0,76	17,36
T8	0,11	0,61	0,52	17,97
T9	0,11	0,54	0,52	17,48

Fonte: Adaptado de Silva (2007)

2.2.5 Resíduos de argamassa

Argamassa é o nome genérico atribuído a uma mistura de aglomerante, agregado miúdo e água. As principais características das argamassas – trabalhabilidade, resistência mecânica, aderência e durabilidade – variam em função da composição da mistura (RIBEIRO et al, 2002).

As argamassas utilizadas em obras são comumente compostas de areia natural lavada, e os aglomerantes são, em geral, o cimento Portland e a cal hidratada. Suas aplicações dependem da quantidade de aglomerante empregado, da granulometria da areia e da quantidade de água adicionada (RIBEIRO et al, 2002).

A cal proporciona elasticidade e capacidade de retenção de água (o que resulta em uma melhor aderência) (BARBOSA, 2004). Argamassas com cal são utilizadas para emboço e reboco, pela sua plasticidade (o que permite maiores deformações sem fissuração) e condições favoráveis de endurecimento. Encontram também aplicação no assentamento de alvenarias de vedação (FIORITO, 1994).

Já as argamassas de cimento são mais resistentes, porém de mais difícil trabalhabilidade. Utilizadas em alvenarias de alicerces, chapiscos, contrapisos, assentamento de alvenarias estruturais, dentre outros.

De acordo com a NBR 13529 (ABNT, 2013) a argamassa de assentamento e revestimento é a mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

As argamassas de assentamento e revestimento têm as funções de unir solidamente os componentes da alvenaria, absorver as deformações naturais, distribuir uniformemente as cargas e selar as juntas contra a penetração de água de chuva. Além disso, têm a função de aprimorar o acabamento e aumentar o conforto termoacústico de uma edificação.

O Artigo 3º da Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002) classifica os resíduos em classes, das quais as argamassas encontram-se na classe A, qualificados como sendo os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, os agregados (resíduos de construção, demolição, reformas, reparos, componentes cerâmicos e peças pré-moldadas). Na classe B estão os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros. A classe C é constituída pelos resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, que permitam a sua reciclagem/recuperação e, finalmente, na classe D estão os resíduos perigosos, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolição, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Assim, este foi o resíduo escolhido para a composição da mistura com solo-cimento na fabricação de blocos destinado à construção de moradias. Conforme mostrado na Tabela 2.8 (página 41), a quantidade de resíduos de argamassa de assentamento e revestimento gerado em canteiros de obra é da ordem de 64% (Oliveira, 2002).

CAPÍTULO 3

PRODUÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados na pesquisa, destacando-se a definição das dosagens das misturas de solo-cimento-resíduo; os procedimentos aplicados ao solo; os procedimentos aplicados ao resíduo e a caracterização físico-mecânica dos BTCs-SCR.

Os primeiros experimentos, de caracterização física, foram realizados na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG), no Laboratório de Mecânica dos Solos e no Laboratório de Materiais e Estruturas. Após a caracterização física do solo e do resíduo de argamassa de cimento e areia, os BTCs-SCR foram confeccionados na empresa Eco Faber – Tijolos Ecológicos, sob supervisão.

Para se alcançar os objetivos propostos na presente pesquisa, foram utilizados os materiais, e observados os métodos, descritos a seguir.

3.1 Materiais

O solo utilizado foi coletado em escavações de obras na cidade de Goiânia - GO. Considerou-se que fossem obras próximas aos laboratórios de ensaio e ao local de confecção dos BTCs. Foi extraído de profundidade superior a um metro, a fim de evitar-se uma coleta com excesso de matéria orgânica.

O resíduo de argamassa de cimento e areia foi coletado, em colaboração com os operários, por uma caçamba do tipo “tira-entulho”, do canteiro de obras de um edifício em construção do Setor Oeste, também da cidade de Goiânia - GO. A Fig. 3.1 mostra como o resíduo foi coletado em obra e a Fig. 3.2, o resíduo dentro da caçamba.



Fig. 3.1 - Coleta do resíduo em obra



Fig. 3.2 - Resíduo

O cimento utilizado nos ensaios de compactação, na fabricação dos tijolos e nos ensaios de resistência à compressão (na composição dos primas e no capeamento, antes do rompimento) foi o CP II-Z-32, de acordo com a NBR 11578 (ABNT, 1991), adquirido em estabelecimento comercial do ramo de materiais de construção. A Fig. 3.3 mostra o cimento utilizado na confecção dos blocos.

Em todo o experimento foi utilizada água potável tratada da rede pública de abastecimento da cidade de Goiânia – GO.



Fig. 3.3 - Cimento utilizado

3.2 Métodos

Adotou-se para o desenvolvimento da pesquisa um esquema experimental que consistiu na execução de cinco etapas principais, descritas a seguir.

3.2.1 Definição das dosagens das misturas de solo-cimento-resíduo

A definição das dosagens teve como objetivo maximizar a quantidade de resíduo em substituição ao solo (matéria-prima) ao mesmo tempo em que optou-se por manter-se fixa a porcentagem de cimento utilizada em cada unidade de BTC.

Foram utilizadas as porcentagens de 20%, 40% e 60% de resíduo em substituição ao solo (valores intermediários aos utilizados quando no curso de mestrado, para comparação e complementação dos dados) e também, como forma de corrigi-lo, uma vez que o resíduo possui características semelhantes ao um solo arenoso.

Para a quantidade de cimento, optou-se por mantê-la fixa na proporção de 12,5% em massa, o que corresponde ao traço em volume de 1:8. De acordo com literatura existente sobre tijolos de solo-cimento, 10% de cimento já seria considerado ideal, porém optou-se por uma quantidade maior devido ao costume da região (porcentagem comumente utilizada em Goiânia, e entorno) e também, como forma de diversificação da pesquisa (ainda para comparação com os resultados obtidos nos ensaios realizados para a dissertação), a fim de se

verificar o comportamento do bloco quanto ao aumento da resistência sem a variação deste parâmetro. Portanto, para a realização da pesquisa foram definidas as dosagens para a confecção dos BTCs, conforme apresenta-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Dosagens das misturas de solo, cimento e resíduo

BTC de SCR	Solo (%)	Cimento (%)	Resíduo (%)
Traço 1 SCR₀	100	12,5	0
Traço 2 SCR₂₀	80	12,5	20
Traço 3 SCR₄₀	60	12,5	40
Traço 4 SCR₆₀	40	12,5	60

3.2.2 Procedimentos aplicados ao solo

O solo, em quantidade separada para os ensaios de caracterização, foi levado para o Laboratório de Mecânica dos Solos da EEC/UFG, passado na peneira nº 4, mantido ao ar livre e protegido de precipitações, como ventos e chuvas.

O método para preparação das amostras de solo seguiu as etapas descritas na norma NBR 6457 (ABNT, 1986): Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, utilizando-se a preparação com secagem prévia. O solo foi seco ao ar livre, para que a umidade chegasse próxima à higroscópica; foram desmanchados os torrões, evitando-se a quebra dos grãos; e a amostra, homogeneizada. Com o auxílio do repartidor, foi feito o quarteamo⁹, até que se obtivessem as quantidades necessárias a cada ensaio de caracterização. As Fig. 3.4 e 3.5 mostram o preparo do solo.



Fig. 3.4 - Preparação do solo

⁹ Processo descrito em norma em que, após o material passar pelo repartidor e ser homogeneizado, é retirada $\frac{1}{4}$ da amostra total, de forma uniforme.



Fig. 3.5 - Quarteamento do solo e determinação da umidade

Em seguida, foram realizados os seguintes ensaios:

- Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, NBR 6508 (ABNT, 1984). Este ensaio teve como objetivo determinar a massa específica do solo, definida como sendo a relação entre o peso do sólido em certo volume, por meio do uso de picnômetros.
- Solo – Análise granulométrica, NBR 7181 (ABNT, 1984). Realizada pela combinação de sedimentação e peneiramento (Fig. 3.6), este ensaio determina a curva de distribuição granulométrica do solo, classificando-o quanto à sua classe textural.
- Solo – Determinação do limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 1984).
- Solo – Determinação do limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 1984). Estes dois últimos caracterizam o solo quanto aos índices básicos representativos da plasticidade.



Fig. 3.6 - Leituras da sedimentação (esq.); Determinação da umidade (dir.).

3.2.3 Procedimentos aplicados ao resíduo

O resíduo de argamassa de cimento e areia foi coletado do canteiro de obras de um edifício em construção e levado para o canteiro de entulhos da empresa Projeto João de Barro, para que fosse triturado e peneirado, a fim de se eliminarem os torrões e grãos com diâmetros superiores a 4,8mm, granulometria adequada, assim como a do solo, para a confecção dos BTCs. A Fig. 3.7 mostra o resíduo antes e depois do processo de britagem. Depois disso, a quantidade necessária para os ensaios de caracterização também foi levada para o Laboratório de Mecânica dos Solos, da EEC/UFG. O restante foi levado para a Eco Faber – Tijolos Ecológicos, onde os BTCs foram fabricados.



Fig. 3.7 - Resíduo de argamassa antes e depois da britagem

Para a caracterização física do resíduo, considerou-se o mesmo como um tipo de solo e o procedimento de ensaios foi semelhante ao aplicado ao solo. Foi realizada a preparação das amostras do resíduo conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 1986), mostradas na Fig. 3.8, e os ensaios executados de acordo com as prescrições das normas a seguir:

- Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, NBR 6508 (ABNT, 1984). Este ensaio teve como objetivo determinar a massa específica do resíduo.
- Solo – Análise granulométrica, NBR 7181 (ABNT, 1984). Realizada pela combinação de sedimentação e peneiramento, para determinar a curva de distribuição granulométrica do resíduo.
- Solo – Determinação do limite de liquidez, NBR 6459 (ABNT, 1984).

- Solo – Determinação do limite de plasticidade, NBR 7180 (ABNT, 1984). Estes dois últimos, para caracterizar o resíduo quanto aos índices básicos de plasticidade.
- Análise química completa, para determinação dos componentes presentes no resíduo.



Fig. 3.8 - Preparação do resíduo

3.2.4 Procedimentos aplicados aos traços definidos

Passaram também pela caracterização física, os traços definidos pelo estudo das dosagens, nas diferentes porcentagens de solo - cimento e resíduo.

Após a preparação das amostras de solo e resíduo, e também separado o cimento, foram preparadas as misturas compostas por solo sem adição de resíduo (Traço 1 – SCR₀), e nas substituições do solo por resíduo nas proporções de 20% (Traço 2 – SCR₂₀), 40% (Traço 3 – SCR₄₀) e 60% (Traço 4 – SCR₆₀), com emprego do teor de cimento em 12,5% em relação à massa da mistura de solo com resíduo, totalizando 4 dosagens.

Foram realizados os ensaios de análise granulométrica, determinação do índice de liquidez e de plasticidade, de acordo com as normas anteriormente citadas e, além destes, foi realizado o ensaio de compactação, de acordo com o norma NBR 12023 (ABNT, 2012): Solo-cimento – Ensaio de compactação, visando determinar os valores de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima, necessários para a confecção dos BTCs. Foi utilizado o método “A”,

usando material que passa na peneira nº 4, para solos com 100% de partículas de tamanho menor do que 4,8 mm, em cilindro pequeno, com 3 camadas e dando 26 golpes por camada com soquete pequeno.

Após a realização deste ensaio, foi possível estabelecer, para cada composição, o percentual de água ideal da mistura, com o qual se alcançam os maiores valores de resistência à compressão simples. A Fig. 3.9 mostra o cilindro sendo retirado do molde, com uso do extrator de corpo-de-prova cilíndrico.



Fig. 3.9 - Cilindro moldado durante o ensaio de compactação

3.2.5 Produção e caracterização físico-mecânica dos BTCs-SCR

Após a caracterização do solo, do resíduo e das misturas de solo-cimento-resíduo, foram preparadas as misturas para a confecção dos BTCs, na Eco Faber – Tijolos Ecológicos.

A empresa disponibilizou a prensa hidráulica da marca Eco Máquinas, modelo Eco Premium 2600 CH/MA (Fig. 3.10) para a produção de um bloco por vez, de dimensões 12,5 cm x 25 cm x 7,5 cm (largura x comprimento x espessura) e encaixes nos furos internos de 6 cm de raio que permitem, apesar das dimensões não serem normatizadas, a amarração direta entre componentes na execução da alvenaria.

De acordo com o fabricante, os blocos de encaixes universais de solo-cimento vazados são indicados para edificações em geral. Sua capacidade de produção é de até 3.500 unidades para um turno de oito horas sem interrupções. O rendimento é de 54 unidades/m², prensados numa tensão de compactação equivalente a 6 toneladas.

Os blocos referentes a cada tratamento foram moldados de acordo com a norma NBR 10833 (ABNT, 2012) que fixa as condições exigíveis para a produção de tijolos maciços e blocos vazados de solo-cimento em prensas hidráulicas.

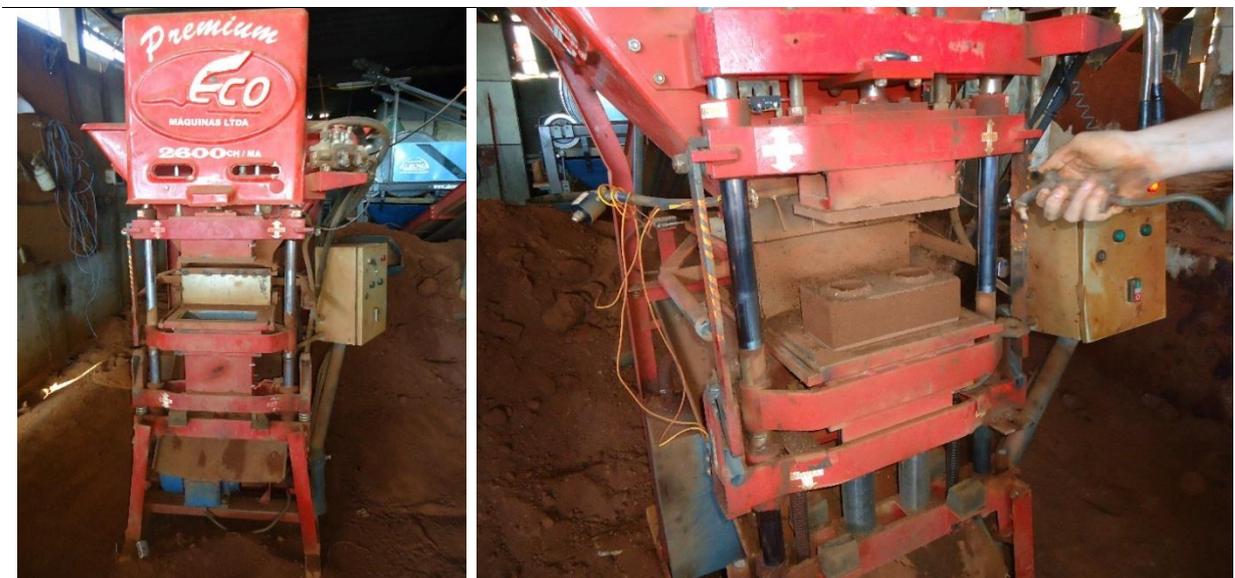


Fig. 3.10 - Prensa hidráulica Eco Premium 2600 CH/MA - Eco Máquinas para fabricação de blocos de terra compactada e tijolos de solo-cimento

Os materiais foram colocados na prensa por meio de um misturador mecânico. Primeiramente foi colocado o solo e iniciada a rotação do misturador. Logo depois o resíduo e, em seguida, o cimento. Esta mistura dos materiais secos é feita por aproximadamente cinco minutos, para a homogeneização da massa. Após este período, a água é adicionada aos poucos, tendo como referência o valor de umidade ótima determinado no ensaio de compactação, porém também considerando a umidade necessária para o perfeito funcionamento da prensa. A massa continua em rotação por aproximadamente três minutos para adquirir uniformidade e, após o desligamento do misturador, é levada até a prensa por uma esteira rolante para a compactação e moldagem do bloco.

A primeira constatação feita na moldagem dos blocos foi que, em função do equipamento utilizado, o teor de umidade da mistura necessário para a obtenção de boa qualidade dos blocos é inferior ao teor de umidade ótima verificada no ensaio de compactação normal Proctor. Por exemplo, nas tentativas de se moldar blocos no traço SCR₆₀, de umidade ótima fixada em 16,1% conforme teor obtido pelo ensaio de compactação, os blocos, embora apresentassem boa condição na moldagem, não permitiram sua manipulação durante a retirada do compartimento de moldagem da prensa: destorroavam-se ou quebravam-se facilmente.

A fim de se evitar a quebra dos blocos optou-se por adicionar porcentagem menor de água à mistura e foi-se verificando com qual teor o equipamento apresentava maior facilidade e eficiência na produção, medida por meio da quantidade de material calculada para produzir um certo número de blocos e da apuração de qual teor de água na mistura apresentava menor desperdício.

Após a compactação do bloco, o mesmo foi retirado e colocado sobre esteiras para o processo de cura. Esta foi feita após 6 horas da moldagem e durante os 7 primeiros dias. Para que os blocos permanecessem úmidos, a aspersão de água foi realizada a cada 2 horas, no período diurno, até que se completassem os 7 dias de idade; permaneceram protegidos do vento e da insolação direta, nas condições normais de armazenamento do local, sem qualquer processo de umidificação. A Fig. 3.11 apresenta o blocos após a moldagem, antes do processo de cura (esq.) e mostra os blocos durante a cura (dir.). Não foram registradas fissuras ou outros problemas nos blocos que fossem decorrentes do processo de cura adotado.

O controle de umidade é determinante na qualidade de materiais à base de solo-cimento. No laboratório, esse controle é relativamente simples, pois o solo encontra-se seco e as condições de trabalho e armazenamento dos materiais garantem a continuidade das características do componente. No campo, esse controle deve ser sistematicamente realizado a cada dosagem de material antes de se realizar a mistura.



Fig. 3.11 - Blocos moldados (esq.); Cura dos blocos (dir.)

Para os procedimentos dos ensaios de absorção, de resistência à compressão simples e de durabilidade, os BTCs foram levados ao Laboratório de Materiais e Estruturas na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (EEC/UFG). A Tabela 3.2 apresenta a quantidade total de blocos moldados e ensaiados.

Tabela 3.2 - Quantidade total de blocos moldados e ensaiados

BTC de SCR		Quantidade de blocos				Total
		Compressão		Absorção	Durabilidade	
		7 dias	28 dias	7 dias	7 dias	
Traço 1	SCR₀	6	7	3	3	19
Traço 2	SCR₂₀	6	7	3	3	19
Traço 3	SCR₄₀	6	7	3	3	19
Traço 4	SCR₆₀	6	7	3	3	19
Total		24	28	12	12	76

3.2.5.1 Ensaio de absorção

Os ensaios de absorção de água permitem determinar, a partir da diferença entre massa seca e massa úmida dos blocos, a capacidade do material em reter água, o que refletirá, posteriormente, na sua durabilidade. Os valores médios de absorção, de acordo com as prescrições da NBR 10834 (ABNT, 2012), devem ser inferiores a 20%.

Decorridos sete dias de cura, o ensaio de absorção foi realizado de acordo a metodologia da norma NBR 10836 (ABNT, 2013) a qual determina que os blocos sejam levados à estufa, com temperatura entre 105° e 110°, até a constância de peso, para determinação da massa seca.

Os blocos foram pesados e, em seguida, colocados imersos em um tanque de água por um período de 24 horas. Após esse período, foram enxutos superficialmente e novamente pesados, para a determinação da massa saturada em gramas.

A diferença percentual entre a massa saturada e a massa úmida do bloco corresponde ao valor de sua capacidade parcial de absorção de água, já a diferença percentual entre a massa saturada e a massa seca corresponde ao valor de sua capacidade total de absorção. Os valores individuais de absorção de cada bloco, expresso em porcentagem, foram obtidos pela Equação 3.1, enquanto que a absorção média foi determinada pela média aritmética de três repetições.

$$A = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

M_1 = massa do bloco seco em estufa (g);

M_2 = massa do bloco saturado (g);

A = absorção de água (%).

3.2.5.2 Ensaio de resistência à compressão simples

A resistência à compressão é determinada por meio de ensaios padronizados de curta duração (carregamento rápido), de acordo com as prescrições da NBR 10836 (ABNT, 2013) para blocos de solo-cimento. Os valores médios de resistência à compressão devem ser, como determina a NBR 10834 (ABNT, 2012), superiores a 2,0 MPa.

A determinação da resistência à compressão simples dos blocos foi realizada de acordo com os métodos da norma NBR 10836 (ABNT, 2013), após os mesmos atingirem as idades de 7 e 28 dias. Foi calculada individualmente para cada bloco, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do mesmo. A resistência média foi determinada pela média

aritmética de 6 repetições para a idade de 7 dias e 7 repetições para a idade de 28 dias. De acordo com a norma NBR 10833 (ABNT, 2012), seriam necessárias apenas 3 repetições para cada idade.

Os blocos foram serrados ao meio perpendicularmente à maior dimensão com uma serra elétrica de disco (Fig. 3.12, esq.). As duas metades invertidas foram superpostas e unidas por uma fina camada de argamassa de cimento, aplicada com o auxílio de uma espátula. Após o endurecimento na pasta de ligação, procedeu-se ao capeamento e regularização das faces inferior/superior de forma a manter seu paralelismo, com a mesma pasta de cimento (Fig. 3.12, dir.). Os furos centrais dos prismas não foram preenchidos. Após o completo endurecimento da argamassa, os prismas foram imersos em água durante 24 horas e enxutos antes de serem rompidos. A Fig. 3.13 apresenta os prismas antes da ruptura (esq.) e depois da ruptura (dir.), na máquina universal.



Fig. 3.12 - Blocos a serem serrados ao meio (esq.); Prisms após o capeamento (dir.)



Fig. 3.13 - Primas antes da ruptura (esq.); Primas depois do rompimento (dir.)

3.2.5.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

No que se refere à durabilidade, as exigências destinam-se a garantir a conservação das características das estruturas ao longo de toda a sua vida útil, sendo que, durante esse período, não devem ser necessárias medidas extras de manutenção ou reparo das estruturas.

Na consideração da durabilidade devem ser levados em conta os mecanismos mais importantes de deterioração, dentre eles incluem-se a lixiviação e a expansão provocadas pela ação da água, solos contaminados e expansões decorrentes de reações químicas. Além disso, há vários mecanismos de deterioração relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, etc. Por último, devem-se considerar as ações físicas e químicas relacionadas à agressividade do ambiente (ARAUJO, 2003).

A norma NBR 13554 (ABNT, 2012) descreve a metodologia para avaliação do comportamento de corpos-de-prova de solo-cimento, submetidos a ciclos de molhagem e secagem, para determinação da perda de massa, variação de umidade e variação de volume. Segundo o

CEPED (1984) recomenda-se, para dosagens de solo-cimento, a perda de massa de 10% ao final do 6º ciclo de imersão e secagem.

Conforme as prescrições da norma acima citada, após 7 dias de cura em câmara úmida, desde a data da moldagem, 3 blocos de cada traço, perfazendo um total de 12 unidades, foram submetidos a 6 ciclos de molhagem por imersão e secagem em estufa. Cada ciclo teve duração de 48 horas, cujo início se deu com a imersão dos blocos em água durante 5 horas e permanência em estufa com temperatura de 70°C durante 42 horas. Após retirados da estufa, os blocos ficam sob temperatura ambiente por 1 hora para resfriamento e posterior pesagem. A Fig. 3.14 apresenta os blocos na estufa (esq.) e em imersão (dir.).

Decorrido o período da secagem, procedeu-se à pesagem dos blocos e, por considerar que as solicitações de abrasão superficial em paredes são menos severas que as previstas para outros usos de solo-cimento (para pavimentação, por exemplo), modificou-se o procedimento de ensaio, não empregando-se o processo de escovação ao final de cada ciclo.



Fig. 3.14 - Blocos na estufa (esq.); Blocos em imersão (dir.)

Ao término do 6º ciclo de molhagem e secagem, os blocos foram colocados em estufa, com temperatura de 105°C, até a constância de massa. O cálculo do percentual de perda de massa foi obtido através da Equação 3.2.

$$P_m = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

P_m = perda de massa dos blocos (%);

P_1 = massa seca inicial do bloco (g);

P_2 = massa seca final do bloco (g).

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados encontrados nos ensaios executados e descritos no capítulo anterior, para os materiais, individualmente, e para o bloco de solo-cimento-resíduo já como componente construtivo, o bloco prensado.

4.1 Caracterização físico-química dos componentes

A Tabela 4.1 sintetiza os resultados dos ensaios de caracterização física aplicados ao solo, ao resíduo e às misturas de solo com resíduos nos traços de 1 a 4.

Tabela 4.1 - Resumo das características físico-químicas do solo, resíduo e solo com resíduo

Parâmetros		Solo	Resíduo	Solo+20% resíduo	Solo+40% resíduo	Solo+60% resíduo
Distribuição granulométrica (%)	Pedregulho (>4,8mm)	0	0	0	0	0
	Areia (0,05-4,8mm)	53,51	96,62	62,85	70,60	76,57
	Silte (0,005-0,05mm)	9,16	2,25	10,08	10,11	8,49
	Argila (<0,005mm)	37,33	1,13	27,07	19,29	14,97
	Porcentagem passante na peneira nº200 (0,074mm)	61,52	7,22	50,52	42,11	28,82
Índices físicos (%)	Umidade natural	6,74	3,93	3,53	3,01	2,42
	Massa específica dos grãos (g/cm ³)	2,70	2,58	2,67	2,65	2,62
	LL	28,0	NP	27,73	28,0	27,42
	LP	24,2	NP	19,84	18,2	18,97
	Índice de plasticidade (IP)	3,8	NP	7,89	9,8	8,45
Classificação	Descrição visual	Argila	Areia	Argila	Areia/argil.	Areia/argil.
	Unificada	Argila	Areia	Argila	Areia	Areia
	AASHTO	A4	A3	A4	A4	A2

Assim, segundo os critérios da NBR 10833 (ABNT, 2012), o solo e as misturas de solo com resíduo são adequados para a confecção de blocos. A descrição das características dos parâmetros de caracterização é feita a seguir.

4.1.1 Análise granulométrica e classificação

A análise granulométrica, por peneiramento e sedimentação, foi realizada com o objetivo de se determinar a distribuição em tamanho das partículas do solo e do resíduo em estudo, de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT, 1984). Segundo Pinto (2006):

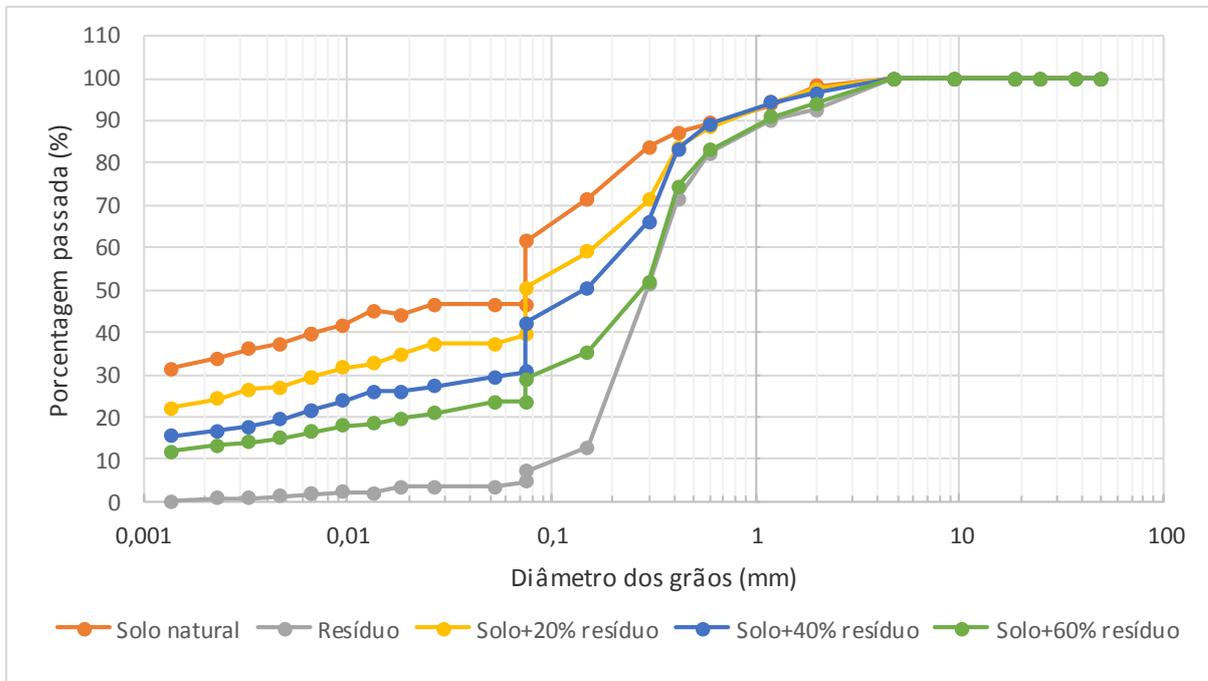
A importância da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é o de poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema (p.61).

A classificação do solo, do resíduo e das misturas de solo com resíduo foi feita de acordo com as recomendações deste autor, pela Classificação Unificada e também pelo Sistema Rodoviário de Classificação, descritas na Tabela 4.1.

O solo é classificado como sendo argiloso de baixa compressibilidade e de granulação fina, com 37% de argila, 9% de silte e 53% de areia, classe A4. O resíduo apresenta granulação grossa, classificado como areia, classe A3. As misturas com 20% e 40% de resíduo ficaram dentro dos limites de solo argiloso de baixa compressibilidade, já a mistura com 60% de resíduo, também possui baixa compressibilidade, porém é classificado com areia de classe A2. Segundo a literatura, os solos mais apropriados para a composição solo-cimento são os que possuem teor de areia entre 45% e 60%, assim, optou-se pela não correção do solo com areia a fim de observar se o próprio resíduo possibilitaria esta correção, uma vez que sua principal característica é a granulometria de composição arenosa.

Considera-se adequado para produção de blocos de solo-cimento, aqueles solos que possuam, segundo a NBR 10833 (ABNT, 2012), 100% dos grãos passando na peneira 4,8 mm (nº4) e de 10% a 50% passando na peneira 0,075 mm (nº200). A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas do solo, do resíduo e das misturas; ela apresenta, juntamente com os dados da Tabela 4.1, que o solo, o resíduo e as composições não têm grãos maiores que 4,8mm e

que, à medida que o resíduo foi incorporado ao solo, o percentual que passa pela peneira 0,075mm permaneceu dentro do intervalo de 10% a 50%; portanto, foram considerados satisfatórios para a composição de blocos.



4.1.2.2 Limites de consistência

Os limites de liquidez e plasticidade foram determinados obedecendo a NBR 6459 (ABNT, 1984) e a NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente. Na Tabela 4.1 são apresentados os valores dos limites de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e índice de plasticidade (IP) do solo e das composições de solo com resíduo.

O resíduo, considerado um tipo de solo arenoso, foi considerado “não plástico” (NP). Conforme Brady (1989), as partículas de areia não possuem a capacidade de serem moldadas, não apresentando plasticidade, ao contrário do que ocorre com as argilas.

De acordo com Lopes (2002), a plasticidade de um solo é influenciada por sua textura e pela natureza mineralógica das argilas presentes. Quanto maior o índice de plasticidade mais o material estará sujeito às variações dimensionais, resultantes do inchamento do solo quando úmido e de sua retração, quando seco. Analogamente, de acordo com Pinto (2006), quanto maior for o limite de liquidez, mais compressível (sujeito a recalques) será o solo.

Para o solo foram obtidos os valores de 28% para o LL e 24,2% para o LP. O índice de plasticidade IP obtido foi de 3,8%, correspondendo à diferença numérica entre os valores dos limites de liquidez e plasticidade. Os resultados mostram que a presença do resíduo promoveu a redução dos limites de liquidez e plasticidade, e o aumento do índice de plasticidade, ficando na faixa de 7 a 9, devido às características de solo arenoso. Porém, de acordo com a norma NBR 10833 (ABNT, 2012), considera-se adequado para produzir blocos de solo-cimento, solos que possuam limite de liquidez $\leq 45\%$ e índice de plasticidade $\leq 18\%$. Assim sendo, o solo natural e as misturas apresentaram valores satisfatórios quanto aos índices físicos.

4.1.2.3 Composição química do solo

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados da análise quanto aos elementos e compostos químicos do solo.

Tabela 4.2 - Análise química do solo

Propriedades determinadas – Análise química		
Determinação		Amostra
Al ₂ O ₃	%	13,5
Fe ₂ O ₃	%	12,0
SiO ₂	%	5,8
TiO ₂	%	2,4
CaO	%	0,10
MgO	%	0,03
Na ₂ O	ppm	23
K ₂ O	ppm	140
SO ₃	ppm	80
Argila	%	37,3
Silte	%	9,1
Areia	%	53,5
Cu(Mehl)	mg/dm ³	1,1
Fe(Mehl)	mg/dm ³	86,5
Mn(Mehl)	mg/dm ³	15,5
Zn(Mehl)	mg/dm ³	2,0
M.O.	%	0,1
pH	Ca ₂ Cl ₂	6,8
P(Mehl)	mg/dm ³	3,2
K	mg/dm ³	30
Ca	cmolc/dm ³	3,6
Mg	cmolc/dm ³	0,2
H+Al	cmolc/dm ³	1,1
CTC	cmolc/dm ³	5,0
V	%	77,9
Ca/Mg	-	18,0
Mg/K	-	2,6
Ca/K	-	46,9
Ca/CTC	%	72,3
Mg/CTC	%	4,0
K/CTC	%	1,5

4.1.2.4 Composição química do resíduo

Na Tabela 4.3 são apresentadas as propriedades determinadas a partir da análise química do resíduo de argamassa de cimento e areia. Comparando-se os elementos das Tabelas 4.2 e 4.3 observa-se que todos os compostos presentes no solo estão também presentes no resíduo, exceto o dióxido de titânio (TiO₂) e trióxido de enxofre (SO₃).

Tabela 4.3 - Análise química do resíduo

Propriedades determinadas Análise química		Valores encontrados (%)	Limites não encontrados (%)
Perda ao fogo		13,64	≤
Óxido de magnésio (MgO)		2,28	≤
Dióxido de Silício (SiO ₂)		59,91	≥
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		2,96	=
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		4,97	=
Óxido de cálcio (CaO)		13,30	=
Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,57	=
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,78	=
	Equiv. Alcalino	1,09	≥
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,07	=
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,04	=
	Equiv. Alcalino	0,10	=
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)		0,0	=

4.1.2.5 Composições física e química do cimento

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 são apresentadas as propriedades determinadas a partir da análise física e química do cimento. Comparando-se seus resultados observa-se que todos os compostos presentes no resíduo estão também presentes na composição do cimento. Este era o esperado, uma vez que o resíduo é proveniente da argamassa que contém cimento.

Tabela 4.4 - Análise física do cimento

Cimento tipo CP II Z-32			
Propriedades determinadas Análise física		Valores encontrados (%)	Limites
Massa específica (g/cm ³)		2,97	-
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	0,4	≤ 12
	Resíduo na peneira 325 (%)	-	≤-
	Área específica (cm ² /g)	5490	≥ 2600
Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	20,7	≥ 10
	7 dias	27,6	≥ 20
	28 dias	35,8	≥ 32 e ≤ 49

Tabela 4.5 - Análise química do cimento

Cimento tipo CP II Z-32		
Propriedades determinadas Análise química	Valores encontrados (%)	Limites não encontrados (%)
Perda ao fogo	11,45	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	1,99	≤ 2,5
Trióxido de enxofre (SO ₃).	3,09	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)	1,23	≤ 6,5
Dióxido de Silício (SiO ₂)	17,11	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,42	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,65	-
Óxido de cálcio (CaO)	60,64	-
Óxido de cálcio livre (CaO)	2,3	-
Álcalis totais	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,09
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,22
	Equiv. Alcalino	0,23
Álcalis solúveis em água	Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,01
	Óxido de potássio (K ₂ O)	0,14
	Equiv. Alcalino	0,10
Sulfato de cálcio (CaSO ₄)	5,25	-

4.1.3 Ensaio de compactação

A finalidade deste ensaio é determinar a curva de compactação e a massa específica aparente seca máxima em função da umidade da amostra. Tal curva indica o teor de umidade ótima para a compactação da mistura, quando submetida a uma energia constante, a fim de se alcançarem valores satisfatórios de resistência à compressão simples.

Os valores da massa específica seca aparente máxima e da umidade ótima de compactação, fornecidos pelos ensaios de compactação normal Proctor, para as misturas de solo-cimento e solo-cimento resíduo, são mostrados na Tabela 4.6. O comportamento das curvas de compactação é mostrado na Fig. 4.2. Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos da norma NBR 12023 (ABNT, 2012).

Verifica-se pelos resultados que, à medida que se aumentou a porcentagem do resíduo na mistura, houve aumento nos valores de massa específica aparente seca máxima e a redução dos valores de umidade ótima. Tal fato era esperado, pois, para uma mesma quantidade de

cimento, houve aumento da granulometria das misturas: solos mais densos (menos porosos) e mais secos.

Tabela 4.6 – Valores médios do ensaio de compactação normal

BTC de SCR		Compactação normal Proctor	
		Massa específica aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)
Traço 1	SCR ₀	1,690	18,8
Traço 2	SCR ₂₀	1,690	18,0
Traço 3	SCR ₄₀	1,715	16,1
Traço 4	SCR ₆₀	1,710	16,1

Além da natureza e do teor de resíduo acrescentado, também a energia de compactação, o teor de umidade e a textura do solo são fatores que influenciam os resultados de compactação do solo. De acordo com Houben e Guillaud (1994), à medida que se aumenta a energia de compactação, cresce a massa específica aparente seca e reduz-se a umidade ótima. Geralmente, com o aumento da energia de compactação, as curvas obtidas pelo ensaio Proctor são mais pronunciadas, enquanto que são mais achatadas quando a energia de compactação é menor.

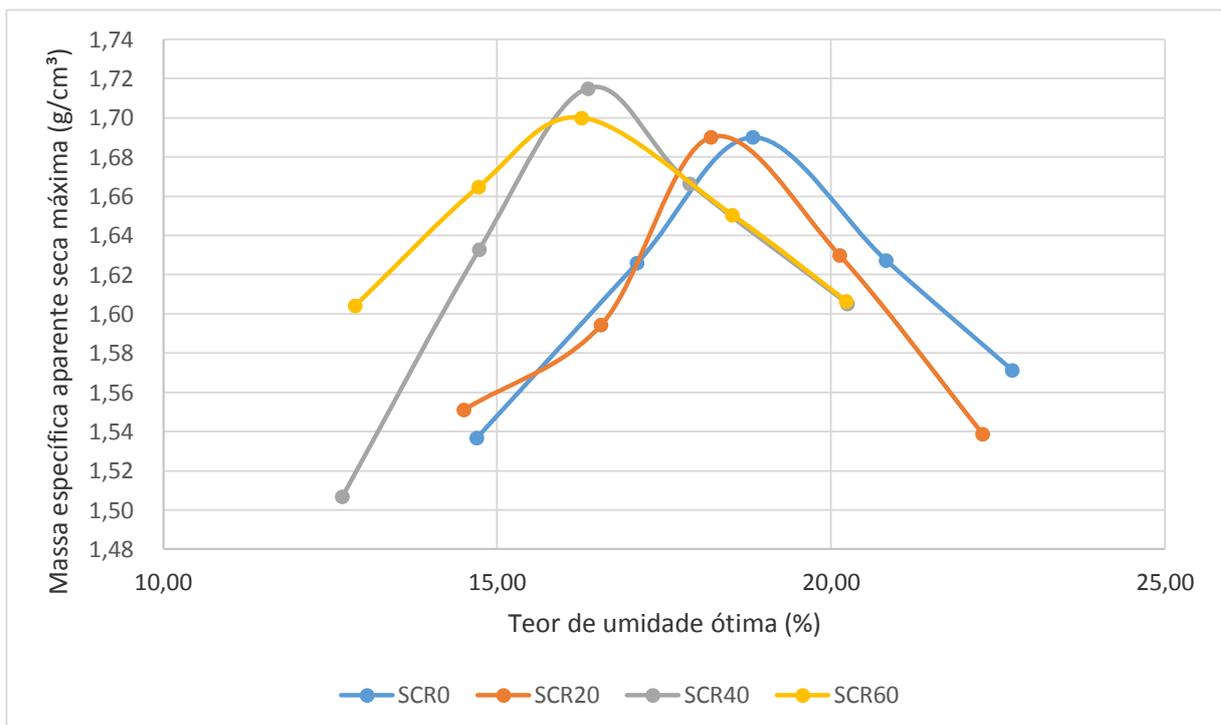


Fig. 4.2 - Curvas de compactação dos traços SRC₀, SCR₂₀, SCR₄₀ e SCR₆₀

Um baixo teor de umidade significa dificuldade na compactação do solo devido ao volume dos espaços vazios. O aumento do teor de umidade lubrifica o solo e o torna mais “trabalhável”. Neste aspecto, a incorporação do resíduo nas porcentagens de 40% e 60% reduziu o valor da umidade ótima em 2%, em comparação ao solo sem resíduo e à mistura de solo com 20% de resíduo.

De acordo com Lopes (2002), quando a distribuição em tamanho das partículas do solo é uniforme, a porosidade é mais alta e a sensibilidade à umidade é reduzida, apresentando então uma curva de compactação mais achatada, característica de solos finos. Quando a distribuição em tamanho das partículas é mais ampla e o solo é bem graduado, a curva será mais pontiaguda, características de solos de textura arenosa, como se observa nas curvas dos traços SCR₂₀, SCR₄₀ e, principalmente, SCR₆₀.

4.2 Caracterização físico-mecânica dos blocos

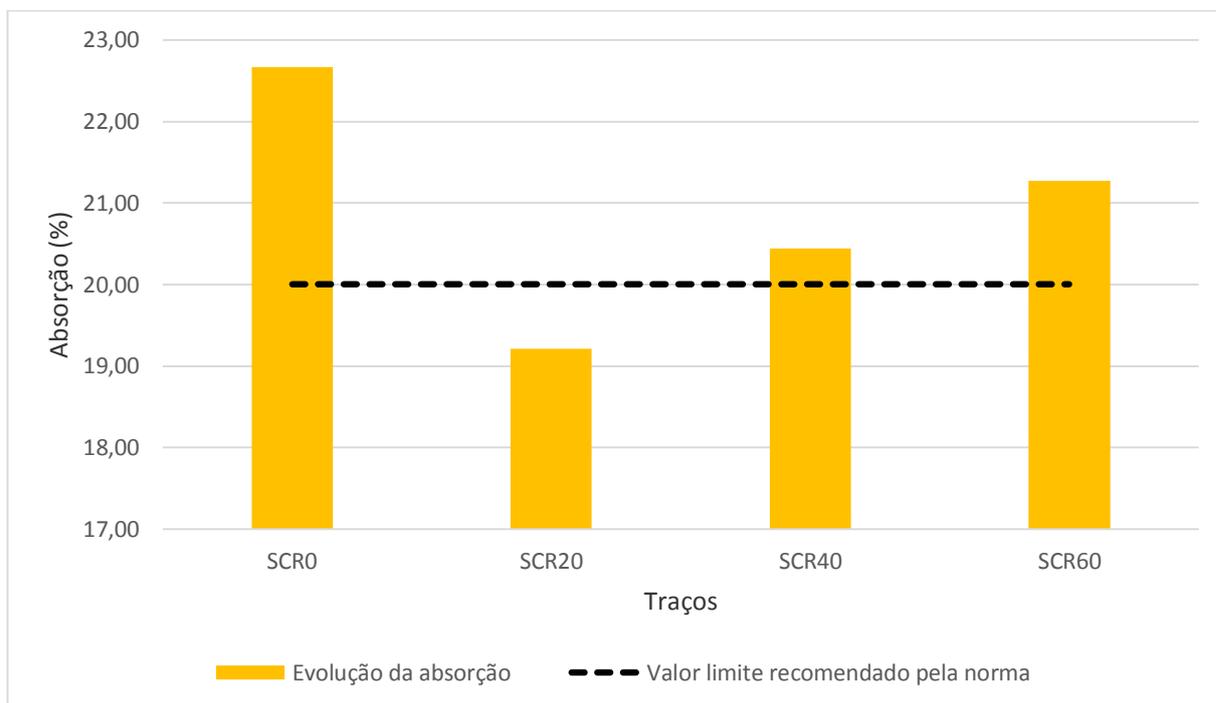
4.2.1 Ensaio de absorção

A Tabela 4.7 apresenta os valores encontrados no ensaio de absorção, realizado aos 7 dias de idade dos blocos, conforme as recomendações da norma NBR 10836 (ABNT, 2013). A finalidade desse procedimento foi avaliar a relação entre ganho de resistência à compressão e a absorção.

De acordo com as especificações da norma NBR 10834 (ABNT, 2012), que pede valores individuais médios $\leq 20\%$ e individuais $\leq 22\%$ aos 28 dias, todos os traços com resíduo se enquadraram individualmente. Porém, tratando-se da média, os traços SCR₂₀ e SCR₄₀ apresentaram resultados mais satisfatórios (Fig. 4.3). Percebe-se, assim, que a incorporação do resíduo em até 40% melhorou a capacidade de absorção de água pelo componente.

Tabela 4.7 - Absorção de água dos blocos aos 7 dias

Traço	Repetições	Peso úmido (g)	Peso saturado (g)	Peso seco (g)	Abs. Total (%)
SCR ₀	1	3230,1	3201,3	2605,1	22,89
	2	3284,9	3238,0	2651,0	22,14
	3	3192,6	3164,6	2573,5	22,97
Média		3235,87	3201,30	2609,87	22,67
SCR ₂₀	1	3266,6	3315,2	2784,6	19,05
	2	3309,1	3359,5	2829,3	18,74
	3	3315,0	3289,1	2744,5	19,84
Média		3296,90	3321,27	2786,13	19,21
SCR ₄₀	1	3148,1	3143,8	2621,0	19,95
	2	3127,4	3105,5	2566,9	20,98
	3	3378,7	3295,6	2737,3	20,40
Média		3218,7	3181,63	2641,73	20,44
SCR ₆₀	1	3345,1	3266,3	2692,8	21,30
	2	3104,6	3034,4	2489,5	21,89
	3	3268,4	3204,1	2656,5	20,61
Média		3239,37	3168,27	2612,93	21,27

Fig. 4.3 - Evolução da capacidade de absorção dos traços SCR₀, SCR₂₀, SCR₄₀ e SCR₆₀

4.2.2 Ensaio de resistência à compressão simples

As Tabelas 4.8 a 4.11 apresentam os valores encontrados no ensaio de resistência à compressão simples para os BTCs de SCR, realizado aos 7 e 28 dias de idade, conforme as

recomendações da norma NBR 10836 (ABNT, 2013). A finalidade desse procedimento foi verificar se os blocos atingem a resistência à compressão mínima, exigida pela norma NBR 10834 (ABNT, 2012), necessária pra sua utilização como componente de construção e, ainda, se o resíduo proporciona aumento nos resultados, quando comparados apenas com o solo natural.

Tabela 4.8 - Resistência à compressão simples traço SCR₀ para 7 e 28 dias

Idade	Repetições	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Resistência	
				Kgf/cm ²	MPa
7	1	2300	149,54	15,38	1,54
	2	2200	136,82	16,08	1,61
	3	2500	135,55	18,44	1,84
	4	2900	137,49	21,09	2,11
	5	3100	138,13	22,44	2,24
	6	2400	134,90	17,79	1,78
Média		2566,67	138,54	18,54	1,85
28	1	2200	138,13	15,93	1,59
	2	1700	138,78	12,25	1,22
	3	1800	137,49	13,09	1,31
	4	2100	136,22	15,42	1,54
	5	1800	138,13	13,03	1,30
	6	1700	138,13	12,31	1,23
	7	2000	138,13	14,48	1,45
Média		1900	137,85	13,79	1,38

Tabela 4.9 - Resistência à compressão simples traço SCR₂₀ para 7 e 28 dias

Idade	Repetições	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Resistência	
				Kgf/cm ²	MPa
7	1	4800	148,22	32,38	3,24
	2	3600	137,48	26,19	2,62
	3	3900	139,40	27,98	2,80
	4	3700	134,28	27,56	2,76
	5	3700	136,18	27,17	2,72
	6	3200	137,48	23,28	2,33
Média		3816,67	138,84	27,43	2,74
28	1	2900	138,11	21,00	2,10
	2	2800	138,13	20,27	2,03
	3	2500	138,78	18,01	1,80
	4	2500	138,79	18,01	1,80
	5	2500	138,78	18,01	1,80
	6	2000	138,78	14,41	1,44
	7	3000	136,18	22,03	2,20
Média		2600	138,22	18,82	1,88

Os resultados indicados nas tabelas mostraram que o melhor resultado de resistência à compressão foi com o traço SCR₂₀ (20% de resíduo), com resistência média obtida de 2,74 MPa. Os traços SCR₀ (sem resíduo), SCR₄₀ e SCR₆₀ apresentaram bons valores individuais, porém as médias ficaram abaixo no mínimo exigido pela norma. Na Fig. 4.4 são registrados, graficamente, os resultados apontados nas tabelas.

Tabela 4.10 - Resistência à compressão simples traço SCR₄₀ para 7 e 28 dias

Idade	Repetições	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Resistência	
				Kgf/cm ²	MPa
7	1	2200	150,17	14,65	1,46
	2	2600	134,91	19,27	1,93
	3	2000	136,21	14,68	1,47
	4	2000	139,43	14,34	1,43
	5	3400	137,51	24,73	2,47
	6	2100	141,38	14,85	1,49
Média		2383,33	139,93	17,09	1,71
28	1	1900	136,83	13,89	1,39
	2	1900	138,14	13,75	1,38
	3	2100	138,13	15,20	1,52
	4	2000	138,78	14,41	1,44
	5	2100	137,46	15,28	1,53
	6	2300	137,49	16,73	1,67
	7	2200	135,56	16,23	1,62
Média		2071,43	137,48	15,07	1,51

Tabela 4.11 - Resistência à compressão simples traço SCR₆₀ para 7 e 28 dias

Idade	Repetições	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	Resistência	
				Kgf/cm ²	MPa
7	1	1900	151,47	12,54	1,25
	2	1000	138,79	7,21	0,72
	3	1800	140,73	12,79	1,28
	4	1700	138,78	12,25	1,22
	5	1600	137,51	11,64	1,16
	6	1700	138,81	12,25	1,22
Média		1616,67	141,01	11,45	1,14
28	1	1500	136,18	11,02	1,10
	2	1500	134,90	11,12	1,11
	3	1500	138,13	10,86	1,09
	4	1300	137,49	9,46	0,95
	5	1400	138,78	10,09	1,01
	6	1600	138,78	11,53	1,15
	7	1800	139,43	12,91	1,29
Média		1514	137,67	11,00	1,10

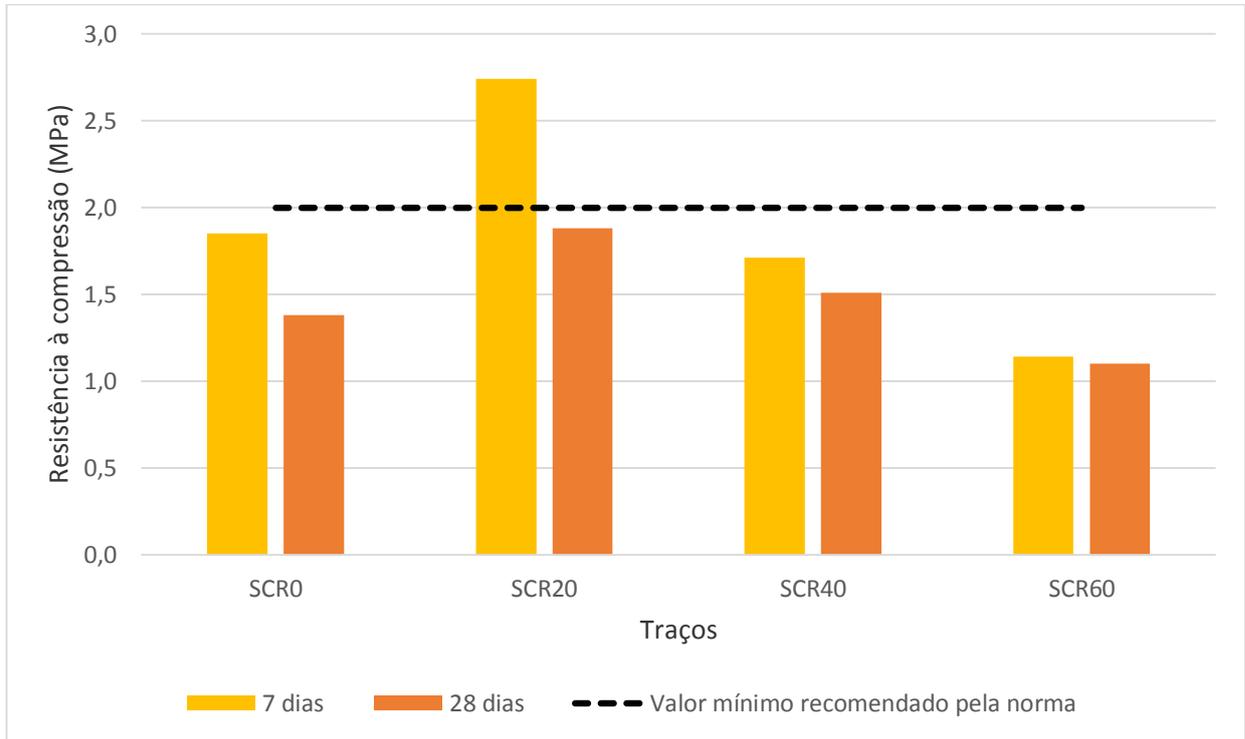


Fig. 4.4 - Resistência à compressão simples para 7 e 28 dias

Os baixos valores de resistência encontrados podem estar associados ao fato de que, antes da ruptura, os blocos devem permanecer imersos em água por um período de 24h, de acordo com as recomendações da norma específica. Porém, segundo Pitta e Nascimento (1983) este procedimento prejudicaria o desempenho dos componentes, devido à sua saturação em água. Os mesmos autores sugerem que se façam ajustes à norma quanto a essa metodologia e que a imersão em água, antes da ruptura, dos blocos ou tijolos que contenham cimento, independentemente do tipo de solo utilizado, seja eliminada.

Além disso, segundo Araújo (2003), os valores de resistência à compressão dependem de alguns fatores: composição do material, condições de cura, forma de aplicação da carga (ensaio estático ou dinâmico), duração do carregamento (ensaio de curta ou longa duração), idade do componente, estado de tensões, formas e dimensões.

Durante a realização dos ensaios observou-se serem de grande influência os valores de umidade das misturas; estas afetam, diretamente, o desempenho dos componentes em ensaios de resistência e pequenas variações nos percentuais de água repercutem em grandes

alterações nos valores de tensão máxima de ruptura. Além disso, os valores de resistência à compressão ainda dependem de fatores de natureza aleatória inerentes às pesquisas que trazem procedimentos experimentais: falta de homogeneidade das misturas, graus de compactação diferentes, dentre outros.

4.2.3 Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem

A Tabela 4.12 apresenta os valores encontrados no ensaio de durabilidade por molhagem e secagem para os BTCs de SCR, realizado aos 7 dias de idade, conforme as recomendações da norma NBR 13554 (ABNT, 2012). A finalidade desse procedimento foi determinar a perda de massa, a variação de umidade e a variação de volume dos blocos.

Tabela 4.12 - Durabilidade dos blocos aos 7 dias (média após 6 ciclos)

Traço	Repetições	Massa seca inicial (g)	Massa seca final (g)	Perda Total (%)
SCR ₀	1	2883,1	3199,3	10,97
	2	2995,9	3237,1	8,05
	3	2947,6	3174,6	7,70
Média		2942,20	3203,67	8,91
SCR ₂₀	1	3046,7	3310,2	8,65
	2	2994,1	3259,5	8,86
	3	2968,8	3275,1	10,32
Média		3003,20	3281,60	9,28
SCR ₄₀	1	2963,1	3243,8	9,47
	2	2999,4	3305,5	10,21
	3	3004,7	3279,8	9,16
Média		2989,07	3276,37	9,61
SCR ₆₀	1	2925,1	3266,3	11,66
	2	2776,6	3035,5	9,32
	3	2968,4	3383,2	13,97
Média		2890,03	3228,33	11,65

Verifica-se que, ao se fixar o teor de cimento, a perda de massa aumenta à medida que são adicionados maiores teores de resíduo (Fig. 4.5); porém, não foram verificadas variações de volume (estas foram inferiores a 1%) e de umidade nos blocos produzidos com diferentes teores de resíduo ao longo dos seis ciclos de imersão e secagem. Para os traços SCR₂₀ e SCR₄₀ os valores observados são inferiores a 10% (e bem próximo aos do traço SCR₀) valor

estabelecido como limite para construções em solo-cimento, de acordo com os critérios da NBR 13553 (ABNT, 2012) e CEPED (1984).

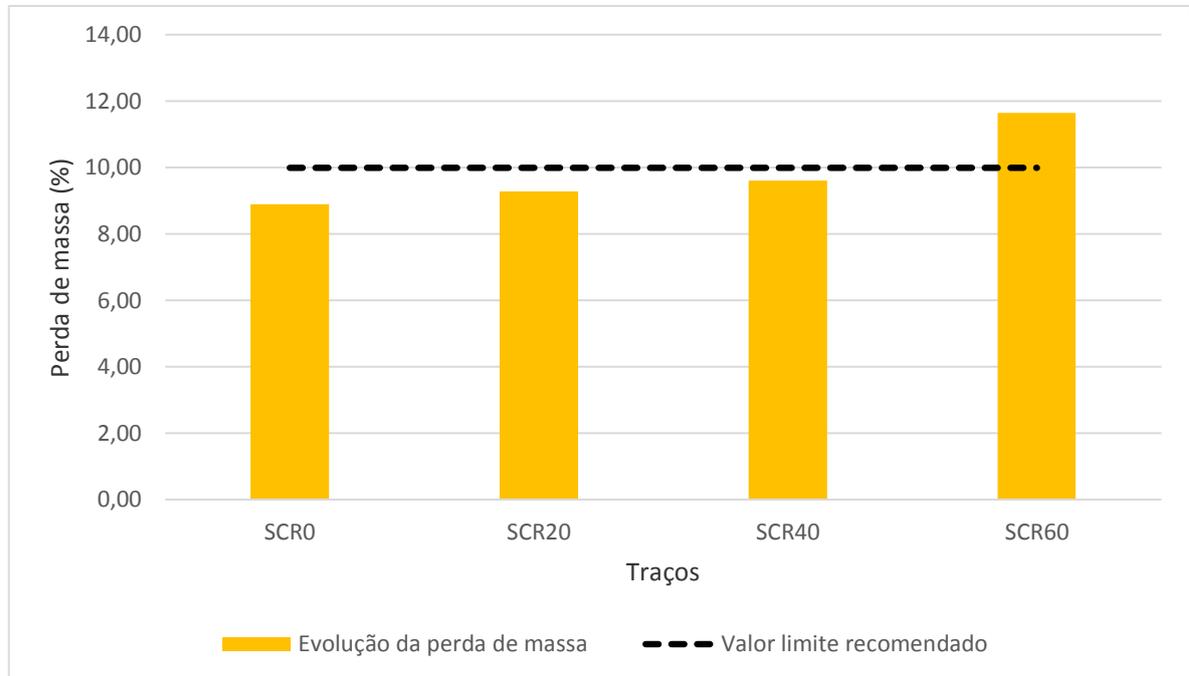


Fig. 4.5 - Evolução da perda de massa dos traços SRC₀, SCR₂₀, SCR₄₀ e SCR₆₀

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 Considerações principais

Conforme a exposição inicial deste trabalho, os objetivos centraram-se no uso de argamassa de cimento e areia, resíduo proveniente das fases de assentamento e revestimento em edificações, na confecção de um novo componente modular, chamado de BTC (bloco de terra compactado) de SCR (solo-cimento-resíduo).

Atentando-se para a originalidade da pesquisa, trabalhou-se no desenvolvimento, a partir da experimentação em laboratório, e na avaliação do uso do BTC-SCR para vedações verticais de edificações em geral e, em particular, em moradias de interesse social, justificada pela questão do déficit no número de moradias que caracteriza o Brasil.

As avaliações de desempenho dos materiais e do componente foram obtidas por meio de uma metodologia baseada em procedimentos experimentais realizados em laboratório, fundamentados em normas técnicas e algumas recomendações práticas, para a determinação das propriedades físicas dos materiais isoladamente, determinação da porcentagem entre os materiais para definição do melhor traço, determinação das propriedades físico-mecânicas e comparação com os blocos existentes no mercado.

Durante a realização dos ensaios observou-se que merece maior atenção o controle de umidade na composição da mistura de solo-cimento, tanto quanto na porcentagem de cimento a ser adotada, para que se atinjam características satisfatórias que garantam a qualidade na caracterização e obtenção de um componente construtivo.

Os resultados obtidos, e apresentados no capítulo 4, permitem uma série de considerações. Primeiramente, não só a hipótese que definiu este trabalho – de que o bloco de solo-cimento confeccionado com resíduo de argamassa de cimento e areia das fases de assentamento e

revestimento é uma alternativa viável para construção de moradias de baixo custo – foi comprovada (o que também justifica sua relevância de cunho social) como constatou-se que a incorporação do resíduo melhorou as propriedades do solo, permitindo acréscimo na resistência à compressão e diminuição da capacidade de absorção de água em alguns dos traços estudados, comparados aos resultados obtidos sem a incorporação do resíduo.

5.1.1 Caracterização físico-química dos componentes

A incorporação das diferentes proporções do resíduo ao solo não resultou em grandes variações nos valores de massa específica dos grãos, o que indica que os resultados encontrados para resistência não sofreram influência devido a este parâmetro.

Quanto à composição granulométrica e aos índices de consistência, tanto o solo quanto o resíduo se enquadraram como satisfatórios para a produção de blocos, conseqüentemente, as composições com porcentagens diferentes também mostraram-se viáveis, uma vez que, à medida em que o resíduo foi sendo acrescentado, melhores tornaram-se os índices de plasticidade. Devido à distribuição granulométrica do resíduo classificá-lo como arenoso, o solo pôde ser “corrigido” também em sua granulometria.

O acréscimo da porcentagem de resíduo ao solo resultou em alteração da massa específica aparente seca máxima, o que alterou conseqüentemente, os valores de umidade ótima de compactação. Entretanto, não houve variação significativa no que se refere ao atendimento dos padrões observados nas normas.

5.1.2 Caracterização físico-mecânica dos blocos

Quanto à capacidade de absorção de água exigida pela norma, todos os traços enquadraram-se, porém a melhor combinação em estudo, foi atingida pelo traço 2 – SCR₂₀, composto por 80% de solo + 12,5% de cimento + 20% de resíduo. O traço 1 – SRC₀, com 0% resíduo, não atendeu aos requisitos da norma e o traço 4 – SCR₆₀, com 60% de resíduo, apresentou valores bem próximos ao limite de aceitação.

Em termos de resistência mínima à compressão, a melhor combinação também foi atingida pelo traço 2 – SCR₂₀, tanto aos 7 quanto aos 28 dias de idade dos blocos, com resultados superiores aos apresentados pelo traço 1 – SRC₀. Isso indica que a incorporação do resíduo na proporção de 20% em substituição ao solo conferiu mais resistência ao componente, em comparação ao bloco de solo natural apenas com cimento.

Os traços 1, 2 e 3, respectivamente SCR₀, SCR₂₀ e SCR₄₀, apresentaram uma relação proporcional entre o ganho de resistência e a diminuição da capacidade de absorção de água.

Quanto à durabilidade, todos os traços apresentaram valores aceitáveis à perda de massa, variações de volume e de umidade, à medida em que o solo foi substituído pelo resíduo. Porém, também neste quesito, a melhor combinação foi o traço 2 – SCR₂₀.

O traço 4 – SCR₆₀ composto por 40% de solo + 12,5% de cimento + 60% de resíduo, não atendeu de forma satisfatória às exigências mínimas constantes em qualquer das normas de caracterização físico-mecânica (resistência, absorção e durabilidade), sendo considerado inadequado para uso como componente construtivo.

5.1.3 Conclusões finais

O conceito de desenvolvimento sustentável implica numa reformulação da visão de impacto ambiental causado pelas atividades humanas, passando a incorporar todos aqueles decorrentes das atividades de produção e de consumo, desde a extração, processamento industrial, transporte e destino dos resíduos oriundos destas atividades. Desta forma, o emprego e o desenvolvimento da tecnologia dos blocos modulares de solo-cimento com resíduos está em conformidade com um dos maiores desafios impostos a pesquisadores, aos profissionais e à sociedade: a diminuição de impactos ambientais advindos das atividades do setor de construção, uma vez que, de acordo com FERRAZ (2004), este setor responde por 30% das emissões que provocam aquecimento global e por 40% da energia utilizada mundialmente a cada ano, onde 80% desse valor são consumidos no beneficiamento, produção e transporte de materiais, sejam eles matéria-prima ou rejeitos.

Inserida no contexto da sustentabilidade na arquitetura, a fabricação de blocos de terra compactada de solo-cimento com resíduos contribui de forma benéfica na discussão sobre processos construtivos que utilizam novos componentes modulares – principalmente quando são alternativa para o aproveitamento de materiais de descarte, que outrora seriam despejados inadequadamente – frente aos requisitos de projeto e diante das necessidades dos usuários.

A análise, apresentada no capítulo 2, de levantamento de preços e custos em comparação ao tijolos convencionais, garante a viabilidade do uso dos BTCs - SCR em termos econômicos. Foi demonstrado que, apesar da quantidade de blocos a serem utilizados numa edificação e o custo unitário do componente serem maiores que os encontrados com o uso da alvenaria convencional, a construção com BTCs - SCR pode ser quase 30% mais econômica, pois, para este dado, são computados a produtividade do componente, a diminuição do desperdício de materiais e a redução nos gastos com assentamentos e revestimentos internos.

Em termos gerais, com a substituição de parte do solo pelo resíduo de cimento e areia, obteve-se um produto que atendeu aos critérios de absorção, resistência e durabilidade, características necessárias ao bom desempenho de edificações, e ficaram comprovadas as condições de uso, a partir da análise técnica e de custos, do BTC-SCR como sendo mais uma alternativa na produção de componentes construtivos de vedação. Assim, o uso dos blocos não teve como objetivo resolver definitivamente a questão habitacional, enraizada em tantos outros aspectos de ordem social, cultural ou econômica, mas de contribuir na busca por maiores e melhores condições de moradias de interesse social.

5.2 Algumas propostas e recomendações

A utilização de resíduos para fabricação de blocos de terra compactada é, certamente, um tema de muita importância que merece e precisa ser mais explorado. Outras análises podem e devem ser parte de estudos futuros, como a definição do desempenho e comportamento quanto à tração/flexão, erosão, abrasão, condutibilidade térmica e acústica, entre tantos outros necessários ao entendimento das características e que melhor garantam seu uso em edificações.

Assim, algumas abordagens para futuras pesquisas poderiam complementar os estudos a fim de facilitar, ou propiciar, a entrada do BTC - SCR no processo de fabricação em escala industrial. Seriam elas:

- Preparação de elementos construtivos (paredes) com os componentes feitos no traço que apresentou melhores resultados, para avaliação da resistência à flexão simples e ao cisalhamento;
- Realização de ensaios de envelhecimento que permitam analisar o comportamento dos BTCs-SCR frente às intempéries, em condições reais de uso e fora dos laboratórios;
- Realização do estudo e análise do ciclo de vida deste tipo de BTC (com resíduos de argamassa de cimento e areia);
- Realização de um protótipo completo utilizando-se o BTC-SCR, confeccionado no traço que apresentou melhores resultados, para uma análise global do produto, com avaliação de seu desempenho como componente modular e também como sistema modular construtivo.
- Realização dos mesmos ensaios, também no traço de melhores resultados, em grande quantidade, para avaliação e tratamento estatístico.

Enfim, muitos aspectos podem ainda ser analisados para um adequado entendimento das características do novo componente construtivo, e também do seu comportamento, para que seja viabilizada sua inserção no mercado da arquitetura e construção civil.

REFERÊNCIAS

ABIKO, A. K. **Solo-Cimento: Tijolos, Blocos e Paredes Monolíticas**. In: Tecnologia de Edificações, IPT/Ded, 13: 97-100. São Paulo - SP, 1983.

ADAM, E. A.; JONES, P. J. **Thermophysical Properties of Stabilized Soil Building Blocks**. *Building and Environment*. V. 30, nº 2. *ScienceDirect Publications*, 1995. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/03601323/30/2>> Acesso em: fevereiro de 2012.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo-SP: EPUSP, 2001. 13 p.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. **Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil**. São Paulo, 2001. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001a.

ÂNGULO, S.C.; KAHN, H.; JOHN, V. M.; ULSEN, C. **Metodologia de Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição**. In: IV Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na construção civil - materiais reciclados e suas aplicações. CT206 - IBRACON. São Paulo - SP. 2001b.

ARAÚJO, J. M. **Curso de Concreto Armado**. V. 1, 2ª ed. Rio Grande - RS: Dunas, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Curso de Solo-cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio**. Anexo 3.1. Dosagem de misturas de solo-cimento. 44p. São Paulo - SP: ABCP, 1972.

_____. **Dosagem das Misturas de Solo-Cimento: Normas de Dosagem e Métodos de Ensaio**. Estudo Técnico 35. 54p. São Paulo - SP: ABCP, 1986.

_____. **Norma de Coordenação Modular Entrou em Vigor e Permite Racionalizar Processos Construtivos**. Banco de pautas. ABCP, 2010. Disponível em <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/fim-do-quebra-quebra-agora-tudo-se-encaixa-na-construcao>> Acesso em: novembro de 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

_____. **NBR 6502: Define termos relativos aos materiais da crosta terrestre, rochas e solos, para fins de engenharia geotécnica de fundações e obras de terra**. Rio de Janeiro, 1998. 18p.

_____. **NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984. 8p.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984. 3p.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984. 13p.

_____. **NBR 8491: Tijolo maciço de solo-cimento.** Rio de Janeiro, 1984. 4p.

_____. **NBR 8492: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991. 5p.

_____. **NBR 10833: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012. 3p.

_____. **NBR 10834: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2012. 5p.

_____. **NBR 10836: Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2013. 4p.

_____. **NBR 12023: Solo-cimento – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 2012. 7p.

_____. **NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013. 13p.

_____. **NBR 13554: Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012. 4p.

_____. **NBR 15873: Coordenação modular para edificações.** Rio de Janeiro, 2010. 9p.

BARBOSA, C. S. **Resistência e Deformabilidade de Blocos Vazados de Concreto e Suas Correlações com as Propriedades Mecânicas do Material Constituinte.** Dissertação de mestrado Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2004.

BRADY, N. C. **Natureza e Propriedade dos Solos.** Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 7ª Edição. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Avanços e Desafios: Política Nacional de Habitação.** Secretaria Nacional de Habitação. Brasília - DF, 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br>> Acesso em: 10 de janeiro de 2011.

_____. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Habitação. **Política Nacional de Habitação**. Caderno 4. Brasília - DF, 2004. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br>> Acesso em: 10 de janeiro de 2011.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307 de 05 de julho de 2002. Estabelece Diretrizes, Critérios e Procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Brasília - DF: Diário Oficial da União, 2002.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 448 de 19 de janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307 de 5 de julho de 2002**. Brasília - DF: Diário Oficial da União, 2012.

BUHÉ, C. *Integration of the Recycling Processes to the Life Cycle Analysis of Construction Products*. *Resources, Conservation and Recycling*, v.20, p.227-243, 1997.

BUSON, M. A. **KRAFTTERRA: Desenvolvimento e Análise Preliminar do Desempenho Técnico de Componentes de Terra com a Incorporação de Fibras de Papel Kraft Provenientes da Reciclagem de Sacos de Cimento para Vedação Vertical**. Tese de doutorado. Brasília - DF: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília - FAU UnB, 2009.

CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S; CASSA, J. C. S. **Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção**. Salvador – Ba: EDUFBA, Caixa Econômica Federal, 2001.

CASANOVA, F. J. **O solo como Material de Construção**. 5º Encontro de Engenharias da Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 22 a 25 nov. 2004. CD-ROM.

CBIC. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. **Banco de Dados**. Disponível em <<http://www.cbic.org.br/>> Acesso em: junho de 2013.

CEPED. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. **Manual de Construção com Solo-Cimento**. Camaçari: CEPED, ABCP, 1984.

CIB. **Agenda 21 para a Construção Sustentável**. 1.ed. Tradução por: Departamento de Engenharia de Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, Editora PCC-USP, 2000.

CINCOTTO, M. A. **Utilização de Subprodutos e Resíduos na Indústria da Construção Civil**. A Construção nº 1855. São Paulo - SP, IPT Encarte TE nº9, 1983.

CORDEIRO, M. E. V. M. **O Sonho da Casa Própria na Terra Prometida: Políticas Habitacionais em Campos dos Goytacazes (1989-2004)**. Dissertação de mestrado. Campos dos Goytacazes - RJ: Universidade Candido Mendes - UCAM, 2004.

CORDEIRO, M. E. V. M.; CONCEIÇÃO, P. M. da; LIMA, T. V. **A Educação Ambiental e o Uso do Solo-cimento**. *Vértices*, v.8, n.1/3. p.35-54. Campos dos Goytacazes - RJ: Editora Essencia, 2006.

COSTA, D. B.; NEVES, C. M. M.; CARNEIRO, A. P. **Uso do Entulho em Tijolos de Solo Estabilizados com Cimento**. In: II Encontro e I Encontro Latino Americano de Edificações e Comunidades Sustentáveis. Canela - RS, 2001. Anais: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ANTAC. Porto Alegre - RS, 2001. p. 101-108.

DA FONSECA, M. G. **Tijolos de cinzas - Cinzas de Carvão Mineral e Cinza de Casca de Arroz. Alternativas ecológicas na fabricação de novos elementos construtivos para alvenarias**. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC 93, Anais, vol. 1. EPUSP/ANTAC, São Paulo – SP, 1993.

DIAMOND, J. M. ***Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed***. New York: Viking Press, 2005.

FARIA, J. R. G. **Unidade de Produção de Tijolos de Solo Estabilizado**. Dissertação de Mestrado. São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, 1990.

FERRAZ, A. L. N.; SEGANTINI, A. A. S. **Estudo da Aplicação de Resíduo de Argamassa de Cimento nas Propriedades de Tijolos de Solo-Cimento**. In: *Holos Environment* – Revista Científica do Centro de Estudos Ambientais - CEA da Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira - SP, 2003.

FERRAZ, A. L. N. **Análise da Adição de Resíduo de Argamassa de Cimento em Tijolos Prensados de Solo-cimento**. Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista - UNESP. Ilha Solteira - SP, 2004.

FERRAZ JUNIOR, F. de A. C. **Equipamentos Modernos para a Produção de Tijolos de Terra Prensada**. In: Workshop Arquitetura da Terra. Anais. São Paulo - SP: NUTAU-FAUUSP, 1995.

FERREIRA, R. C. **Desempenho Físico-mecânico e Propriedades Termo Físicas de Tijolos e Mini-Painéis de Terra Crua Tratada com Aditivos Químicos**. Tese de Doutorado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI da UNICAMP, 2003.

FERREIRA, M. dos S.; BREGATTO, P. R.; D’AVILA, M. R. **Coordenação Modular e Arquitetura: Tecnologia, Inovação e Sustentabilidade**. In: 7o Seminário Internacional “Espaço Sustentável: Inovação em Edifícios e Cidades. São Paulo - SP: Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - NUTAU/USP, 2008.

FIGUEROLA, V. **Alvenaria de Solo-Cimento**. Revista Técnica Ed. 85, São Paulo - SP: Editora PINI, 2004.

FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução**. São Paulo - SP: Editora PINI, 1994.

FREIRE, W. J. **Tratamento Prévio do Solo com Aditivos Químicos e Seu Efeito Sobre a Qualidade do Solo-cimento**. Tese de Doutorado. Piracicaba - SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ da Universidade de São Paulo - USP, 1976. 142p.

FREITAS, E. D. G. A. **Obtenção de Tijolos de Solo-Cimento com Adição de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar para Uso na Construção civil.** Dissertação de Mestrado. Niterói – RJ: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Fluminense, 1996.

GRAHAM, P; EILBERG, I. **Resource Efficient Building Program.** In: *Construction and Environment – CIB Symposium, 2000, São Paulo, Brasil. Proceedings.* São Paulo, Brasil, 2000. 1 CD-ROM.

GRANDE, F. M. **Fabricação de Tijolos Modulares de Solo-cimento por Prensagem Manual Com e Sem Adição de Sílica Ativa.** Dissertação de Mestrado. São Carlos – SP: Escola de Engenharia de São Carlos – EECS da Universidade de São Paulo - USP, 2003.

GUTIERREZ, N, H. M.; MARTINS, D. das n.; PIETROBON, C. e PETROBON, C. L. da R. **Caracterização Física de Componente Alternativo Industrializado: Bloco Vazado Auto-Portante em Solo-Cimento.** *5th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries.* Florianópolis, Brasil, 1994.

HABITARE. Programa de Tecnologia de Habitação. FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. Disponível em: <<http://www.habitare.org.br>> Acesso em: agosto de 2013.

HOUBEN, H.; GUILLAUD, H. **Earth Construction: A Comprehensive Guide.** *Earth Construction Series. V.3, Nº 2. London: Intermediate Technology Publications, 1994.*

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. PNAD. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - 2012** – Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2012/default.shtm>> Acesso em: dezembro 2013.

ITAMBÉ. Cimento Itambé. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/?acao=sec&p=area_tecnica/home> Acesso em: agosto de 2013.

JARDIM, N. S. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.** São Paulo - SP, 1995.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de Resíduos como Materiais de Construção. Reciclagem de Entulho para Produção de Materiais de Construção.** Salvador - BA: EDURFA, 2001.

KEELER, M; BURKE, B. **Fundamentos de Projeto de Edificações Sustentáveis.** Tradução técnica: Alexandre Salvaterra. Porto Alegre - RS: Bookman, 2010.

LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho da Construção Civil, para Utilização como Agregado para Argamassas e Concretos.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo - SP, 1997.

LOPES, W. G. R. **Solo-Cimento Reforçado com Bambu: Características Físico-Mecânicas.** Tese de doutorado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI da UNICAMP, 2002.

MESA VALENCIANO, M. del C. **Incorporação de Resíduos Agroindustriais e Seus Efeitos Sobre as Características Físico-Mecânicas de Tijolos de Solo Melhorado com Cimento**. Dissertação de Mestrado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1999.

MERCADO, M. C. **Solo-Cimento: Alguns Aspectos Referentes à Sua Produção e Utilização em Estudo de Caso**. Dissertação de Mestrado. São Paulo – SP: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - FAU, Universidade de São Paulo - USP, 1990.

MILANI, A. P. S. **Avaliação Físico-Mecânica de Tijolos de Solo-Cimento e de Solo-Cal Adicionados de Casca de Arroz**. Dissertação de Mestrado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2005.

MIRANDA, R. A. C. **Viabilidade Técnica da Aplicação de Resíduo de Beneficiamento de Mármore e Granito em Tijolos de Solo-Cimento**. Dissertação de mestrado. Goiânia - GO: Escola de Engenharia Civil - EEC, Universidade Federal de Goiás - UFG, 2007.

NEVES, C. M. M. **Tijolos de Solo-Cimento**. In: Dez Alternativas Ecológicas para Habitação. Anais, p.141-166. Brasília - DF: MHU/PNUD, 1989.

NEVES, C. M. M. **Componentes Habitacionais de Argamassa Celulósica e Espuma de Poliuretano**. In Coletânea HABITARE, Volume 4 – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional, p.176 - 217. Porto Alegre - RS: ANTAC, 2003.

OLIVEIRA, M. J. E. **Materiais Descartados pelas Obras de Construção Civil: Estudo dos Resíduos de Concreto para Reciclagem**. Tese de doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Rio Claro, 2002. 191p.

PENTEADO, P. T.; MARINHO R. C. **Análise Comparativa de Custo e Produtividade dos Sistemas Construtivos: Alvenaria de Solo-Cimento, Alvenaria com Blocos Cerâmicos e Alvenaria Estrutural com Blocos de Concreto na Construção de uma Residência Popular**. Monografia. Curitiba - PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/3ª Edição**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, T. P. **Utilização de Resíduos de Construção – Estudo em Argamassas**. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. São Carlos – SP, 1986.

PINTO, T. P. **Reciclagem de Resíduos da Construção Urbana no Brasil. Situação atual**. In: Reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil (Workshop), São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p.156-170.

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. Tese de Doutorado. São Paulo - SP: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP. 1999.

PITTA, M. R.; NASCIMENTO, A. A. P. **Dosagem de solo melhorado com cimento por modificações físicas, químicas e mecânicas do solo original**. Estudo Técnico - 53. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo - SP, 1983.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. da S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 2ª Edição. Belo Horizonte - MG: Editora UFMG, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2002.

ROCHA, A. F. **Estudo Experimental Sobre Misturas de Solo-Cimento para a Região de Campo Novo do Parecis, MT**. Dissertação de Mestrado. São Carlos - SP: Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, Universidade de São Paulo - USP, 1996.

SABBAG, P. Y. **Solo-Cimento: O Estudo da Retração e suas Implicações**. Dissertação de Mestrado. São Paulo - SP: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, 1980.

SEGANTINI, A. A. S. **Utilização de Solo-cimento Plástico em Estacas Escavadas com Trado Mecânico em Ilha Solteira – SP**. Tese de Doutorado. Campinas - SP: Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2000.

SEGANTINI, A. A. S.; ALCÂNTARA M. A. M. **Solo-Cimento e Solo-Cal**. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ª. Ed. v.2. São Paulo - SP: IBRACON, 2007.

SILVA FILHO, C. R. V. da; SOLER, F. D. **Gestão de Resíduos Sólido: O que Diz a Lei**. São Paulo - SP: Trevisan Editora Universitária, 2012.

SILVA, S. R. da. **Tijolos de Solo-Cimento Reforçado com Serragem de Madeira**. Dissertação de mestrado. Belo Horizonte - BH: Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2005.

SILVA, W. M. **Efeitos da Incorporação de Resíduos Agroindustriais nas Características Mecânicas e Termofísicas de Tijolos Modulares de Solo-Cimento**. Dissertação de mestrado. Goiânia - GO: Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás - UFG, 2007.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2.ed. São Paulo - SP: Atlas, 2002.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Disponível em: < <http://www.snic.org.br/>> Acesso em agosto de 2013.

TANGO, C. E. S. **Materiais: tecnologia e controle**. In: *Manual Técnico de Alvenaria*. Associação Brasileira da Construção Industrializada. São Paulo - SP: ABCI, 1990.

ANEXOS

Anexo A - Detalhes construtivos de edificações realizadas com o sistema construtivo modular

Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA. Disponível em <http://www.sahara.com.br/index.php>

Os tijolos modulares requerem certo cuidados desde a seleção de um solo adequado para a produção de uma mistura de solo-cimento de qualidade, até o controle das condições de preparação da mistura, dos processos de moldagem e desmoldagem e do empilhamento dos tijolos para garantir suas características de resistência, durabilidade e estética. Assim, serão apresentados alguns detalhes construtivos que distinguem o sistema construtivo modular dos sistemas convencionais em construção civil.

As principais vantagens que os tijolos modulares, produzidos com controle tecnológico, apresentam em relação aos tijolos comuns são:

- Texturas e medidas regulares, o que evita o desperdício de material para correções de imperfeições, além de proporcionar um bom acabamento à vista;
- Seu sistema de encaixe auxilia a orientação no assentamento, evitando que a parede fique fora do prumo, e mantendo as juntas regulares que evitam o surgimento de trincas e fissuras;
- O seu emprego reduz o peso da construção, pois necessita de uma menor quantidade de material para assentamento e revestimento;
- Reduz o tempo para execução da obra, o que gera economia, principalmente com mão-de-obra;
- Ajuda a manter o canteiro de obras mais limpo e organizado;
- Seus furos, além de promoverem conforto termoacústico, também formam condutores para as redes hidráulica e elétrica, evitando a quebra de paredes, além de permitirem o embutimento fácil e rápido das colunas de sustentação;
- É também um tijolo ecológico, pois não provoca desmatamento e não lança resíduos de queima no ar, como ocorre nas tradicionais olarias

Além das vantagens destacadas desse sistema construtivo, é importante destacar:

- Para o assentamento dos tijolos modulares basta um filete de cola branca, argamassa própria ou massa de solo-cimento (com as seguintes proporções: 1kg de cimento, 1/2kg de cola branca e 6kg de solo). A exceção acontece somente na primeira fiada, que ser assentada sobre argamassa convencional de cimento e areia, traço 1:3 sobre o baldrame, permitindo a regularização da superfície (ver figura 1).

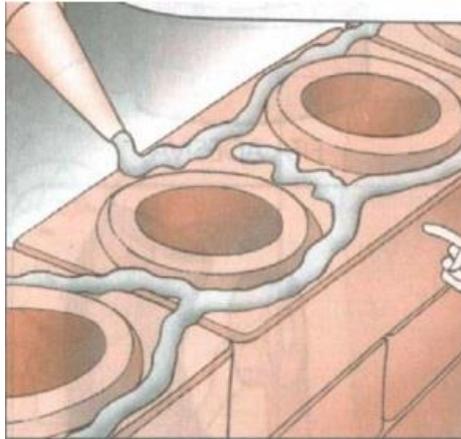


Figura 1 – Detalhe da aplicação do filete de argamassa
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- Para instalação elétrica, pode-se optar pelo uso dos furos nos módulos em vez de conduítes e caixa para tomadas e interruptores.

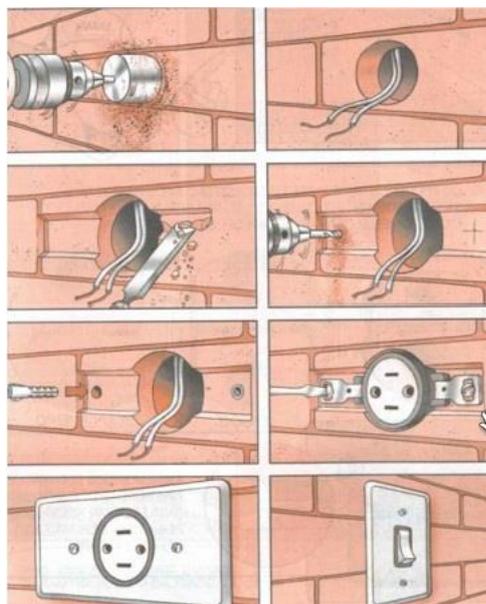


Figura 2 – Detalhe das instalações elétricas
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- Para instalações hidráulicas, a facilidade é a mesma, não é necessária a quebra de paredes.



Figura 3 – Detalhe das instalações hidráulicas
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- Nesse sistema construtivo modular, é possível embutir as colunas nas paredes. Para isso, é importante que as barras de ferro que irão compor a estrutura da coluna estejam fundidas no alicerce ou no radier antes das paredes serem erguidas.

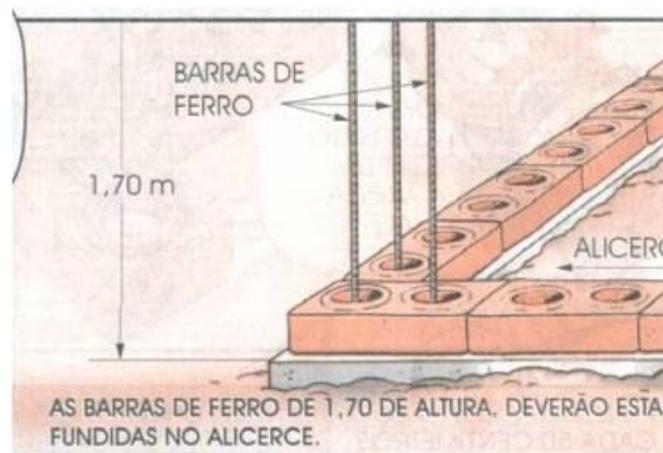


Figura 4 – Detalhe das barras de ferro fundidas no alicerce
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- O preenchimento dos furos com argamassa ou concreto tem duas finalidades: reforçar a estrutura e promover uma melhor amarração das paredes. A necessidade, a quantidade e a localização dessas “colunas” devem ser calculadas em projeto. Se elas existirem, é preciso encher as colunas de sustentação a cada meio metro de altura. A amarração das paredes deve ser feita com grampos, encaixados em pequenos sulcos cavados nos tijolos. Ou ainda de forma direta, pela simples amarração do tijolo. O

mesmo procedimento deve ser repetido a cada meio metro para proporcionar resistência à construção.

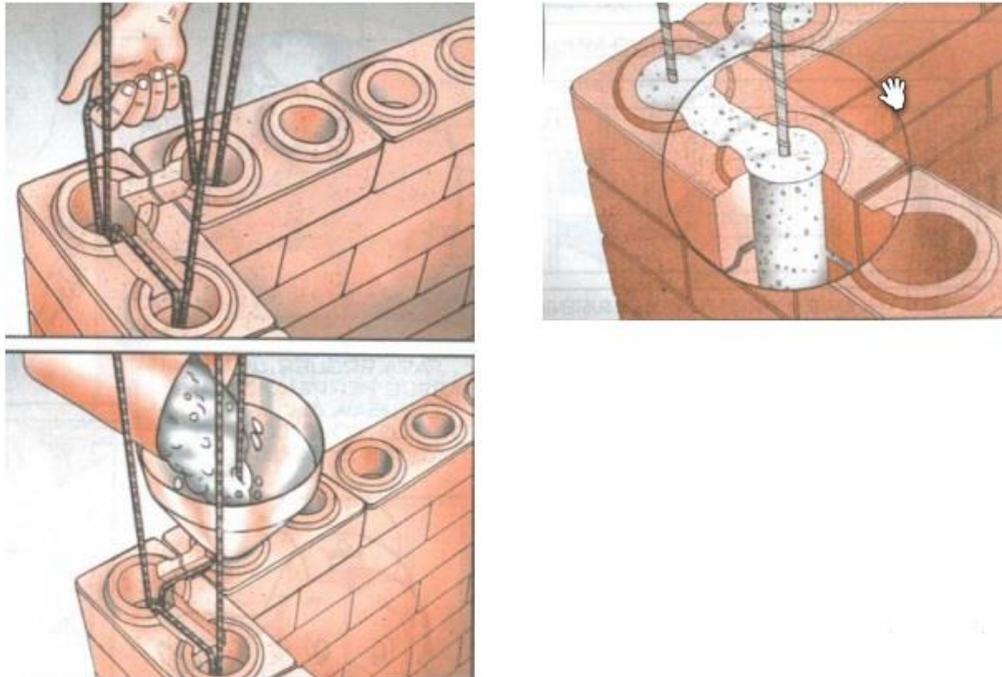


Figura 5 – Detalhe do preenchimento das colunas e das amarrações com os grampos
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- Amarração de encontro de paredes (figura 6). A amarração de encontro de paredes pode ser realizada também de maneira direta (figura 7).

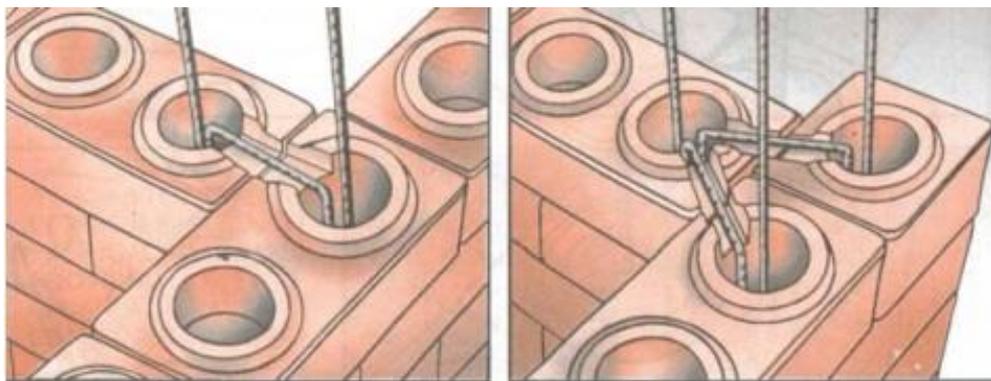


Figura 6 – Detalhe das amarrações de encontro de paredes
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

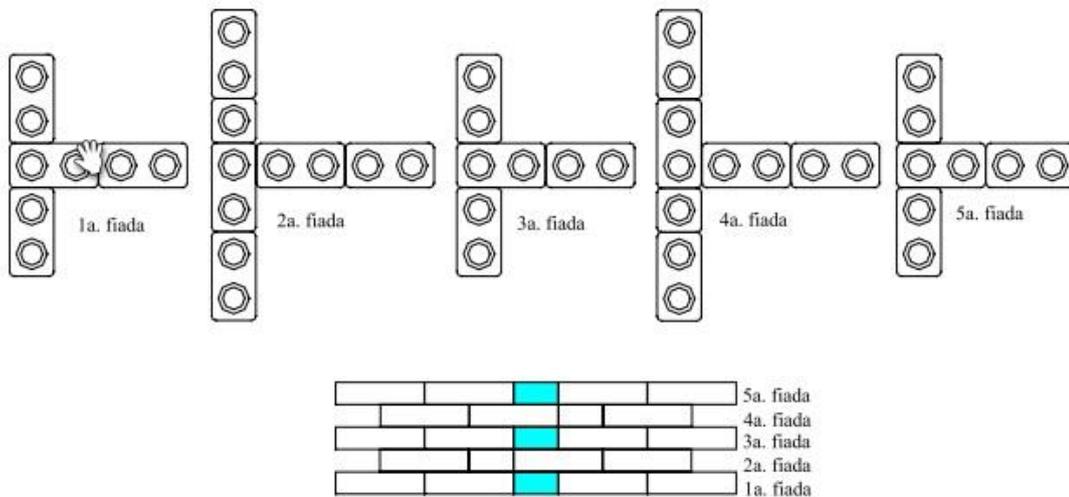


Figura 7 – Detalhe das amarrações de encontro de paredes de forma direta
 Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- Detalhe da cinta de amarração e da contra-verga que devem ser executadas à meia altura (peitoril da janela), sobre os vãos de portas e janelas e no respaldo.



Figura 8 – Detalhe das cintas de amarração e das contra-vergas
 Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

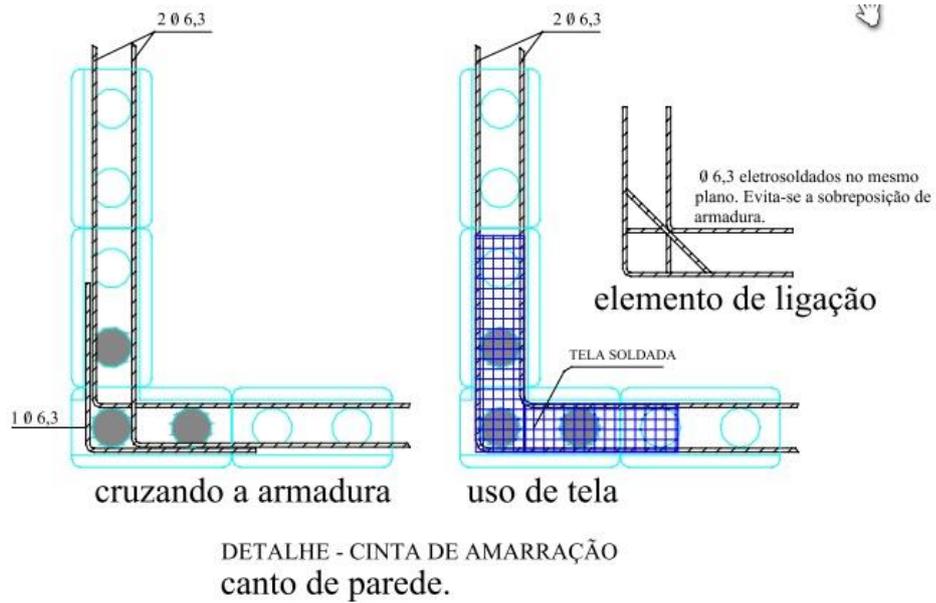


Figura 9 – Detalhes sugeridos para as cintas de amarração em cantos de paredes
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

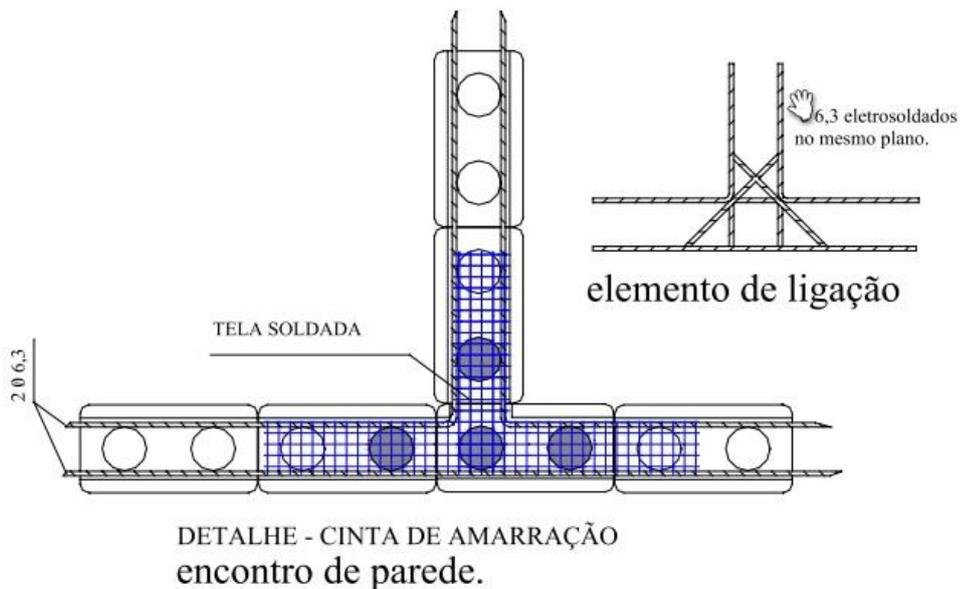


Figura 10 – Detalhes sugeridos para as cintas de amarração em encontros de paredes
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

- As canaletas podem ser preenchidas da forma ilustrada na figura 11, possibilitando futuras ampliações na rede elétrica, sem a necessidade do corte da alvenaria.

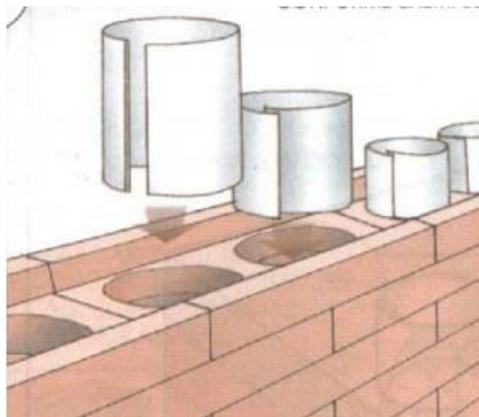


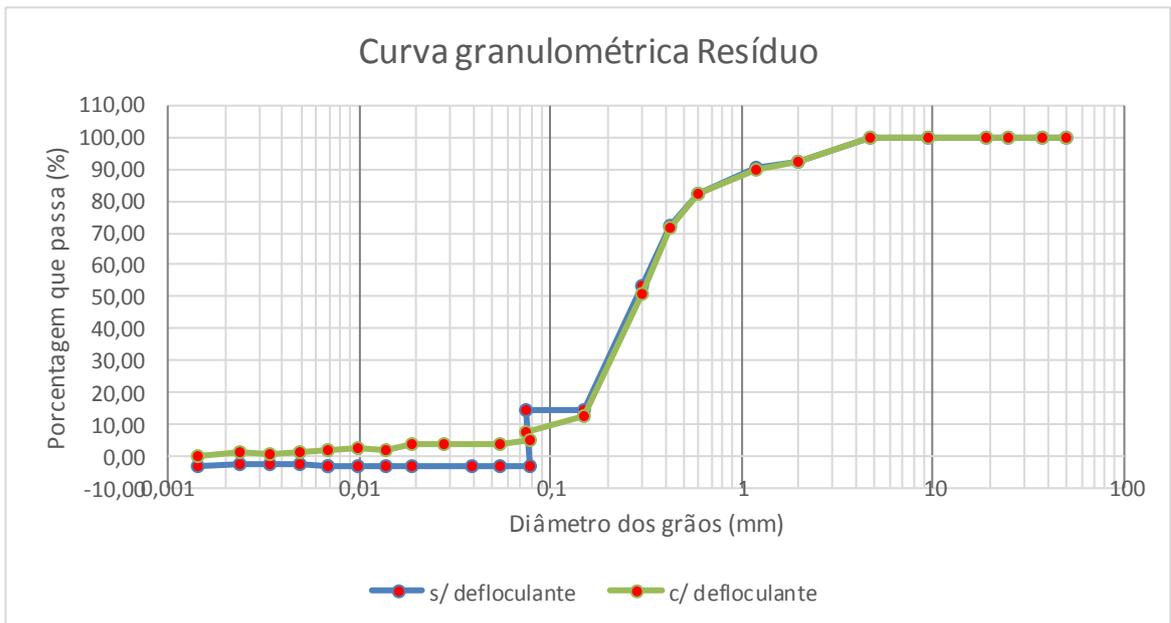
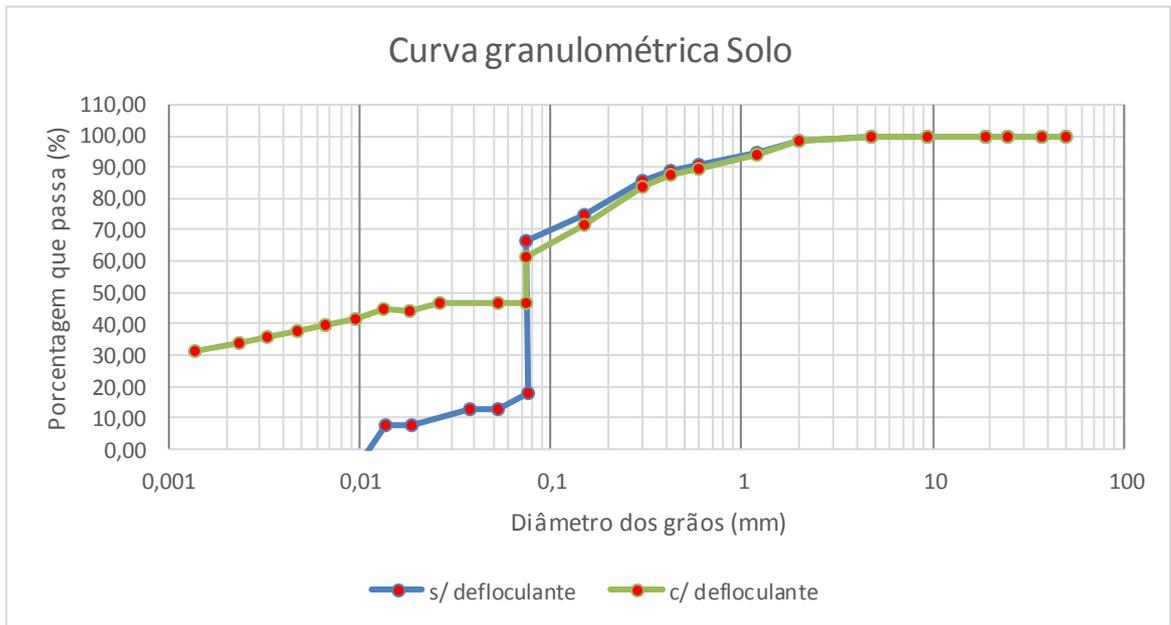
Figura 11 – Detalhe da desobstrução dos furos com canos de PVC cortados para preenchimento das canaletas
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

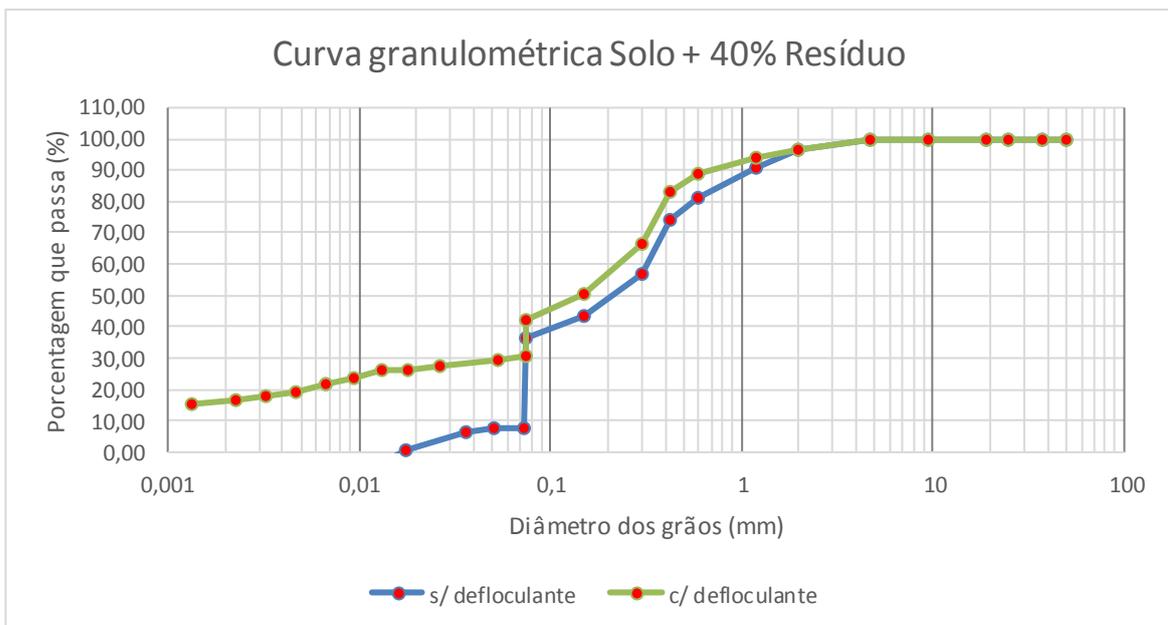
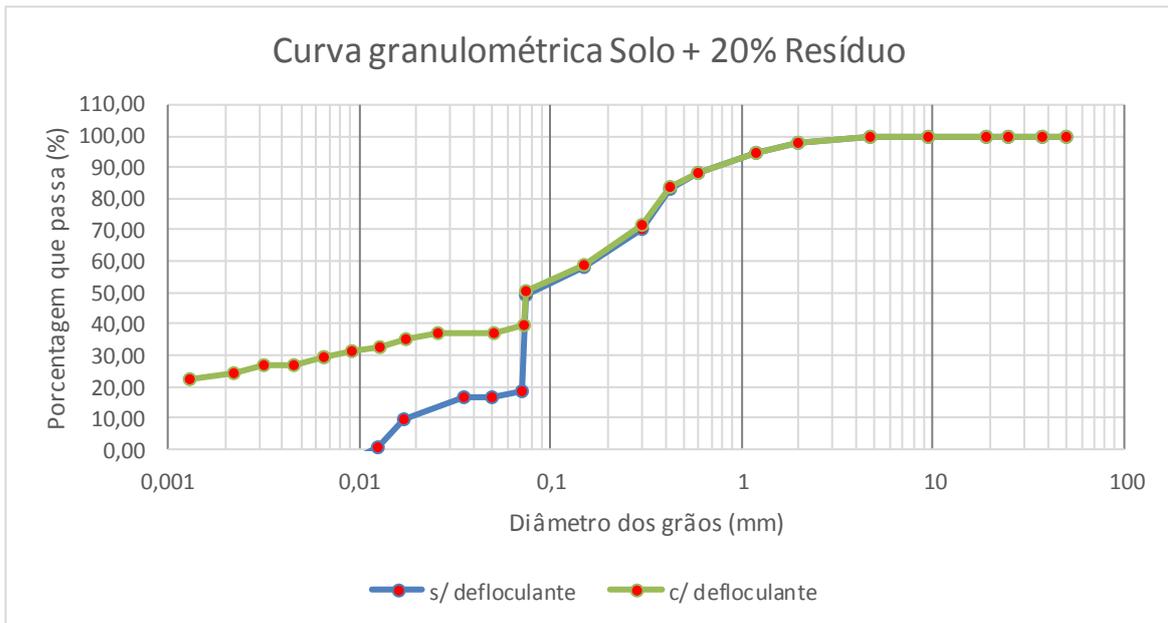
A figura 12 ilustra o sistema construtivo com fotos de construções.

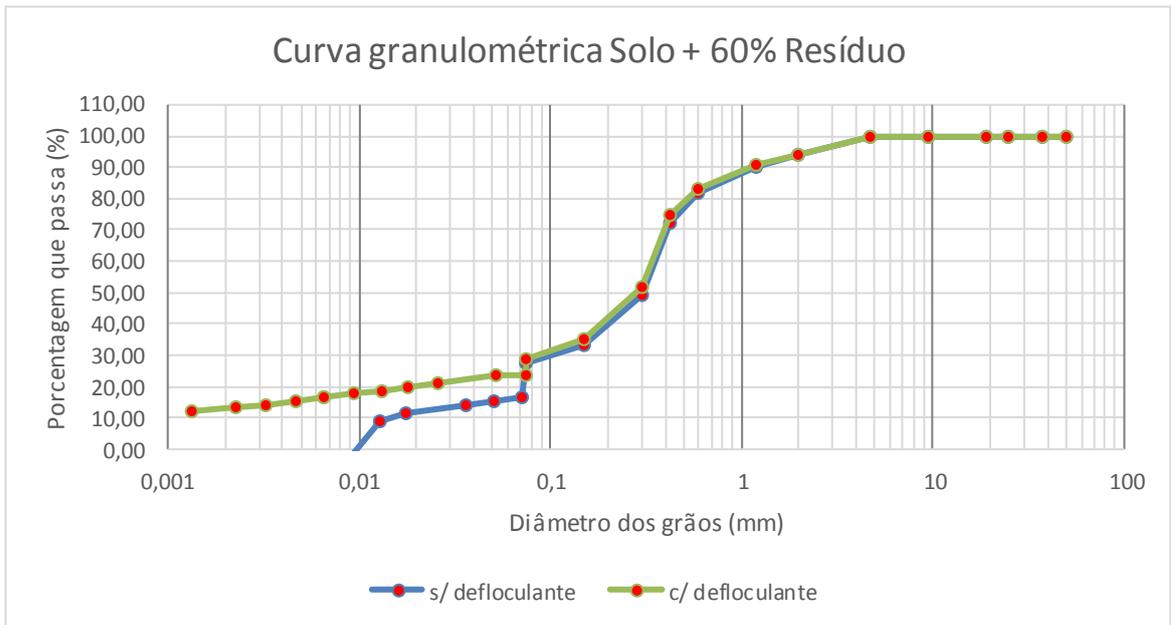


Figura 12 – Exemplos de construção empregando o sistema construtivo modular
Fonte: Grupo Aguilar – SAHARA.

Anexo B – Gráficos das curvas granulométricas de cada traço com e sem defloculante





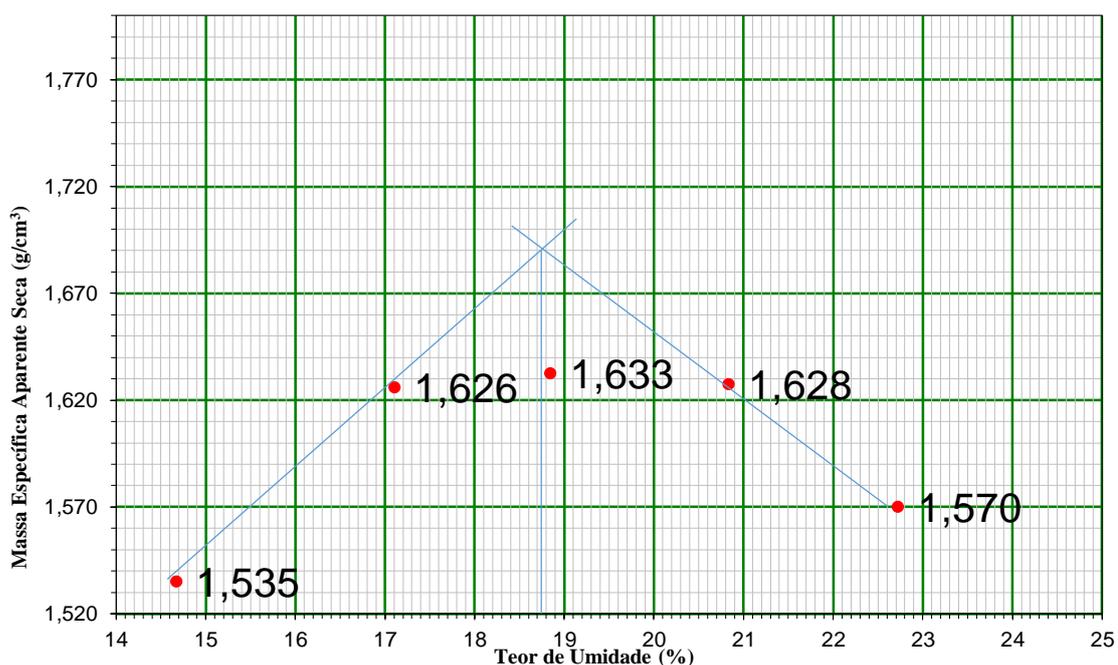


Anexo C – Tabelas e gráficos dos ensaios de compactação para cada traçoTraço 1 – SCR₀

Umidade ótima = 18,8%

Massa específica aparente seca máxima = 1,690g/cm³

Características do Ensaio											
Energia	Normal	Material SCR ₀									
Determinação da Massa Específica											
Cilindro	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solo úmido + cilindro	g	4165	4306	4342	4369	4330					
Peso cilindro	g	2400	2400	2400	2400	2400					
Volume cilindro	g	1001	1001	1001	1001	1001					
Solo úmido	g	1765	1906	1942	1969	1930					
Massa específica úmida	g/cm ³	1,763	1,904	1,940	1,966	1,928					
Massa específica seca	g/cm³	1,535	1,626	1,633	1,633	1,628	1,628	1,628	1,628	1,628	1,570
Determinação do Teor de Umidade											
Cápsula	nº	1	10 G5	2T	20	40	17 F	16 Y	T 62	129 F	46
Tara cápsula	g	16,99	14,66	13,40	17,16	13,87	14,04	16,77	13,58	17,97	16,44
Peso Solo úmido + Tara cápsula	g	81,47	81,17	63,00	92,31	95,83	102,23	88,80	110,65	95,96	97,77
Peso Solo seco + Tara cápsula	g	73,16	72,73	55,77	81,32	82,86	88,23	76,4	93,9	81,49	82,75
Peso Água	g	8,31	8,44	7,23	10,99	12,97	14,00	12,40	16,75	14,47	15,02
Peso Solo Seco	g	56,17	58,07	42,37	64,16	68,99	74,19	59,63	80,32	63,52	66,31
Teor de Umidade	%	14,8	14,5	17,1	17,1	18,8	18,9	20,8	20,9	22,8	22,7
Teor de Umidade	%	14,7		17,1		18,8		20,8		22,7	

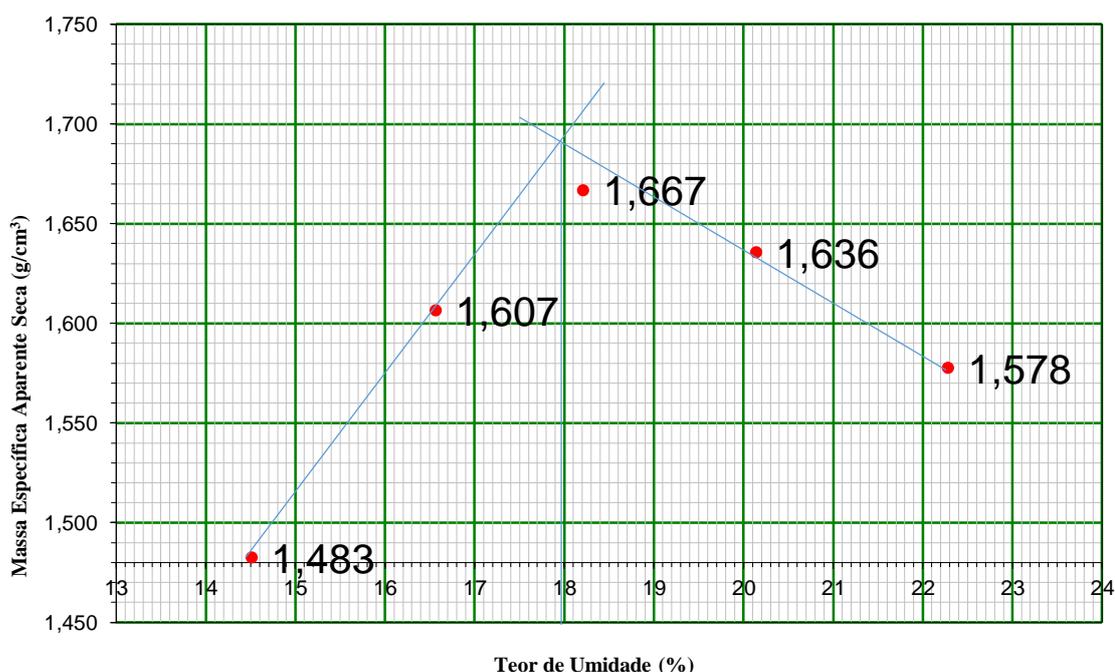


Traço 2 – SCR₂₀

Umidade ótima = 18,0%

Massa específica aparente seca máxima = 1,690g/cm³

Características do Ensaio											
Energia	Normal	Material SCR ₂₀									
Determinação da Massa Específica											
Cilindro	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solo úmido + cilindro	g	4100	4276	4373	4367	4332	4367	4332	4367	4332	4332
Peso cilindro	g	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Volume cilindro	g	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
Solo úmido	g	1700	1876	1973	1967	1932	1967	1967	1967	1932	1932
Massa específica úmida	g/cm ³	1,698	1,873	1,971	1,964	1,930	1,964	1,964	1,964	1,930	1,930
Massa específica seca	g/cm³	1,483	1,607	1,667	1,636	1,578	1,636	1,636	1,636	1,578	1,578
Determinação do Teor de Umidade											
Cápsula	nº	146	4	126	135	113	152	125	153	4B	150
Tara cápsula	g	5,89	5,70	6,14	5,97	6,06	5,69	6,14	5,47	5,64	5,82
Peso Solo úmido + Tara cápsula	g	27,74	30,67	31,41	33,50	29,40	28,84	25,21	36,92	47,21	40,81
Peso Solo seco + Tara cápsula	g	24,97	27,51	27,81	29,60	25,8	25,28	22,02	31,64	39,62	34,45
Peso Água	g	2,77	3,16	3,60	3,90	3,60	3,56	3,19	5,28	7,59	6,36
Peso Solo Seco	g	19,08	21,81	21,67	23,63	19,74	19,59	15,88	26,17	33,98	28,63
Teor de Umidade	%	14,5	14,5	16,6	16,5	18,2	18,2	20,1	20,2	22,3	22,2
Teor de Umidade	%	14,5		16,6		18,2		20,1		22,3	

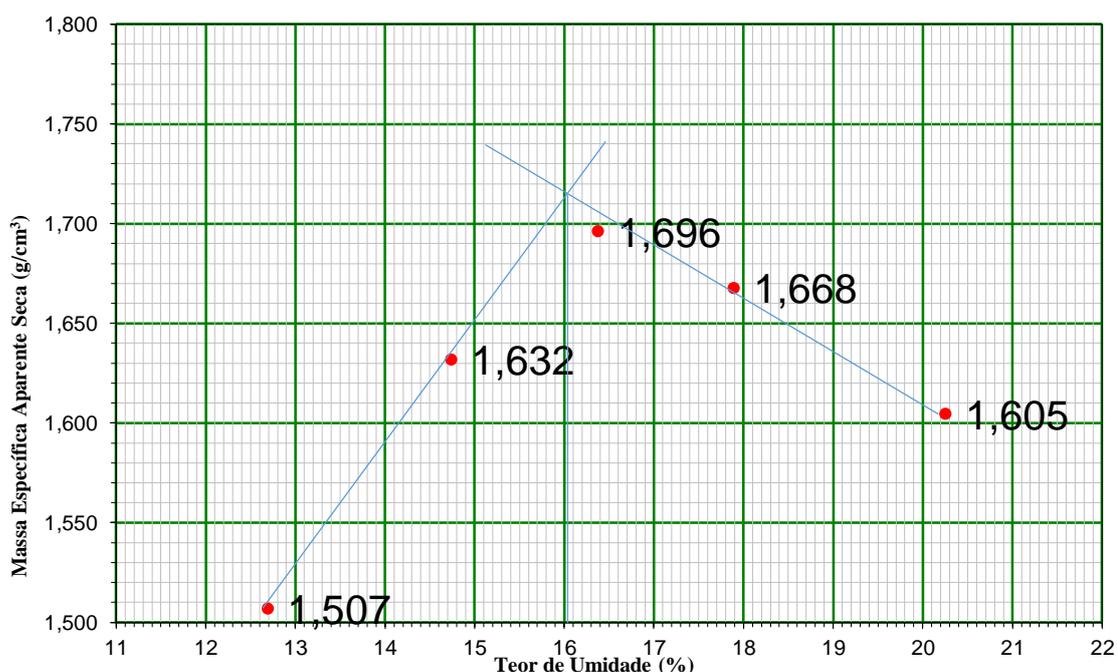


Traço 3 – SCR₄₀

Umidade ótima = 16,1%

Massa específica aparente seca máxima = 1,715g/cm³

Características do Ensaio											
Energia	Normal	Material SCR ₄₀									
Determinação da Massa Específica											
Cilindro	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solo úmido + cilindro	g	4100	4276	4373	4367	4332	4367	4332	4332	4332	4332
Peso cilindro	g	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Volume cilindro	g	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
Solo úmido	g	1700	1876	1973	1967	1932	1967	1967	1967	1932	1932
Massa específica úmida	g/cm ³	1,698	1,873	1,971	1,964	1,930	1,964	1,964	1,964	1,930	1,930
Massa específica seca	g/cm³	1,507	1,632	1,696	1,668	1,605	1,668	1,668	1,668	1,605	1,605
Determinação do Teor de Umidade											
Cápsula	nº	4B	30	150	125	113	152	126	135	4	146
Tara cápsula	g	5,64	5,47	5,82	6,14	6,06	5,69	6,14	5,97	5,70	5,89
Peso Solo úmido + Tara cápsula	g	40,26	41,39	35,30	32,09	28,58	30,01	29,80	33,64	40,69	39,56
Peso Solo seco + Tara cápsula	g	36,37	37,34	31,50	28,77	25,44	26,56	26,23	29,42	34,79	33,90
Peso Água	g	3,89	4,05	3,80	3,32	3,14	3,45	3,57	4,22	5,90	5,66
Peso Solo Seco	g	30,73	31,87	25,68	22,63	19,38	20,87	20,09	23,45	29,09	28,01
Teor de Umidade	%	12,7	12,7	14,8	14,7	16,2	16,5	17,8	18,0	20,3	20,2
Teor de Umidade	%	12,7		14,7		16,4		17,9		20,2	

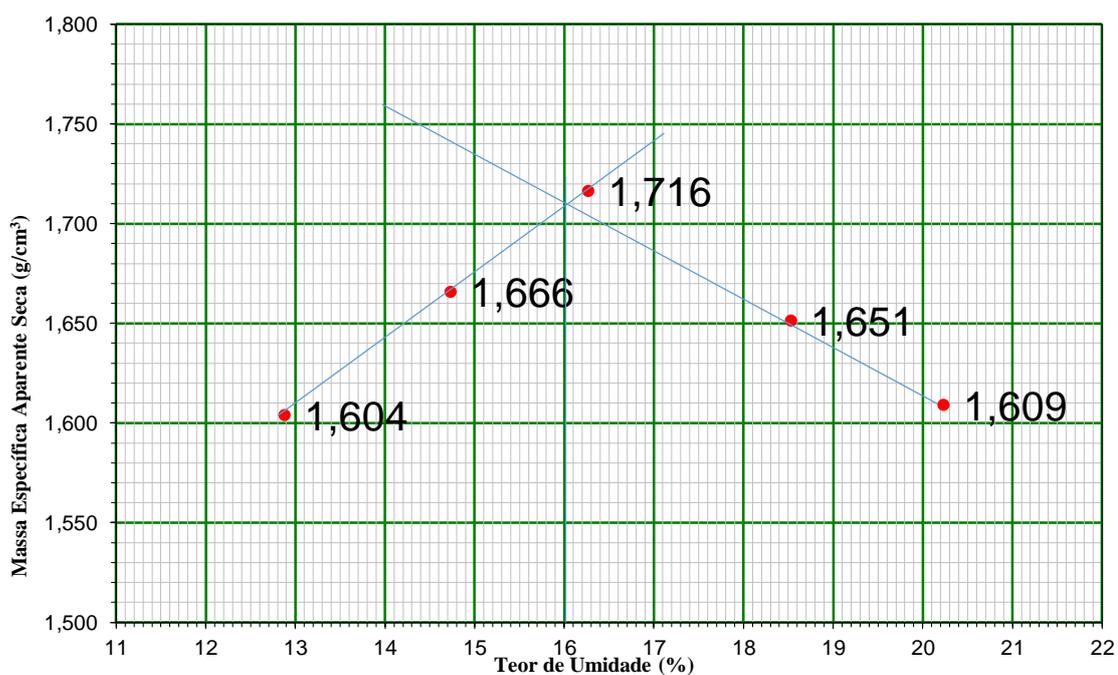


Traço 4 – SCR₆₀

Umidade ótima = 16,1%

Massa específica aparente seca máxima = 1,710g/cm³

Características do Ensaio											
Energia	Normal	Material SCR ₆₀									
Determinação da Massa Específica											
Cilindro	nº	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Solo úmido + cilindro	g	4213	4312	4399	4358	4334					
Peso cilindro	g	2400	2400	2400	2400	2400					
Volume cilindro	g	1001	1001	1001	1001	1001					
Solo úmido	g	1813	1912	1999	1958	1934					
Massa específica úmida	g/cm ³	1,811	1,910	1,996	1,956	1,931					
Massa específica seca	g/cm³	1,604	1,666	1,716	1,651	1,609					
Determinação do Teor de Umidade											
Cápsula	nº	129	32	40	09 G5	17F	1	98	02 T	10 G5	20
Tara cápsula	g	17,86	16,66	13,76	13,54	13,93	16,97	17,84	13,30	14,56	17,05
Peso Solo úmido + Tara cápsula	g	70,23	61,18	100,71	84,05	90,27	83,73	82,53	79,67	80,68	88,50
Peso Solo seco + Tara cápsula	g	64,26	56,1	89,6	74,96	79,57	74,41	72,46	69,26	69,65	76,38
Peso Água	g	5,97	5,08	11,11	9,09	10,70	9,32	10,07	10,41	11,03	12,12
Peso Solo Seco	g	46,40	39,44	75,84	61,42	65,64	57,44	54,62	55,96	55,09	59,33
Teor de Umidade	%	12,9	12,9	14,6	14,8	16,3	16,2	18,4	18,6	20,0	20,4
Teor de Umidade	%	12,9		14,7		16,3		18,5		20,2	



Anexo D – Tabela completa do ensaio de absorção

Tabela absorção 7 dias

Tratamento	Repetições	Peso úmido		Peso seco	Ab.	Ab.
		(g)	Peso saturado (g)	(g)	Parcial	Total
SCR ₀	1	3230,1	3201,3	2605,1	-0,89%	22,89%
	2	3284,9	3238	2651	-1,43%	22,14%
	3	3192,6	3164,6	2573,5	-0,88%	22,97%
Média		3235,87	3201,30	2609,87	-1,07%	22,67%
Desvio		46,42	36,70	38,97	0,00	0,00
CV%		1,43%	1,15%	1,49%	-29,45%	2,01%
SCR ₂₀	1	3266,6	3315,2	2784,6	1,49%	19,05%
	2	3309,1	3359,5	2829,3	1,52%	18,74%
	3	3315	3289,1	2744,5	-0,78%	19,84%
Média		3296,90	3321,27	2786,13	0,74%	19,21%
Desvio		26,41	35,59	42,42	0,01	0,01
CV%		0,80%	1,07%	1,52%	177,66%	2,96%
SCR ₄₀	1	3148,1	3143,8	2621	-0,14%	19,95%
	2	3127,4	3105,5	2566,9	-0,70%	20,98%
	3	3378,7	3295,6	2737,3	-2,46%	20,40%
Média		3218,07	3181,63	2641,73	-1,10%	20,44%
Desvio		139,50	100,54	87,07	0,01	0,01
CV%		4,33%	3,16%	3,30%	-110,27%	2,54%
SCR ₆₀	1	3345,1	3266,3	2692,8	-2,36%	21,30%
	2	3104,6	3034,4	2489,5	-2,26%	21,89%
	3	3268,4	3204,1	2656,5	-1,97%	20,61%
Média		3239,37	3168,27	2612,93	-2,19%	21,27%
Desvio		122,85	120,03	108,43	0,00	0,01
CV%		3,79%	3,79%	4,15%	-9,23%	3,00%

