

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO À COMPRESSÃO DE PAREDES INTERTRAVADAS COM TIJOLOS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Judy Norka Rodo de Mantilla

Dra. Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Profa Assistente, Faculdade de Engenharia e Arquitetura
– FUMEC, judy.mantilla@fumec.br

Terezinha Espósito

Dra. Escola de Minas - UFOP
Prof a Associada, Depto. de Engenharia de Transportes
e Geotecnia, Escola de Engenharia – UFMG, esposito@
etg.ufmg.br

Luis Eustáquio Moreira

Dr. PUC – Rio de Janeiro
Prof. Associado, Depto. de Engenharia de Estruturas,
Escola de Engenharia – UFMG, luis@dees.ufmg.br

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco

Dr. Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Prof. Titular, Depto. de Engenharia de Estruturas, Escola
de Engenharia – UFMG, mantilla@dees.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho trata da avaliação técnica do desempenho de paredes executadas com tijolos de rejeitos de minério de ferro e cimento (TSFC) quando solicitadas à compressão simples. Foram construídas três paredes no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas da UFMG, com dimensões de 150 cm de largura, 240 cm de altura e 15 cm de espessura e ensaiadas em um pórtico de reação com aplicação monotônica de carga, registrando-se as medidas do encurtamento e do deslocamento lateral das mesmas, seguindo as especificações da norma brasileira NBR 10837. Durante os ensaios surgiram as primeiras fissuras com uma tensão de 0,56 MPa, correspondente a apenas 3,8 % da tensão de ruptura do tijolo isolado. Em relação aos deslocamentos das paredes, vertical e horizontal, constatou-se que o deslocamento horizontal foi

praticamente desprezível em todas elas. Quando do aparecimento das microfissuras, estas evoluíram para fissuras e finalmente para trincas, assim a ruptura das paredes ocorreu por esmagamento, após uma ocorrência generalizada de trincas, do mesmo modo que os tijolos, o que indica uma regularidade de comportamento. Não foi observada flambagem das paredes devido ao deslocamento horizontal ser desprezível no colapso. Foram realizados também ensaios de compressão para determinação da resistência do tijolo, do prisma (dois tijolos sobrepostos) e da argamassa, seguindo as especificações de normas nacionais. Os resultados mostraram uma alta resistência à compressão dos tijolos, média de 14,57 MPa, com coeficiente de variação relativamente pequeno, 13,6%, para 7 de corpos-de-prova ensaiados. Todos eles romperam-se do mesmo modo, por esmagamento. Sob ambos os aspectos analisados, resistência e modo de ruptura, há uma regularidade nos resultados, o que é um fator positivo. Os prismas do mesmo modo, apresentaram também alta resistência à compressão, 9,82 MPa em média, com coeficiente de variação também relativamente baixo, 13,1%, embora se constatasse uma perda de resistência da ordem de 33%, em relação ao tijolo isolado. Esses prismas também se romperam por esmagamento, do mesmo modo que os tijolos. A argamassa apresentou uma alta resistência à compressão, média de 25,2 MPa, e ótimo desempenho, com desvio padrão de apenas 0,88. A parede apresentou boa resistência mecânica, cuja tensão limite de resistência foi de 2,05 MPa, em média, o que representa 14 % da resistência dos tijolos. No que se refere às deformações das paredes observou-se que para a tensão limite de resistência de 2,05 MPa, média das três paredes, ocorreram deformações relativamente altas, de 0,6 %. Isto significa que a parede é flexível. Para a tangente do ângulo da reta com a horizontal denominado módulo de deformabilidade axial, se obteve um valor médio de 420 MPa. Ressalta-se que paredes de tijolos queimados cerâmicos e blocos de concreto apresentam módulos de deformabilidade axial de 1170 MPa e 720 MPa, respectivamente, o que significa que as paredes ensaiadas são mais deformáveis do que aquelas. Em serviço, os materiais devem estar abaixo dos estados limites, tanto de resistência quanto

de utilização. Dessa forma, com base na tensão de fissuração média de 0,56 MPa e adotado um coeficiente de segurança de 2, o valor da tensão máxima de cálculo é de 0,28 MPa, ou seja, as paredes podem absorver uma carga correspondente a essa tensão, que para a área das paredes ensaiadas corresponde a uma carga de 63 kN. Um aspecto muito positivo, pertinente de comentar, é que a tensão de cálculo de 0,28 MPa é apenas 13,6 % da tensão limite de resistência (2,05 MPa) da parede e 1,9 % da resistência à compressão média do tijolo (14,57 MPa), ou seja, há uma reserva muito grande em termos de resistência.

Palavras-chave: Desempenho de paredes, tijolos, rejeitos de minério de ferro.

ABSTRACT

This study deals with technical evaluation of the performance of brick walls constructed with iron ore by-products (tailings) and cement (TSFC) under simple compressive loading. Three walls were built in the Experimental Structural Analysis Laboratory of UFMG, with dimensions of 150 cm width, 240 cm height and 15 cm thickness, and tested in a test frame with monotonic load application, registering the mean values of shortening and lateral displacement, following the specifications of the Brazilian standard NBR 10837. During the tests, the first fissures arose with a stress of 0.56 MPa, corresponding to only 3.8 % of the rupture stress of the brick alone. In relation to vertical and horizontal wall displacements, it was observed that horizontal displacement was practically negligible in all of them. Micro fissures appeared first and evolved into fissures and finally into cracks; thus, wall failure occurred through crushing, after widespread occurrence of cracks, in the same manner as the bricks, which indicates regularity of behavior. Buckling of the walls was not observed since horizontal displacement was negligible at the time of collapse. Compressive load tests were also performed for determination of strength of the brick, of the prism (two overlaid bricks) and of the mortar, following the specifications of Brazilian standards. Results showed high compressive strength of the bricks, a mean value of 14.57 MPa, with a relatively small coefficient of variation

of 13.1 %, although a loss of strength in the order of 33 % was observed in relation to the brick alone. The prisms also failed through crushing, in the same manner as the bricks. The mortar exhibited high compressive strength with a mean value of 25.2 MPa and excellent performance, with standard deviation of only 0.88. The wall exhibited good mechanical strength with a mean stress limit of 2.05 MPa, which represents 14 % of the brick strength. In regard to deformation of the walls, it was observed that for the stress limit of 2.05 MPa, the mean value of the three walls, there were relatively high deformations of 0.6 %. That means the wall is flexible. For the tangent of the angle of the straight line with the horizontal, called the axial deformation modulus, a mean value of 420 MPa was obtained. It is noteworthy that fired ceramic brick walls and concrete block walls show axial deformation modulus of 1170 MPa and 720 MPa, respectively, which means that the walls under testing are more able to be deformed than the walls of those two construction materials. In practice, materials should be below limit states/boundary conditions, both for strength and for utilization. Therefore, based on a mean fissuration stress of 0.56 MPa and adopting a coefficient of safety of 2, the maximum calculated stress value is 0.28 MPa, i.e., the walls can bear a load corresponding to this stress, which for the area of the walls tested corresponds to a load of 63 kN. A very positive aspect, worthy of note, is that the 0.28 MPa is only 13.6 % of the stress limit (2.05 MPa) of the wall, and 1.9 % of the mean compressive strength of the brick (14.57), i.e., there is a very large reserve in terms of strength.

Keywords: Wall performance; interlocking bricks; iron ore by-products.

INTRODUÇÃO

A grande demanda na indústria de materiais de construção civil e em especial a necessidade de se ter um material ecologicamente correto esta obrigando aos projetistas e construtores a utilizarem materiais não convencionais. A produção de materiais de construção civil convencionais como cimento, tijolos e aço, consome muita energia e polui o ar, a água e o solo (RAUT S. P., et al., 2011). Muita pesquisa esta sendo desenvolvida no

mundo utilizando resíduos sólidos gerados pela indústria e atividades domésticas e agrícolas (SENGUPTA J., 2002 e MANGESH V., 2013). Entretanto com resíduos sólidos de combustão de carvão, rejeitos de alumínio, de ferro, cobre e zinco, poucos estudos vem sendo desenvolvidos (PAPPU ASOKAN, et al., 2007). A pesquisa nesses tipos de materiais exige muito tempo e elevado esforço, considerando o estudo desde a matéria prima, o rejeito, o elemento construtivo o tijolo e finalmente a parede (JEAN-CLAUDE MOREL, et al., 2007). No contexto do presente estudo, a matéria prima é o rejeito do processo de mineração do minério de ferro, material de granulometria fina e grossa. A estabilização foi feita com 10 % de cimento. O design do tijolo foi concebido para permitir o intertravamento entre eles e eliminar a argamassa de assentamento. Desta forma os processos construtivos se tornem mais eficientes e limpos (ESPÓSITO T., et al., 2011).

Quanto aos ensaios para determinar a capacidade de carga de uma parede feita com materiais não convencionais, se utilizam os procedimentos desenvolvidos para ensaios de blocos de concreto e de tijolos cerâmicos. No entanto, a adequação desses procedimentos não foi verificada por estudos científicos (WALKER P., 1995). Ao contrário de outras unidades de alvenaria, não há consenso sobre o procedimento de ensaio à compressão de tijolos ou blocos de materiais não convencionais. Nesse sentido algumas dúvidas podem ser levantadas, por exemplo, devem ser ensaiados blocos úmidos ou secos? Como deveriam ser considerados os efeitos tridimensionais em relação a forma? Como devem ser avaliadas as condições de contorno no ensaio? (JEAN-CLAUDE MOREL, et al., 2007). A capacidade de uma parede solicitada à compressão está fortemente relacionada com a resistência à compressão das unidades da alvenaria (pedra, tijolo, ou bloco), bem como a resistência da argamassa de assentamento, tipo de interligação das unidades. Embora outros parâmetros também influenciem na capacidade de carga da parede (densidade, absorção d'água), a resistência à compressão tornou-se um padrão e uma unidade de medida universalmente aceita para especificar a qualidade das unidades de alvenaria.

O presente artigo analisa o desempenho de paredes intertravadas, feitas com tijolos de rejeitos de minério de ferro estabilizado com cimento. Foram utilizados os procedimentos de ensaios padronizados para argamassa e blocos de concreto (NBR 13279, 1995; NBR 7215,1996; NBR 7184, 1992) e para paredes de alvenaria (NBR-8949, 1985).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais. Os tijolos foram feitos com um material constituído de uma mistura de rejeitos de minério de ferro, com cimento e água, e prensados. A seguir apresenta-se uma descrição dos materiais e da execução do tijolo.

Os rejeitos provenientes do minério de ferro foram homogeneizados para a realização de todos os ensaios de caracterização e de resistência. Os resultados dos ensaios de granulometria permitiram classificar os rejeitos como grosso, com porcentagens correspondentes de 44 % de areia e 54 % de silte, e fino, com 14 % de areia e 79 % de silte, apenas para diferenciá-los.

Em misturas de solo-cimento as proporções da fração fina e da grossa influenciam nas características e propriedades de resistência do tijolo feito com esse material, e como já se sabe solos que apresentam uma maior porção de areia em sua composição, na maioria das vezes, levam a uma maior resistência do solo-cimento (Silva, 2005). Dessa forma, após várias misturas com proporções diferentes dos rejeitos grosso e fino, definiu-se a que melhor representasse em termos de granulometria, 75 % de rejeito grosso e 25 % de rejeito fino. Para estabilizar a mistura dos rejeitos o teor de cimento utilizado foi de 10 % e o tipo Cimento Portland - CP V - ARI (Alta Resistência Inicial). A carga calculada para ser aplicada na prensagem do tijolo, tendo em vista o cimento CP V – ARI foi de 400 kN.

A mistura dos elementos e sua homogeneização para a confecção de tijolos é muito importante, nesse sentido adotou-se a sequência de misturar inicialmente os

rejeitos, depois o cimento e por fim a água aos poucos, em um misturador de argamassa. Em seguida coloca-se a mistura no molde para aplicação da carga por uma prensa hidráulica, fabricada especialmente para esta finalidade, e ao final do processo o tijolo é extraído para sua cura. Ressalta-se que a configuração do tijolo, Fig. 1, foi concebida para um sistema construtivo intertravado, sem necessidade de rejuntamento e de argamassa de assentamento dos tijolos, ou seja, só por encaixe.

A Fig. 2 mostra uma seqüência ilustrativa desse sistema construtivo.

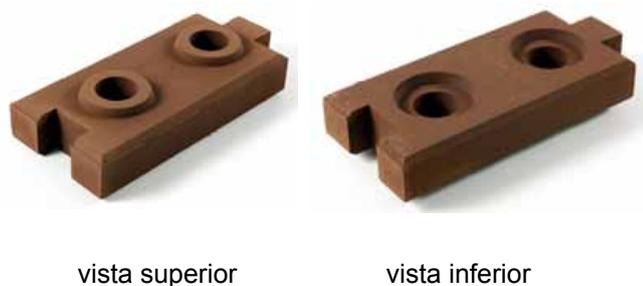


Figura 1 - Tijolo intertravado de rejeito-cimento



Figura 2 - Detalhes do sistema construtivo intertravado.

Corpos-de-prova. Foi definida a parede de tijolos de rejeitos de minério de ferro (P) como corpo-de-prova, com dimensões de 150 cm de largura x 240 cm de altura e 15 cm de espessura. Para os ensaios de compressão foram confeccionadas três paredes com 35 fiadas de tijolos, com dois orifícios em cada extremidade preenchidos com argamassa feita com o próprio rejeito e cimento. A Fig. 3 mostra uma visão geral da seqüência da execução das paredes.



Figura 3 – Vista geral da execução das paredes.

Foi determinada a resistência à compressão por meio de ensaios nos seguintes corpos-de-prova (CPs): tijolo, Fig. 4a, prisma que consiste na sobreposição de dois tijolos, Fig. 4b, e em CPs de argamassa, Fig. 4c.

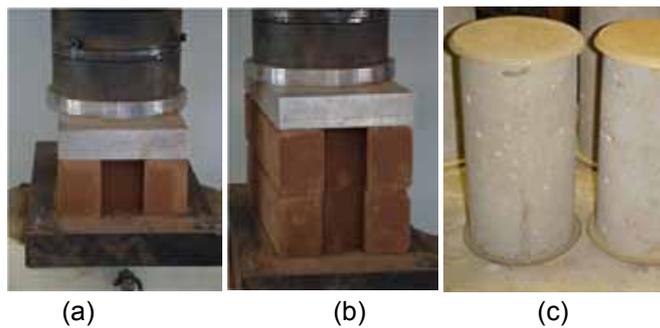


Figura 4 – Corpos-de-prova: a) tijolo, b) prisma e c) argamassa.

Equipamentos de aplicação de carga e preparação para ensaio das paredes. As cargas transmitidas às paredes foram aplicadas por um atuador hidráulico preso a um pórtico de reação. O atuador hidráulico, com capacidade de 1.500 kN, possui linhas de fluxo e retorno de modo que o movimento do pistão poder ser feito nas duas direções. A Fig. 5 mostra uma vista do pórtico de reação e do atuador utilizado.

Figura 5 – Vista do pórtico de reação, do sistema de aplicação de carga e atuador.



Os valores correspondentes às cargas foram medidos por uma célula de carga, com capacidade de 500 kN, acoplada à bomba de acionamento do pistão do atuador hidráulico. Essa célula de carga foi calibrada em uma Máquina Universal, que por sua vez foi calibrada em um laboratório credenciado pelo INMETRO. As paredes foram executadas sobre o piso da laje de reação do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES). Todo o processo de fabricação das paredes inclusive a dosagem da argamassa de enchimento foi controlado. Após a cura da argamassa (7 dias) iniciou-se a preparação e instrumentação das paredes. Um perfil soldado e uma borracha de manta asfáltica foram colocados entre o pistão do atuador hidráulico e o topo da parede de modo a distribuir uniformemente as tensões na superfície superior da parede. Foram colocados anteparos frontais e laterais ao pórtico de

reação, constituídos de cantoneiras e tela metálica com o intuito de prevenir o tombamento da parede por instabilidade durante o ensaio ou quando ocorresse sua ruptura. Esses anteparos foram fixados na laje de reação, Fig. 6.

Figura 7 – Detalhe do ensaio de parede: transdutor de deslocamento utilizado para determinação do deslocamento vertical.



Equipamentos para medição dos deslocamentos horizontais. Para a determinação dos deslocamentos horizontais foi utilizado um DT, colocado perpendicularmente à direção da carga e a 5/6 da altura da parede (NBR-8949, 1985), como mostra a Fig. 8. Desta maneira qualquer tendência de flexão e/ou instabilidade da parede na direção ortogonal ao do carregamento poderia ser registrada. O DT utilizado é da marca Kyowa tipo DT 50A, modelo BA5687, curso de 50 mm e sensibilidade de 0,01 mm.

Figura 8 – Detalhe do ensaio de parede: transdutor de deslocamento (DT) utilizado para determinação do deslocamento horizontal.

O Sistema de Aquisição de Dados (SAD) é constituído por uma placa condicionadora de sinais que amplifica



e condiciona o sinal, uma placa conversora A/D (analógica/digital) e uma placa controladora que contém um multiplexador e 16 canais com seus respectivos condicionadores de sinais. Todo esse sistema é conectado a um computador. Os DTs e a célula de carga foram conectados cada um em um canal. As informações coletadas podem ser obtidas com frequências muito elevadas. No ensaio realizado foi usada uma frequência de leitura de 10 Hz, isto é, 10 leituras a cada segundo. Na Fig. 9 é mostrado o sistema completo.

Figura 9 – Vista do Sistema de Aquisição de Dados (SAD).



Ensaio para determinação da resistência à compressão dos tijolos e prismas. Para a determinação da resistência à compressão dos tijolos e prismas, foi selecionada uma amostra constituída por sete tijolos e seis prismas. Já para a argamassa de preenchimento utilizada na execução das paredes, foram moldados CPs cilíndricos. Os tijolos, prismas e os CPs de argamassa foram ensaiados no Laboratório de Caracterização Mecânica

da Madeira e Novos Materiais (CPAM3), em uma prensa hidráulica controlada por um servo-hidráulico da marca EMIC com capacidade de 2.000 kN. Todos os ensaios foram realizados seguindo as prescrições das normas (NBR 13279, 1995; NBR 7215,1996; NBR 7184, 1992). A Fig. 10 mostra detalhes dos ensaios e um tijolo e um prisma após a ruptura.

Figura 10 – Detalhes dos ensaios em um tijolo e em um prisma.



Ensaio para determinação da capacidade de carga das paredes. As paredes foram ensaiadas após a cura completa da argamassa de preenchimento dos orifícios (12 dias). O carregamento aplicado em cada parede foi realizado em três ciclos (carga e descarga), a primeira e a segunda até 50 % da carga prevista e a terceira até a ruptura. A aplicação do carregamento foi controlada de forma que a tensão aplicada, calculada em relação à área bruta, se eleve progressivamente à razão de 0,25 N/cm²/s. As paredes foram carregadas continuamente, as medidas das cargas, dos deslocamentos verticais e dos deslocamentos horizontais, foram capturadas pelo SAD. Quando a carga no segundo ciclo atingiu 180 kN os equipamentos de leitura dos deslocamentos horizontais foram retirados para evitar danos aos mesmos, e em seguida deu-se continuidade à aplicação da carga até a parede atingir a ruptura. Na Fig. 11 apresenta-se a ruptura da parede P1 e detalhes do aparecimento das primeiras fissuras nos tijolos.

Figura 11 – Ruptura da parede P1 e primeiras fissuras nos tijolos.





RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaio de compressão dos tijolos, prismas e dos CPs de argamassa. Na Tabela 1 são apresentados os resultados dos ensaios à compressão, portanto a resistência dos tijolos, dos prismas e dos CPs de argamassa. Os modos de ruptura observados foram esmagamento para ambos, tijolo e prisma.

Tabela 1 – Resistência à compressão dos tijolos, prismas e argamassa (MPa)

Legenda: D.P. = Desvio padrão e C.V. = coeficiente de variação.

CP	Tijolo	Prisma	Argamassa
01	15,13	10,52	24,32
02	15,84	10,77	25,03
03	12,08	9,81	26,07
04	13,53	10,57	24,29
05	12,15	9,91	26,05
06	16,40	7,31	---
07	16,86	---	---
Média	14,57	9,82	25,15
D.P.	1,99	1,29	0,88
C.V.	13,6 %	13,1 %	3,5 %

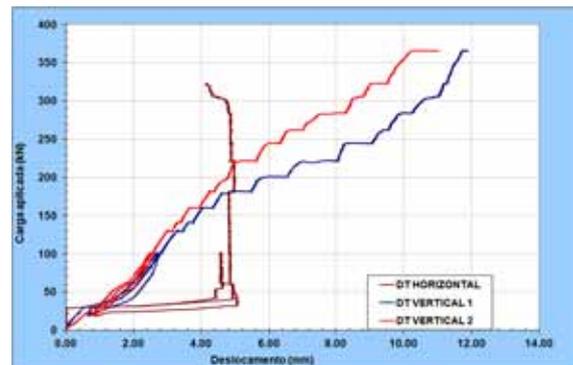
Ao analisar os valores da Tabela 1 se observa que os tijolos apresentam alta resistência à compressão em média 14,57 MPa, com coeficiente de variação

relativamente pequeno, 13,6 %, para o número de corpos-de-prova ensaiados. Todos os tijolos romperam-se do mesmo modo, por esmagamento. Ou seja, sob ambos os aspectos analisados, resistência e modo de ruptura, há regularidade nos resultados, o que é sempre um fator positivo. Os prismas do mesmo modo, apresentaram também alta resistência à compressão, 9,82 MPa, com coeficiente de variação relativamente baixo, 13,1 %, embora com uma perda de resistência alta, de 33 %, em relação ao tijolo isolado. Os prismas também romperam por esmagamento porem na interface dos tijolos. A argamassa teve elevada resistência mecânica média de 25,15 MPa e coeficiente de variação de apenas 3,5 %.

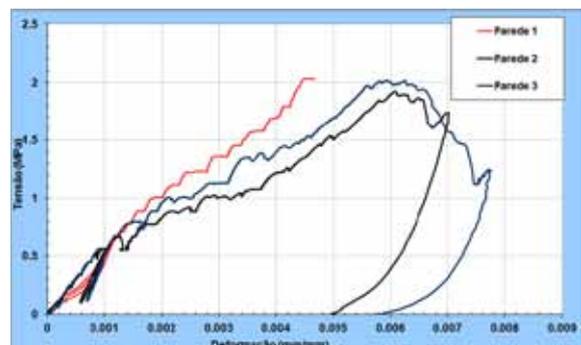
Ensaio de compressão das paredes.

Deslocamentos. Na Fig. 12 são apresentados, como exemplo, os gráficos da carga x deslocamento vertical (DT-1 e DT-2) e da carga x deslocamento horizontal, da parede P1. Nota-se que a curva do DT horizontal acaba na carga de 320 kN, foi neste momento retirado o DT para evitar que seja danificado. O gráfico tensão x deformação de cada uma das paredes é apresentado na Fig. 13.

Figura 12 – Carga x deslocamento – parede P1. Figura



13 – Gráfico tensão x deformação – paredes 1, 2 e 3.



Ruptura da parede. Na tabela 2 são apresentadas de cada parede a carga de ruptura, a tensão de ruptura e a

tensão em que aparece a primeira fissura.

Tabela 2 – Carga de ruptura e tensão de ruptura das paredes

Parede	Carga de ruptura (kN)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão da primeira fissura (MPa)	Observações
1	400,24	2,22	0,57	 O início de fissuração ocorreu com uma carga próxima de 100 kN, na 5ª fiada superior direita. As fissuras subsequentes apareceram após a aplicação da carga de 200 kN. As fissuras nas partes laterais da parede surgiram com uma carga de 260 kN. A ruptura da parede não foi explosiva e nem frágil.
2	345,75	1,92	0,54	 O início de fissuração ocorreu com uma carga próxima de 100 kN, na 1ª fiada superior na parte central da parede. As seguintes fissuras apareceram após a aplicação da carga de 210 kN. As fissuras nas partes laterais da parede apareceram com 240 kN de carga. A ruptura da parede não foi explosiva e nem frágil.
3	362,68	2,01	0,56	 O início de fissuração ocorreu com uma carga próxima de 100 kN, na 12ª fiada superior na parte central da parede. As fissuras subsequentes apareceram após a aplicação da carga de 180 kN. As fissuras nas partes laterais da parede apareceram com 230 kN de carga. A ruptura da parede não foi explosiva e nem frágil.
Media	369,56	2,05	0,56	
D.P.	27,88	0,15	0,015	
C.V.	7,5%	7,5%	2,7%	

Os valores da tabela 2 mostram que a parede revela boa resistência mecânica levando em conta a resistência do tijolo. Contudo, é considerável a perda de resistência em relação ao do tijolo isoladamente. O limite de resistência de 2,05 MPa é apenas 14 % da resistência de um tijolo. Contudo, os resultados são também regulares, indicado pelo coeficiente de variação relativamente baixo, de 7,6 %. Perda de resistência ainda maior ocorre para o início da constatação de danos visuais – aparecimento das primeiras fissuras, que corresponde à tensão média de 0,56 MPa, com coeficiente de variação baixo, de 2,7 %. Ou seja, os primeiros danos visuais apareceriam para tensões que são apenas 3,8 % da tensão de ruptura do tijolo isolado.

Na Fig. 12 observa-se que o deslocamento horizontal foi praticamente desprezível, e as rupturas ocorreram por esmagamento da parede com uma generalização de trincas. Ou seja, microfissuras abriram-se em fissuras e finalmente em trincas. Assim, a parede teve o mesmo modo de ruptura dos tijolos, mostrando novamente uma regularidade no comportamento. O fato de o deslocamento horizontal ser desprezível no colapso significa que não houve flambagem, fenômeno que provocaria um aumento progressivo do deslocamento horizontal à medida que se aumentasse a carga, o que não foi observado. Apenas a parede 1 teve um

deslocamento de 6 mm para uma carga de 25 kN, representando sem dúvida uma acomodação lateral do sistema. Logo em seguida não houve nenhum acréscimo de deslocamento lateral, com o aumento da carga. Permaneceu uma reta vertical até a retirada do DT.

Dividindo-se a carga total pela área da seção transversal da parede de 150 cm x 15 cm tem-se a tensão de compressão atuante. Na Fig. 13 pode-se observar que as curvas das paredes tensão x deformação podem ser ajustadas por retas no trecho inicial, se aproximando, portanto à lei de Hooke, fator favorável em termos de análise. Para tensões baixas, de 2,05 MPa em média, no limite de ruptura, tem-se deformações relativamente altas, de 0,6 %. Isto significa que a parede é flexível. A tangente do ângulo da reta com a horizontal denomina-se módulo de deformabilidade axial e apresenta o valor médio de 420 MPa. Paredes de tijolos cerâmicos queimados e de blocos de concreto apresentam módulos de deformabilidade axial de 1.170 MPa e 720 MPa, respectivamente.

Em serviço os materiais devem estar abaixo de determinados estados limites, tanto de resistência quanto de utilização. Neste caso, as tensões não deveriam em nenhuma hipótese atingir o valor de 0,56 MPa, pois aí já se apresentariam danos visíveis, as primeiras fissuras. Normalmente sobre este valor ainda é lançado um coeficiente de segurança. Supondo que este coeficiente seja 2, então, em serviço as paredes poderiam absorver uma carga tal que a tensão máxima seria de 0,28 MPa. Uma tensão desta, para a área da parede ensaiada, corresponde a uma carga de 63 kN. Observando-se as curvas carga x deslocamento, para essa carga, teríamos encurtamento das paredes de menos de 3 mm, valor relativamente baixo, que é um resultado aspecto favorável. Esta carga de 63 kN, corresponderia a uma carga distribuída por metro linear de 4,2 kN/m. Ou seja, os blocos secos como foram ensaiados permitiriam que se fizessem edificações com dois andares com segurança, isto é, um pavimento térreo e um andar superior com telhado.

Uma grande reserva de carga restaria até a ruptura, o que é mais um aspecto favorável. Ou seja, esta parede, por não ter apresentado ruptura frágil nem flambagem, avisaria que iria romper. Se a carga excedesse o limite de fissuração, surgiriam pequenas fissuras e daí por diante, com cargas maiores surgiriam trincas e assim consecutivamente, até o colapso final da parede. Trabalhando-se com a tensão de 0,28 MPa é apenas

13,6 % da carga de ruptura da parede e 1,9 % da carga de ruptura de um tijolo.

Comparação dos resultados com paredes de alvenaria de tijolo cerâmico e de bloco de concreto. Neste item é apresentada uma comparação dos resultados obtidos nos ensaios de compressão nas paredes de tijolos intertravados com resultados de paredes com tijolos cerâmicos e com blocos de concreto não estrutural (CARRASCO E.V.M., 1993). Nas Fig. 14, 15 e 16 são apresentados, respectivamente, os gráficos de tensão x deformação específica, tensão de ruptura e tensão de fissuração, desses três tipos de paredes.

Observa-se na Fig. 14 que as curvas das paredes de tijolos de rejeitos de minério de ferro têm maior inclinação que as paredes de tijolo cerâmico e de bloco de concreto. Isto indica que são mais flexíveis com módulo de deformabilidade menor. Na Fig. 15 observa-se que a tensão de ruptura da parede de tijolos de rejeitos de minério de ferro é maior que as paredes de bloco de concreto e muito mais ainda se comparada com as de tijolo cerâmico. Na Fig. 16 também se observa que a tensão de fissuração das paredes de tijolos de rejeitos de minério de ferro é maior do que as paredes de tijolo cerâmico e de bloco de concreto.

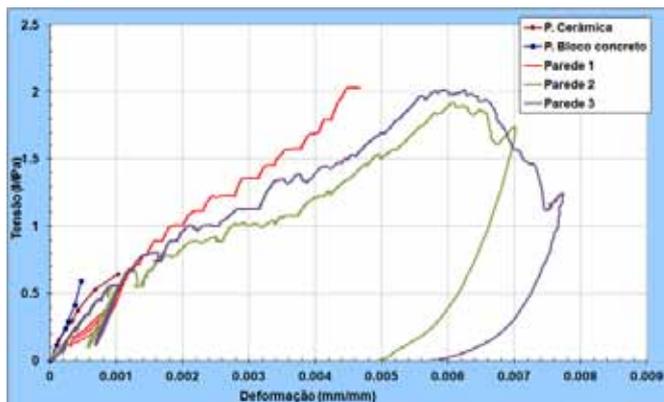


Figura 14 – Gráfico comparativo da tensão x deformação específica das paredes de tijolos cerâmicos, blocos de concreto e de tijolos de rejeitos de minério de ferro.

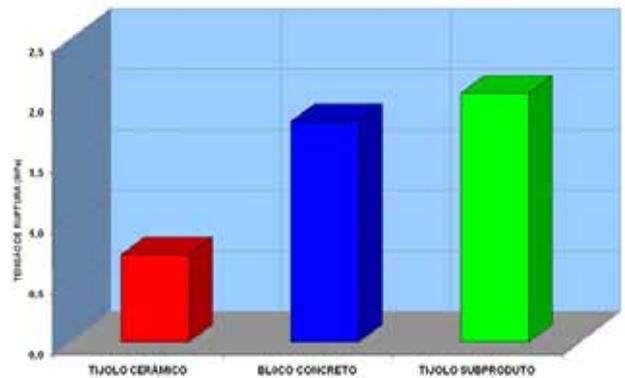


Figura 15 – Gráfico comparativo da tensão de ruptura das paredes de tijolos cerâmicos, blocos de concreto e de tijolos de rejeitos de minério de ferro.

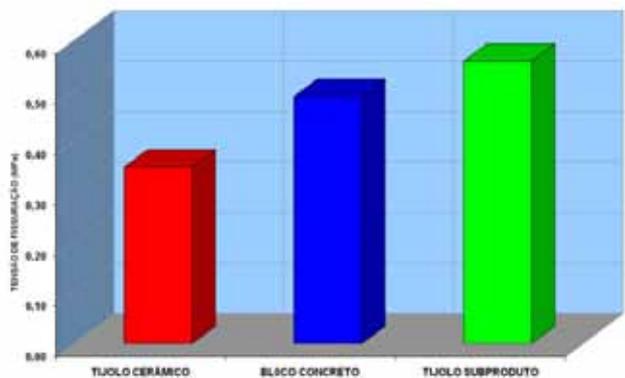


Figura 16 – Gráfico comparativo da tensão de fissuração das paredes de tijolos cerâmicos, blocos de concreto e de tijolos de rejeitos de minério de ferro (em verde).

CONCLUSÕES

A regularidade dos resultados em termos de baixo coeficiente de variação dos ensaios mecânicos e dos modos de ruptura, dos tijolos e da parede como um todo, são aspectos positivos do comportamento da parede.

Os tijolos apresentaram alta resistência à compressão média de 14,57 MPa, com coeficiente de variação relativamente pequeno, 13,6 %, para o número de corpos-de-prova ensaiados num total de 7. Todos os tijolos romperam do mesmo modo, por esmagamento. Sob ambos os aspectos analisados, resistência à compressão e modo de ruptura, os resultados apresentam regularidade o que é um fator positivo.

Os dois tijolos sobrepostos, denominados de prisma, do mesmo modo, apresentaram também alta resistência à

compressão, 9,82 MPa em média, com coeficiente de variação também relativamente baixo, 13,1 %, embora se constatasse uma perda de resistência da ordem de 33 %, em relação ao tijolo isolado. Os prismas também se romperam por esmagamento, do mesmo modo que os tijolos.

A parede revelou boa resistência mecânica, apesar da perda da mesma ser considerável em relação ao do tijolo. A tensão limite de resistência foi de 2,05 MPa, em média, o que representa 14 % da resistência do tijolo. Os resultados são também regulares, indicado pelo coeficiente de variação relativamente baixo 7,6 %. A tensão de fissuração foi de 0,56 MPa, correspondente a apenas 3,8 % da tensão de ruptura do tijolo isolado.

Em relação aos deslocamentos das paredes, vertical e horizontal, constatou-se que o deslocamento horizontal foi praticamente desprezível em todas elas. Levando em conta o deslocamento vertical conclui-se que as paredes apresentaram comportamento dúctil e não frágil resultado também positivo do ponto de vista estrutural. No que se refere às deformações das paredes observou-se que para a tensão limite de resistência de 2,05 MPa, média das três paredes, ocorreram deformações relativamente altas, de 0,6 %. Isto significa que a parede é flexível com módulo de deformabilidade axial médio de 420 MPa, relativamente baixo e inferior ao das paredes de tijolos cerâmicos e de blocos de concreto.

Um aspecto muito positivo é que a tensão de cálculo de 0,28 MPa é apenas 13,6 % da tensão limite de resistência (2,05 MPa) da parede e 1,9 % da resistência à compressão média do tijolo (14,57 MPa), ou seja, há uma reserva muito grande em termos de resistência.

AGRADECIMENTOS

À empresa mineradora SAMARCO S.A. pelo fornecimento dos rejeitos e pela ajuda financeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RAUT SP, RALEGAONKAR RV, MANDAVGANE SA. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: a review of waste-create bricks. *Constr Build Mater* 25 (2011) 4037–4042.

SENGUPTA J. Recycling of agro-industrial wastes for manufacturing of building materials and components in India. An over view. *Civ Eng Constr Ver* 15(2) (2002) 23–33.

MANGESH V., MADURWAR, RAHUL V. RALEGAONKAR, SACHIN A. MANDAVGANE. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review *Construction and Building Materials* 38 (2013) 872–878

PAPPU ASOKAN, SAXENA MOHINI, ASOLEKAR SHYAM R. Solid wastes generation in India and their recycling potential in building Materials. *Build Environ* 42 (2007) 2311–2320.

JEAN-CLAUDE MOREL, ABALO PAKLA, PETER WALKER. Compressive strength testing of compressed earth blocks *Construction and Building Materials* 21 (2007) 303–309.

ESÓPITO T., MANTILLA J N R., CARRASCO E V M., MOREIRA L E. Estudo da viabilidade do aproveitamento dos rejeitos da Samarco mineração S.A. na construção civil e como material alternativo em obras geotécnicas. Relatório interno, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil (2011) 126.

WALKER P. Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks. *Cement Concrete Comp* 17(4) (1995) 301–310.

ABNT. NBR 13279. Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Brasil (1995) 2.

ABNT. NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Brasil (1996) 8.

ABNT. NBR 7184. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, Brasil (1992) 2.

ABNT. NBR-8949. Paredes de alvenaria estrutural – ensaio à compressão simples (Método de Ensaio). Rio de Janeiro, Brasil (1985) 7.

CARRASCO E V M., CHAHUD E. Comportamento à compressão de paredes de tijolos de solo-cimento (Empresa Andrade Gutierrez). Relatório interno, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil (1993) 57.