

## ESTADO LIMITE DE UTILIZAÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO E FIBRAS DE MADEIRA

Mantilla J.N.R.<sup>1</sup>; Carrasco, E.V.M.<sup>2</sup>; Silva S.G. da<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Prof. Dr. Associado, Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, Universidade Federal de Minas Gerais,

<sup>2</sup> Prof. Dr. Associado, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais

<sup>3</sup> Pesquisadora, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais



### RESUMO

*Este trabalho tem como objetivos estudar o caminho da ruptura de tijolos intertravados de solo-cimento, acrescido de fibras de madeira, sob carregamento de compressão e obter um indicativo do limite a partir do qual ocorra modificação do mecanismo de ruptura dos tijolos, utilizando análise experimental de tensões. Deformações horizontais ( $\epsilon_x$ ) e verticais ( $\epsilon_y$ ) dos tijolos foram obtidas com cinco rosetas. A partir dos valores dessas deformações e utilizando-se as equações da resistência dos materiais, foram determinados os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade, e calculadas as tensões correspondentes a cada roseta conforme as equações do Estado Plano de Tensões. Para determinar a trajetória da ruptura foi necessário confeccionar gráficos tensão-carregamento de cada roseta. Conhecendo-se essa trajetória determinaram-se as tensões relacionadas à modificação do mecanismo de ruptura do tijolo. O aparecimento de uma fissuração prematura ou excessiva são parâmetros adotados para determinar o estado limite de utilização dos tijolos.*

*Palavras chave:* Análise experimental de tensões, Tijolos de solo-cimento, Estados limites.

### 1- INTRODUÇÃO

A terra crua vem sendo utilizada pelo homem há milênios, visando resolver o problema de habitação da humanidade. A mesma está presente em qualquer parte do mundo. É comum encontrar construções históricas que resistem ao tempo, mostrando a influência e comprovando a durabilidade deste material. Vestígios arqueológicos em todo o mundo comprovam a existência de várias cidades da antiguidade construídas com este

material dentre as quais podem-se destacar Jericó, na Palestina, cidade bíblica erguida há 10.000 anos sendo talvez a mais antiga, Taveira (1987) e Lopes (2002).

Segundo Taveira (1987), o emprego do solo-cimento em habitações no Brasil foi iniciado em 1948, com a construção das casas do Vale Florido, na Fazenda Inglesa em Petrópolis, Rio de Janeiro. Desde 1930 eram feitas experiências com solo-cimento no país. No final da década de 1950, a mistura de solo e cimento estava

totalmente aprovada no Brasil, passando a ser difundida como nova alternativa para baratear construções.

A inclusão de elementos de reforço nos solos para melhoria de suas propriedades já era do conhecimento de povos da antiguidade. Isto pode ser confirmado através de algumas construções, ainda existentes nos dias de hoje, como as muralhas de Ziggurat de Agar Quf, na Mesopotâmia (1.400 a.C.), construída utilizando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Os Incas utilizavam lã de lhama misturada ao solo na construção de estradas resistentes ao tempo. São também conhecidas aplicações de mantas de folhas e galhos sobre camadas de solos moles, antes da construção de aterros nestes solos, no interior do Brasil e em outros países, Montardo et al (2001).

Segundo o CEPED (1985), dentre as vantagens na utilização do solo-cimento pode-se citar: solo disponível no local da obra ou próximo a ela (dispensando transporte e a utilização de equipamentos sofisticados, o que torna o custo da escavação baixo), correções simples na sua granulometria e sem necessidade de mão de obra especializada (caso o solo não se enquadre nas especificações), boas condições de conforto térmico e acústico (comparáveis às das construções em alvenaria de tijolos cerâmicos). As construções com solo-cimento são muito confortáveis pois a “terra crua” é má condutora de calor. Construções em solo-cimento são também resistentes ao fogo; as paredes não oferecem a menor condição para instalação e proliferação de insetos nocivos à saúde levando assim a uma maior higiene do local; grande durabilidade e manutenção reduzida, pois, por apresentar elevada resistência e boa impermeabilidade, as construções com ele executadas são muito duráveis, resistindo ao longo dos anos ao desgaste e à umidade.

A principal desvantagem, no entanto, está na grande variedade de solos existentes o que implica na execução de ensaios para a caracterização dos solos utilizados. Tais ensaios podem ser executados em qualquer laboratório por se

tratarem de ensaios simples e rotineiros. Os ensaios necessários à avaliação da mistura solo-cimento são: granulométrica, compactação e compressão simples.

A inclusão de fibras no solo-cimento (matriz frágil) é uma técnica mais recente, porém utilizando conceitos milenares. As vantagens são diversas. Pode-se citar: bom isolamento termo-acústico, Savastano e Agopyan (1998), propriedades mecânicas melhoradas (resistência à tração, à flexão e ao impacto) e comportamento alterado após a fissuração, pois ao invés de ocorrer ruptura súbita do material após o início da fissuração da matriz, ocorre uma deformação plástica considerável, mais adequada à construção civil, Agopyan (1993).

A inclusão de fibras de madeira já é mais recente. Segundo Latorraca e Albuquerque (2002) e Latorraca e Silva (2003), o compósito à base de cimento-madeira de eucalipto possui excelentes propriedades de isolante térmico e acústico, além da fácil trabalhabilidade apresenta ainda uma excelente resistência a fungos e boa aderência a diferentes substratos. A porcentagem de madeira na mistura influencia diretamente nestas características. Em geral, as fibras inibem a amplitude das fissuras associadas à ruptura do compósito. Este fato leva a um aumento nas áreas sob as curvas tensão x deformação. Esta propriedade é comumente referida como tenacidade e representa o trabalho da fratura ou a capacidade de absorção de energia do compósito. Segundo Montardo et al (2001), as fibras não impedem a formação das fissuras, porém, controlam a propagação das mesmas ao longo da massa cimentada, beneficiando as propriedades mecânicas no estado pós-fissuração. A principal desvantagem mostrada por Beraldo e Pimentel (1999) e por Beraldo e Carvalho (2000) está na incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento. A constituição química da biomassa devido à presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, pode afetar de forma adversa a hidratação do cimento. Estas desvantagens no entanto, não inviabilizam a utilização de determinado

resíduo. É possível minimizar ou até mesmo evitar os efeitos da incompatibilidade física através de tratamentos físico-químicos aplicados sobre as partículas vegetais.

O processo de fabricação dos tijolos consiste na homogeneização, prensagem e endurecimento das matérias-primas anteriormente descritas, previamente determinadas quantitativamente. Para esta utilização, os solos considerados ideais são os areno-siltosos, os areno-argilosos, os silto-arenosos e os silto-argilosos, sendo que a quantidade de areia deve ser maior ou igual à quantidade de finos (silte e argila). Solos conhecidos popularmente como saibro, piçarra, as terras vermelhas e amarela são de boa qualidade, podendo, na maioria das vezes, serem utilizados. O solo deve ser isento de matéria orgânica, devendo-se, portanto, evitar o uso de solos pretos ou cinza-escuros por serem prejudiciais às propriedades do produto final, os tijolos. Torrões, pedregulhos e raízes devem ser retirados do solo uma vez que reduzem as qualidades do tijolo. O peneiramento torna-se então imprescindível para que tal condição seja cumprida. Para se obter um tijolo ideal onde a resistência seja otimizada, é necessário que o mesmo seja produzido respeitando-se parâmetros pré-determinados pelo ensaio de compactação no solo e no solo-cimento. Vale a pena ressaltar, então, que a otimização do tijolo é feita baseando-se na equivalência entre a compactação Proctor Normal e a prensagem dos tijolos.

Os tijolos intertravados são idealizados para não utilizar nenhuma argamassa de assentamento seja vertical ou horizontal. A estabilidade e a resistência a esforços horizontais são combatidos pelos encaixes verticais e horizontais. O uso incorreto desta tecnologia pode ocasionar em construções com condições inadequadas tais como frestas e fissuras, onde, roedores e insetos se abrigam, colocando em risco a saúde de seus moradores. Porém, quando a tecnologia é bem aplicada, observam-se construções com qualidade e resistência satisfatórias. Segundo Lopes (2002), obras construídas

com tijolos intertravados apresentam rápida, fácil e econômica execução.

A avaliação do comportamento mecânico de tijolos de solo-cimento utilizando técnicas de análise experimental de tensões foi pouco estudado. Um dos primeiros a estudar as propriedades de tensão-deformação de paredes de solo-cimento foi Bryan (1988). Reddy et al (2005), apresenta as relaciones de tensão-deformação e as propriedades elásticas de blocos de solo-cimento. Os resultados indicam que há um aumento de 2,5 vezes na resistência para a duplicação de conteúdo de cimento. O módulo de elasticidade de bloco de solo-cimento variou entre 2.000 e 6.000 MPa e aumenta 2,5 vezes quando o teor de cimento é aumentado de 6 a 8 %. Reddy et al (2007), Reddy et al (2008-a), Reddy et al (2008-b) e Kim et al (2008) apresentam as leis constitutivas dos blocos de solo-cimento variando sua composição (argila, silte e cimento). Bryan et al (2004), Kaushik et al (2007), Gusmaste et al (2007) e Brencich et al (2008) usam técnicas variadas para determinar as relações tensão-deformação de tijolos cerâmicos, prismas e pequenas paredes.

A utilização de extensômetros elétricos juntamente com uma análise experimental de tensões para determinar o comportamento de elementos estruturais da alvenaria, foi pouco utilizada. Beitia et al (2009), apresenta um estudo sobre o uso da técnica do “furo central” em paredes de alvenaria. Utilizam 8 extensômetros elétricos formando rosetas.

Neste trabalho com o objetivo de estudar o caminho da ruptura, bem como obter um indicativo de um limite a partir do qual ocorra a modificação do mecanismo de ruptura dos tijolos, foi utilizado extensômetros elétricos e técnicas de análise experimental de tensões.

## **2- MATERIAIS**

### **2.1 - Solo**

Para a composição dos solos estudados foram utilizados, os solos de

duas jazidas na região de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, misturadas com pequenas porções de areia fina e grossa e agrofilito, com a finalidade de conseguir uma granulometria do solo que permiti-se estar dentro dos limites recomendados por Silva (2004), para fabricação de tijolos de solo-cimento. As curvas granulométricas das misturas dos solos resultantes (solo Homog. 1 e solo Homog. 3), são mostradas na fig. 1.

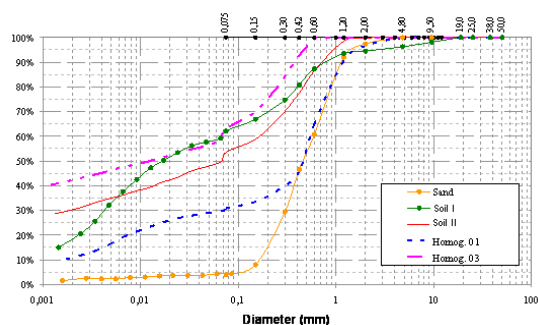


Fig 1 – Curvas granulométricas dos solos e curvas limites

## 2.2 - Cimento e água

Utilizou-se o cimento Portland de alto forno para uso geral do tipo CP III-32-RS. Como foi utilizada água destilada para os ensaios de laboratório, visando manter o mesmo parâmetro, utilizou-se também água destilada para os tijolos.

## 2.3 - Resíduos de madeira

Para o estudo dos resíduos foram coletadas sobras de peças de madeira, denominadas de serragem, de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. Esta serragem foi peneirada para que somente fossem utilizados os resíduos contidos entre as peneiras # 4 (4,8 mm) e # 10 (2,0 mm). Visando a “impermeabilização” dos resíduos, fez-se uma solução de sulfato de alumínio [ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ] e água (1% de sulfato em relação à água utilizada). O resíduo foi colocado nesta solução por 20 minutos. Em seguida, foi levado à estufa (60°C) até sua secagem total. Esta “impermeabilização” ou proteção da fibra com sulfato de alumínio, segundo Savastano e Agopyan (1998) auxilia no controle da degradação da mesma. As características dos solos utilizados na confecção dos tijolos estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos materiais utilizados na confecção dos tijolos intertravados

Solo	IP (%)	Proctor Normal		
		$w_{ot}$ (%)	$\gamma_{d,máx}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{s,P.N.}$ (MPa)
Homog 1	10.0	13.5	18.58	0.131
Homog. 3	11.0	26.1	14.85	0.182

sendo: IP índice de plasticidade,  $w_{ot}$  teor de umidade ótimo,  $\gamma_{d,máx}$  peso específico seco máximo e  $\sigma_{s,P.N.}$  resistência a compressão com energia do Proctor Normal.

## 2.4 - Confecção dos tijolos

Para a confecção dos tijolos de solo-cimento-resíduos de madeira, foi fabricada uma prensa hidráulica de tal forma que fosse possível controlar a pressão durante a prensagem dos mesmos. Para isto, a mesma foi instrumentada com um manômetro, que foi calibrado com um anel dinamométrico, possibilitando assim a conversão da medida fornecida pelo instrumento para a medida da pressão de compactação (2,0 MPa), fig 2. Após a moldagem, os tijolos foram levados para a câmara úmida onde permaneceram durante sete dias à uma temperatura de  $23 \pm 0,2$  °C e umidade relativa em torno de 100%.



(a) Prensa para moldagem de tijolos



(b) Extração do tijolo

Fig 2 – Prensa de moldagem de tijolos. LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

## 2.5 - Corpos de prova para estudo

Foram confeccionados três tijolos, um primeiro de solo-cimento para o solo homogeneizado 01, um segundo de solo-cimento para o solo homogeneizado 03 e um terceiro de solo-cimento e 0,5% de fibras para o solo homogeneizado 01. A finalidade foi verificar a influência do tipo de solo e a fibra de madeira no estado limite último do tijolo. As dimensões dos tijolos foram as apresentadas na fig. 3. Esta geometria permite um encaixe entre tijolos na horizontal através do sistema macho-fêmea, com uma pequena folga para evitar ruptura durante a confecção da alvenaria. Os orifícios e os encaixes verticais servem, também, para evitar o deslocamento horizontal e permitir a passagem da instalação elétrica e em alguns casos reforçar a alvenaria com o enchimento de concreto.

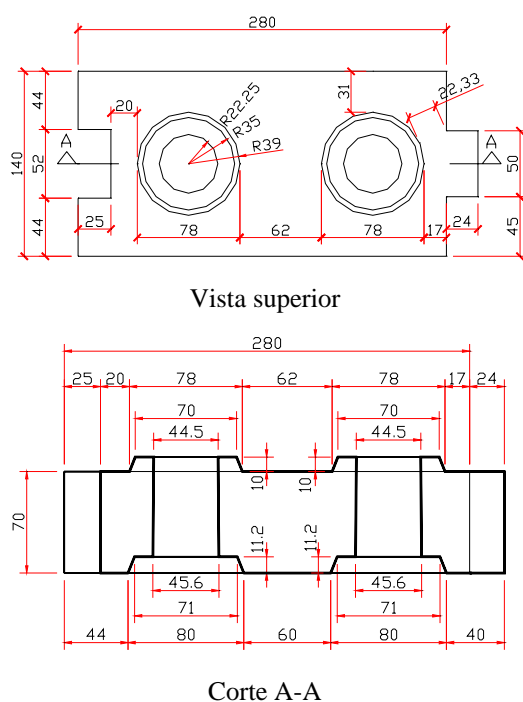


Fig. 3 – Dimensões em milímetros estudadas para os tijolos

## 2.6 - Equipamentos

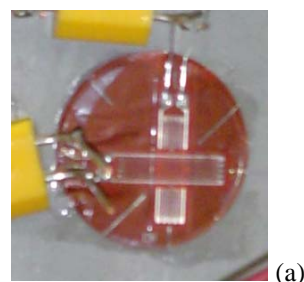
Para os ensaios a compressão simples nos tijolos, foi utilizada a máquina universal da marca EMIC, modelo DL 30000, com capacidade de 300 kN mostrada na fig. 4. Esta máquina possui controle automático de carregamento e de deslocamento.

Para a instrumentação dos tijolos foram utilizadas para cada um deles cinco rosetas de dois extensômetros da marca Kyowa, modelo KFG-10-120-D16-11 (fig. 5-a). Os extensômetros foram colados na superfície dos tijolos previamente preparada, utilizando um adesivo específico. Para o preparo da superfície foi aplicada no tijolo seco à temperatura ambiente uma massa plástica, com o objetivo de regularizar a superfície tornando-a lisa e proteger os extensômetros da umidade. O intervalo entre a aplicação da massa plástica e a colagem dos extensômetros foi de 24 horas, sendo os tijolos ensaiado após 12 horas no mínimo depois de colados os extensômetros.



Fig 4 – Máquina universal com capacidade de 300 kN. LAEES – Escola de Engenharia – UFMG

Foi utilizada uma célula de carga, acoplada à máquina universal, fabricada pela Micro Análise, modelo SWH, com capacidade de 200 kN (fig. 5-b). Os dados fornecidos pelos extensômetros e pela célula de carga foram coletados por um sistema de aquisição de dados (SAD).



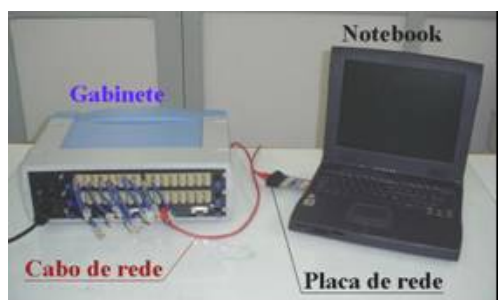
(a)



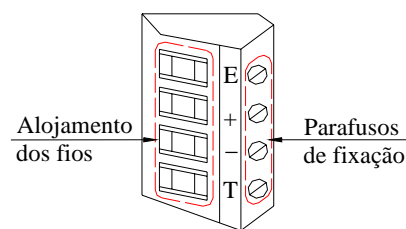


Fig. 5 – Sensores para ensaios dos tijolos instrumentados (a) roseta, (b) célula de carga de 200 kN

Utilizou-se o Sistema de Aquisição de Dados ADS-2000 da Lynx. Este sistema é composto de um gabinete ligado a um computador. No gabinete estão localizados o módulo controlador (AC-2122) e o módulo condicionador (AI-2160). O módulo AC-2122 possui um conector (de controle dos sinais analógicos e digitais) que permite sua conexão com a placa instalada no computador através de um cabo. Todos os instrumentos apresentados foram ligados ao sistema ADS-2000 e os dados foram coletados através do programa Aqdados 7.0 instalado no notebook (fig. 6-a). O tratamento dos dados consistiu de uma filtragem passa-baixas (frequências de corte de 60 Hz) e de uma redução do número de dados coletados através de substituição de cinco valores por sua média. O sistema ADS-2000 possui 32 canais, cada qual com um conector de entrada para sinais analógicos onde existem quatro pontos para alojamento dos fios provenientes dos sensores utilizados. Cada um destes pontos tem uma função específica, como pode ser visto na fig. 6-b. Os fios alojados neste conector serão ligados aos circuitos existentes na placa AI-2160. Estes circuitos podem ser configurados por meio de jumpers, de acordo com a necessidade de cada sensor aí acoplado (1/4 ou ponte completa).



(a)

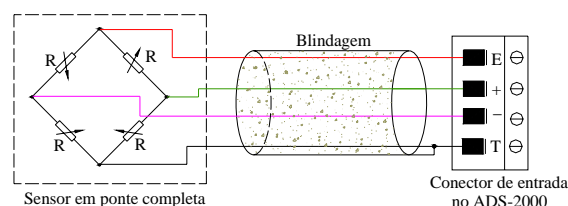


(b)

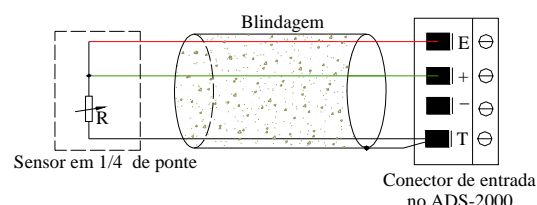
E: sinal de excitação de sensores;  
+ : terminal positivo de entrada de sinal;  
- : terminal negativo de entrada de sinal;  
T : Terra.

Fig. 6 – (a) Sistema de aquisição de dados ADS-2000 e (b) Conector de entrada de sinais

O sensor da célula de carga possui quatro extensômetros elétricos ligados internamente em um circuito do tipo ponte completa de Wheatstone (fig. 7-a). Já as rosetas por serem formadas por extensômetros individuais foram ligadas em um circuito do tipo 1/4 de ponte de Wheatstone (fig. 7-b).



(a)



(b)

Fig. 7 – (a) Configuração em ponte completa, (b) Configuração para sensores em 1/4 de ponte

Os aparelhos utilizados foram calibrados em seus respectivos canais de entrada através de uma regressão linear no programa Aqdados. O programa faz a leitura da tensão na entrada do canal correspondente a um valor conhecido na unidade de engenharia. A reta obtida por este par de valores corresponde ao fundo de escala do canal. Nas calibrações executadas, a correlação entre os valores determinantes da constante de calibração foi sempre em torno de 99%. A célula de carga de 200 kN foi calibrada na máquina universal da EMIC, com o auxílio de uma outra célula (capacidade de 300 kN) da

própria máquina. Os extensômetros não foram calibrados pois já vêm configurados de fábrica. Para aceitação desta calibração e para uma conversão dos valores dos extensômetros para valores de engenharia no programa Aqdados, utilizou-se uma constante conhecida como valor de engenharia ( $V_{eng}$ ), cuja determinação é mostrada na Eq. 1.

$$V_{eng} = \frac{R_g}{k \times (R_g + R_{cal})} = 910,66 \mu\epsilon = (910,66 \times 10^{-6}) \quad (1)$$

sendo  $R_g$  a resistência do extensômetro ( $R_g = 120,2 \Omega$ ),  $k$  o fator gage do extensômetro ( $k = 2,12$ ) e  $R_{cal}$  a resistência da placa condicionadora ( $R_{cal} = 62140 \Omega$ ).

## 2.7 - Instrumentação dos tijolos

Para a captura das deformações horizontais ( $\epsilon_x$ ) e verticais ( $\epsilon_y$ ), os tijolos foram instrumentados, cada um deles, com cinco rosetas, formadas por dois extensômetros (um vertical e outro horizontal), nos locais mostrados na fig. 8. A medida da carga foi realizada pela célula de carga com capacidade de 200 kN. O critério utilizado para a localização das rosetas foi baseado num modelamento numérico linear, isto é, nos lugares onde apresentava maior tensão.

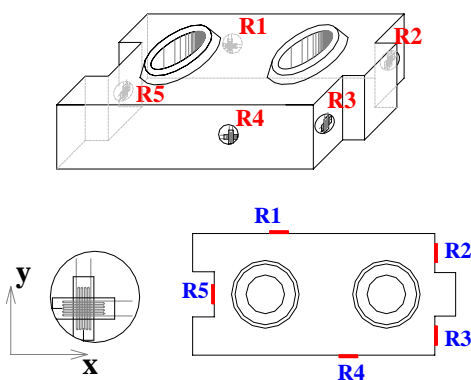


Fig. 8 – Posição e numeração das rosetas no tijolo intertravado

## 2.8 - Metodologia de ensaio

Os tijolos instrumentados foram ensaiados à compressão simples, com carregamento aplicado e monitorado através de uma célula de carga, fig 9. A velocidade de carregamento foi de 1mm/min. Para uma melhor distribuição do carregamento na face superior do tijolo,

utilizou-se a forma superior da máquina de tijolos como distribuidor de carga, por isso não foi executado o capeamento nas faces dos tijolos.



Fig. 9 – Ensaio de compressão simples nos tijolos instrumentados

## 3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados coletados pelo SAD foram filtrados com frequências de corte de 60 Hz (para eliminar ruído elétrico) e de uma redução do número de dados coletados através da substituição de cinco valores por sua média.

A partir dos dados capturados em cada extensômetro, e utilizando-se as equações da resistência dos materiais, foram determinados os coeficientes de Poisson em cada um dos pontos mostrados e os módulos de elasticidade. O módulo de elasticidade foi determinado a partir da lei constitutiva do material (gráfico tensão-deformação), e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) a partir da relação das deformações horizontais ( $\epsilon_x$ ) e verticais ( $\epsilon_y$ ) de cada extensômetro elétrico ( $\nu = \epsilon_y/\epsilon_x$ , ou seja a inclinação da curva). A Tabela 2 mostra os valores para o coeficiente de Poisson encontrados nos três tijolos instrumentados. As rosetas R1, R2, R3 e R4 apresentam um comportamento similar o que não ocorre com a roseta R5. Observa-se que em cada tijolo, para cada

roseta foi encontrado um valor diferente para o coeficiente de Poisson. A geometria do tijolo colabora para que tal situação ocorra. O coeficiente de Poisson determinado pela R5 mostrou-se diferente dos demais devido provavelmente às perturbações ocasionadas pela configuração geométrica do tijolo. Para o tijolo fabricado com o solo Homog. 3 observou-se variação entre os valores do coeficiente de Poisson. Porém, a relação de similaridade entre as posições foi mantida, o que pode indicar uma influência do tipo de solo utilizado nesta determinação

Tabela 2 – Valores do coeficiente de Poisson nos tijolos

Roseta	1	4	2	3	média	5
SCI-0% resíduos	0,23	0,25	0,23	0,23	0,22	0,16
SCI-0,5% resíduos	0,18	0,23	0,22	0,17	0,20	0,16
SC3-0% resíduos	0,32	0,33	0,34	0,30	0,32	0,12

Utilizando os valores do coeficiente de Poisson encontrados para cada ponto, o módulo de Elasticidade (módulo de Young) determinado para a mistura solo-cimento e solo-cimento-resíduos de madeira, e as deformações, foram calculadas as tensões correspondentes a cada roseta a partir das equações que relacionam as tensões e deformações no estado tridimensional, Eq. 2.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times [(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times [(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_z)] \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times [(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)]\end{aligned}\quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}; \tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz}; \tau_{zx} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{zx}$$

Por se tratar de um estado uniaxial de tensões, as tensões  $\sigma_x$ ;  $\sigma_z$ ;  $\tau_{yz}$ ;  $\tau_{zx}$ ;  $\tau_{xy}$  são iguais a zero, assim considerando o plano xy, tem-se a Eq 3.

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -\frac{\nu}{E} \sigma_y \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E}\end{aligned}\quad (3)$$

Sendo:  $E$  o módulo de Young em MPa,  $\nu$  o coeficiente de Poisson,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  as tensões normais no plano em MPa.

O gráfico da fig. 10, apresentado como exemplo, mostra as tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  obtidas em cada ponto no tijolo do solo homog. 1. As tensões em x são provavelmente devido as forças de atrito nos pratos dos CPs.

Para a análise da trajetória da ruptura foi necessário confeccionar gráficos individuais de cada roseta, onde se mostram as tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  atuantes em cada uma delas. No gráfico da fig. 11 é mostrado, como exemplo, os gráficos das tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , nos locais onde foram instaladas as rosetas, para o tijolo confeccionado com solo homog. 1. Em cada curva determinou-se o carregamento responsável pela perda de capacidade resistente, indicada pela mudança do nível do esforço. O maior dos dois foi determinante na avaliação da trajetória. Para a determinação da sequência da ruptura, os maiores carregamentos obtidos de cada ponto foram ordenados de forma crescente. Nos gráficos, onde se lê  $s_x$  e  $s_y$  têm-se as componentes da tensão  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ .



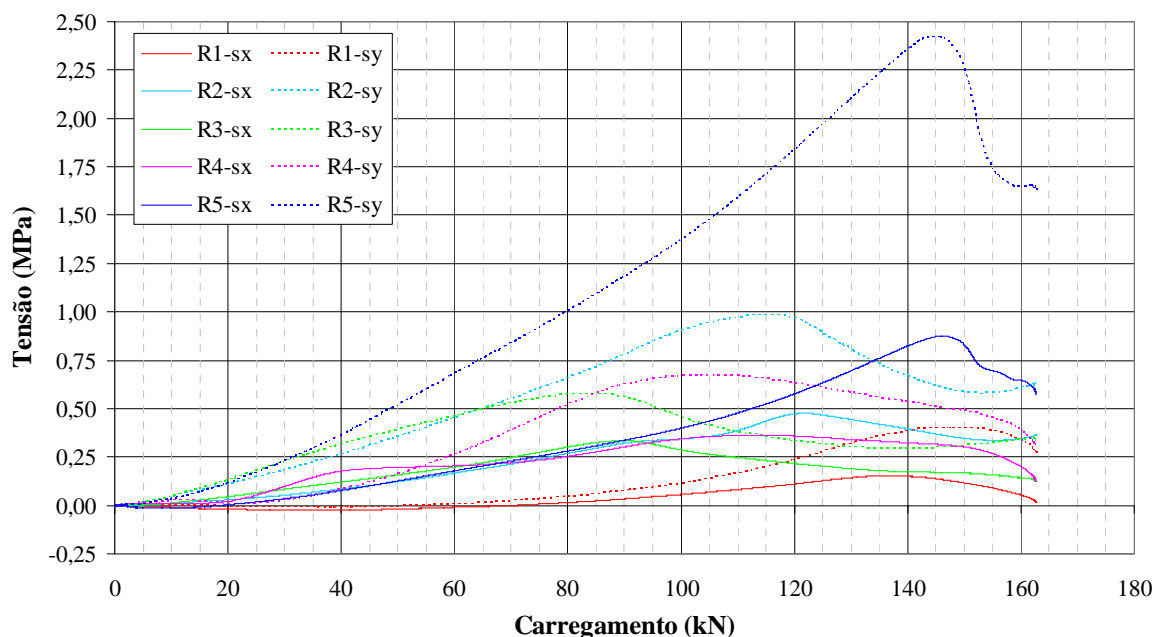
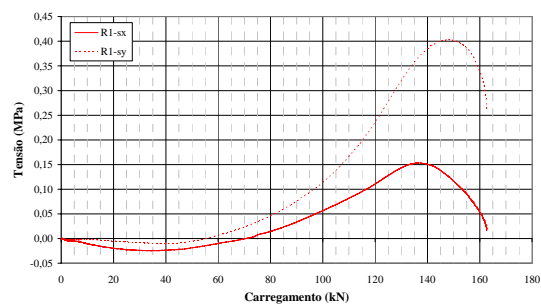


Fig. 10 – Análise da tensão em cada roseta para o tijolo fabricado com solo Homog. 1 e 0% de resíduos

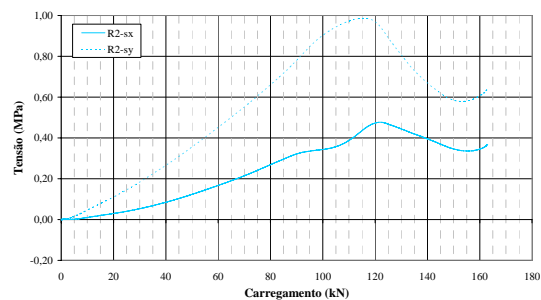
A partir das curvas dos gráficos, determinou-se o caminho da ruptura. A Tabela 3 mostra a trajetória da ruptura, apresentando a sequência das rosetas. Observa-se a ocorrência de um comportamento semelhante nos tijolos com solo Homog. 1 e 0,5% de resíduos e com solo Homog. 3 sem resíduos. Ambos apresentam uma ductilidade maior que o tijolo com solo Homog. 1 e 0% de resíduos. O solo Homog. 3, naturalmente mais plástico devido a maior presença de fração argilosa, apresenta inicialmente uma maior ductilidade. Já o solo Homog. 1 com a adição de 0,5% de resíduos aumenta sua ductilidade. Observa-se também que a comparação entre os tijolos mais ou menos dúcteis mostrou que a ruptura começou de forma oposta. Esta trajetória de ruptura fornece indícios de que a ductilidade afeta o caminho da ruptura.

Tabela 3 – Trajetória da ruptura nos tijolos

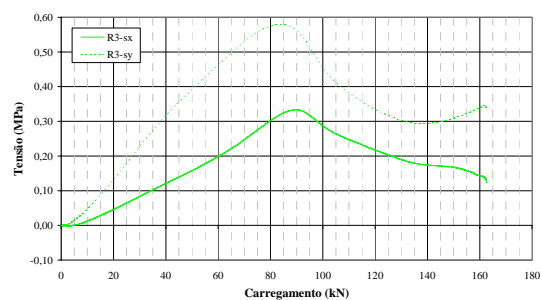
Sequência de ruptura	
SC1-0% resíduos	3 $\Rightarrow$ 4 $\Rightarrow$ 2 $\Rightarrow$ 1 $\Rightarrow$ 5
SC1-0,5% resíduos	5 $\Rightarrow$ 4 $\Rightarrow$ 1 $\Rightarrow$ 2 $\Rightarrow$ 3
SC3-0% resíduos	5 $\Rightarrow$ 1 $\Rightarrow$ 4 $\Rightarrow$ 2 $\Rightarrow$ 3



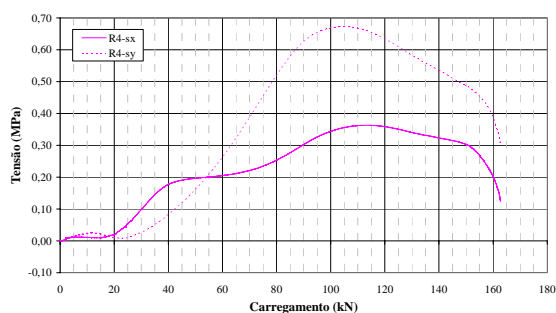
Análise da tensão na roseta R1



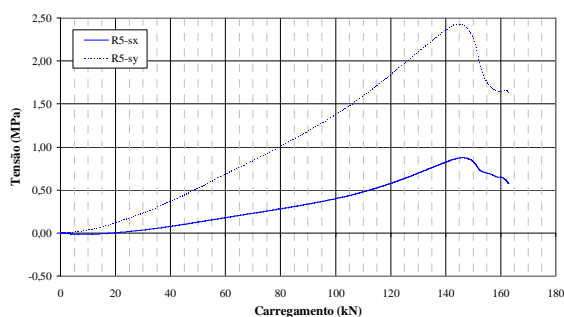
Análise da tensão na roseta R2



Análise da tensão na roseta R3



Análise da tensão na roseta R4



Análise da tensão na roseta R5

Fig. 11 — Análise de tensões do tijolo com solo Homog. 01 e 0 % de resíduos

Conhecendo-se a trajetória da ruptura, determinou-se as tensões relacionadas à modificação do mecanismo de ruptura do tijolo. Sabe-se que o estado limite de utilização é caracterizado pela impossibilidade de emprego da estrutura, no todo ou em parte, quanto às condições necessárias de conforto e durabilidade, mesmo que ela não tenha esgotado sua capacidade portante. O aparecimento de deformações excessivas ou uma fissuração prematura ou excessiva, etc. são parâmetros adotados para esta determinação. Desta forma, nos tijolos estudados, a partir das curvas tensão x carregamento, procurou-se o carregamento responsável pelo primeiro indício de alteração do mecanismo de ruptura, mesmo

que não aparente, pois existe uma possibilidade que esteja atingindo-se seu limite de utilização. Uma das características dos tijolos estudados é não utilizar reboco, por isto, qualquer fissura aparente poderia comprometer suas características estéticas. A Tabela 4 mostra as tensões de utilização obtidas para os três tijolos, bem como o módulo transversal (G). Conhecendo-se a trajetória da ruptura, o menor carregamento dentre todos os cinco pontos do tijolo, admitiu-se como sendo este o responsável pelas tensões de utilização. Nas rosetas onde a primeira ruptura ocorreu, ou seja os valores limites prováveis de ocorrência da tensão de utilização, são destacados na Tab. 4. Os demais valores mostrados referem-se às tensões atuantes nos pontos indicados pelas rosetas, quando da aplicação do carregamento equivalente a tal tensão.

Os valores de tensões mostrados na Tabela 4 dão indícios de que a tensão de utilização do tijolos estudados varia: entre 0,33 MPa e 0,56 MPa quando fabricados com solo Homog. 1 e 0% de resíduos; entre 0,28 MPa e 0,86 MPa quando fabricados com solo Homog. 1 e 0,5% de resíduos; e entre 0,35 MPa e 1,26 MPa quando fabricados com solo Homog. 3 e 0% de resíduos. O módulo de distorção (G) foi determinado

Pode-se dizer que este estudo indica um valor específico para a tensão de utilização de forma preliminar, uma vez que se avaliou apenas um tijolo de cada tipo.

Tabela 4 – Tensões de utilização nos tijolos

Solo homogeneizado 01 + cimento + 0% resíduo									
Roseta 1 $v_1 = 0,23$ $G_1 = 192,87$ MPa		Roseta 2 $v_2 = 0,23$ $G_2 = 193,25$ MPa		Roseta 3 $v_3 = 0,21$ $G_3 = 196,20$ MPa		Roseta 4 $v_4 = 0,27$ $G_4 = 186,67$ MPa		Roseta 5 $v_5 = 0,16$ $G_5 = 203,37$ MPa	
$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
0,034	0,075	0,322	0,781	0,333	0,561	0,302	0,627	0,337	1,184
Solo homogeneizado 01 + cimento + 0,5% resíduo									
Roseta 1 $v_1 = 0,18$ $G_1 = 109,06$ MPa		Roseta 2 $v_2 = 0,25$ $G_2 = 103,51$ MPa		Roseta 3 $v_3 = 0,14$ $G_3 = 112,93$ MPa		Roseta 4 $v_4 = 0,23$ $G_4 = 104,69$ MPa		Roseta 5 $v_5 = 0,16$ $G_5 = 111,21$ MPa	
$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
0,465	1,005	0,256	0,463	0,784	1,104	0,048	0,349	0,278	0,856
Solo homogeneizado 03 + cimento + 0% resíduo									
Roseta 1 $v_1 = 0,07$ $G_1 = 184,49$ MPa		Roseta 2 $v_2 = 0,35$ $G_2 = 146,59$ MPa		Roseta 3 $v_3 = 0,30$ $G_3 = 151,83$ MPa		Roseta 4 $v_4 = 0,05$ $G_4 = 187,46$ MPa		Roseta 5 $v_5 = 0,12$ $G_5 = 175,97$ MPa	
$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)
0,051	0,232	0,259	0,380	0,153	0,264	-0,020	0,076	0,353	1,262

As fig. 12 e 13 mostram as linhas de ruptura em varias posições. O conhecimento destas linhas possibilitou a determinação dos pontos onde se situariam as rosetas, e conseqüentemente onde seriam avaliadas as tensões atuantes. Na fig. 12 observa-se linhas de ruptura verticais próximas às extremidades do tijolo. A existência de furos nos tijolos, talvez tenha causado pontos de fragilidade próximos à esta região.



Fig. 12 – Ruptura do tijolo – face longitudinal

Os encaixes existentes no tijolo mostram rupturas diferenciadas. Nas reentrâncias dos tijolos se observam algumas linhas de fissuras horizontais. Já próximo às saliências tem-se uma linha de ruptura inclinada, fig. 13.

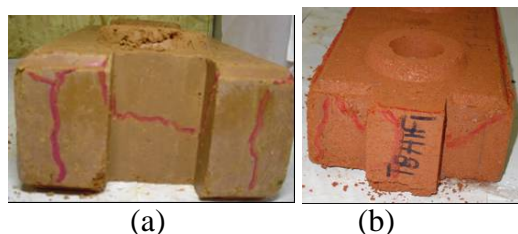


Fig. 13 – Ruptura do tijolo - região do encaixe (a) fêmea, (b) macho

As fig. 14 e 15 mostram a melhoria conseguida com a inclusão dos resíduos. Os tijolos confeccionados com solo sem resíduos tendem a apresentar um

comportamento frágil. Com a inclusão dos resíduos vegetais, a ruptura tende a ficar mais dúctil. Notar a abertura das fissuras existentes nos tijolos sem resíduos e as linhas de fissuras apresentadas nos tijolos com resíduos.



Fig. 14 – Ruptura do tijolo - solo Homog. 3 (a) 0% resíduos fêmea, (b) 0,5 % resíduos



Fig. 15 – Ruptura do tijolo - solo Homog. 1 (a) 0% resíduos fêmea, (b) 1 % resíduos

#### 4- CONCLUSÕES

A geometria do tijolo propiciou a determinação de valores distintos de tensão, Módulo de Elasticidade e coeficiente de Poisson em cada ponto coincidente com as rosetas.

A determinação do caminho da ruptura mostrou comportamentos semelhantes para os tijolos que apresentaram uma maior ductilidade (plasticidade natural do solo Homog. 3 – mais argiloso - ou aumento da ductilidade

conseguida pela inclusão dos resíduos vegetais no solo Homog. 1 – mais arenoso). O tijolo menos dúctil (solo Homog. 1 sem resíduos) apresentou um caminho de ruptura inverso. Conhecendo-se o momento do início da ruptura foi possível a determinação de um limite provável da tensão de utilização (possivelmente primeiro indício de alteração de comportamento do tijolo e também primeiro ponto de fissura). Os ensaios realizados apenas dão indícios de sua ocorrência, pois só foi avaliado experimentalmente um tijolo de cada tipo.

## 5- REFÊRENCIAS

- Agopyan, V. 1993. O emprego de materiais fibrosos na construção civil. Anais do Simpósio Internacional sobre materiais reforçados com fibras para a construção civil, EPUSP, São Paulo. SP. Brasil. p.11-25.
- Beraldo, A.L. e Carvalho, J.V. 2000. Efeito de variáveis nas características de compósito Eucalipto-cimento. XXX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Fortaleza, Ceará. Brasil, p. 17-29.
- Beraldo, A.L. e Pimentel, L.L. 1999. Efeito de tratamentos físico-químicos sobre a resistência à compressão de compósitos de partículas de pinus e cimento. XXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, São Paulo, SP, Brasil, p 119-128.
- Brencich A.; Corradi, C.; Gambarotta L. 2008. Engineering Structures 30 (5): 3629-3643.
- Bryan D. E. e Mervyn J. K. 2004. Compressive Behavior of Unconfined and Confined Clay Brick Masonry. Journal of Structural Engineering, 130 (4): 650-661.
- Bryan, A.J. 1988. Soil cement as a walling material .1. Stress-strain properties. Building and Environment, 23 (4): 321-330.
- CEPED – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, 1985. Cartilha para construção de paredes monolíticas em solo cimento. 4ª edição. Rio de Janeiro, RJ., Brasil, BNH / DEPEA., 39 p.
- Kaushik, H.B.; Rai, D.C.; Sudhir, K.J. 2007. Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (9): 728739.
- Kim, Y.T. ; Kim, H.J.; Lee, G.H. 2008. Mechanical behavior of lightweight soil reinforced with waste fishing net. Geotextiles and Geomembranes, 26 (6): 512-518.
- Latorraca, J.V. e Silva, G.C. 2003. Compósitos Cimento-Cadeia de Eucalipto. II Seminário de produtos sólidos de madeira de Eucalipto – SIF –. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, p. 75-86.
- Latorraca, J.V.F. e Albuquerque, C.E.C. 2002. Produção de painéis cimento-madeira de eucalipto. Anais Seminário Sólidos de Eucalipto: Avanços Científicos e Tecnológicos, Lavras, Minas Gerais, Brasil, p. 25-36.
- Lopes, W.G.R. 2002. A taipa de mão no Brasil, Anais I SIACOT – I Seminário Ibero-Americano de construção com terra, Salvador, Ba, Brasil, p. 16-18.
- Montardo, J.P.; Consoli, N.C.; Prietto, P.D.M. 2001. Comportamento mecânico de compósitos Solo-Cimento-Fibra: Estudo do efeito das propriedades dos materiais constituintes, Revista Solos e Rochas, 24 (3), p. 191-209.
- Reddy, B.V.V. e Gupta, A. 2005. Characteristics of cement-soil mortars, Materials and Structures. 38 (280): 639-650.
- Reddy, B.V.V. e Gupta, A. 2005. Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils Materials and Structures. 38 (280): 651-658.
- Reddy, B.V.V. e Gupta, A. 2008. Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry. Construction and Building Materials, 22 (8): 1614-1623.
- Reddy, B.V.V. e Vyas, C.V.U. 2008. Influence of shear bond strength on compressive strength and stress-strain characteristics of masonry. Materials and Structures, 41 (10): 1697-1712.
- Reddy, B.V.V.; Lal, R.; Rao, K.S.N. 2007. Enhancing bond strength and characteristics of soil-cement block masonry. Journal of Materials in Civil Engineering, 19 (2): 164-172.
- Savastano, H. e Agopyan, V. 1998. Fibras naturais para produção de componentes construtivos. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados. Cali, Colombia, Universidad del Valle/Cyted Proyecto VIII. 5.
- Segantini, A.A. da S. e Carvalho, D. 2000. Aplicação de solo-cimento em elementos de fundação. Evolução da Pesquisa em Ilha Solteira-SP. Anais do 4º seminário de Engenharia de Fundações Especiais e

Mantilla J.N.R.; Carrasco, E.V.M.; Silva S.G. da

Geotecnia. São Paulo, SP, Brasil, p. 339-348.

Taveira, E.S.N. 1987. O solo-cimento no campo e na cidade. Construir, morar, habitar. Coleção Brasil Agrícola, Ícone editora. 2ª edição. São Paulo, SP.

## **6- AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo subsídio financeiro à pesquisa.