

DESEMPENHO ACÚSTICO DE PLACAS À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO APLICADAS NO SISTEMA LIGHT STEEL FRAME

BERTOLI; Stelamaris Rolla (1); GOMES, Carlos Eduardo Marmorato (2); MARTINS, Juliana Furtado Arrobas (3); MARIANO, Tássya Braz(4); ZENERATO, Thais Sacomani (5)

(1) Professora Doutora da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Departamento de Arquitetura e Construção, rolla@fec.unicamp.br; (2) Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Departamento de Arquitetura e Construção, cemgomes@fec.unicamp.br; (3) Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, juarrobas@hotmail.com; (4) Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, tassyaabraz@hotmail.com, (5) Mestranda em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, thais.zenerato@hotmail.com

Resumo: O *Light Steel Frame* consiste em um sistema construtivo industrializado leve que teve seu uso intensificado no Brasil a partir de 1990 para uso em vedações verticais, consistindo em perfis e guias de aço galvanizado com fechamentos externos realizados usualmente através de placas à base de cimento Portland e fibras de reforço. O cimento à base de óxido de magnésio (cimento Sorel) apresenta grande relevância como produto alternativo ao cimento Portland e pode ser usado em várias aplicações, dentre elas, a produção de elementos construtivos para a construção a seco, tais como as placas, chapas e painéis. O presente estudo realizou a análise do desempenho acústico de isolamento a sons aéreos dessas placas alternativas comparativamente àquelas tradicionalmente usadas no Brasil, à base de cimento Portland, e comumente empregadas na construção a seco. Para a realização deste estudo, foi construído um protótipo em *Light Steel Frame* (LSF) onde foram fixadas nas fachadas as placas de óxido de magnésio e de cimento Portland. O desempenho acústico quanto ao isolamento aéreo das fachadas foi avaliado por meio da medição do parâmetro $D_{2m,nT}$ em função de frequência segundo a norma ISO 140-5 (1998) e o cálculo do parâmetro $D_{2m,nT,w}$ (ISO 717-1:1996), este último indicado como critério de desempenho de fachada conforme a norma NBR15575-4 (2013). Os resultados do isolamento sonoro aéreo mostraram um incremento no isolamento em toda faixa de frequência para a placa de cimento magnésiano. Da análise dos parâmetros acústicos observou-se que a fachada com cimento Sorel apresentou um ganho de 4dB no isolamento comparado com as placas com cimento Portland. Neste sentido, as placas de MgO são apresentadas neste trabalho como alternativas às tradicionais placas de fibrocimento, evidenciando a importância de estudos sobre uma tecnologia amplamente utilizada em países como a China e os EUA, mas ainda incipiente no Brasil.

Palavras-chave: Placa de fibrocimento, cimento magnésiano, desempenho acústico, construção a seco, *Light Steel Frame*.

Área do Conhecimento: Tecnologia de Componentes Construtivos – Características Tecnológicas de Desempenho

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland é o aglomerante mais empregado na construção civil e emite grande quantidade de gás carbônico durante seu processo de produção. Estima-se que a cada quilo de clínquer produzido, um quilo desse gás é liberado à atmosfera que, segundo relatório da CNI (2012), se divide em descarbonatação (50%), combustão no forno (30%), transporte de matéria-prima (5%) e eletricidade (5%). Comercialmente, valores médios de 650 quilos de CO₂ por tonelada de cimento produzida podem ser considerados conforme dados da CSI (*Cement Sustainability Initiative*) (CNI, 2012), dependendo diretamente da relação clínquer/cimento. Com isso, mediante a crescente preocupação ambiental, alternativas têm sido estudadas na substituição total ou parcial desse cimento pela indústria da construção civil.

O cimento à base de magnésio (cimento magnésiano ou cimento Sorel) se apresenta como opção ao se mostrar um produto alternativo ao cimento Portland e que pode ser utilizado para várias finalidades, dentre elas a produção de elementos construtivos para a construção a seco, como placas, chapas e painéis. Porém, no Brasil o uso dele ainda se restringe, principalmente, para a produção de refratários.

Salienta-se que as placas, chapas e painéis estão sendo cada vez mais usadas na construção modular devido a diversos benefícios como agilidade e facilidade de execução, racionalidade e diminuição na produção de resíduos, além de possibilitarem maior liberdade construtiva, sendo possível a criação de diversos ambientes em um único espaço.

A maior parte dos elementos e sistemas construtivos industrializados consiste em sistemas leves, principalmente, a partir das tecnologias denominadas por Drywall e Light Steel Frame (LSF), que teve maior impulso a partir de 1990 para uso em vedações verticais. Este sistema é estruturado em perfis de aço galvanizado formado a frio que são parafusados e dispostos sob uma fundação comum nivelada, podendo empregar vários tipos de revestimentos internos e externos como gesso acartonado, placas cimentícias, régua de PVC, chapas de madeira *Oriented Strand Board* (OSB) entre outras, além de ainda permitir o assentamento de revestimento cerâmico convencional sobre as placas.

O sistema LSF, incorporado no país no final da década de 90 por profissionais que o conheceram no exterior, introduz o reticulado metálico com função estrutural. Ele já é amplamente utilizado nos Estados Unidos, Canadá, França, Austrália e Japão, em projetos de edificações residenciais e não residenciais. Os materiais utilizados nesse sistema devem garantir proteção termo-acústica, diminuindo os gastos energéticos da edificação e prevenindo a propagação de grandes incêndios.

Com isso, ao propor um material alternativo ao comumente utilizado nas construções industrializadas no Brasil, este estudo tem como premissa básica a análise do desempenho acústico de isolamento a sons aéreos de placas à base de cimento magnésiano comparativamente àquelas de cimento Portland, evidenciando a importância de estudos sobre uma tecnologia amplamente empregada no exterior, mas ainda incipiente no Brasil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cimento magnésiano é também conhecido como “cimento Sorel” devido à descoberta feita por Sorel no ano de 1867. Este cimento foi produzido primeiramente por uma reação entre óxido de magnésio e cloreto de magnésio resultando no cimento oxí-cloreto de magnésio (MOC). Outros dois cimentos foram obtidos a partir do óxido de magnésio (MgO) sendo eles o cimento oxí-sulfato de magnésio (MOS) e o cimento de fosfato de magnésio (MAP) (SHAND, 2006).

O cimento magnésiano que compõe as placas analisadas nesse estudo é o MOC. Segundo Shand (2006), este cimento apresenta algumas propriedades consideradas superiores quando comparado ao Cimento Portland, como: cura úmida dispensável; alta resistência ao fogo; baixa condutividade térmica; boa resistência à abrasão. Este cimento é a combinação de magnésia e uma solução de cloreto de magnésio. As fases de ligação são $Mg(OH)_2$, $3Mg(OH)_2.MgCl_2.8H_2O$ e $5Mg(OH)_2.MgCl_2.8H_2O$, sendo esta última fase com propriedades mecânicas superiores.

A propriedade de resistência à água dos cimentos magnesianos pode ser considerada relativamente baixa, é visto em literatura que as placas de óxido de magnésio são suscetíveis a problemas e alterações ocasionados pela ação da água e ambientes úmidos. Desde a década de 80, cientistas de vários países têm feito grandes progressos na pesquisa da área alterando a condição de cura da argamassa, adicionando agente modificador químico, realizando tratamento de superfície, controlando o conteúdo de composição ativa de magnésio e de cloreto de magnésio e misturando materiais reforçados com fibra. Dessa forma foi possível melhorar a durabilidade, a antipermeabilidade, a resistência ao desgaste, a resistência mecânica e a durabilidade ao impacto desse cimento, tornando-se um material competitivo no mercado (LI *et al*, 2003).

O potencial do óxido de magnésio como aglutinante em materiais de construção tem sido reconhecido desde a descoberta de cimentos à base de óxido de magnésio em 1867. Soluções de óxido de magnésio podem ser usadas como aglomerantes em placas e painéis, em materiais isolantes e em várias outras aplicações nas construções residências ou comerciais para revestimento interno e até mesmo externo, uma vez que, com a fabricação correta, seu desempenho não é afetado pela absorção de água (THOMAS, 2007). Suas placas podem ser fixadas em sistemas construtivos como Drywall e Light Steel Frame (LSF) e aceitam finalização com diferentes materiais e acabamentos, como tinta, papel de parede e azulejos.

O sistema construtivo Light Steel Frame (LSF) é amplamente empregado na construção industrializada, uma vez que, com o crescimento populacional e dos avanços tecnológicos, a indústria da construção civil no mundo tem buscado sistemas mais eficientes de construção. O LSF introduz o reticulado metálico com função estrutural, sendo relativamente recente no Brasil. Esse sistema construtivo, além de ser eficiente, utiliza

materiais leves, diminuindo, assim, o peso próprio da construção, economizando com fundação e possibilitando versatilidade de projeto. É um sistema que trabalha com componentes de alto controle de qualidade o que torna sua estrutura resistente a ações de desgaste causadas pelo clima, tempo e por agentes biológicos (SILVA et al., 2014).

No exterior, o cimento magnesiano é amplamente utilizado para a fabricação de painéis e placas, a primeira aplicação em larga escala desse cimento ocorreu há mais de 10 anos, motivada pelos Jogos Olímpicos de Beijing 2008, utilizando placas de MgO como um material premium para tornar a cidade um modelo de construção ecológica e desenvolvimento sustentável (BEIJING REPORT, 2009). A segunda grande aplicação do MgO vem com o Taipei 101, o edifício LEED Platinum mais alto do mundo em Taiwan, que contém MgO em paredes e tetos, dentro e fora (TAMBOLI et al, 2008). Os compostos à base de cimento magnesiano não são usados no Brasil por desconhecimento da tecnologia pela indústria, bem como a ausência de pesquisas e literatura nacional sobre o tema. Neste sentido, nosso grupo de trabalho GMC3 tem sido pioneiro na promoção desta tecnologia.

Nesse trabalho foi estudado o potencial de melhoria no desempenho de isolamento sonoro promovido por placas cimentícias quando se troca o cimento convencional (Portland) por cimento à base de óxido de magnésio, dado que a preocupação com a melhoria do isolamento sonoro de sistemas de fachadas foi ainda mais acentuada com a aprovação da norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) que estabelece critérios mínimos de isolamento sonoro aéreo de fachadas de edificações habitacionais.

3 METODOLOGIA

Foi construído um protótipo experimental de Light Steel Frame (Figura 1a), junto ao Laboratório de Materiais de Construção da FEC, na Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, na cidade de Campinas – SP, com dimensões em planta de 2,5m x 2,5m e pé-direito de 3,0m, empregando-se perfis de aço conformados a frio (montantes e guias) com espessura 0,95mm e espaçamentos entre montantes de 0,40m. O contraventamento da estrutura foi realizado por meio de placas OSB (*Oriented Strand Board*) respeitando-se as dimensões e modulações apresentadas anteriormente, de forma a minimizar perdas e possibilitar o correto travamento da estrutura. Os parafusos de fixação das placas foram do tipo cabeça lenticular, ponta-broca, galvanizados, com dimensões de 4,2mm x 19mm. Especialmente na fixação das placas cimentícias (Sorel e Portland) foram utilizados parafusos com aletas com mesmas especificações dos anteriores. Também, foi empregada lã de vidro com densidade de 43kg/m³ como isolamento interno dos painéis.

Para o fechamento dos painéis foram adotadas placas planas com dimensões de 1,20m x 2,40m e espessura de 8mm, produzidas com a tecnologia oxi-cloreto, importadas da China. Comparativamente, foram adotadas placas planas de fibrocimento nacionais com as mesmas dimensões e espessura, produzidas com cimento Portland (Figura 1b). Para contraventamento dos painéis foram adotadas placas OSB com dimensões de 1,20m x 2,40m e espessura de 11mm.

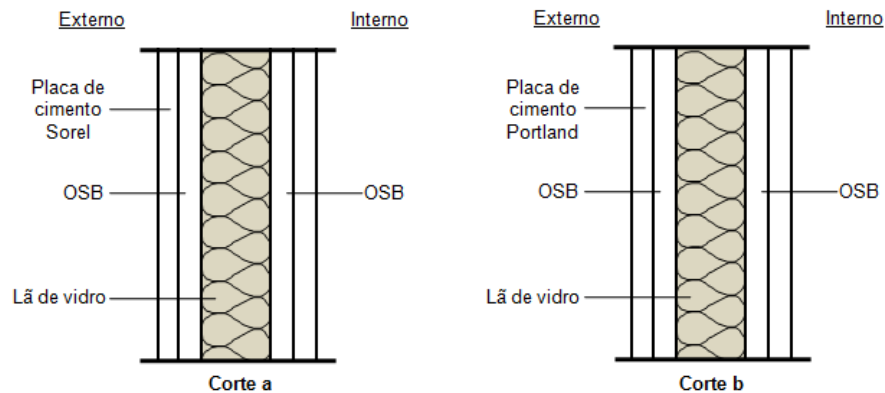
Figura 1 – Protótipo construído: (a) Estrutura em Light Steel Frame e (b) Placas de cimento Sorel e cimento Portland fixadas no protótipo



Fonte: Autores (2017)

Na Figura 2 é possível observar os detalhes construtivos do sistema Light Steel Frame, bem como fixação das placas de cimento Sorel (corte A) e fibrocimento de cimento Portland (corte B), juntamente com os painéis de OSB para contraventamento e a lã de vidro para isolamento.

Figura 2 – Detalhes construtivos: (a) Painel construído com placa de fibrocimento Portland e (b) Painel construído com placa à base de óxido de magnésio.



Fonte: Autores (2017)

A norma NBR 15575-4 (2013) estabelece requisitos, critérios e métodos para a determinação do desempenho de isolamento sonoro aéreo de sistemas de vedações verticais internas e externas de edificações habitacionais. O critério de desempenho é baseado em valores do parâmetro acústico Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,nT,w}$) determinado segundo a norma ISO 717-1 (2013) a partir dos valores calculados da Diferença Padronizada de Nível ($D_{2m,nT}$) obtidos em função de frequência. O método indicado pela NBR 15575-4 (2013) para a determinação do isolamento a sons aéreos de partições verticais externas é o procedimento proposto pela norma ISO 140-5 (1998). Esse procedimento de medição independe do tipo de fachada ou do tipo de edificação a ser avaliada, assim ele foi escolhido como o método para a determinação de isolamento sonoro aéreo das placas de cimento aplicadas como fachada de um protótipo construído em Light Steel Frame (LSF). Para efeito de comparação foram avaliadas o desempenho acústico de placas de cimento preparadas com cimento a base de óxido de magnésio e a base de cimento Portland.

Com a fonte sonora posicionada do lado externo da edificação e emitindo ruído rosa, o procedimento de medição estabelece que sejam obtidos os níveis de pressão sonora a 2m da fachada (L_1) e os níveis de pressão sonora no ambiente interno da fachada estudada (L_2), ambos medidos em função de frequência em bandas de 1/3 de oitava entre as frequências de 100Hz e 3150Hz. No ambiente interno, denominado de sala receptora, também se mede o tempo de reverberação (T) em função de frequência em bandas de 1/3 de oitava no mesmo intervalo de frequência. A partir dos valores de (L_1), (L_2) e (T) calcula-se a Diferença Padronizada de Nível ($D_{2m,nT}$) em função de frequência empregando a equação 1:

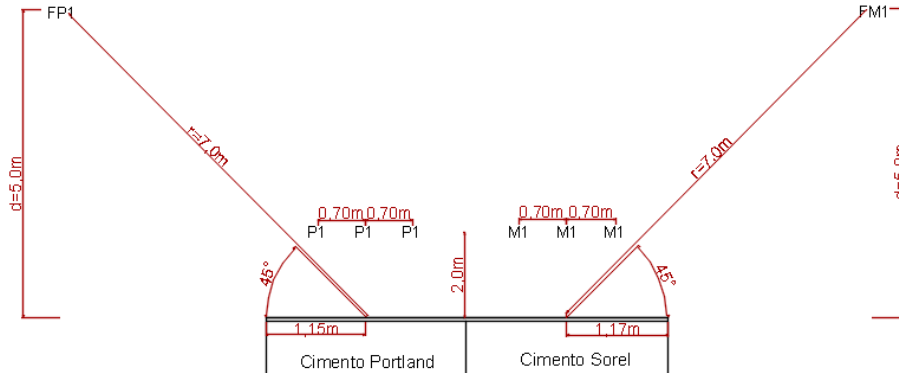
$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \log (T/T_0) \quad (1)$$

onde ($L_{1,2m}$) é o nível de pressão sonora medido a 2m da fachada, (L_2) é o nível de pressão sonora no ambiente interno da fachada estudada, T é o tempo de reverberação do ambiente interno e T_0 é tempo de reverberação de referencia que vale 0,5s.

O sistema de medição é composto pelo medidor de nível de pressão sonora BK 2270, a fonte omnidirecional Tipo 4292-L e o amplificador Tipo 2734 e programa Building Acoustics BZ 7228, todos da Bruel&Kjaer.

Para as medidas dos níveis de pressão sonora externos (L_1) foram escolhidas três posições de microfones em frente a fachada com placa Sorel (M1) e três posições em frente a fachada com a placa Portland (P1). Todos os pontos de microfone estão distantes 2m do plano da fachada e a uma altura $h = 1,5m$. Os posicionamentos da fonte sonora obedecem às distâncias recomendadas pela norma ISO 140-5 (1998). Na Figura 3 são apresentadas as posições e distâncias dos pontos de medição e da fonte sonora em relação as fachadas finalizadas com a placa Sorel (FM1) e com a placa Portland (FP1).

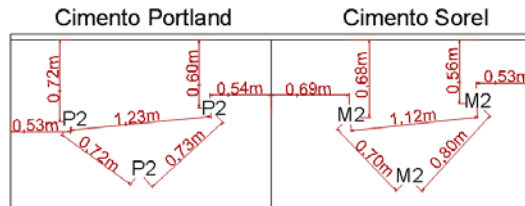
Figura 3- Representação, em planta, das posições da fonte sonora e do microfone na área externa



Fonte: Autores (2017)

Para as medições dos níveis de pressão sonora na parte interna da edificação (L2), de acordo com a norma ISO 140-5 (1998) devem ser utilizadas na sala receptora um mínimo de cinco posições de microfone, distribuídos com o maior espaçamento possível. A norma também estabelece uma distância mínima de 0,7m entre posições de microfone e de 0,5m entre a posição do microfone e das bordas do ambiente. Devido as dimensões reduzidas dos ambientes do protótipo, foram escolhidas três posições de microfone e utilizadas duas alturas diferentes, $h_1 = 1,45m$ e $h_2 = 1,73m$ totalizando seis medições (M2) para a sala receptora referente a placa Sorel e outras seis medições (P2) referente a placa Portland. As posições são apresentadas na Figura 4.

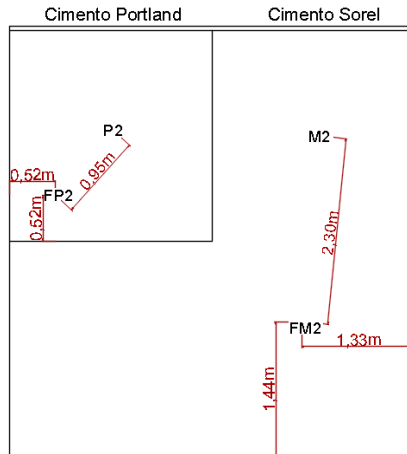
Figura 4 – Representação, em planta, do posicionamento dos microfones na área interna



Fonte: Autores (2017)

Para a obtenção do tempo de reverberação (T), a fonte sonora foi posicionada no interior da edificação a uma altura de 1,5m. A norma ISO 140-5 (1998) estabelece uma distância mínima de 1,0m entre a fonte e quaisquer posições de microfone. Na Figura 5 é mostrado o posicionamento da fonte sonora e dos pontos de medição mais próximos à fonte, no interior da edificação para a medição do tempo de reverberação (T).

Figura 5 – Representação, em planta, das posições da fonte sonora e microfone na área interna



Fonte: Autores (2017)

O nível de pressão sonora relativo ao ruído de fundo foi medido no interior da sala receptora para verificar a necessidade ou não da correção do nível L_2 pelo ruído de fundo conforme recomenda a ISO 140-5 (1998). A correção não é necessária quando a diferença entre o ruído de fundo e o nível sonoro com a fonte ligada externamente é maior que 10dB. Nesse ensaio não foi necessário efetuar a correção.

Considerando os resultados medidos de L_1 , L_2 e T em função de frequência, e empregando a Equação 1 são calculados os valores do parâmetro Diferença Padronizada de Nível ($D_{2m,nT}$) obtidos em função de frequência.

A norma ISO 717-1(2013) apresenta os cálculos para que os valores de isolamento do som aéreo obtidos em função de frequência sejam convertidos em um único número e que irão representar o desempenho acústico da fachada. Aplicando esse procedimento obtém-se o parâmetro Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,nT,w}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores da Diferença Padronizada de Nível ($D_{2m,nT}$) em função da frequência em bandas de 1/3 de oitava entre 100Hz e 3150Hz foram calculados segundo a Equação 1, a partir dos valores medidos de $L_{1,2m}$, L_2 e T conforme procedimento descrito na metodologia. Os resultados de $D_{2m,nT}$ em função de frequência para as placas produzidas com cimento Portland e com cimento a base de óxido de magnésio são apresentados na Tabela 1.

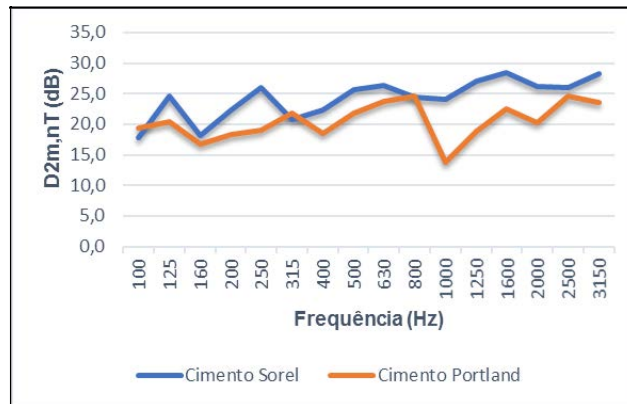
Tabela 1 - Diferença Padronizada de Nível em função de frequência das placas estudadas

Frequência (Hz)	$D_{2m,nT}$ (dB)	
	Portland	Sorel
100	19,4	17,9
125	20,3	24,6
160	16,8	18,1
200	18,3	22,3
250	19,0	26,0
315	21,9	20,7
400	18,5	22,4
500	21,8	25,7
630	23,7	26,4
800	24,5	24,5
1000	13,8	24,1
1250	18,8	27,1
1600	22,5	28,5
2000	20,3	26,1
2500	24,6	26,0
3150	23,5	28,3

Fonte: Autores (2017)

Para efeitos de comparação, a Figura 6 apresenta as curvas da Diferença Padronizada de Nível em função de frequência para as duas fachadas. Observa-se que a placa Sorel tem isolamento superior a placa Portland em toda a faixa de frequência. Destaca-se que a placa Portland tem uma redução acentuada no isolamento a 1000Hz, frequência importante para isolamento de sons relativos a fala. Esse decréscimo no isolamento nessa frequência está associado ao efeito de coincidência. A troca de cimento favoreceu o isolamento nessa frequência específica.

Figura 6 – Diferença Padronizada de Nível das fachadas



Fonte: Autores (2017)

Os valores da Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,n,T,w}$) obtidos para as placas Portland e Sorel com a aplicação do procedimento da ISO 717-1 (2013) são apresentados na Tabela 2. Observa-se uma elevação de 4dB no comportamento de isolamento das placas com a substituição do cimento Portland para o cimento com oxido de magnésio. Considerando os critérios de isolamento de fachadas da norma NBR 15575-4, esse resultado indica a mudança de classificação de desempenho mínimo para intermediário na classe de ruído I.

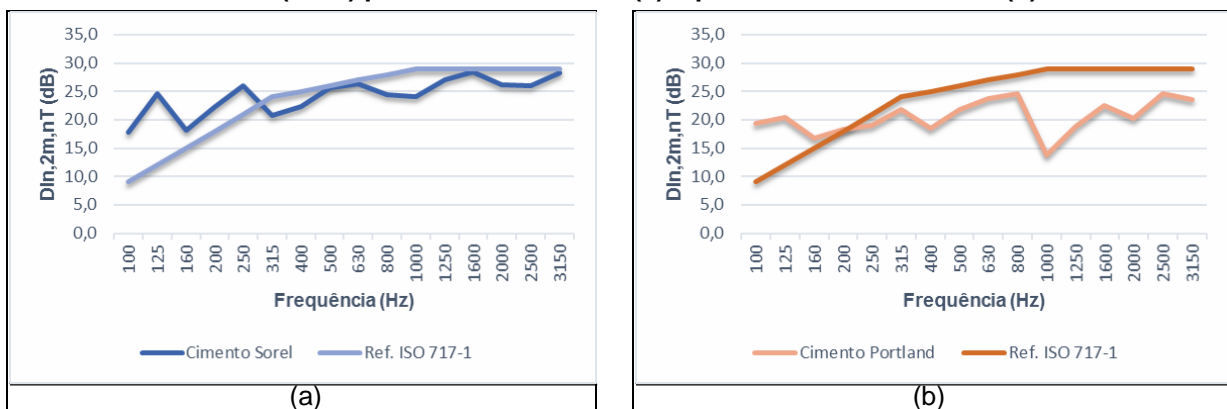
Tabela 2 - Diferença Padronizada de Nível Ponderada

Tipo de cimento	$D_{2m,n,T,w}$ (dB)
Portland	22
Sorel	26

Fonte: Autores (2017)

As Figuras 7a e 7b mostram as curvas de referência da norma ISO 717-1 ajustadas para os resultados obtidos da Diferença Padronizada de Nível em função de frequência para as duas fachadas

Figura 7 - Curvas da Diferença Padronizada de Nível ajustadas com Curva de referência da norma ISO 717-1 (2013) para a fachada Sorel (a) e para a fachada Portland (b)



Fonte: Autores (2017)

5 CONCLUSÕES

A melhoria do isolamento sonoro de sistemas de fachadas é cada vez mais requerida. Essa preocupação ficou mais acentuada com a aprovação da norma de desempenho NBR 15575 que estabelece critérios mínimos de isolamento sonoro aéreo de fachadas de edificações habitacionais.

Nesse trabalho foi estudado o potencial de melhoria no desempenho de isolamento sonoro promovido por placas cimentícias quando se troca o cimento convencional (Portland) por cimento acrescido de óxido de magnésio. Os resultados do isolamento sonoro aéreo mensurado pelo parâmetro acústico Diferença Padronizada de Nível em função de frequência mostraram um incremento no isolamento em toda faixa de frequência para a placa que empregou o óxido de magnésio. Houve uma melhora significativa no isolamento sonoro aéreo na frequência de 1000Hz onde foi possível excluir o efeito de coincidência que reduzia o isolamento nessa banda de frequência. Em termos globais, o parâmetro Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,nT,w}$) é indicado para comparação de desempenho acústico de isolamento entre sistemas construtivos. Nesse estudo verificou-se um aumento de 4dB na substituição do cimento convencional (Portland) pelo cimento com óxido de magnésio. Isso representa o atendimento a norma NBR15575-4 do desempenho intermediário para isolamento aéreo de fachada.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR – 15575 - 4**: Requisitos para sistemas de vedações verticais internas e externas- Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BEIJING REPORT. **Independent Environmental Assessment: Beijing 2008 Olympic Games**. Published by the United Nations Environment Programme (UNEP) in February 2009.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Associação Brasileira de Cimento Portland. – Brasília : CNI, 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 140-5**: Acoustics – Measurements of sound insulation in buildings and of buildings elements – Field measurements of airborne sound insulation of facade elements and facades. Geneva.1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 717-1**: Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of buildings elements – Airborne sound insulation. 2013.

SHAND, M. A. **The Chemistry and Technology of Magnesia**. John Wiley & Sons, Ltd., Hoboken, 2016.

LI, G. *et al.* Experimental study on urban refuse/magnesium oxychloride cement compound floor tile. **Cement and concrete research**, v. 33, n. 10, p. 1663-1668, 2003.

TAMBOLI, A., LEONARD, J. UMKANT, V., XIAO, XU, Tall Buildings: Sustainable Design Opportunities, CTBUH 8th World Congress, Dubai, March 3-5, 2008.

THOMAS, R. **MgO Board**. Walls and Ceilings. 2007. Disponível em: <<http://www.wconline.com/articles/85449-mgo-board?>>. Acesso em 30/03/2017.

SILVA, C. F. B. da. *et al.* **Custo-benefício do sistema construtivo Steel Framing**. In: 8º EnTec – Uberada, MG. 28 a 30 de outubro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à TESSA Engenharia, pela doação de todos os materiais de pesquisa, e, também, ao LACAF/Unicamp, pelos equipamentos utilizados.