CBPAT 2020 ANAIS
CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
DE 15 A 17 DE ABRIL | FORTALEZA - CE
http://dx.doi.org/10.4322/CBPAT.2020.197
ISBN 978-65-86819-05-2

DESEMPENHO TÉRMICO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO À BASE DE RESÍDUOS: SIMULAÇÃO TÉRMICA EM UMA RESIDÊNCIA DE BAIXO PADRÃO

MENDES, JÚLIA CASTRO
Engenheira Civil, D.Sc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
julia.mendes@ufop.edu.br

SANTOS, BRUNA LOURES DE CASTRO
Graduanda em Arquitetura e Urbanismo
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
brunalouresc@gmail.com

LOPES, AMANDA VITOR
Arquiteta e Urbanista
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
amanda.vitor@aluno.ufop.edu.br

SOUZA, HENOR ARTUR
Engenheiro Mecânico, D.Sc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
henor@ufop.edu.br

FONTES, WANNA CARVALHO
Arquiteta e Urbanista, D.Sc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
wanna.fontes@ufop.edu.br

PEIXOTO, RICARDO ANDRÉ FIOROTTI
Engenheiro Civil, D.Sc.
Universidade Federal de Ouro Preto
Minas Gerais; Brasil
ricardofiorotti@ufop.edu.br

RESUMO

Este trabalho objetiva avaliar a viabilidade da aplicação de resíduos industriais e de mineração como agregados para argamassas de revestimento em termos de desempenho térmico na construção, conforto, durabilidade e melhorias para usuários. Foram realizados estudos em argamassas com areia de rio (REF), Rejeito de Barragem de Minério de Ferro (RBMF), Quartzito Friável (QTZ) e Escória de Aciária Processada (EAP). Inicialmente, foram obtidas por meio de experimentos a massa específica aparente e a condutividade térmica das argamassas, que foram em sequência utilizadas para análise através de simulações térmicas em uma residência de baixo padrão. As argamassas com EAP e RBMF apresentaram melhor desempenho devido à sua alta massa específica e baixa condutividade térmica. As argamassas com EAP apresentaram 55% das classificações de desempenho térmico como "superior" e "intermediário", enquanto os demais agregados contam com uma média de 43%, seguidos pelas argamassas com RBMF, REF e QTZ, respectivamente. Conclui-se, portanto, que argamassas com resíduos industriais e de mineração como agregados são soluções econômicas e sustentáveis para melhorar o desempenho térmico dos edifícios, além de contribuir para reduzir os impactos do descarte desses resíduos.
Palavras-chave: desempenho térmico; simulação energética; reutilização de resíduos; sustentabilidade; argamassa de revestimento.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the feasibility of applying industrial and mining wastes as aggregates for coating mortars in terms of thermal performance in construction, comfort, durability and improvements for users. Studies were conducted with river sand (REF), iron ore tailings (IOT), friable quartzite (QTZ) and steel slag (SLG). Specific density and thermal conductivity of the mortars were defined followed by energy simulations in a low standard residence. Mortars with SLG and IOT presented better performance due to their high specific density and low thermal conductivity. SLG mortars presented 55% of the thermal performance ratings as "superior" and "intermediate", while the other aggregates had an average of 43%, followed by IOT, REF and QTZ mortars, respectively. It is concluded, therefore, that mortars with industrial and mining wastes as aggregates are economical and sustainable solutions to improve thermal performance of buildings, besides contributing to reduce waste disposal impacts.
Keywords: thermal performance; energy simulation; waste reuse; sustainability; coating mortar.

ISBN 978-65-86819-05-2

1. INTRODUÇÃO

Devido à urbanização e ao aumento da população, a busca por recursos naturais tem aumentado consideravelmente. Estes são extraídos do planeta de forma radical para suprir toda a demanda exigida em um processo não-sustentável. Nesse contexto, bilhões de toneladas de rejeitos de mineração e resíduos industriais são assim gerados e descartados todos os anos, com altos custos ambientais e sociais (Figueirôa, 2014; Edraki, et al., 2014; Galvão, et al., 2018). Uma alternativa promissora para a destinação desses resíduos está na composição de materiais de construção civil, visto que a atividade do setor se intensificou muito ao longo dos anos e possui uma alta demanda de consumo (CBIC, 2019).

Como exemplo dessa aplicação, rejeitos de barragens de minério de ferro foram estudados por Sant'Ana Filho (2017), Fontes (2018) (2016), Weishi (2018) e Ma (2016), com um bom desempenho como agregado em matrizes cimentícias. Carvalho (2014), Carvalho (2019), Rondi (2016) e Silva (2016) também observaram resultados positivos no uso da escória de aciaria processada como agregado para concretos e argamassas. Outro resíduo promissor é o quartzito friável, obtido a partir da produção de rochas ornamentais. Ramirio (2008) e Adom-Asamoath (2014) caracterizaram o material para fins de construção civil; e Santos (2015) e Dias (2017) utilizaram com sucesso a fração fina para argamassas colantes e de revestimento.

Em geral, as características físicas e mecânicas de pastas, argamassas e concretos são encontradas na literatura com facilidade, diferentemente de suas propriedades térmicas. Além disso, pesquisas sobre propriedades térmicas geralmente se concentram no efeito de aditivos em matrizes cimentícias (Corinaldesi, et al., 2011; Benmansour, et al., 2014), com pouca literatura relatando a substituição total de agregados naturais por mineração e / ou resíduos industriais (Rashad, 2016; Franco, et al., 2019).

Portanto, o presente trabalho avalia o desempenho térmico de argamassas produzidas com agregados reciclados, buscando auxiliar no desenvolvimento de novos materiais de construção, no desempenho térmico de edificações, na saúde e produtividade dos usuários, na durabilidade dos materiais e no gerenciamento de resíduos. Para isso, foram realizadas simulações térmicas em residência de baixo padrão, buscando analisar o desempenho dos diferentes resíduos em diferentes zonas climáticas brasileiras. No cenário atual, em que os agregados naturais estão se tornando cada vez mais escassos, essa avaliação abre caminho para materiais de construção mais sustentáveis e com maior eficiência energética, além de contribuir para a redução de manifestações patológicas e um melhor desempenho da edificação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho avalia o desempenho térmico de argamassas de revestimento compostas com resíduos industriais e de mineração, realizando simulações térmicas em um edifício de baixo padrão. Esse projeto está entre os modelos fornecidos pelo programa Minha Casa Minha Vida da Caixa Econômica Federal. Foram investigados quatro tipos de agregados: agregado natural local, areia de rio como Referência (REF); Rejeitos de Barragem de Minério de Ferro (RBMF); Quartzito Friável (QTZ); Escória de Aciaria Processada (EAP).

Um tipo comum de argamassa de revestimento foi produzido com cimento Portland e cal hidratada, traço 1:1:6 (cimento: cal: agregado miúdo, em volume), traço tipicamente adotado em construções convencionais. As argamassas com areia natural de rio como agregado foram denominadas argamassas de referência ou convencionais (REFa). Nas outras argamassas, o agregado miúdo foi totalmente substituído por RBMF (RBMFa), Quartzito Friável (QTZa) ou Escória de Aciaria Processada (EAPa).

2.1 Materiais

Para a preparação das argamassas, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI), escolhido por conter o menor teor de adições que, por sua vez, poderiam interferir com os resíduos estudados; cal hidratada; agregados miúdos e água potável. As amostras dos resíduos foram coletadas representativamente, de acordo com as prescrições normativas da NBR 10007 (ABNT, 2004). Antes da mistura, o agregado natural e todos os resíduos foram peneirados na malha nº 4 (4,75 mm) e secos em estufa a 105°C.

O RBMF utilizado é originário das margens de uma barragem localizada na cidade de Igarapé, estado de Minas Gerais. Após a secagem, o RBMF foi destorroado manualmente. As amostras de QTZ são originárias de processos de mineração e corte de quartzito da cidade de São Thomé das Letras, Minas Gerais, e foram utilizadas no estado bruto. A escória é proveniente do processo de *Linz-Donawitz* de uma siderurgica da cidade de João Monlevade, estado de Minas

ISBN 978-65-86819-05-2

Gerais. A EAP utilizada foi montada de modo que sua distribuição granulometrica fosse coincidente a da areia natural. Previamente, a escória foi submetida às interpéries por mais de um ano, com o objetivo de hidratar completamente seus óxidos livres (CaO e MgO), em seguida submetida à trituração em um moinho de mandíbulas para reduzir o tamanho de suas partículas. As amostras foram então segregadas entre frações metálicas e não metálicas. Após a segregação, a fração metálica retornou ao ciclo de produção de aço, enquanto a fração não metálica originou os agregados utilizados neste trabalho.

2.2 Caracterização dos Agregados

A distribuição granulométrica de todos os agregados foi obtida por peneiramento convencional, segundo procedimentos da NBR NM248 (ABNT, 2003) e difração a laser (na fração <0,075 mm), utilizando um granulômetro a laser BETTERSIZE 2000. A massa específica foi determinada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2003), e a massa unitária segundo o método C da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

A Figura 1 mostra a distribuição granulométrica da areia do rio e os resíduos (RBMF, QTZ e EAP) utilizados no presente trabalho.

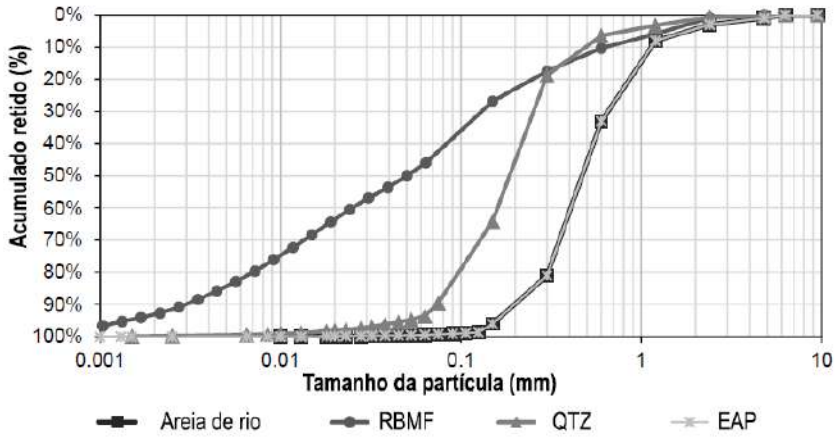

Figura 1 - Distribuição granulométrica dos agregados.

É notável que o RBMF é um material bem graduado e particularmente fino, com 50% de suas partículas menores que 0,05 mm. É seguido pelo QTZ, com 50% do material menor que 0,2 mm; e agregado miúdo natural, areia de rio, com 50% das partículas abaixo de 0,5 mm. A EAP possui intencionalmente a mesma distribuição de tamanho de partícula que a areia do rio.

A massa unitária e a massa específica dos agregados são mostradas na Tabela 1. As maiores massas unitárias, RBMF e EAP, são, provavelmente, uma consequência de suas composições químicas. Areia do rio e QTZ seguem com densidades muito semelhantes.

Tabela 1 – Massa específica e massa unitária dos agregados.

	Areia de Rio	RBMF	QTZ	EAP
Massa específica (g/cm³)	2.65	3.53	2.63	3.49
Massa unitária (g/cm³)	1.58	1.62	1.51	1.74

O DRX dos agregados é mostrado na Tabela 2. A areia de rio e o QTZ são constituídos basicamente por quartzo, 78,04% e 89,60%, respectivamente. O RBMF tem a hematita como fase predominante, 43,62%, e quartzo e caulinita com concentrações menores, mas não menos importantes, de valores 26,32% e 17,53%, respectivamente. Já a EAP se destaca pela maior concentração de material amorfo na composição, 52,65%, seguido por Calcita e Wustite, também em concentrações menores de 12,02% e 11,03%.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 2 - Difração de Raios-X dos agregados

Mineral	Areia de Rio	QTZ	RBMF	EAP
Quartzo	78.04%	89.60%	26.32%	0.79%
Caulinita	3.53%	4.40%	17.53%	
Gibbsita	1.95%		5.20%	
Ortoclase	5.62%			
Flogopita	2.87%			
Moscovita		2.85%		
Hematita			43.62%	
Goethita			2.07%	
Calcita				12.02%
Wüstite				11.03%
Brownmillerita				9.31%
Larnita				8.46%
Sistema De Cristal Monoclínico				4.74%
Akermanite				0.66%
Periclase				0.18%
Cal				0.16%
Teor de amorfos	7.83%	3.12%	5.25%	52.65%

2.3 Projeto e Preparação das Argamassas

As argamassas foram produzidas em um misturador de argamassa convencional, segundo NBR13276 (ABNT, 2005). O procedimento de mistura incluiu 1 minuto em baixa velocidade, seguido de 30s em alta velocidade. Para cada tipo de agregado foram confeccionadas 4 corpos de prova em forma de placa de dimensões 300 × 300 × 50. A cura foi realizada em câmara úmida por 28 dias; temperatura 25 ± 2°C e umidade relativa de 90% ± 5%. A quantidade de água foi definida para obter um índice de consistência de 260 ± 10mm.

2.4 Caracterização Física e Térmica das Argamassas

No estado endurecido, para determinar a massa específica aparente, o volume foi obtido medindo as amostras com um paquímetro e obtendo a massa com uma balança de precisão, segundo a NBR 13280 (ABNT, 2005). O volume final foi dado pela média de oito medições nos quatro lados das placas.

Um medidor de fluxo de calor NETZSCH HFM 436 Lambda foi utilizado para obter a condutividade térmica das amostras. Foi adotada temperatura média de 20°C, com diferença de temperatura de 10°C entre as placas frias e quentes. O processo de preparação das amostras procurou reduzir o máximo de água livre de todas as placas para garantir parâmetros de simulação semelhantes. As amostras foram gradualmente secas em estufa a 80°C até estabilização da massa, ou seja, a perda de massa por evaporação da água não excedeu 0,5% em dois intervalos de pesagem de 24 horas.

Inicialmente, a Figura 2 apresenta a massa específica das argamassas no estado endurecido. Argamassas com agregados naturais (REFa) apresentaram massa específica aparente de 1831kg/m³, considerada normal, segundo a NBR 15220 (ABNT, 2005).

ISBN 978-65-86819-05-2

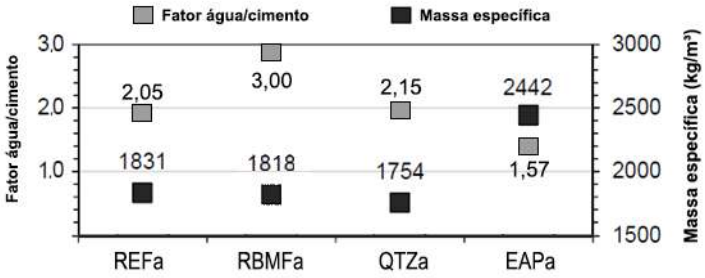

Figura 2 - Massa específica e fator água/cimento das argamassas no estado endurecido.

Embora o RBMF tenha uma massa específica muito maior que a areia natural, a RBMFa mostrou uma massa específica ligeiramente menor que a REFa. Provavelmente, isso ocorre devido ao ar incorporado durante a mistura e maior a/c dessas argamassas. A finura do RBMF, juntamente com a alta retenção de água (Fontes, et al., 2016), além da cal (Sébaïbi, et al., 2003), são as principais causas possíveis.

Argamassas com quartzito friável (QTZa) apresentaram massa específica semelhante à referência (REFa), o que é esperado devido às características químicas semelhantes de ambos os agregados. As EAPa apresentaram a maior massa específica e, provavelmente, este resultado está relacionado às propriedades químicas e de interação deste resíduo.

A Figura 3 apresenta os resultados da condutividade térmica. A estrutura de poros formada pelos agregados foi responsável pela redução da condutividade térmica de RBMFa e QTZa. A relação entre a condutividade térmica e esse aspecto morfológico foi estudada em profundidade em um trabalho anterior (Mendes, et al., 2019). Um sistema de poros refinado foi gerado em QTZa, RBMFa e EAPa devido ao efeito filler (QTZ e RBMF), à retenção de água (RBMF) e às propriedades cimentantes (EAP).

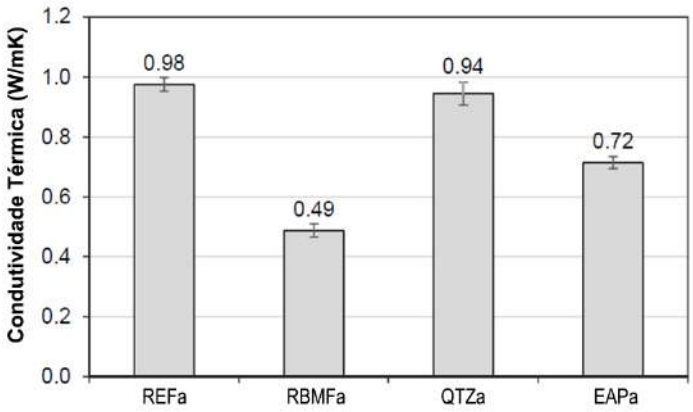

Figura 3 – Condutividade térmica das argamassas.

Observa-se uma diferença de 15% na condutividade térmica entre a condutividade térmica experimental da argamassa convencional (REFa) e o valor genérico fornecido para argamassas pela norma NBR 15220: 1,15W/(m·K) (ABNT, 2005). Essas variações podem estar relacionadas ao conteúdo a/c ou à técnica de medição, mas não devem ser negligenciadas. Em termos de simulações de construção, essa diferença pode subestimar ou superestimar os resultados do desempenho térmico.

2.5 Avaliação Do Desempenho Térmico Através De Simulação Térmica

As propriedades físicas e térmicas resultantes foram usadas como dados entrada para a simulação térmica do edifício. Para esse fim, foi avaliado um projeto de habitação social em países tropicais, cujo projeto arquitetonico é mostrado na Figura 3. Essas habitações são constituidas por alvenaria de tijolo cerâmico vazado, fixadas com argamassa de assentamento, sendo as juntas verticais e horizontais com espessura de 1 cm. As paredes são cobertas de cada lado com argamassa de revestimento (espessura de 2,5 cm; traço 1: 1: 6). Em cada simulação, as propriedades da argamassa de revestimento foram alteradas para corresponder às de cada resíduo testado.

ISBN 978-65-86819-05-2

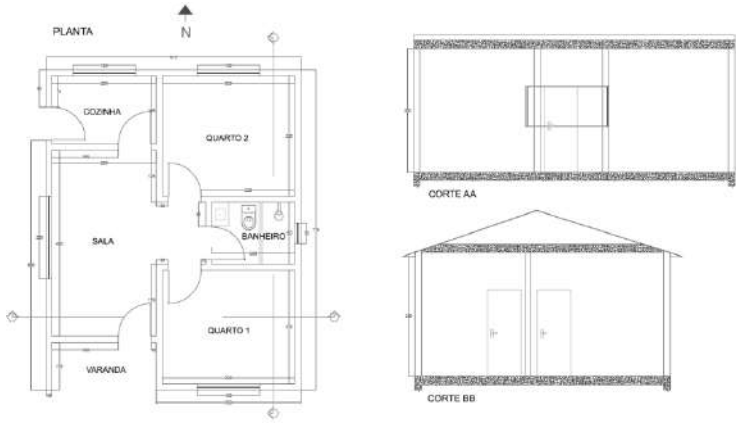

Figura 4 - Projeto arquitetonico da residência de baixo padrão (Caixa Econômica Federal, 2019).

Para investigar o desempenho térmico das novas argamassas em relação ao clima local, foram utilizados dias típicos de cada uma das oito zonas climáticas do Brasil (ABNT, 2005). As cidades podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo das recomendações para cada Zona Bioclimática Brasileira e as cidades simuladas segundo NBR 15220 (ABNT, 2005).

Zona	Cidade Simulada	Estação	Max. temperatura diária bulbo seco (°C)	Alcance temperatura diária bulbo seco (°C)
1	Curitiba	Verão	31.4	10.2
		Inverno	12.3	11.6
2	São Lourenço	Verão	31.8	11.7
		Inverno	19.2	16.6
3	São Paulo	Verão	31.9	9.2
		Inverno	16.2	10.0
4	Brasília	Verão	31.2	12.5
		Inverno	22.2	12.2
5	Vitória da Conquista	Verão	31.7	10.3
		Inverno	20.4	9.7
6	Campo Grande	Verão	33.6	10.0
		Inverno	13.7	11.5
7	Cuiabá	Verão	37.8	12.4
		Inverno	25.7	14.3
8	Manaus	Verão	34.9	9.1
		Inverno	29.3	7.9

Conforme indicado pela norma brasileira de desempenho térmico NBR 15575 (ABNT, 2013), foram avaliadas as temperaturas na sala e no quarto mais desfavorável. De acordo com as instruções desta norma (ABNT, 2013), duas taxas de infiltração foram testadas: 1 ren/h e 5 ren/ h.

A Tabela 4 apresenta os critérios de adequação dos ambientes a partir da norma de desempenho térmico (ABNT, 2013). Ela não considera a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, equipamentos em geral), buscando isolar os efeitos do entorno do edifício. Embora muito simplificado para avaliar com precisão o conforto humano (Yang, et al., 2014) (Oliveira, et al., 2015), esse método é adequado para avaliar o desempenho de nossos diferentes materiais.

ISBN 978-65-86819-05-2

Tabela 4 - Critério de desenvolvimento de Desempenho Térmico, onde Te = temperatura do ar externo; Ti = temperatura do ar interno; min = minimo; max = maximo.

	Critérios de Verão		Critérios de Inverno	
Nível de desempenho	Zona 1 a 7	Zona 8	Zonas 1 a 5	Zonas 6 a 8
Mínimo (M)	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3°C)$	Sem requerimentos
Intermediária (I)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2°C)$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1°C)$	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5°C)$	
Superior (S)	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4°C)$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2°C)$ and $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1°C)$	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7°C)$	

Nota: se a temperatura falhar em alcançar o nível mínimo de desempenho, é considerada não-conformidade (NC).

Para fins de comparação, juntamente com os quatro tipos de argamassas testadas experimentalmente (REFa, RBMFa QTZa e EAPa), outras simulações foram realizadas com as propriedades de referência fornecidas pela Norma Brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005). Este padrão fornece propriedades genéricas para materiais de construção comuns. Esta argamassa genérica, denominada pela ABNT, possui uma densidade específica média de 1950 kg/m³ e condutividade térmica de 1,15W/m·K.

A simulação do edifício foi desenvolvida no software Energy Plus (versão 8.6.0) e considerou as seguintes hipóteses:
• Orientação norte;
• Adoção de condutividade térmica e massa específica aparente experimentais para as argamassas testadas;
• Paredes compostas por tijolos vazados de cerâmica com 15 cm de espessura e argamassas de revestimento estudadas (2,5 cm de cada lado);
• Telhas cerâmicas.
• Para os materiais cerâmica, concreto, madeira e vidro, foram utilizados os valores indicados pela NBR 15220;
• Calor específico de 1000J/kg·K foi adotado para todas as argamassas, seguindo a NBR 15220;
• Nenhum equipamento de condicionamento artificial foi simulado;
• As condições de sombreamento foram apenas as promovidas pelos beirais do telhado;
• Nenhuma vegetação circundante foi considerada;
• A temperatura do solo adotada foi a padrão de software de 18 ° C, não foi considerado material de isolamento;
• As janelas foram abertas e apenas a ventilação / insolação natural foi considerada.
• A simulação compreendeu períodos de 3 dias típicos seguidos de projeto (para verão e inverno), conforme indicado pela norma de desempenho térmico NBR 15575;
• A variação na condutividade térmica de materiais na presença de umidade não foi considerada (Siwinska & Garbalinska, 2011);

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação do desempenho térmico através da simulação térmica do edifício

Finalmente, as Figuras 5 e 6 exemplificam os resultados típicos das simulações. Foram mostrados um dia de inverno e um de verão; para Zona 2 e Zona 7, reconhecíveis por invernos e verões rigorosos no Brasil, respectivamente. Além dos quatro tipos de argamassas testados experimentalmente (REFa, com areia natural; RBMFa, com rejeitos de minério de ferro; QTZa, com rejeitos de quartzito; e EAPa, com escória processada em aço), simulações adicionais foram realizadas com as propriedades de referência fornecidas pela norma brasileira NBR 15220 (ABNT, 2005), para fins de comparação.

ISBN 978-65-86819-05-2

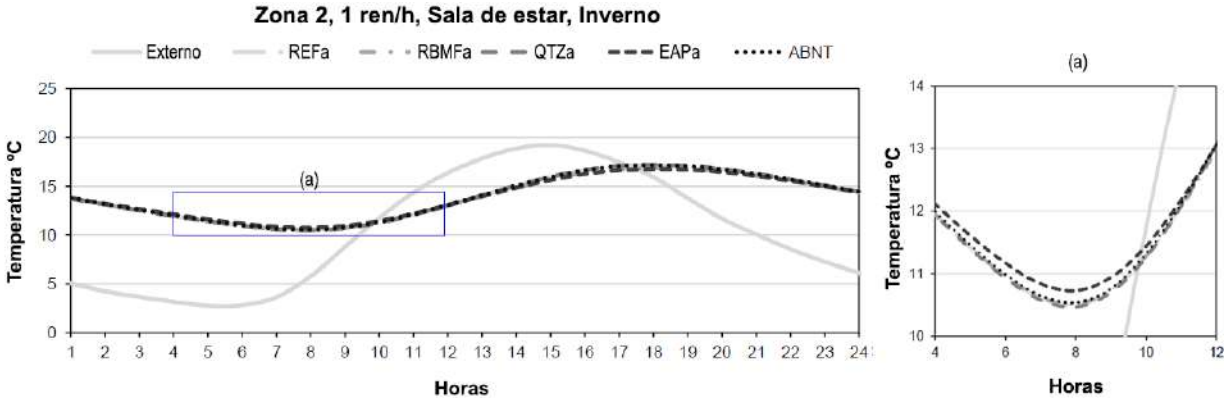

Figura 5 – Variação de temperatura das argamassas na sala de estar em dia de inverno.

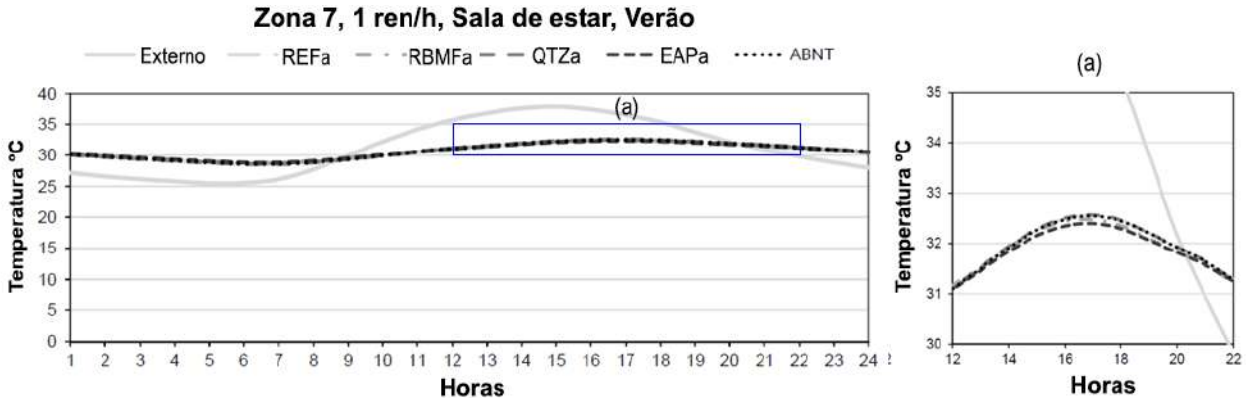

Figura 6 – Variação de temperatura das argamassas na sala de estar em dia de verão.

Os recortes (a) permitem a observação dos diferentes desempenhos das argamassas (Figura 5 e Figura 6). As argamassas EAPa e RBMFa geralmente apresentaram uma diferença maior na temperatura externa do que as argamassas REFa, QTZa e ABNT, com perfis de temperatura comparáveis. Esses resultados sugerem um desempenho aprimorado de isolamento para argamassas EAPa e RBMFa.

A Figura 7 resume os resultados dos níveis de desempenho térmico para cada tipo de argamassa, para todas as conduções de ventilação (1 ren/h e 5 ren/h) e 8 zonas climáticas (um total de 52 simulações), com os níveis (superior, intermediário, mínimo e não-correspondente) de desempenho térmico pra cada tipo de argamassa.

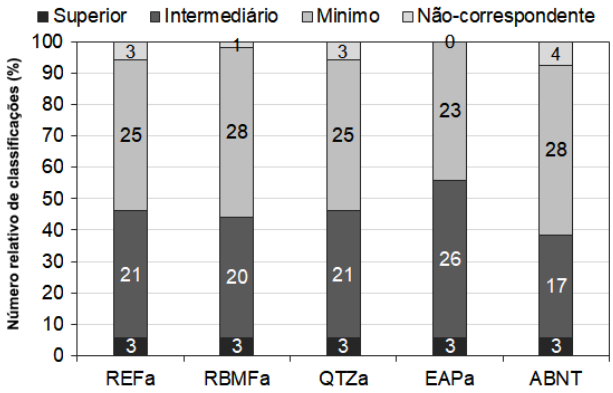

Figura 7 – Níveis de desempenho térmico para cada argamassa.

Inicialmente, observa-se que as EAPa apresentaram o melhor desempenho geral, com a maioria das classificações "superiores" e "intermediárias" e nenhuma "não conformidade".Este desempenho é resultado da baixa condutividade térmica desta argamassa (28% menor que a REFa), juntamente com a sua alta densidade específica (33% maior). Essa configuração permitiu um alto atraso térmico e, portanto, melhorou a temperatura em ambientes fechados (Lam, et al., 2008) (Lamberts, et al., 1997).

ISBN 978-65-86819-05-2

EAPa são seguidas por RBMFa (apenas 1 não conformidade) e REFa (3 não conformidades). As argamassas RBMFa têm uma condutividade térmica significativamente baixa (50% da REFa) e uma massa específica apenas 1% menor que a REFa. Essa configuração garantiu menos ocorrências de não conformidades e um número maior de simulações com resultados "superiores" e "intermediários" (23 versus 24 da REFa).

Entre as argamassas experimentais, o QTZa apresentou os piores resultados (3 não conformidades e 24 simulações com níveis “superior” e “intermediário”). Uma condutividade térmica ligeiramente mais baixa (4% menor que REFa) não foi suficiente para contrabalançar a menor massa específica (também 4% menor que REFa). Esses resultados (juntamente com os do RBMFa e EAPa) indicam que as densidades das argamassas são mais influentes na simulação do que suas condutividades térmicas, mantido o mesmo calor específico para ambas.

Embora as argamassas QTZa não tenham desempenhado tão bem quanto as IOTa e QTZa, elas ainda tiveram um desempenho um pouco melhor do que as propriedades genéricas, ABNT (4 não conformidades e 20 simulações com níveis "superior" e "intermediário"). Essa situação é alarmante - o uso de valores padrão pode levar a uma subestimação do desempenho térmico dos edifícios, o que, por sua vez, pode levar a alterações desnecessárias no projeto.

A Figura 8 auxilia na comparação entre as diferentes zonas climáticas. Esses números apresentam a diferença de temperatura entre os ambientes internos e o exterior da residência. A sala com 1 ren / h foi escolhida para essa avaliação mais detalhada, pois apresentava as maiores amplitudes térmicas.

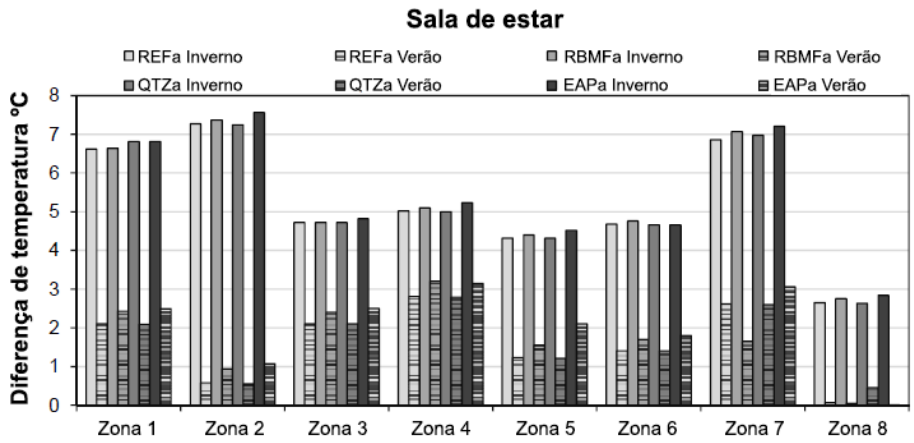

Figura 8 – Diferença de temperatura entre os ambientes internos e o exterior da residência.

A Figura 8 mostra que as maiores diferenças de temperatura foram obtidas pela EAPa na maioria das zonas climáticas, demonstrando melhor desempenho térmico. A diferença de temperatura de pico entre EAPa e REFa foi em média 0,3°C, atingindo 0,9°C na zona 5 no verão. A EAPa geralmente é seguido pela RBMFa, graças às propriedades térmicas dessas duas argamassas. Essa tendência foi mantida no verão e no inverno; no entanto, no verão, a inércia térmica para o resfriamento promovida pela EAPa foi mais significativa. As argamassas REFa e QTZa seguem com resultados muito semelhantes (diferença inferior a 5% entre elas).

Esses resultados indicam que uma diminuição na condutividade térmica das argamassas em até 50% e um aumento na massa específica aparente em até 33% não foram tão eficazes na redução da temperatura geral quanto algumas outras medidas passivas. Por exemplo, Sá et al. (2012) encontraram diferenças na ordem de 2°C nas temperaturas de pico ao adicionar 25% de materiais de mudança de fase (PCMs) às argamassas de revestimento. Franco et al. (2019) observaram diferenças de até 1ºC ao substituir completamente os agregados no envelope do edifício (blocos, concreto e argamassas) por escória siderúrgica.

Mesmo com esses dados, as argamassas de resíduos mostraram desepenho similar ou superior às convencionais, e o impacto disso para os usuários pode aumentar a saúde, a produtividade e a felicidade dos mesmos, reduzindo assim a privação social sofrida por famílias de baixa renda em ambientes termicamente estressantes (Patinoa & Siegel, 2018). As consequências são não apenas sociais, mas também econômicas e ambientais, dado o uso mais racional dos recursos, com menor consumo de energia e reutilização de resíduos.

ISBN 978-65-86819-05-2

4. CONCLUSÃO

O presente estudo avalia o desempenho térmico de argamassas de revestimento produzidas com resíduos industriais e de mineração. Para isso, investigamos o efeito de quatro tipos de agregados (areia de rio, rejeitos de minério de ferro, quartzito friável e escória de aciária processada) sobre uma argamassa de revestimento. Procurando entender como as propriedades térmicas das argamassas influenciam o desempenho térmico de edifícios em diferentes climas, uma residência de baixo padrão foi simulada em oito zonas climáticas.

Entre as argamassas produzidas com resíduos, aquelas com escória siderúrgica (EAPa) apresentaram os melhores resultados em todas as zonas climáticas brasileiras. Eles foram seguidos por argamassas com rejeitos de minério de ferro (RBMFa) com desempenho térmico semelhante. Este resultado está relacionado à baixa condutividade térmica e alta massa específica aparente dessas matrizes. As argamassas com rejeitos de quartzito (QTZa) apresentaram valores de temperatura semelhantes ou ligeiramente piores que as argamassas convencionais (REFa), devido às suas propriedades físicas e térmicas semelhantes.

A diferença de temperatura de pico entre as argamassas com resíduos e a convencional alcançou 0,9 ° C, sem alteração nos métodos de construção. Os resultados mostraram que as argamassas estudadas são alternativas viáveis para contribuir com a eficiência energética dos edifícios. Dado que o calor específico das argamassas foi mantido fixo, observou-se que um aumento da inércia térmica promovida por sua gravidade específica foi mais influente nas simulações térmicas do que uma menor condutividade térmica. Esta informação é especialmente importante para o desenvolvimento de materiais sensíveis para armazenamento de calor sensível.

Por fim, o melhor desempenho térmico promovido pelos rejeitos pode aumentar a saúde, a produtividade e a felicidade, reduzindo assim a privação social sofrida por famílias de baixa renda em ambientes termicamente estressantes (Patinoa & Siegel, 2018). A aprimoração obtida pela inserção dos resíduos como agregados no envelope é duradoura e exige pouca ou nenhuma manutenção. Portanto, eles contribuem para o aumento da durabilidade dos materiais e para o menor impacto ambiental dos edifícios, resultante da reutilização de resíduos e do menor consumo de energia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem à FAPEMIG, CPRM/ CNPq e a PROPP/UFOP pelo apoio para a realização e apresentação dessa pesquisa. Também somos gratos pela infraestrutura e colaboração do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (RECICLOS – CNPq) e ao Centro de Pesquisa em Conforto da UFOP (NUPECON).

REFERÊNCIAS

ABNT, 2004. *NBR 10007* - ***Amostragem de resíduos sólidos.*** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2005. *NBR 13280* - ***Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido***, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2005. *NBR 15220* - ***Desempenho térmico de edificações***. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2013. *NBR 15575* - ***Edificações habitacionais — Desempenho***, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Caixa Econômica Federal. (2019). **Minha Casa Minha Vida**.

Carvalho, J. et al., 2014**. Study of the Mechanical Behavior of Blocks for Structural Masonry Produced with Steel Slag in Substitution of Natural Aggregates**. *MASONRY INTERNATIONAL*, 30(2), pp. 31-38.

ISBN 978-65-86819-05-2

de Carvalho, J. M. F. et al., 2019. **More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials**. *Construction and Building Materials,* Volume 206, pp. 397-409.

CBIC, 2019. ***Taxa (%) de crescimento - Setores e Construção Civil***. Brasília: s.n.

Edraki, M. et al., 2014. **Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a rewiew of alternative approaches**. *Journal of Cleaner Production,* 1 December, Volume 84, pp. 411-420.

Figueirôa, S., 2014**.** ***Mining in Brazil***. s.l.:Encyclopedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures.

Fontes, W. et al., 2018. **Iron ore tailings in the production of cement tiles: a value analysis on building sustainability.** *Ambiente Construído,* 18(4), pp. 395-412.

Fontes, W., Mendes, J., Silva, S. & Peixoto, R., 2016. **Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams.** *Construction and Building Materials,* Volume 112, p. 988–995.

Galvão, J. L. B. et al., 2018. **Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints.** *Journal of Cleaner Production,* Volume 200, pp. 412-422.

Lam, J., Wan, K., Tsang, C. & Yang, L., 2008. **Building energy efficiency in different climates**. *Energy Conversion and Management,* 49(8), pp. 2354-2366.

Lamberts, R., Dutra, L. & Pereira, F., 1997. ***Energy Efficiency in Architecture***, Rio de Janeiro: Eletrobrás Procel.

Ma, B. G., Cai, L. X., Li, X. G. & Jian, S. W., 2016. **Utilization of iron tailings as subtitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration products**. *Journal of Cleaner Production,* Volume 127, pp. 162-171.

Mendes, J. et al., 2019. **On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites.** *Cement and Concrete Composites,* Volume 104, p. 103365.

Oliveira, R. D. et al., 2015. **Thermal comfort for users according to the brazilian housing buildings performance standards.** *Energy Procedia,* Volume 78, pp. 2923-2928.

Patinoa, E. D. L. & Siegel, J. A., 2018**. Indoor environmental quality in social housing: A literature review.** *Building and Environment,* Volume 131, p. 231–241.

Rondi, L. et al., 2016. **Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation**. *Composites Part B: Engineering,* Volume 90, pp. 195-202.

Sant'Ana Filho, J. N. et al., 2017. **Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams**. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 29(9), p. 04017104.

Sébaïbi, Y., Dheilly, R. M. & Queneudec, M., 2003. **Study of the water-retention capacity of a lime–sand mortar: influence of the physicochemical characteristics of the lime**. *Cement and Concrete Research,* 33(5), pp. 689-696.

Silva, M. et al., 2016. **Feasibility Study of Steel Slag Aggregates in Precast Concrete Pavers**. *ACI MATERIALS JOURNAL,* 113(4), pp. 439-446.

Weishi, L., Guoyuan, L., Ya, X. & Qifei, H., 2018. **The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings**. *Journal of cleaner production,* Volume 204, pp. 685-692.

ISBN 978-65-86819-05-2

Yang, L., Yan, H. & Lam, J. C., 2014. **Thermal comfort and building energy consumption implications–a review**. *Applied Energy*, Volume 115, pp. 164-173.