



CAPÍTULO VII

USO DO AGREGADO RECICLADO EM TIJOLOS DE SOLO ESTABILIZADO COM CIMENTO



Célia Maria Martins Neves
Alex Pires Carneiro
Dayana Bastos Costa

No Brasil, o atendimento às necessidades mínimas de habitação para as camadas de mais baixa renda ainda não foi equacionado. A enorme demanda por moradias, no País, exige a construção de aproximadamente 6 milhões de unidades, sendo a maioria destinada a famílias com renda mensal inferior a cinco salários-mínimos (Watanabe, 2000). Apesar do esforço do Governo, a demanda por moradias populares continua crescendo, com velocidade superior à capacidade de produção de novas unidades.

Alguns fatos incontestáveis, relativos à estruturação da política habitacional, são apontados por Maffei (1992):

- cidades com mais de 5 milhões de habitantes apresentam graves problemas de ordem econômica, administrativa e humana;
- a propriedade privada da terra urbana é fonte permanente de especulação imobiliária;
- poucos são os planos de construção em massa de moradias populares sem um forte subsídio do Estado;
- cada indivíduo necessita de, no mínimo, 10 m² como espaço interno útil para habitar.

A questão da habitação popular, no Brasil, exige soluções compatíveis com a situação socioeconômica. Essas podem ser efetivadas pelo emprego de tecnologias alternativas, que utilizem matérias-primas naturais, renováveis ou não, e também resíduos sólidos industriais e urbanos, abundantes na região (Calmon et al., 1998).

Programas para produção de habitações destinadas às populações de menor poder aquisitivo são realizados na maioria dos países em desenvolvimento, notadamente nos do continente africano e da América Latina. Esses programas geralmente adotam alternativas tecnológicas de menor custo, bem como regimes de auto-construção ou de ajuda mútua, e são efetivados por iniciativas governamentais associadas ou não à participação de entidades comunitárias.

Na década de 70, particularmente na sua segunda metade, começaram a ser realizadas, no Brasil, diversas pesquisas e experiências, na tentativa de viabilizar, do ponto de vista técnico e econômico, a implantação de alternativas tecnológicas de menor custo para produção de moradias populares (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, CEPED, 1984; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, 1985; Neves, 1989).

Dentre essas tecnologias, a produção de habitações populares de tijolos de solo estabilizado foi uma das alternativas mais freqüentemente adotadas, devido à facilidade de fabricação desse componente e de execução da alvenaria, notadamente por seu baixo custo (Banco Nacional da Habitação, 1985). Deve-se ressaltar que o custo de fundações, paredes e piso da habitação popular chega a alcançar 50% do custo da edificação (Neves, 1988).

Outra vantagem do tijolo de solo estabilizado é a possibilidade de incorporar outros materiais na sua fabricação, de modo a aproveitar recursos abundantes na região, como, por exemplo, na área urbana, o agregado produzido com entulho reciclado, e que também podem contribuir para a melhoria das características do produto.

O entulho, constituído de fragmentos ou restos de tijolos, concretos, argamassas, madeiras e outros materiais usados na execução de obras de construção, é classificado como material inerte segundo a NBR 10004, pois não apresenta risco de contaminação para a saúde pública e para o meio ambiente, desde que sua destinação seja adequada. Devidamente reciclado, o produto resultante apresenta propriedades físicas e químicas apropriadas para seu emprego como material de construção de edificações (Pinto, 1997).

Vale ressaltar, no entanto, que o entulho apresenta características variáveis, que dependem do tipo de obra, das técnicas construtivas, da fase em que se encontra a obra, das características socioeconômicas da região, entre outros fatores.

O aproveitamento do entulho pelo setor que o gerou, a construção civil, facilita sua reciclagem, contribui para minimizar os efeitos prejudiciais dos descartes irregulares em cursos d'água ou vias públicas e do esgotamento das áreas destinadas à sua deposição (Pinto, 1997).

O agregado reciclado pode ser utilizado para produzir materiais de construção mais baratos e de qualidade. Conforme apresentado no Capítulo V, as aplicações mais indicadas para o agregado reciclado incluem os materiais para base e sub-base de pavimentos, aterros, agregados para concreto e argamassa, além de matéria-prima para produção de tijolos e blocos.

O uso do agregado reciclado em tijolos de solo estabilizado com cimento é também uma das soluções em que o entulho é aproveitado pelo próprio setor que o produz e contribui tanto para minimizar impactos ambientais como para reduzir o custo da alvenaria. Contudo, para utilização como matéria-prima em substituição à tradicional, é necessário que os resíduos apresentem desempenho compatível com a sua aplicação.

Nesse sentido, o Projeto Entulho Bom investigou a utilização do agregado reciclado de Salvador em tijolos prensados, com substituição total ou parcial do solo. Selecionou solos, elaborou tracos, fabricou tijolos e analisou propriedades físicas e mecânicas, de modo a avaliar seu desempenho na alvenaria.

USO DO SOLO COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

O uso do solo como material de construção pode ser distinguido em dois níveis: por um lado, pela utilização em sistemas construtivos mais simples e de menor custo, gerados pela carência em que vivem algumas populações; por outro lado, pelo uso de técnicas inovadoras, incentivadas pelas investigações nas universidades e instituições de pesquisas e caracterizadas pela simplicidade, eficácia e baixo custo (Neves, 1993).

Segundo o *Manual de Construção de Solo-Cimento* (CEPED, 1984), o solo pode ser utilizado, basicamente, de dois modos:

- embebido em água, constituindo uma massa de consistência plástica ou “argamassa de solo”;
- constituindo uma mistura úmida, compactada ou prensada, de solo e água.

O solo embebido em água possui porosidade elevada, devido à evaporação da água adicionada na preparação da massa. Além disso, o mecanismo de evaporação pode provocar tensões capilares de retração no material, resultando em trincas que aceleram sua deterioração.

Quando o solo é compactado ou prensado, sua umidade é muito inferior à empregada para a massa plástica. Essa umidade, chamada umidade ótima, varia para cada tipo de solo e caracteriza as condições em que se pode obter melhor compactação (maior massa específica). No solo compactado, devido à menor umidade, são menores a porosidade e os efeitos de retração, o que o caracteriza como um material mais durável e de maior resistência mecânica.

Ainda de acordo com o *Manual de Construção de Solo-Cimento* (CEPED, 1984), em ambos os casos de utilização do solo, as propriedades mecânicas e de permeabilidade podem ser melhoradas

significativamente pela adição de pequenas porcentagens de produtos estabilizadores. Desse modo, a mistura de pedacos de palha ou fibras reduz acentuadamente o efeito de retração por secagem da massa plástica. A adição de óleos vegetais ou animais e emulsões asfálticas, tanto na massa plástica como no solo compactado, tem o efeito de aumentar significativamente a sua impermeabilidade, melhorando as condições de durabilidade. A mistura de cimento e/ou cal pode produzir aumentos consideráveis da resistência mecânica.

As reações que envolvem as mudanças de propriedades dos solos por adição de cimento e/ou cal ainda não são plenamente conhecidas. Sabe-se que, na fração arenosa do solo, a ação de cimentação é a mesma que se processa nos concretos, desenvolvendo vínculos de coesão nos pontos de contato com os grãos. Nos solos argilosos, há também reações entre a superfície dos grãos de argila e a cal liberada na hidratação do cimento. Os principais fatores que irão intervir nas características finais do solo estabilizado correspondem ao teor de aglomerante, à natureza do solo e à compacidade da mistura.

Quando o solo não apresenta propriedades adequadas para seu uso na construção, pode-se melhorar suas características com a adição de outro solo ou material, como, por exemplo, o agregado produzido a partir de entulho. Por suas características de material inerte, o agregado reciclado pode contribuir significativamente na correção granulométrica do solo.



TIJOLOS E BLOCOS DE SOLO ESTABILIZADO

Os tijolos e blocos de solo estabilizado são produzidos com o material obtido pela mistura de solo, aglomerante (cimento ou cal) e água, que, após compactada ou prensada em moldes específicos, ganha resistência e durabilidade suficientes para diversas aplicações, especialmente para a execução de alvenarias.

Os tijolos de solo estabilizado podem ser usados em qualquer tipo de construção, para substituir os blocos cerâmicos convencionais, seja em **alvenaria** simples de **vedação**, ou **alvenaria estrutural**, desde que atendam às resistências estabelecidas no projeto (Carvalho & Poroca, 1995). As paredes tanto podem ser aparentes como revestidas, podendo receber diversos tipos de pintura ou revestimento cerâmico.

O sistema construtivo da parede é semelhante ao da alvenaria convencional, sendo necessário apenas identificar as argamassas de assentamento e revestimento mais adequadas às características do componente. Segundo Carvalho & Poroca (1995), as paredes construídas com tijolos de solo estabilizado apresentam comportamento térmico e durabilidade equivalentes às construídas com blocos cerâmicos. Os critérios de projeto devem ser iguais àqueles aplicados ao material tradicional, com os cuidados e serviços de manutenção semelhantes aos de alvenaria convencional.

O processo de fabricação de tijolos e blocos de solo estabilizado é bastante simples e adequado aos sistemas de produção automatizada. Utiliza-se um dispositivo mecânico com sistema de alavanca para prensagem. O princípio fundamental desse equipamento consiste em submeter a mistura de solo, cimento e água a pressões elevadas dentro de moldes metálicos, o que resulta em tijolos com formas e dimensões desejadas.

Após pequeno período de cura, o tijolo fabricado apresenta resistência à compressão similar à de bloco cerâmico, sendo sua resistência tanto mais elevada quanto maior for a quantidade de aglomerante empregada. No entanto, esse consumo deve ser limitado a um teor ideal, que confira ao tijolo a resistência necessária com o menor custo.

Entre as vantagens que apresentam os tijolos de solo estabilizado, podem-se destacar (Associação Brasileira de Cimento Portland, ABCP, 1988):

- utilização de solo do próprio local, reduzindo ou eliminando o custo do transporte;
- manutenção da regularidade de suas formas com faces bastante lisas e planas, implicando menor consumo da argamassa de assentamento e revestimento;
- dispensa do revestimento do tijolo, quando a parede estiver devidamente protegida da ação direta da água;
- redução do consumo de energia e, conseqüentemente, de danos ambientais, por não ser necessário o cozimento do tijolo.

Carvalho & Poroca (1995) ressaltam, também, que o processo de moldagem em prensa permite, além da regularidade dimensional, obter encaixes que podem reduzir o consumo de argamassa de assentamento e proporcionar sistemas construtivos mais simples.

FABRICAÇÃO DE TIJOLOS E BLOCOS DE SOLO ESTABILIZADO

O processo de fabricação do componente da alvenaria — tijolos e blocos de solo estabilizado — corresponde, basicamente, às etapas apresentadas na **Figura 1** (ABCP, 1988):

PREPARAÇÃO DO SOLO

Consiste em destorroar e peneirar, se necessário, o solo seco. A secagem deve ser feita ao ar livre. Recomenda-se usar peneira com abertura de malha da ordem de 5 mm.



PREPARO DA MISTURA

Adiciona-se o cimento ao solo preparado, na proporção previamente estabelecida. Misturam-se os materiais secos, até obter-se coloração uniforme; adiciona-se água aos poucos, até que a mistura atinja a umidade adequada para sua prensagem.



MOLDAGEM DE TIJOLOS E BLOCOS

Coloca-se a mistura no equipamento e procede-se à prensagem e à extração do tijolo ou do bloco, transportando-o em bandeja e acomodando-o numa superfície plana e lisa, em área protegida do sol, do vento e da chuva.



CURA E ARMAZENAMENTO

Após 6 horas de moldados e durante os 7 primeiros dias, os componentes devem ser mantidos úmidos por meio de molhagens sucessivas; os tijolos ou blocos podem ser acomodados em pilhas de até 1,5 metro de altura.

FIGURA 1 - ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS E BLOCOS DE SOLO ESTABILIZADO

A mistura de solos ou adição de outros materiais, como o agregado reciclado, por exemplo, deve ser feita na etapa de preparação do solo.

A mistura dos materiais pode ser manual — pá e enxada — ou mecânica, com equipamentos apropriados, em geral um misturador forçado de eixo vertical. Para solos muitos arenosos, com teor de areia da ordem de 80%, pode-se utilizar a betoneira de eixo inclinado com relativo sucesso. A quantidade a ser preparada é determinada em função da capacidade de produção do equipamento de prensagem. A publicação *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais* (ABCP, 1988) recomenda dimensionar o volume da mistura numa quantidade suficiente para a produção de tijolos ou blocos durante 1 hora de funcionamento da prensa.

A umidade de conformação dos componentes está diretamente relacionada com as características do solo ou da mistura utilizada. Essa umidade pode ser determinada em laboratório, através do ensaio de compactação, realizado de acordo com a NBR 7182. No processo de fabricação, a umidade de conformação dos componentes pode ser verificada, com razoável precisão, da seguinte forma (ABCP, 1988):

- toma-se uma porção da mistura e aperta-se fortemente entre os dedos e a palma da mão; ao abrir a mão, o “bolo” deve ter a marca deixada pelos dedos; se isso não ocorrer, a mistura está muito seca;
- deixa-se o “bolo” cair de uma altura aproximada de um metro, sobre uma superfície dura, de modo que deverá esfarelar-se ao chocar-se com a superfície; se isso não ocorrer, a mistura está muito úmida.

Os tijolos e blocos de solo-cimento devem ser utilizados dentro de, no mínimo, 14 dias após a sua fabricação (NBR 10832; NBR 10833).

EQUIPAMENTOS DE FABRICAÇÃO DE TIJOLOS E BLOCOS

Os tijolos e blocos de solo estabilizado são moldados por prensagem, em equipamentos com moldes, cujo formato possibilite produzir componentes de formas e dimensões variadas. A maquinaria disponível para sua fabricação é diversa e pode atender às necessidades de produção para edificações de diferentes portes. Podem ser utilizados desde um simples equipamento de prensagem até complexas unidades de produção industrial — que englobam pulverizador de solo, peneirador, misturador, dosador, prensa e outros acessórios. O dimensionamento da maquinaria está relacionado com a dimensão, produtividade e custo do empreendimento.

As prensas podem ser operadas manualmente ou com auxílio de motor, que aciona um mecanismo, mecânico ou hidráulico, de prensagem. Ferraz Junior (1995) apresenta um interessante estudo sobre as prensas disponíveis no mercado, ressaltando suas principais características. A **Tabela 1** apresenta a produtividade e a energia de compactação das prensas estudadas.

TABELA 1 - PRODUTIVIDADE DAS PRENSAS PARA COMPONENTES DE SOLO ESTABILIZADO

TIPO DE PRENSA		ENERGIA DE COMPACTAÇÃO (MPa)	TAXA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO*	PRODUÇÃO (tijolos/dia)
Manual	Mecânica	1,5 - 2,0	1,38	300 a 1.200
	Hidráulica	2,0 - 10,0	1,65	2.000 a 2.800
Motorizada	Mecânica	4,0 - 24,0	> 1,65	1.600 a 12.000
	Hidráulica	> 20,0	> 2,00	—

* corresponde à relação entre os volumes da mistura em estado solto e em estado compactado, sendo proporcional à energia de compactação.

As prensas manuais geralmente requerem baixo capital para sua aquisição e manutenção, além de serem leves, pequenas, fáceis de usar e sem obviamente os custos inerentes ao consumo de energia. A baixa taxa de compactação, principalmente da prensa manual mecânica, exige cuidados especiais na seleção e no preparo do solo, para que os tijolos produzidos apresentem resistência à compressão especificada pela norma.

Ferraz Junior (1995) ressalta que a taxa de produção real das prensas manuais pode se diferenciar da taxa de produção nominal fornecida pelos fabricantes, devido ao esforço necessário para sua operação, ao longo de um turno completo de trabalho. Um sistema eficiente de rodízio, na equipe de trabalho, pode evitar a queda gradual de produtividade e eventuais prejuízos na qualidade do componente produzido.

A instalação de pistão hidráulico na prensa aumenta significativamente sua energia de compactação e diminui o esforço físico para operá-la. Permite ainda obter componentes com melhor uniformidade dimensional, mais compactos e com maior resistência mecânica.

Nas prensas motorizadas, também denominadas automáticas, a produtividade pode ser aumentada pelo acoplamento de um sistema rotatório com moldes múltiplos, ao invés de uma plataforma fixa com moldes individuais (Ferraz Junior, 1995).

Alguns modelos possuem um dispositivo acoplado à prensa, que realiza testes de resistência à compressão, para o controle de qualidade dos tijolos produzidos.

Outro interessante estudo sobre equipamentos para produção desses tijolos e blocos foi realizado durante o desenvolvimento do “tijolito”, bloco intertravado de solo-cimento, pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e a Construtora Andrade Gutierrez S. A., visando à fabricação de blocos com

detalhes especiais, de modo a permitir a eliminação da argamassa de assentamento (Assis, 1995). Foram projetadas e construídas prensas manuais, pneumáticas e hidráulicas, para produção simultânea de 1 a 3 componentes, com seção de 10 cm x 20 cm e com carga de prensagem variando de 75 kN até 600 kN, o que equivale a uma energia de compactação que varia de 1,5 MPa a 30 MPa.

Estudando a eficiência — definida como relação entre a produção do equipamento e seu custo —, Assis (1995) demonstra que as prensas manuais são de menor eficiência, seguidas das pneumáticas, sendo de maior eficiência as hidráulicas. Os equipamentos pneumáticos apresentaram desvantagens em relação aos hidráulicos, devido à elevada perda de energia e a limitações na carga de prensagem. Outra observação importante de Assis (1995) refere-se ao baixo custo da prensa em relação ao total do investimento, principalmente para um sistema industrializado, com uso de equipamentos para o preparo da mistura, cura e controle de qualidade.

As prensas que possuem pistão compactador em apenas um sentido devem ser utilizadas basicamente para a produção de tijolos com altura máxima da ordem de 8 cm. Acima desse valor e até a altura de 20 cm, são necessárias prensas com duplo sentido de compactação (ABCP, 1989). Essa limitação não se deve à energia de compactação do equipamento, mas à propriedade de compactação do solo.

A escolha do equipamento de prensagem deve ser apropriada ao empreendimento e deve considerar, entre outros aspectos, a produção desejada e o grau de automatização possível em relação ao investimento. Programas habitacionais realizados (Neves, 1989) comprovam que a técnica da produção de tijolos que utiliza sistemas manuais ou automatizados é muito simples e de fácil assimilação pelos operadores, tanto em regime de mutirão como por administração direta.

CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE SOLO E DOSAGEM DE TRAÇO

O solo é o elemento que entra em maior proporção na mistura, devendo ser selecionado de modo a permitir o uso da menor quantidade possível de estabilizante. Segundo a NBR 10832 e a NBR 10833, os solos adequados para a fabricação de tijolos e blocos de solo-cimento são os que possuem as características apresentadas na **Tabela 2**.

TABELA 2 - CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE SOLOS

CARACTERÍSTICA	REQUISITOS (%)
% passando na peneira ABNT 4,8 mm (n° 4)	100
% passando na peneira ABNT 0,075 mm (n° 200)	10 a 50
Limite de liquidez	≤ 45
Limite de plasticidade	≤ 18

Os limites de consistência (liquidez e plasticidade) são as variáveis que melhor expressam as condições de trabalhabilidade do solo. O aumento dos valores desses limites gera maior dificuldade no destorroamento, mistura e secagem (CEPED, 1984).

Quanto à granulometria, os solos mais adequados para estabilização com cimento são os arenosos. Embora existam solos sem uma distribuição granulométrica que permita a produção de tijolos, existe a possibilidade de misturá-los a outros solos para obtenção de uma mistura de granulometria adequada (ABCP, 1988).

O Manual de Construção de Solo-Cimento (CEPED, 1984) comenta que o consumo de cimento depende fundamentalmente

do tamanho dos grãos e da sua uniformidade. O acréscimo de silte e argila, ou a ocorrência de grãos muito uniformes, acarreta um aumento no consumo de cimento. Por outro lado, a existência de grãos maiores, areia grossa e pedregulho é benéfica, pois tais componentes atuam como enchimento, favorecendo a liberação de uma maior quantidade de cimento para ligar os grãos menores.

Ainda segundo o CEPED (1984), os solos devem ter um teor mínimo da fração fina, pois a resistência inicial do solo estabilizado é devida à coesão da fração fina compactada, uma vez que ainda não se processaram as reações de endurecimento do cimento. Essa resistência permite desmoldagem e manuseio do solo estabilizado após prensagem. Além disso, não devem ser utilizados solos que contenham matéria orgânica, pois essa pode interferir na hidratação do cimento.

A publicação *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais* (ABCP, 1988) recomenda, para a escolha do traco mais adequado, moldar tijolos com proporções, em volume, de cimento e solo de 1:10, 1:12 e 1:14. A proporção adotada da mistura para a fabricação dos tijolos será a que apresentar menor consumo de cimento e que atender aos critérios de resistência à compressão e absorção de água estabelecidos pela NBR 8491.

REQUISITOS PARA CONTROLE DE QUALIDADE

Deve-se assegurar que os tijolos e blocos de solo estabilizado apresentem características adequadas para seu uso em fundações e paredes de edificações. Nesse sentido, além das diversas recomendações resultantes de projetos de pesquisas desenvolvidos, apresentadas em publicações variadas, estão disponíveis documen-

tos que estabelecem requisitos para avaliação dos componentes produzidos. Buscando estabelecer procedimentos de ensaios e critérios para produção de tijolos e blocos de solo-cimento, a ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, publicou as seguintes normas técnicas:

- NBR 8491 — Tijolo macico de solo-cimento. Especificação.
- NBR 8492 — Tijolo macico de solo-cimento — Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio.
- NBR 10832 — Fabricação de tijolo macico de solo-cimento com a utilização de prensa manual. Procedimento.
- NBR 10833 — Fabricação de tijolo macico e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica. Procedimento.
- NBR 10834 — Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural. Especificação.
- NBR 10835 — Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural — Forma e dimensões. Padronização.
- NBR 10836 — Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural — Determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio.

Para qualificar o tijolo de solo-cimento, a NBR 8491 estabelece a verificação das suas características em pelo menos treze amostras, retiradas aleatoriamente em lotes de 10000 a 25000 tijolos. Os critérios estabelecidos para o controle de qualidade de tijolos de solo-cimento estão apresentados na **Tabela 3**.

Esses limites, especificados para o tijolo de solo-cimento, geralmente são adotados também para avaliação de tijolos de solo estabilizado, independentemente do tipo de aglomerante ou material utilizado em substituição ao solo.

TABELA 3 - LIMITES ESPECIFICADOS PARA TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

CARACTERÍSTICA	Nº AMOSTRA	EXIGÊNCIA NBR 8491	
Varição dimensional	—	± 3 mm	
Resistência à compressão	10	valor médio	≥ 2,0 Mpa
		valor individual	≥ 1,7 Mpa
Absorção de água	3	valor médio	≤ 20 %
		valor individual	≤ 22 %

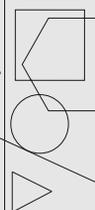
EXPERIÊNCIA REALIZADA

USO DO AGREGADO RECICLADO DE SALVADOR EM TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO

O estudo sobre a utilização do agregado reciclado de Salvador em tijolos de solo-cimento, desenvolvido pelo Projeto Entulho Bom, busca contribuir para o atendimento à crescente demanda de habitação popular, através da implantação de uma alternativa tecnológica apropriada ao meio urbano, além de reduzir o impacto ambiental gerado pela própria indústria da construção civil.

A metodologia adotada consistiu em selecionar um solo, identificar a proporção adequada de cimento para a fabricação do tijolo de solo-cimento e, substituindo o solo por proporções variadas de agregado reciclado, determinar a propriedade física, mecânica e de durabilidade dos tijolos produzidos.

Para determinação do traco seguiu-se o procedimento indicado na NBR 10823. Foram adotados tracos com teores de 10%, 12% e 14% de cimento, em massa, e determinadas a resistência mecânica e a absorção de água. Adotou-se o traco que atendesse às condições



de resistência à compressão maior ou igual a 2,0 MPa e absorção de água menor ou igual a 20% e com menor consumo de cimento. Os tracos de 12% e 14% atenderam a essas condições; por apresentar menor consumo de cimento adotou-se o traco de 12%.

Em seguida, o solo foi substituído por agregado reciclado nas proporções de 25%, 50%, 75%, 85% e 100% em massa, e determinadas as propriedades dos tijolos produzidos de acordo com os procedimentos estabelecidos em normas e em outras recomendações técnicas indicadas neste capítulo.

Além da verificação das dimensões, da determinação da resistência à compressão e da absorção de água, também foi avaliada a durabilidade dos tijolos. Essa foi determinada pela perda de massa e resistência à compressão de tijolos submetidos a seis ciclos de imersão em água e secagem em estufa a 70°C, com duração mínima de 24 horas para cada atividade do ciclo. O ensaio adotado, realizado com base no procedimento estabelecido na NBR 13544, também mede a variação volumétrica e de umidade. Por considerar que as solicitações de abrasão superficial em paredes são menos severas que as previstas para outros usos do solo-cimento (em estradas, por exemplo), modificou-se o procedimento de ensaio, não se empregando o processo de escovação dos tijolos ao final de cada ciclo. Além disso, o ensaio foi realizado em tijolos, em substituição aos corpos-de-prova especificados na NBR 13544. Segundo o *Manual de Construção de Solo-Cimento* (CEPED, 1984), a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP recomenda, para dosagens de solo-cimento, uma perda de massa inferior ou igual a 10%, após o 6º ciclo de imersão e secagem em corpos-de-prova moldados por compactação no cilindro de Proctor, de acordo com o procedimento estabelecido na NBR 12024.



Comparando-se os valores obtidos em tijolos com diferentes proporções de agregado reciclado com os dos tijolos de solo-cimento (sem material reciclado), foi possível avaliar a influência do agregado reciclado nas propriedades dos tijolos de solo estabilizado e o comportamento dos tijolos de solo-agregado reciclado-cimento. Adotando-se os limites estabelecidos na **Tabela 3** e perda de massa máxima de 10%, determinaram-se as proporções de agregado reciclado adequadas para serem adicionadas ao solo selecionado.

Os tijolos foram fabricados numa prensa manual, com capacidade para a moldagem simultânea de três unidades, com dimensões de 22 cm x 11 cm x 5,5 cm. Para evitar a introdução de variáveis indesejáveis no estudo, os tijolos foram preparados por um único operador.

A fabricação dos tijolos e os ensaios necessários ao desenvolvimento do trabalho foram realizados nos laboratórios do Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais da Escola Politécnica da UFBA e no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento – CEPED.



MATERIAIS UTILIZADOS

Para a fabricação dos tijolos foram utilizados:

- cimento Portland tipo CP II Z 32, marca Poty;
- água potável, fornecida pela concessionária;
- dois diferentes tipos de solos, denominados laterítico e saprolítico, típicos da Região Metropolitana de Salvador;
- agregado reciclado miúdo da Região Metropolitana de Salvador.

As características dos dois solos e do agregado reciclado são apresentadas na **Tabela 4** a seguir:

TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS E DO AGREGADO REICLADO MIÚDO

PROPRIEDADE	PROCEDIMENTO	SOLO LATERÍTICO	SOLO SAPROLÍTICO	AGREGADO REICLADO	
Composição Granulométrica					
• pedregulho (%)	NBR 7181 NBR 6502	0	0	0	
• areia (%)		grossa (%)	2	0	0
		média (%)	25	9	10
		finas (%)	53	23	72
• silte (%)		1	33	2	
• argila (%)	19	35	16		
Material que passa na peneira					
• 4,8 mm (%)	NBR 7181	100	100	100	
• 0,075 mm (%)		20	68	18	
Limite de liquidez (%)	NBR 6459	20	62	NL	
Limite de plasticidade (%)	NBR 7180	15	42	NP	
Massa específica (g/cm ³)	NBR 6508	2,55	2,60	2,59	
Compactação					
• massa específica máx. (g/cm ³)	NBR 7182	1,83	1,38	1,86	
• umidade ótima (%)		9,3	21,6	13,8	

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Inicialmente foi selecionado o solo laterítico, pois atende aos limites estabelecidos na NBR 10832, apresentados na **Tabela 2**. De acordo com os critérios adotados para dosagem, determinou-se a proporção de 12% de cimento para a fabricação do tijolo de solo-cimento. A incorporação do agregado reciclado ao solo laterítico, no entanto, não permitiu a fabricação de tijolos prensados, pois diminuiu significativamente a quantidade de material fino, que é o responsável pela resistência inicial necessária para o manuseio dos tijolos recém-moldados. Tentou-se modificar esse comportamento com a adição de cal, além da quantidade de cimento já estabelecida

(Brum, et al., 2000). Entretanto, constatou-se ser essa uma solução economicamente inviável, pois a quantidade de cal necessária para permitir o manuseio do tijolo após prensagem, cerca de 10%, aumentaria consideravelmente o seu custo.

Partiu-se, então, para o estudo do solo denominado saprolítico, que apresentava maior teor de finos, permitindo, após a adição do agregado reciclado, a obtenção de uma mistura com características adequadas à fabricação de tijolos prensados.

Os tijolos produzidos com o solo saprolítico e o agregado reciclado foram submetidos à verificação dimensional e aos testes para determinação de suas características, de acordo com a programação indicada na **Tabela 5**.

TABELA 5 - PROGRAMAÇÃO DE ENSAIOS INDICANDO A QUANTIDADE DE TIJOLOS PARA CADA CARACTERÍSTICA ESTUDADA.

CARACTERÍSTICA	PROCEDIMENTO	NÚMERO DE TIJOLOS
Verificação dimensional	Medida Individual	24
Massa específica	CETA nº 4	5
Absorção de água	NBR 8492	5
Resistência à compressão		10
Durabilidade	NBR 13554 *	5

* ensaio modificado, sem escovação

Para cada traco, foram moldados 70 tijolos, perfazendo um total de 350 unidades. O percentual de cimento de 12% permaneceu constante, independentemente da composição do solo e do agregado reciclado.

Os resultados apresentados na **Tabela 6** correspondem aos dos tijolos preparados com solo saprolítico sem material reciclado e

solo saprolítico com agregado reciclado, nas proporções de 25%, 50%, 75% e 85%. A substituição total do solo não foi estudada, pois os tijolos moldados não apresentaram resistência inicial suficiente para a desmoldagem imediata e transporte para área de cura e armazenamento. Essa tabela também apresenta os resultados obtidos com os tijolos produzidos com solo laterítico, sem agregado reciclado.

Os ensaios foram realizados em tijolos com idade superior a 14 dias.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E DE SOLO-AGREGADO RECICLADO-CIMENTO

CARACTERÍSTICA		LATERÍTICO	SAPROLÍTICO					TENDÊNCIA ¹
		Solo-cimento	Solo-cimento	Solo-agregado reciclado-cimento				
		TEOR DE AGREGADO RECICLADO						
		0%	0%	25%	50%	75%	85%	
Teor de finos ² (%)		20	68	62	48	33	26	decrecente
Tolerância nas dimensões (mm)		± 3	± 3	± 3	± 3	± 3	± 3	estável
Massa específica (g/m ³)		2,3	1,3	1,5	1,5	1,6	1,7	crescente
Absorção de água (%)		12	30	21	18	15	13	decrecente
Resistência à compressão (MPa)	natural	2,1	1,5	2,5	3,0	3,0	3,6	crescente
	após ciclo	—	—	2,7	3,2	3,5	4,8	crescente
Perda de massa (%)		—	—	8,7	9,3	9,5	11,8	crescente

¹ Tendência para tijolos com solo saprolítico

² Material que passa na peneira 0,075mm



Os resultados obtidos para os tijolos de solo-cimento comprovam a influência do tipo de solo empregado. Os resultados de resistência à compressão e de absorção de água do tijolo de solo saprolítico não atendem aos limites estabelecidos na NBR 8491 (**Tabela 3**). Tampouco atendem aos critérios para seleção de solos (**Tabela 2**). Confirma-se, então, que os limites relativos à composição granulométrica e os índices de consistência (**Tabela 2**) são adequados para seleção de solos.

As dimensões reais dos tijolos apresentaram pequena variação em relação às dimensões do molde (22 cm x 11 cm x 5,5 cm), que atendem à tolerância de 3 mm estabelecida na NBR 8491. Deve-se ressaltar que a altura do tijolo é determinada pela energia de compactação e pela quantidade de material introduzido no molde, antes da prensagem. No processo de fabricação com prensa manual, a altura do tijolo depende diretamente da atuação do operador.

Com exceção do aspecto dimensional, a proporção do agregado reciclado influencia diretamente outras propriedades do tijolo prensado. Maiores proporções do agregado reciclado aumentaram o teor de material retido na peneira 0,075 mm, de natureza arenosa, e diminuíram o teor de finos. O aumento dos teores de agregado reciclado proporciona tijolos mais compactos, com massa específica mais elevada, e com valores decrescentes de absorção de água por imersão. Além disso, obtêm-se tijolos mais resistentes à compressão, porém menos resistentes às variações hidrotérmicas e às intempéries, devido ao aumento na perda de massa.

Verifica-se que a perda de massa aumenta à medida que são adicionados maiores teores de agregado reciclado. Entretanto, não foram verificadas variações de volume e de umidade nos tijolos produzidos com diferentes teores de agregado reciclado, ao longo dos seis ciclos de molhagem e secagem. Os resultados da resistência à

compressão, ao final dos ciclos de imersão e secagem, são maiores que os dos tijolos em condição natural. Supõe-se que o processo de imersão e secagem melhora a hidratação e modifica a forma dos compostos hidratados do cimento, aumentando a resistência dos tijolos.

As **Figuras 2, 3 e 4** mostram que existe relação linear entre o teor de finos e a resistência à compressão, absorção de água e perda de massa dos tijolos com solo saprolítico e teor de agregado reciclado utilizado.

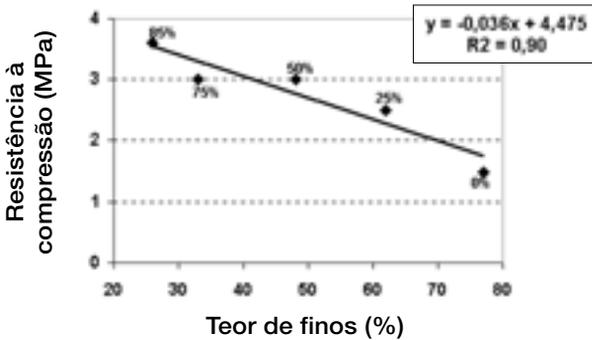


FIGURA 2 - RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE FINOS E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

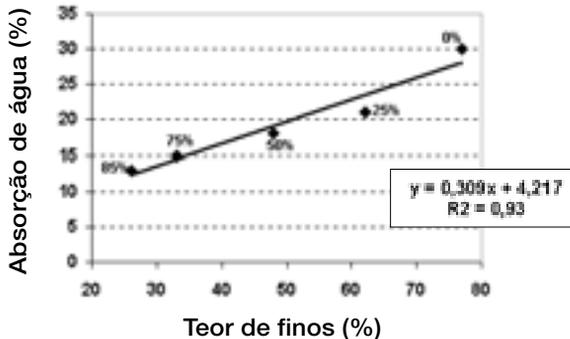


FIGURA 3 - RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE FINOS E ABSORÇÃO DE ÁGUA

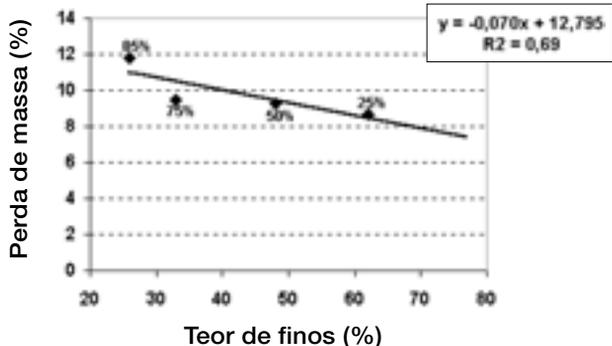


FIGURA 4 - RELAÇÃO ENTRE O TEOR DE FINOS E PERDA DE MASSA APÓS SEIS CICLOS DE IMERSÃO E SECAGEM

As **Figuras 5, 6 e 7** apresentam as médias dos valores de resistência à compressão, absorção de água e perda de massa, respectivamente, em função do teor de agregado reciclado de cada traço e dos limites adotados.

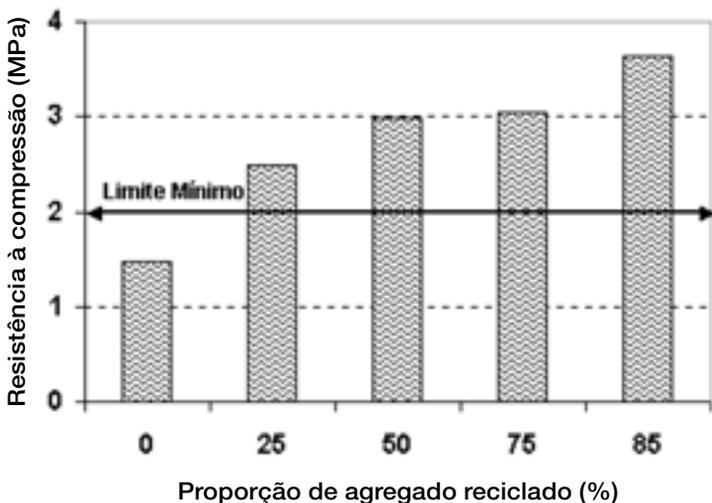


FIGURA 5 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS TIJOLOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE AGREGADO RECICLADO USADO NO TRAÇO



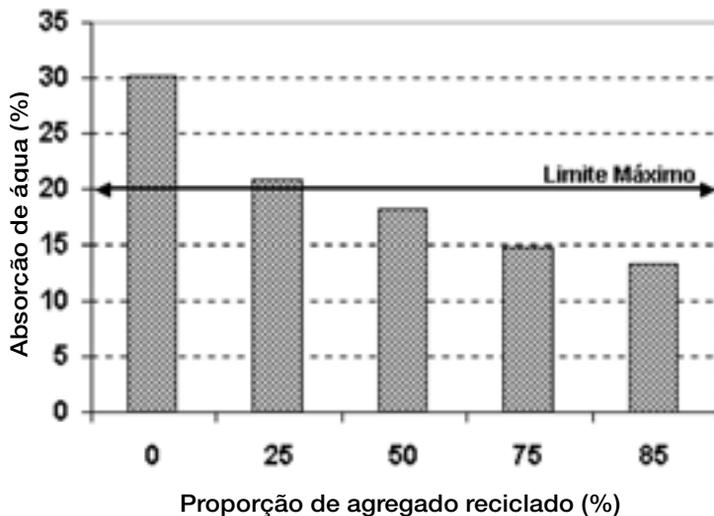


FIGURA 6 - ABSORÇÃO DE ÁGUA DOS TIJOLOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE AGREGADO RECICLADO USADO NO TRAÇO

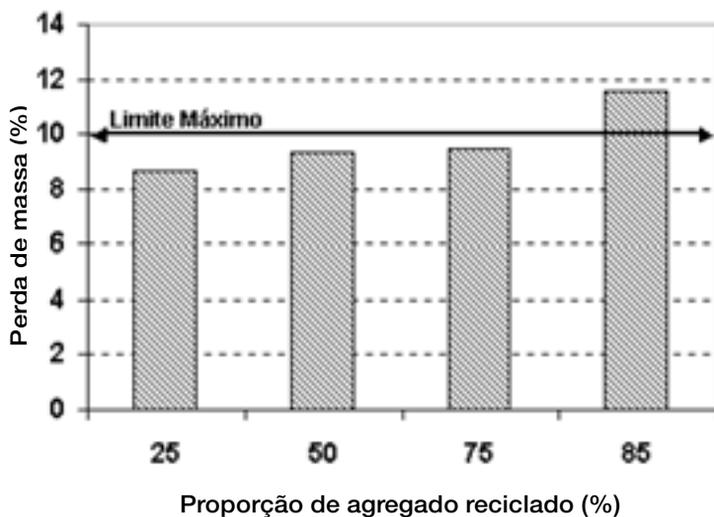


FIGURA 7 - PERDA DE MASSA DOS TIJOLOS EM FUNÇÃO DA PROPORÇÃO DE AGREGADO RECICLADO NO TRAÇO

Os tijolos de solo-agregado reciclado-cimento atenderam ao limite mínimo de resistência à compressão. Com teores de agregado reciclado acima de 50%, atenderam ao limite máximo de absorção de água; abaixo de 75%, atenderam ao limite máximo para perda de massa.

A **Tabela 7** indica as proporções de agregado reciclado adicionadas ao solo estudado e que atendem a cada um dos critérios adotados.

TABELA 7 - TEOR DE AGREGADO RECICLADO APROVADO EM FUNÇÃO DOS REQUISITOS ADOTADOS

REQUISITO	CRITÉRIO	TEOR DE AGREGADO RECICLADO				
		0%	25%	50%	75%	85%
Material menor 0,075mm	10% a 50%					
Varição dimensional máxima	± 3 mm					
Resistência à compressão média	≥ 2,0 MPa					
Absorção de água	≤ 20%					
Perda de massa	≤ 10%	—				
	Especificação NBR 10832					
	Adotado na experiência de tijolos solo-agregado reciclado-cimento					

Dessa forma, pode-se considerar que, para o solo utilizado, a proporção de agregado reciclado deve situar-se na faixa de 50% a 75%; o limite inferior é determinado pelo critério de absorção de água, e o limite superior pela durabilidade (perda de massa). Essa faixa também atende ao critério estabelecido na NBR 10832 para seleção de solos adequados à fabricação de tijolos de solo-cimento, relativo à percentagem de material com dimensão de grãos menor que 0,075 mm (teor de finos).

Por fim, observa-se que a resistência à compressão dos tijolos de solo-agregado reciclado-cimento, com proporção de 50% e 75%, é superior ao resultado obtido com tijolos de solo-cimento de solo laterítico (**Tabela 6**). Isso comprova que o desempenho do tijolo de solo-agregado reciclado-cimento é semelhante ou superior ao do tijolo de solo-cimento.

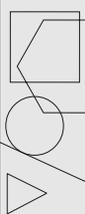
CONCLUSÃO

O estudo realizado comprova que é possível utilizar o agregado reciclado de Salvador em tijolos de solo-cimento. As características do solo e do material reciclado são diferentes nas diversas regiões, e as proporções adequadas para substituição do solo por agregado reciclado devem ser analisadas em cada caso distinto.

Este estudo definiu uma metodologia fundamentada em experiências anteriores e recomendações técnicas para fabricação de tijolos de solo-cimento, assim como adotou critérios para avaliação dos resultados que podem ser usados em estudos sobre a incorporação de outros materiais para fabricação de tijolos de solo estabilizado prensado.

Através da experiência realizada, identificou-se, como proporção adequada para a fabricação de tijolos de solo-agregado reciclado-cimento, a faixa entre 50% e 75% do agregado reciclado de Salvador, em substituição ao solo saprolítico estudado. As demais proporções não atenderam aos critérios estabelecidos neste estudo.

Deve-se ressaltar que o estudo utilizou apenas um tipo de prensa manual. A utilização de outros tipos de prensa pode alterar os resultados obtidos. Supõe-se que prensas mais eficientes



podem melhorar o comportamento dos tijolos de solo-agregado reciclado-cimento.

A reciclagem do entulho na fabricação de tijolos de solo estabilizado promove o aproveitamento racional dos resíduos de construção e demolição, transformando-os em matéria-prima para obras de construção, o que favorece, principalmente:

- o aproveitamento de resíduos pelo próprio setor que o produz;
- a minimização de uso de recursos naturais;
- a redução da área para descarte (disposição).

Além disso, a utilização do agregado reciclado em tijolos de solo estabilizado amplia as possibilidades de reciclagem do entulho, material considerado indesejável pela população.

O entulho, após devidamente reciclado, pode ser transformado em matéria-prima para construção civil, pois melhora determinadas características do solo, permitindo seu aproveitamento em tijolos de solo-agregado reciclado-cimento. Desse modo, amplia a oferta de alternativas tecnológicas simplificadas, para a fabricação de moradias populares.

Estudos como este contribuem para o desenvolvimento de um processo de edificação sustentável na Região Metropolitana de Salvador, melhorando a qualidade de vida de sua população. Ademais, buscou-se aqui analisar as características de um material reciclado, desenvolvendo-lhe uma aplicação apropriada, proporcionando ainda fundamentação ao meio técnico e, por fim, apresentando à sociedade uma solução harmoniosa para o uso do entulho.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas hidráulicas*: prática recomendada. São Paulo, 1989. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). *Fabricação de tijolos de solo-cimento com a utilização de prensas manuais*: prática recomendada. São Paulo, 1988. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Solo-cimento na habitação popular. São Paulo, 1985. 8 p. (Boletim Técnico, 129).

ASSIS, João B.S. de. Bloco intertravado de solo-cimento “Tijolito”. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA, 1995, São Paulo. *Anais...* São Paulo: NUTAU-FAUUSP, 1995. p.149-162.

BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO - BNH (Brasil). *Tijolos maciços de solo cimento*; fabricação e utilização. Rio de Janeiro, 1985. 20 p.

BRUM, Irineu A. S. et al. Recycling of Construction Waste from Salvador - Brazil for Producing of Soil-Cement Bricks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5., 2000, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 2000. 1 CD.

CALMON, João et al. Aproveitamento do resíduo de corte de granito para produção de tijolos de solo cimento. In: ENTAC 98 - QUALIDADE NO PROCESSO CONSTRUTIVO, 1998, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: NPC/ECV/CPC/UDESC, 1998. p.899-907.

CARVALHO, Aldânio R.O. de; POROCA, Jamesson dos S. *Como fazer e usar tijolos prensados de solo estabilizado*. Brasília: IBICT, 1995. 38 p. (Banco de Soluções, 24).

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO (CEPED). *Manual de construção com solo-cimento*. 3. ed. São Paulo: ABCP, 1984. 147 p.

CENTRO TECNOLÓGICO DE ARGAMASSA (CETA). *Massa específica, absorção de água por imersão e índice de vazios*: procedimento n. 4. Salvador: UFBA/CEPED, 1998. 3 p.



FERRAZ JUNIOR, Francisco de A.C. Equipamentos modernos para a produção de tijolos de terra prensada. In: WORKSHOP ARQUITETURA DE TERRA, 1995, São Paulo. *Anais ...* São Paulo: NUTAU-FAUUSP, 1995. p.163-179.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). *Utilização de blocos vazados de solo-cimento na construção de habitações*. 2. ed. atual. Rio de Janeiro: BNH, 1985. 51 p.

MAFFEI, C. A. A. Casas baratas ou casas de baixo custo? *Techne*, São Paulo, n. 1. p.24-25, nov./dez., 1992. (Habitação).

NEVES, Célia M. M. Habitação e saneamento com materiais alternativos. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA HABITAÇÃO E SANEAMENTO, 1987, Olinda. *Anais...* Brasília: MHU/PNUD, 1988. p. 273-282.

NEVES, Célia M. M. Inovações tecnológicas em construção com terra: o solo-cimento. In: ENTAC 93 - AVANÇO EM TECNOLOGIA E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE EDIFICAÇÕES, 1993, São Paulo. *Anais...* São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1993. p. 221-230.

NEVES, Célia M. M. Tijolos de solo-cimento. In: DEZ ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA HABITAÇÃO. Brasília: MINTER/PNUD, 1989. p.141-166.

PINTO, T. P. Resultados da gestão diferenciada. *Techne*, São Paulo, n. 31. p. 31-34, nov./dez., 1997. (Reciclagem).

WATANABE, Mário. O desafio de privatizar a moradia popular. *Qualidade na construção*, São Paulo, n. 22, p.12-20, 2000. (Habitação).



NORMAS TÉCNICAS CITADAS¹

- NBR 6459 - *Solo*: determinação do limite de liquidez. Método de ensaio. 1984.
- NBR 6502 - *Rochas e solos*: terminologia. 1995.
- NBR 6508 - *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm*: determinação da massa específica: método de ensaio. 1984.
- NBR 7180 - *Solo*: determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. 1984.
- NBR 7181 - *Solo*: análise granulométrica: método de ensaio. 1984.
- NBR 7182 - *Solo*: ensaio de compactação: método de ensaio. 1982.
- NBR 8491 - *Tijolo macico de solo-cimento*: especificação. 1984.
- NBR 8492 - *Tijolos macicos de solo-cimento*: determinação da resistência à compressão e da absorção: método de ensaio. 1982.
- NBR 10004 - *Resíduos sólidos*: classificação. 1987.
- NBR 10832 - *Fabricação de tijolo macico de solo-cimento com a utilização de prensa manual*: procedimento. 1989.
- NBR 10833 - *Fabricação de tijolo macico e bloco vazado de solo-cimento com a utilização de prensa hidráulica*: procedimento. 1989.
- NBR 10834 - *Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural*: especificação. 1994.
- NBR 10835 - *Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural*: forma e dimensões: padronização. 1994.
- NBR 10836 - *Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural*: determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. 1994.
- NBR 12024 - *Solo-cimento*: moldagem e cura dos corpos-de-prova cilíndricos: método de ensaio. 1992.
- NBR 13554 - *Solo-cimento*: durabilidade por molhagem e por secagem: método de ensaio. 1996.

¹ Publicação ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.





Célia Maria Martins Neves - *Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Ambiental e Urbana - UFBA, Pesquisadora do CEPED - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento*

Alex Pires Carneiro - *Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Ambiental e Urbana - UFBA, Coordenador do Projeto Entulho Bom*

Dayana Bastos Costa - *Estudante de Engenharia Civil - UFBA, Pesquisadora do Projeto Entulho Bom*

