



CORRELAÇÃO ENTRE O DESEMPENHO FÍSICO, MECÂNICO E TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO PRODUZIDAS COM RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS EM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL À AREIA – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

CORRELATION AMONG THE PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PERFORMANCE OF COATING MORTARS CONTAINING INDUSTRIAL SOLID WASTE.

Alceu Aparecido Cardoso ¹
Alberia Cavalcanti de Albuquerque ²
Ivan Julio Apolonio Callejas ³

Resumo

O uso de argamassas compostas de materiais alternativos, em sua maioria oriundos de resíduos industriais, tem sido pesquisado como uma possibilidade de fabricação de revestimentos a base de cimento com melhor desempenho térmico do que as argamassas confeccionadas com materiais convencionais. Neste trabalho foram elencadas pesquisas relativas às argamassas produzidas com resíduos vegetais, poliméricos e minerais com vistas à melhoria do isolamento termo acústico e à redução da densidade, uma vez que são características correlatas à resistência térmica. Os resultados coletados a partir da revisão bibliográfica foram analisados por regressão não-linear a fim de identificar o nível de dependência entre propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas. Para todas as categorias de resíduos obteve-se coeficiente de determinação entre 0,75 e 0,83, indicando uma clara dependência entre a massa específica, a condutividade térmica e a resistência à tração, sendo essas propriedades diretamente proporcionais.

Palavras-chave: argamassa térmica; argamassa leve; sustentabilidade.

¹ IFMT - Campus Cuiabá, Cuiabá – MT – Brasil. Professor mestre. E-mail: alceu.cardoso@cba.ifmt.edu.br

² IFMT - Campus Cuiabá, Cuiabá – MT – Brasil. Professora titular. E-mail: alberia.albuquerque@cba.ifmt.edu.br

³ UFMT - Campus Cuiabá, Cuiabá – MT – Brasil. Professor doutor, FAET. E-mail: ivancallejas1973@gmail.com

Abstract

The use of mortars composed of alternative materials, mostly from industrial waste, has been researched as a possibility to manufacture cement based coatings with better thermal performance than mortar made from conventional materials. In this work, the researches related to mortars produced with vegetal, polymeric and mineral residues with a view to the improvement of the thermo acoustic insulation and to the reduction of density, since they are characteristics correlated to the thermal resistance. The results obtained from the literature review were analyzed by non-linear regression in order to identify the level of dependence between physical, mechanical and thermal properties of mortars. For all categories of residues a coefficient of determination was obtained between 0.75 and 0.83, indicating a clear dependence between specific mass, thermal conductivity and tensile strength, and these properties were directly proportional.

Key words: thermal mortar; light mortar; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

O foco deste trabalho foram os estudos que tratam diretamente do efeito da adição de resíduos industriais no comportamento das propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas. Em princípio, as propriedades mais importantes das argamassas para revestimento de alvenaria são a trabalhabilidade, a capacidade de retenção de água e a aderência. Por outro lado, em função da aplicação à qual se destina a argamassa, outras características podem ser desejáveis, tais como leveza e isolamento térmico e acústico. A resistência à compressão, por sua vez, não é uma propriedade condicionante como geralmente se supõe, sendo nesse caso preterida pela resistência à tração na flexão (SOUSA, 2010).

Uma vez que a argamassa pode ser considerada um material compósito, no qual a fase contínua é a pasta de cimento e a fase dispersa é o agregado miúdo, suas propriedades finais são proporcionais às frações volumétricas das fases de seus constituintes e as suas respectivas propriedades (CALLISTER JR, 2002). Por exemplo, a medida que se insere no material compósito um componente que possui menor massa específica tem-se, conseqüentemente, um material resultante também de menor massa específica. E a intensidade do efeito resultante será proporcional à fração volumétrica do componente adicionado e a sua respectiva massa específica.

Sendo assim, a fim de atender requisitos específicos, têm-se buscado alterar as características das argamassas por meio da substituição parcial da areia por outros materiais reconhecidos como bons isolantes térmicos, tais como lã de rocha, lã de vidro, poliestireno expandido, argila expandida, vermiculita, pedra pome, entre outros (SOUSA, 2010).

Além dos materiais reconhecidamente utilizados como isolantes térmicos, esta pesquisa bibliográfica revelou o uso de materiais alternativos (primordialmente resíduos industriais) incorporados na argamassa com vistas a modificar as propriedades das mesmas. Os principais resíduos utilizados são: raspa de pneu, cortiça, madeira, sisal, palha de arroz, borrachas, plásticos e resíduos da construção civil.

Os resultados dessas pesquisas foram tabulados, classificados por natureza da origem do material (resíduos vegetais, poliméricos e minerais) e analisados com vistas a identificar o nível de correlação entre eles. As análises de regressão não linear foram realizadas com base em 219 traços de argamassas cujos dados foram coletados em 47 publicações. Uma síntese desta pesquisa está apresentada a seguir.

2. CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS COM RESÍDUOS INDUSTRIAIS

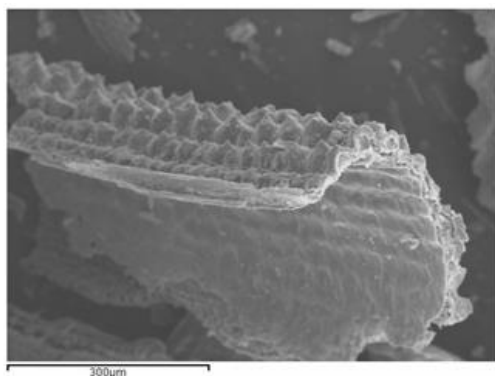
2.1 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE ORIGEM VEGETAL

Na confecção de argamassas com cimento Portland e resíduos de origem vegetal, esses últimos respondem pela leveza e pelas características de isolamento termo acústico do compósito.

Rossi *et al* (2005) estudaram uma alternativa para o sistema de aquecimento de piso por resistência elétrica em granjas de aves e suínos, confeccionado a partir de placas de argamassa com palha de arroz (Figura 1). A argamassa de cimento, areia e palha de arroz mostrou-se um bom isolante térmico, sendo seu uso indicado para revestir a parte inferior das placas. Nos testes realizados, a camada de argamassa mista conseguiu manter gradientes de temperatura de até 5°C entre a face superior (aquecida) e o ambiente (frio). Os resultados corroboram com a pesquisa de Stancato (2006) e Tashima (2006).

Stancato (2000) analisou a condutividade térmica e a resistência mecânica em argamassa leve, evidenciando as características termo isolantes e os principais aspectos do compósito cimento-resíduo vegetal, em relação as suas propriedades mecânicas. A argamassa com pó-de-serra se mostrou cinco vezes mais isolante do que a argamassa convencional de cimento e areia (Figura 2). Resultados semelhantes foram observados por outros autores, destacando uma dosagem máxima de 5% de pó-de-serra a fim de evitar vazios excessivos e consequente perda de resistência mecânica (TEIXEIRA e CÉSAR, 2004; TAOUKIL *et al.*, 2011; CORINALDESI e MORICONI 2012; CARDOSO, 2017).

Figura 1 – Palha de arroz: a imagem ampliada exibe a estrutura alveolar do material.



Fonte: TASHIMA, 2006, p.57

Figura 2 – Resíduo do beneficiamento da madeira. Pó de serra: (a) granular; (b) fibroso.



Fonte: TEIXEIRA e CÉSAR, 2004, p.8

Na pesquisa realizada por Beraldo e Vieira (2003a) foi avaliado o efeito de três teores de adições de fibras de sisal (Figura 3) na resistência à compressão simples e na velocidade de propagação de onda ultra-sônica de argamassas de cimento e areia. Nesses estudos, a velocidade de propagação da onda no compósito contendo 10,80% de fibra foi quatro vezes inferior aos demais compósitos, indicando elevada formação de vazios no material, o que foi ratificado por proporcional redução da resistência à compressão. Discussão semelhante foi abordada por Stancato (2006), ao observar o efeito do índice de vazios na condutividade térmica de argamassas compostas com fibra de sisal com e sem aditivo. Os resultados indicaram que os aditivos incorporam ar no sistema, ajudando na redução da condutividade térmica e reduzindo a resistência, entretanto, após determinado teor, os aditivos passam a colmatar os poros provocando um efeito reverso.

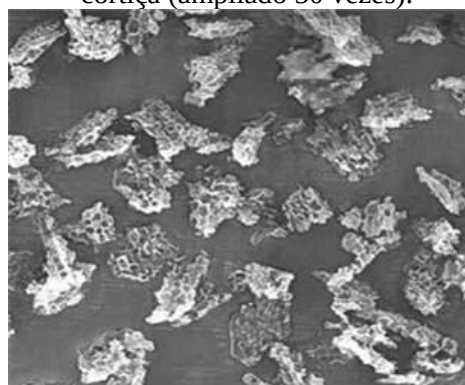
Em estudo desenvolvido por Frade et al. (2012), duas composições de argamassas com resíduos de cortiça (Figura 4) em substituição parcial da areia, designadamente uma argamassa de reboco para projeção mecânica e uma argamassa de alvenaria leve para aplicação manual ou mecânica, foram avaliadas quanto ao comportamento mecânico, térmico e acústico. Os valores obtidos (0,12 a 0,16 W/m.K) permitiram classificar estas argamassas como leves e de baixa condutibilidade térmica e acústica, além de bom desempenho do ponto de vista da retração plástica. Pesquisas desenvolvidas por outros autores levaram a resultados similares no tocante ao comportamento térmico e acústico de argamassas contendo resíduo de cortiça (BRANCO *et al.*, 2008; BRANCO *et al.*, 2010; MARTINS, 2010; LEAL, 2012).

Figura 3 – Fibra de sisal.



Fonte: BERALDO e VIEIRA, 2003b, p.2

Figura 4 – Estrutura alveolar do pó de cortiça (ampliado 50 vezes).



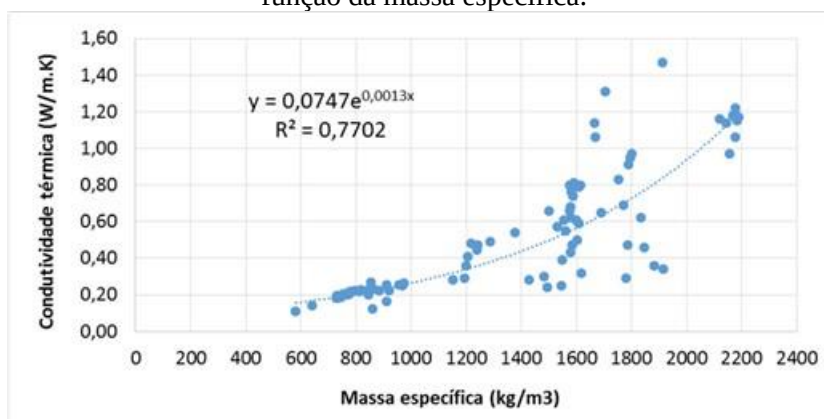
Fonte: MAIO, 2010, p.55

De uma maneira geral, os estudos que envolvem o uso de resíduos vegetais em substituição parcial à areia denotam que, além do tipo de material e da fração volumétrica da

fase dispersa, deve-se considerar a forma e o tamanho das partículas, uma vez que essas características podem interferir na resistência térmica oferecida pelo sistema na direção do fluxo de calor, além de impactar negativamente na resistência mecânica.

Todos os dados de massa específica e condutividade térmica das argamassas desenvolvidas pelos autores citados neste estudo, envolvendo adição de agregados de origem vegetal na argamassa, foram catalogados e tabulados. Estas variáveis foram relacionadas por meio de regressão não-linear e verificou-se que há dependência entre estas propriedades, expressa pela tendência da diminuição da condutividade térmica à medida que diminui a massa específica aparente nos traços das argamassas, com coeficiente de determinação de 0,77 (R^2), indicando que 77% dos dados explicam o modelo determinado pela equação apresentada da Figura 5.

Figura 5 – Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas vegetais em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Esse comportamento pode ser explicado pelo aumento da substituição de agregado natural por vegetal, o qual possui porosidades internas em sua microestrutura, onde o ar aprisionado aumenta a resistência térmica do material. Nota-se também que há uma menor dispersão dos pontos para os valores de massa específica inferior a 1400 kg/m^3 , o que pode indicar um comportamento mais uniforme das argamassas leves nessa correlação.

2.2 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS

Além dos polímeros naturais, tais como celulose e látex, os polímeros sintéticos encontram amplo emprego como materiais de engenharia e depois são descartados gerando um

importante passivo ambiental. Devido aos baixos valores de massa específica, em relação aos agregados convencionais, os resíduos oriundos desses materiais têm sido objeto de estudo na produção de argamassas a fim de obter maior isolamento termo acústico, com a vantagem de aliar o ganho técnico ao ambiental, em comparação às argamassas convencionais.

Um polímero largamente utilizado como isolante térmico é o Poliestireno Expandido, popularmente chamado de EPS. Além de uma baixíssima massa específica (da ordem de 20kg/m^3), esse material se caracteriza por apresentar uma condutibilidade térmica muito baixa decorrente de uma estrutura celular fechada, com ar ocluído, que dificulta a transferência de calor (Figura 6). Por outro lado, quando utilizado como agregado em argamassas, apresenta baixa absorção de água e importante compatibilidade com os diferentes tipos de ligantes utilizados na construção civil (GONÇALVES *et al.*, 2012).

Diversas pesquisas investigaram o uso do EPS em substituição ao agregado miúdo para produção de argamassas com características de isolamento térmico chegando a formulações que resultaram em condutividades térmicas que variam de 0,07 a 0,09 W/m.K (FRADE, 2010; GONÇALVES, 2012) e outras também bastante promissoras com condutividade da ordem de 0,60W/m.K (ALVES, 2009; POLETO, 2009; LEAL, 2012). Todas elas atestam a eficiência dessas argamassas para isolamento térmico e acústico de edificações, embora se verifique também redução da ordem de 50% da resistência mecânica.

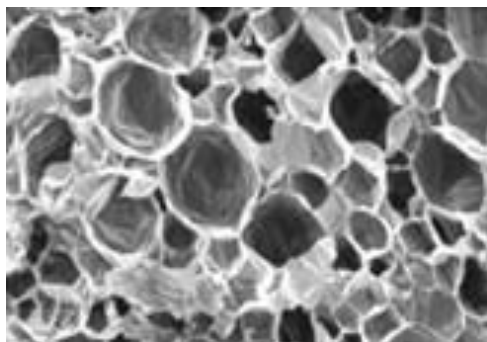
Estudos realizados com agregados de polímeros reciclados, oriundos de embalagens de alimentos, tais como polietileno (PE), polipropileno (PP) e polietileno tereftalato (PET) (Figura 7), foram realizados a fim de verificar o efeito desses materiais nas propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas. Os resíduos foram utilizados em variadas frações em substituição à areia natural para produção de argamassas, sendo observada redução de até 50% da condutividade térmica em relação a argamassas de referência (BENOSMAN *et al.* (2013); IUCOLANO *et al.* (2013); INGRAO *et al.* (2014).

Testes semelhantes realizados com resíduos de poliuretano e EVA (Figura 8) resultaram em argamassas com condutividade térmica entre 0,60 e 0,65 W/m.K. Entretanto, o uso simultâneo de filler calcáreo aumenta a condutividade para valores acima de 0,7 W/m.K, que é o valor limite para que seja considerada argamassa térmica (CORINALDESI *et al.*, 2011; ZUCHETTO *et al.* 2015).

Outro resíduo de forte impacto ambiental são os pneus inservíveis (Figura 9). Resíduos de borracha de pneu podem ser obtidos pela raspagem das bandas de rodagem durante o

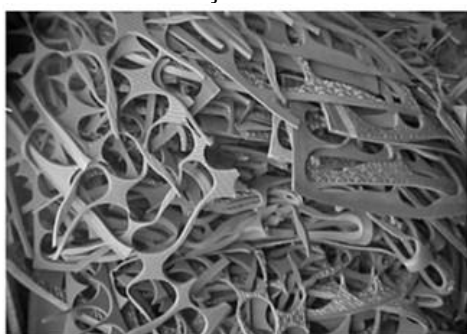
processo de recauchutagem. Aqueles pneus que não servem mais à recauchutagem são triturados e todos os seus componentes do pneu podem ser reciclados para a construção civil (ALVES *et al.*, 2010; ALBUQUERQUE, 2009).

Figura 6 – Microestrutura do EPS.



Fonte: POLETTTO, 2009, p.6

Figura 8 – Resíduos de EVA da indústria calçadista.



Fonte: ZATTERA *et al* 2005, p.74

Figura 7 – Resíduos de embalagens PET na forma de flocos.



Fonte: MODRO *et al*, 2009, p.729

Figura 9 – Trituração de pneus inservíveis.



Fonte: RODRIGUES e FERREIRA, 2010, p.3

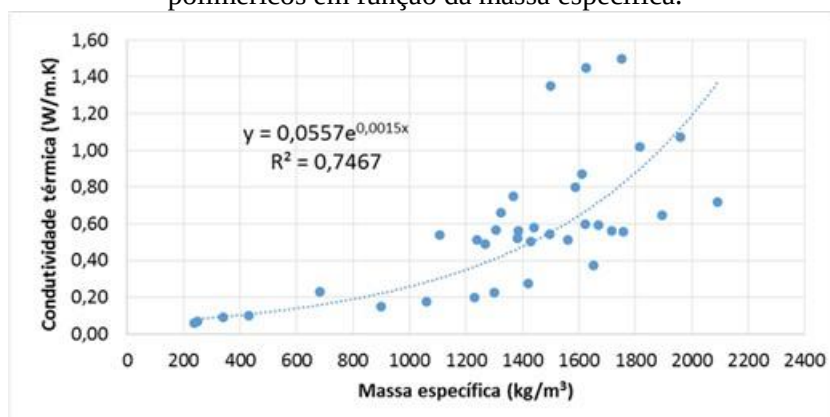
Estudos de argamassas com raspas de pneu para avaliação do comportamento termo acústico indicaram melhoria de desempenho no isolamento térmico e acústico de até 45% (Ferreira, 2010; Furlanato Neto e Castro, 2012; Fadiel *et al* (2014). As pesquisas com raspas de pneu já permitem concluir pela viabilidade de algumas aplicações em elementos e componentes para a construção civil, com desempenho adequado e custo bastante competitivo quando comparado a materiais e produtos convencionais.

Os dados de massa específica e condutividade térmica das argamassas desenvolvidas com adição de polímeros pelos autores citados anteriormente foram tabulados e em seguida foram construídas curvas de regressão não linear entre as duas propriedades. Verificou-se que há dependência entre as variáveis (Figura 10), expressa pela tendência da diminuição da

condutividade térmica à medida que a adição de polímeros tende a diminuir a massa específica aparente nos traços das argamassas, com coeficiente de determinação de 0,74 (R^2), ligeiramente menor do que o observado com as argamassas com a adição de resíduo vegetal (Figura 8). Assim como no caso anterior, a curva exponencial foi a que melhor representou a correlação entre as propriedades pesquisadas.

Mais uma vez a dependência da condutividade térmica em relação à massa específica pode estar associada ao aumento da porosidade quando se aumenta a quantidade de resíduo incorporado, seja devido à própria microestrutura do resíduo, como é o caso do EVA e do EPS, ou devido à incorporação de ar provocada pelo resíduo durante o processo de mistura, como é o caso das raspas de pneu e do PET. Como já foi discutido, o ar estagnado não é bom condutor de calor e, assim contribui para a redução da condutividade do material. Deve-se atentar também que os polímeros possuem uma microestrutura na qual os átomos estão ligados por meio de ligações covalentes e, desse modo, os elétrons não ficam livres para a condução de calor.

Figura 10 – Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos poliméricos em função da massa específica.



Fonte: o autor.

2.3 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS MINERAIS

Muitos estudos de argamassas leves envolvem o uso de agregados provenientes de argilas ou resíduos industriais tais como cinzas e escórias. Várias argamassas desenvolvidas usando agregados leves como substituição da fração de areia usada na argamassa tradicional resultaram em densidades entre 1.100 kg/m³ e 1.400 kg/m³ (TINKER e O'ROURKE, 1995). Os agregados leves utilizados pelos autores foram os resíduos de carvão; cinzas de combustível

pulverizado e pasta de carvão (PFA); escória de alto-forno expandida; e pedra-pome. A densidade e a condutividade térmica de cada argamassa foram, em média, 32% e 51% menores do que o padrão, respectivamente.

Diversos autores têm avaliado o uso da vermiculita expandida na produção de argamassas leves e observaram que o nível de isolamento é inversamente proporcional ao tamanho (ALVES, 2009; BRANCO, 2008; BRANCO, 2010) e diretamente proporcional à massa específica das partículas de argila (FERREIRA *et al.*, 2007; NÓBREGA, 2007; NASCIMENTO, 2008), tendo sido registrados valores de condutividade térmica de 0,16 a 0,34 W/m.K.

No caso dos resíduos de cerâmica vermelha (CV), resíduo de construção e demolição (RCD) e pó de vidro (PV) não foram encontradas referências de pesquisas que tenham utilizado esses materiais com vistas à redução da condutividade térmica de argamassas (Figura 12).

Resíduos de cerâmica vermelha e resíduos de construção e demolição têm sido pesquisados como forte opção de substituição de agregados graúdos e miúdos em concretos e argamassas, sendo utilizados em teores de até 100% de substituição dos agregados naturais (GONÇALVES, 2007; CABRAL *et al.*, 2009; ZAMPIRON *et al.*, 2010; COSTA *et al.*, 2011).

Figura 11 – Vermiculita expandida :
imagem exibe estrutura foliar.



Fonte: UGARTE *et al.* 2008, p.878

Figura 12 – Trituração do resíduo de
cerâmica vermelha.



Fonte: ZAMPIRON, 2010, p.23

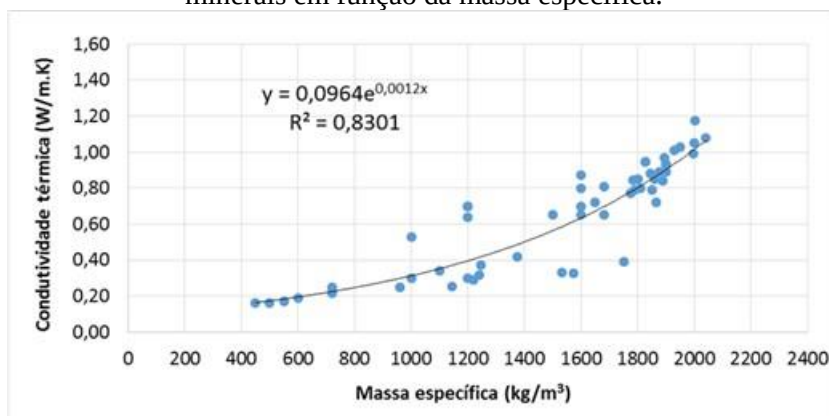
Os resíduos de vidro, por sua vez, têm encontrado maior aplicabilidade como material pozolânico em substituição parcial ao cimento com vistas a melhoria do desempenho mecânico, uma vez que é composto predominantemente por sílica amorfa. Nesse caso os resíduos de vidro são reduzidos à finura do cimento e utilizados em teores de 5 a 30% em substituição ao mesmo (OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2013; SAUER *et al.*, 2013; CALMON *et al.*, 2014, SANTOS *et al.*, 2015).

Do ponto de vista da condutividade térmica, o alto grau de amorfismo do vidro e sua composição microestrutural, de natureza cerâmica, podem ser interessantes para o desempenho térmico das argamassas de revestimento. Nos materiais cerâmicos, as ligações atômicas são de natureza iônica e, portanto, não há muitos elétrons disponíveis para condução de calor, a qual ocorre basicamente por meio das vibrações atômicas. No vidro não há uma rede cristalina organizada para transmissão das vibrações, e o alto grau de desordem da estrutura dificulta essa transmissão.

A Figura 13 ilustra a análise de regressão não linear realizada com os dados de massa específica e condutividade térmica dos trabalhos desenvolvidos com o uso de resíduos minerais em argamassas. O melhor ajuste dos dados se deu por meio de uma relação não linear exponencial, com coeficiente de determinação de 0,83 (R^2), indicando que 83% dos dados explicam o modelo determinado. Entre os modelos determinados, este foi o que apresentou menor dispersão dos dados em relação a curva ajustada.

Este fato pode estar associado a característica do material de substituição que possui elevada porosidade interna dos materiais, o que contribui para o aumento da porosidade total do compósito e, conseqüentemente, para o aumento da resistência térmica da argamassa.

Figura 13 – Comportamento da condutividade térmica das argamassas com partículas de resíduos minerais em função da massa específica.



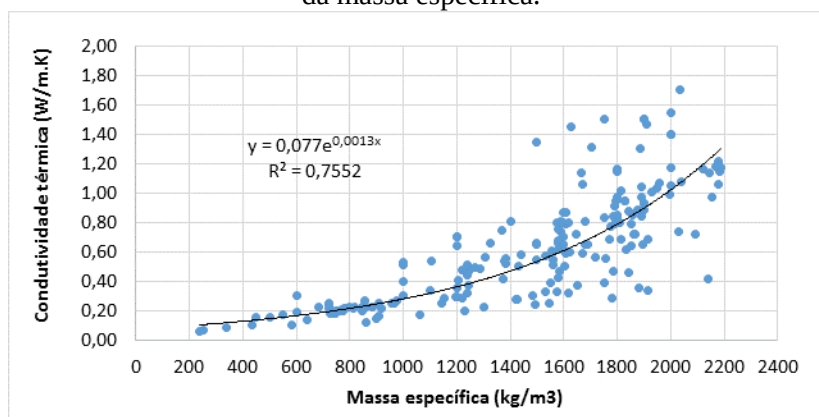
Fonte: o autor.

2.4 CORRELAÇÃO ENTRE MASSA ESPECÍFICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA

2.4.1 Massa específica x Condutividade Térmica

Com intuito de compreender como a massa específica das argamassas interfere na sua condutividade térmica, os dados destas variáveis, quando disponibilizadas nas pesquisas citadas na revisão bibliográfica deste trabalho, foram tabulados. A partir desse procedimento, foi possível estabelecer por meio de análise de regressão não linear o comportamento da variação da condutividade em função da massa específica das argamassas (Figura 14). O melhor ajuste entre as variáveis se deu por meio de uma equação exponencial, com coeficiente de determinação 0,75 (R^2), indicando que 75% dos dados explicam o modelo determinado. Nota-se que há tendência de elevação da condutividade térmica à medida que aumenta a massa específica das argamassas com diferentes composições.

Figura 14 - Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Pela análise da Figura 14 é possível perceber maior dispersão dos dados nas argamassas com massa específica superior a 1500 kg/m³. Pode-se apontar uma série de variáveis intervenientes para justificar o comportamento observado tais como uso de diferentes tipos de aglomerantes na composição das argamassas pesquisadas, diferentes condutividades térmicas entre os agregados miúdos utilizados (areia), qualidade da interface partícula matriz, uso de diferentes metodologias de dosagens e de ensaios etc. Todavia, tal comportamento pode estar relacionado aos resíduos que apresentam diferentes massas específicas, visto que esta propriedade relaciona-se com o transporte de calor em nível de estrutura molecular destes

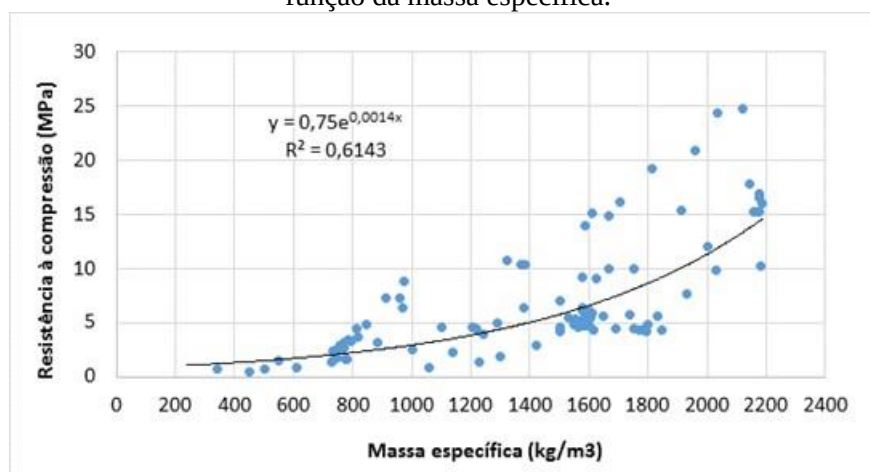
materiais. Por outro lado, as dosagens utilizando materiais leves reduzem não só a massa aparente, como alteram a porosidade, o índice de vazios e a incorporação de ar pela argamassa, justificando as variações na condutividade térmica verificadas nas pesquisas utilizadas como referência neste trabalho.

Como a norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2008) é restrita em termos de dados de condutividade térmica de argamassas, a relação determinada por meio da equação da Figura 14 poderia ser utilizada para estimar a propriedade de condutividade térmica de uma argamassa conhecendo ou especificando a sua massa específica aparente.

2.4.2 Massa específica x Resistência Mecânica

O comportamento da correlação entre a massa específica e a resistência das argamassas se dá de forma similar àquela observada entre a massa específica e a condutividade térmica, observando-se elevação na resistência à compressão e à tração a medida que a massa específica da argamassa se eleva. No caso da resistência à compressão, verifica-se que o ajuste se deu por meio de uma equação exponencial, com coeficiente de determinação 0,61 (R^2), indicando que 61% dos dados explicam o modelo determinado (Figura 15). Já no caso da resistência à tração (Figura 16), obteve-se um melhor grau de determinação com a massa específica (0,77), embora a amostra seja menor uma vez que nem todos os pesquisadores avaliaram essa propriedade.

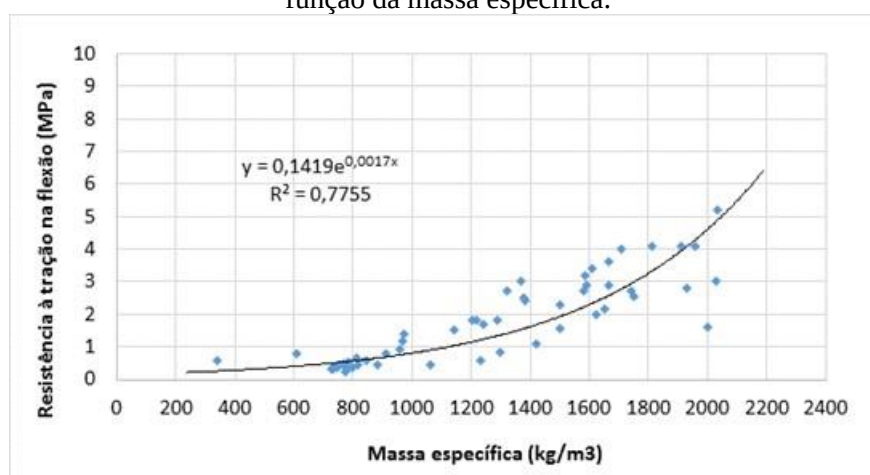
Figura 15 – Comportamento da resistência à compressão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.



Fonte: o autor.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) a porosidade dos materiais de matriz cimentícia interfere negativamente no suporte de carga do material, de modo que quanto maior a porosidade, menor serão a densidade e a resistência. Desta forma, o comportamento da resistência tanto à compressão como à tração, em função da massa específica, se deu de forma prevista uma vez que as argamassas leves apresentam maior quantidade de poros que as mais densas. A dispersão dos dados pode ser atribuída em parte às características das partículas de agregados incorporadas às argamassas que são porosas, não contribuindo desta forma para a resistência do conjunto. Ou seja, a porosidade à qual se referem Mehta e Monteiro (1994) é a porosidade encontrada na matriz cimentícia, considerando que os agregados graúdos e miúdos são partículas sólidas de rocha que contribuem para o suporte de carga do material. No caso das argamassas aqui analisadas, além da porosidade da matriz, as partículas incorporadas também são porosas e não contribuem para a resistência do conjunto.

Figura 16 - Comportamento da resistência à tração na flexão de todas as argamassas pesquisadas em função da massa específica.

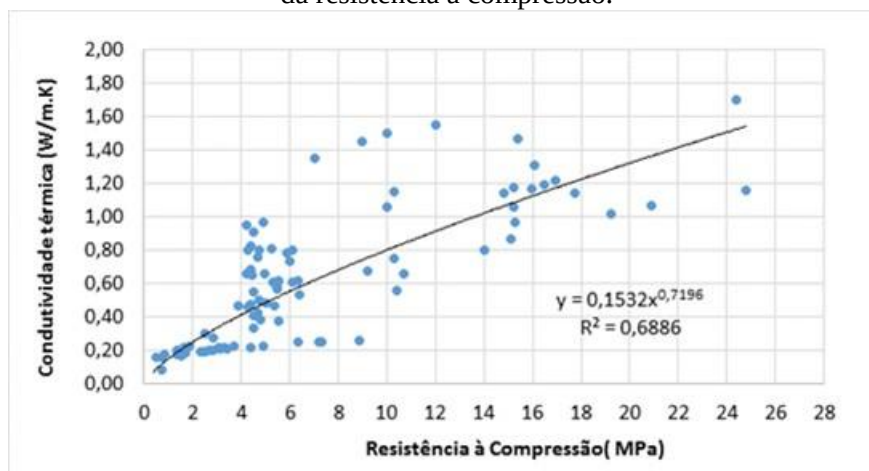


Fonte: o autor.

2.4.3 Resistência mecânica x Condutividade Térmica

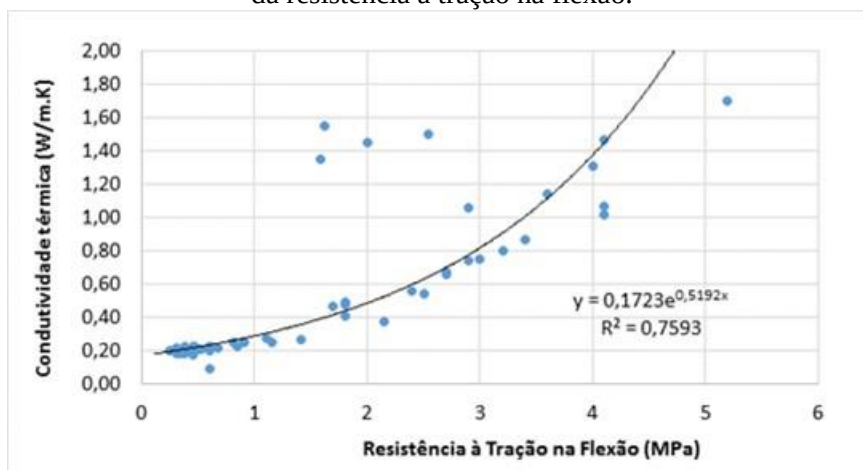
Procedeu-se, quando disponibilizadas pelos autores, a tabulação das propriedades de resistência mecânica (compressão e tração na flexão) e da condutividade térmica das argamassas citadas na revisão bibliográfica deste trabalho. A relação entre essas propriedades pode ser observada nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à compressão.



Fonte: o autor.

Figura 18 – Comportamento da condutividade térmica de todas as argamassas pesquisadas em função da resistência à tração na flexão.



Fonte: o autor.

A partir da análise das Figuras 17 e 18, verifica-se que a condutividade térmica se eleva com a elevação da resistência mecânica à compressão e à tração na flexão. Enquanto a análise de regressão indicou melhor ajuste dos dados por meio da equação na forma de potência para a resistência à compressão com coeficiente de determinação de 0,69 (R^2), para a resistência à tração por flexão o melhor ajuste foi obtido por meio de equação exponencial, com coeficiente de determinação de 0,76.

Nos materiais de matriz cimentícia, o aumento da resistência está relacionado à maior formação de cristais de silicato de cálcio hidratado, melhor aderência na interface

matriz/agregado e menor porosidade (Mehta e Monteiro, 1994), sendo essas justamente as características que facilitam a condução de calor através do material, o que explica a elevação da condutividade térmica em função da elevação da resistência mecânica.

3. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada uma intensa pesquisa bibliográfica dos estudos que têm sido desenvolvidos por diversos autores em todo o mundo, no âmbito da temática de argamassas de revestimento contendo resíduos sólidos industriais, com vistas a melhoria do conforto térmico e acústico nas edificações.

Os trabalhos encontrados foram analisados e classificados por tipo de resíduo utilizado, quais sejam: argamassas com resíduos vegetais; argamassas com resíduos poliméricos; e argamassas com resíduos minerais.

Os resultados coletados a partir dos estudos dos diversos autores foram analisados por regressão não-linear a fim de identificar o nível de dependência entre as características das argamassas estudadas. Para todas as categorias de resíduos obteve-se coeficiente de determinação entre 0,75 e 0,83, indicando uma clara dependência da condutividade térmica das argamassas em função de sua massa específica, sendo essas propriedades diretamente proporcionais.

Coeficientes de determinação acima de 0,75 foram também obtidos nas análises de regressão entre a massa específica e a resistência à tração e também entre a resistência à tração e a condutividade térmica, indicando que 75% dos dados correspondem ao modelo de comportamento determinado pela equação. Em contrapartida, os coeficientes de determinação entre a massa específica e a resistência à compressão e também entre a resistência à compressão e a condutividade térmica foram abaixo de 0,7, indicando uma menor correspondência entre os dados e o modelo determinado.

As variáveis que foram estudadas neste artigo de revisão apresentam correlações monotônicas, quer dizer, foram não lineares o que condiz com os traçados gráficos encontrados e sugerem que algumas das variáveis aumentam ou diminuem sistematicamente quando a outra decresce. É importante salientar, entretanto, que mesmo as variáveis altamente correlacionadas podem não apresentar necessariamente qualquer relação de causa e efeito. Sendo assim, as evidências de relações causais devem ser obtidas a partir do conhecimento dos processos

envolvidos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). No caso das relações analisadas nesta pesquisa, o principal fator causal é a densidade dos materiais, que interfere diretamente na resistência mecânica e na condutividade térmica, embora de forma não-linear.

A análise da correlação da condutividade térmica das argamassas com outras propriedades físicas e mecânicas tais como coeficiente de capilaridade, índice de vazios, resistência de aderência, entre outras, não foi possível uma vez que os trabalhos estudados não apresentavam dados suficientes.

4. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2:2008 - Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2008.

ALBUQUERQUE, A.C. **Estudo das propriedades de concreto massa com adição de partículas de borracha de pneu**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2009.

ALVES, J.M.C. **Argamassas leves para execução de camadas de regularização e de enchimento de pavimentos**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Área Departamental de Engenharia Civil. Lisboa, 2009.

ALVES, J.D., PINHEIRO, D.G.L., CARDOSO, F.A.M., SANTOS, T.M. **Argamassas de revestimento com adição de raspas de pneus**. Prêmio de inovação e sustentabilidade. Câmara brasileira da indústria da construção – CBIC. 16ª Edição. 2010.

BENOSMAN, A.S., MOULI, M., TAIBI, H., BELBACHIR, M., SENHADJI, Y., BAHLOULI, I., HOUIVET, D. **Studies on Chemical Resistance of PET - Mortar Composites: Microstructure and Phase Composition Changes**. Engineering, 2013, 5, 359-378.

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F.F. **Argamassa com adição de fibras de sisal**. In: V Simpósio Brasileiro de Tecnologia em Argamassas, 2003, São Paulo. V SBTA. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2003. v. 1. p. 449-454. (a)

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F.F. **Ensaio não destrutivo (END) aplicados à argamassa com adição de fibra de sisal**. 3rd Pan American Conference for Nondestructive Testing – PANNDT. Rio de Janeiro, 2003. (b)

BRANCO, F.G.; GODINHO L.; MASGALOS, R. **Desempenho de argamassas leves em isolamento a sons de percussão**. Acústica 2008. Coimbra, 2008.

BRANCO, F.G.; GODINHO, L.; TAVARES, J. **A Utilização de Argamassas Leves na Minimização da Transmissão de Ruídos de Impacto em Pavimentos**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010.

CABRAL, A.E.B., SCHALCH, V., DAL MOLIN, D.C.C., RIBEIRO, J.L.D., RAVINDRARAJAH, R.S. **Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha**. Cerâmica 55. Pp 448-460. 2009.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 5ª Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CALMON, J.L., SAUER, A.S., VIEIRA, J.L., TEIXEIRA, J.E.S.L. **Effects of windshield waste glass on properties of repair mortars**. Cement & Concrete Composites 53, pp. 88–96. 2014.

CORINALDESI, V., MAZZOLI, A., MORICONI, G. **Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles**. Materials and Design 32 (2011) 1646–1650.

CORINALDESI, V., MORICONI, G. **Characterization of lightweight mortars containing wood waste**. Conference Paper October 2012.

COSTA, J.S., MARTINS, S.A., BALDO, J.B. **Caracterização da Matriz de Argamassas para Alvenaria Utilizando Rejeitos das Indústrias de Cerâmica Vermelha e de Sanitários**. Cerâmica Industrial, 16 (5-6) Setembro/Dezembro, 2011.

FADIEL, A., RIFAIE, F., ABU-LEBDEH, T., FINI, E. **Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials**. American Journal of Engineering and Applied Sciences 7 (1): 1-11, 2014.

FERREIRA, A.S.; BRITO, J.; BRANCO, F. **Desempenho relativo das argamassas de argila expandida na execução de camadas de forma**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2007.

FERREIRA, C.R.G. **Análise de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de argamassa e resíduo de borracha**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. 2010.

FRADE, D. F.; GONÇALVES, P.J.; NASCIMENTO, R.S.; SEQUEIRA, A.C. **Argamassa de Reboco com Características Térmicas**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010.

FRADE, D.; TADEU, A.; TORRES, I.; MENDES, P.A.; SIMÕES, N.; MATIAS, G.; NEVES, A. **Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2012.

FURLANETTO NETO, A.; CASTRO, L.C. **Análise acústica de contrapiso com adição de resíduos de pneus**. Artigo (Trabalho de Conclusão de Curso). Engenharia Civil da UNESC. Criciúma, 2012.

GONÇALVES, J.P., **Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos**. Rem: Revista Escola de Minas [en linea] 2007, 60 (Outubre-Diciembre)

GONÇALVES, P.J.; FRADE, D. F.; BRITES, J. **Argamassas térmicas - Uma solução no cumprimento do RCCTE**. Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Coimbra, 2012.

INGRAO, C.; GIUDICEB, A.; TRICASEC, C.; RANAC, R.; MBOHWAB, C.; SIRACUSA, V. **Recycled-PET fibre based panels for building thermal insulation: Environmental impact and improvement potential assessment for a greener production**. Science of the Total Environment 493 (2014) 914–929.

IUCOLANO, F.; LIGUORI, B.; CAPUTO, D.; COLANGELO, F.; CIOFFI, R. **Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties**. Materials and Design 52 (2013) 916–922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>.

LEAL, M.M.R. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal. 2012.

MAIO, D.J.D. **Desenvolvimento de “tinta” com pó de cortiça com desempenho acústico otimizado**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2010.

MARTINS, A.F.S.; CALLEJAS, I.J.A.; LOUZICH, K.M.D.; CARDOSO, A.A.; DURANTE, L.C. **Condutividade térmica de argamassas convencionais e não convencionais: uma revisão sistemática**. ENTAC 2016 - XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 2016

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Editora Pini. São Paulo, 1994.

MODRO, N.L.R., MODRO, N.R., MODRO, N.R., OLIVEIRA, A.P.N. **Avaliação de concreto de cimento Portland contendo resíduos de PET**. Matéria (Rio J.) vol.14 no.1 Rio de Janeiro Apr. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762009000100007>

NAGHETTINI, M., PINTO, E.J.A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

NASCIMENTO, M.C.B. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

NÓBREGA, A.F. **Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba – UFPB. Centro de Tecnologia. João Pessoa, 2007. 117p.

OLIVEIRA, R.B. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro-efeito de fíler e pozolânico.** Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.

OLIVEIRA, R., BRITO, J., VEIGA, R. **Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.21, p.25-39, Maio, 2013.

POLETTTO, Matheus – **Obtenção e caracterização de compósitos preparados com poliestireno expandido reciclado e pó de madeira.** Universidade de Caxias do Sul, 2009. Dissertação de Mestrado.

RODRIGUES, M.R.P.; FERREIRA, O.P. **Argamassa com partículas de borracha derivada da reciclagem de pneus inservíveis.** Congresso Português de Argamassas de Construção. APFAC. Lisboa, 2010.

ROSSI, L.A.; CARDOSO, P.E.R.; BERALDO, A.L. **Avaliação térmica de placas de argamassa de cimento e casca de arroz aquecidas por resistência elétrica.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.1, p.37-45, jan./abr. 2005.

SANTOS, W.M.G. CARDOSO, A.A., ALBUQUERQUE, A.C. Efeito do uso de pó de vidro em substituição parcial do cimento na resistência à compressão do concreto. VI Seminário Mato-Grossense de Habitação de interesse Social. Cuiabá, 2015.

SAUER, A.S., CALMON, J.L., VIEIRA, J.L. **Avaliação da resistência de aderência à tração de argamassas de recuperação estrutural com resíduo de vidro laminado.** Anais do IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas. João Pessoa, 2013.

SOUSA, A.J.C. **Aplicação de argamassas leves de reboco e assentamento em alvenarias.** Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto. Porto, 2010.

STANCATO, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve.** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000. 155p.

STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados.** Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006. 155p.

TAOUKIL, D., EL-BOUARDI, A., EZBAKHE, H., AJZOUL, T. **Thermal Proprieties of Concrete Lightened by Wood Aggregates.** Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 3(2): 113-116, 2011

TASHIMA, M.M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006.

80 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

TEIXEIRA, M.G., CÉSAR, S.F. **Resíduo de madeira como possibilidade sustentável para produção de novos produtos.** I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável e X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ENTAC 2004. São Paulo, 2004.

TINKER, J.A.; O'ROURKE, A. **Thermally improved lightweight mortars.** Thermal Envelopes VII Heat Transfer in Walls I-Principles. 1995. pp. 163-167.

UGARTE, J.F.O., SAMPAIO, J.A., FRANÇA, S.C.A. **In: Rochas e Minerais Industriais. Capítulo 38 – Vermiculita.** Centro de Tecnologia Mineral. CETEM/2008, 2a Edição. 2008.

ZAMPIRON, L.C., SOUZA, R.A., OLIVEIRA, A.L. **Utilização de areia de reciclagem proveniente de cerâmica vermelha para a confecção de argamassa de assentamento para alvenaria estrutural.** Caderno de Publicações Acadêmicas - IFSC. v2. n1. 2010.

ZATTERA, A.J., BIANCHI, O., ZENI, M., FERREIRA, C.A. **Caracterização de Resíduos de Copolímeros de Etileno-Acetato de Vinila – EVA.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 15, nº 1, p. 73-78, 2005

ZUCHETTO, L. K.; SOUZA, R. P.; NUNES, M. F. O.; TUTIKIAN, B.F. **Estudo de contrapisos leves a base de EVA (Etileno Acetato de Vinila) para desempenho acústico e reduzidas cargas permanentes.** XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção – CONPAT. Lisboa, 2015.