

ARIEL FERREIRA. ATÉ AQUI, 2019.

INSTALAÇÃO *SITE SPECIFIC*, PINTURA COM TINTA DE TERRA E ROCHAS,
MEMORIAL MINAS GERAIS VALE, PRAÇA DA LIBERDADE, BELO HORIZONTE.
FOTOGRAFIA: ARIEL FERREIRA.

ANÁLISE DE CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES CONSTRUÍDAS COM REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO

ANA CAROLINA OLIVEIRA VELOSO*

ROBERTA VIEIRA GONÇALVES DE SOUZA*

ANA ELISA DIAS MALHEIRO*

ELISA MARIA CAMPOS DE ALMEIDA*

MARINA ROHLFS NAVES*

RAMIRO FELIX DA SILVA JUNIOR*

THADEU RIBEIRO ABREU NEVES*

RESUMO Desastres ambientais recentes ocorridos em Minas Gerais impulsionaram estudos e iniciativas que investigam o uso do rejeito de minério. Dentre as iniciativas existentes está o desenvolvimento de casas protótipo para teste de novos materiais de construção com uso de rejeito. O presente estudo analisa o desempenho térmico destas habitações a partir de simulações realizadas com o *software* EnergyPlus v.8.8 e de acordo com o Regulamento de Eficiência Energética Brasileiro – RTQ-R (BRASIL, 2012). Foram analisadas três zonas bioclimáticas presentes no estado de Minas Gerais. Os resultados obtidos indicam que o sistema construtivo com blocos e argamassa que utilizam rejeito de minério em sua composição pode vir a ser uma solução para uso na construção civil.

PALAVRAS-CHAVE Rejeito de minério de ferro, habitação, desempenho térmico.

ANALYSIS OF THERMAL COMFORT IN BUILDINGS BUILT WITH IRON ORE TAILINGS

ABSTRACT Recent environmental disasters in Minas Gerais have boosted studies and initiatives that investigate the use of iron ore tailings. The construction of prototype houses for testing new building materials that use ore tailings is among the existing initiatives. The present study analyzes the thermal performance of these dwellings using simulations carried out with Energyplus v.8.8 software and according to RTQ-R (BRASIL, 2012). Three bioclimatic zones present in Minas Gerais State were analyzed. Results obtained indicate that constructive systems that use iron ore tailings in the composition of blocks and mortar may prove to be an appropriate solution for use in civil construction.

KEYWORDS Iron ore tailings, housing, thermal performance.

* Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

1. Introdução

O Brasil é conhecido mundialmente como um grande exportador de *commodities* minerais. O setor minerário contribuiu em 2017 com uma parcela de 16,7% do PIB Nacional, gerando um faturamento de 32 bilhões de dólares para o país, de acordo com dados coletados pelo Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018). Naquele ano o minério de ferro correspondeu à cerca de 68% das exportações, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial, com cerca de 400 milhões de toneladas por ano, o equivalente a 19 bilhões de dólares. O estado de Minas Gerais, por seu contexto histórico e riqueza em minerais, concentradas principalmente na região do chamado Quadrilátero Ferrífero, move 53% da produção do minério de ferro no Brasil (IBRAM, 2012).

Barragens de rejeito estão entre as maiores estruturas construídas pelo homem (CURI *apud* CARDOZO, 2020). Estas estruturas têm a função de acondicionar, de maneira estável e segura, todo o rejeito proveniente dos processos de beneficiamento mineral, especificamente, das etapas de concentração, sendo estas normalmente posteriores a etapas de moagem. No entanto, mesmo após o término da exploração mineral, a barragem de rejeito é uma estrutura com risco permanente de ruptura e de todos os danos oriundos da possível falha (CARDOZO, 2020). Tem-se ainda que entre 5 e 10% de todo o custo com a operação mineira é desprendido com o projeto, execução e gestão das barragens de rejeito (XIN; XIAOHU; KAILI, 2011).

Como alternativa às barragens, o rejeito de minério de ferro pode ser transformado em matéria-prima, gerando produtos que podem dar um caráter mais sustentável à cadeia de produção de minério de ferro desde que estes atendam a requisitos técnicos exigidos por normas brasileiras e internacionais.

Além disso, é perceptível que nos últimos anos vem crescendo a importância de se repensar e planejar a cidade com suas construções, dentro de um conceito de sustentabilidade. O tema da sustentabilidade vem influenciando abordagens de projeto

na arquitetura contemporânea e questões de conforto ambiental e suas relações com a eficiência energética, os recursos para a construção e a operação do edifício, como materiais, energia e água, fazem parte das variáveis que vêm sendo exploradas, com especial atenção na formulação de propostas de menor impacto ambiental (DUARTE, 2006). Duarte (2006) coloca ainda que a busca pela sustentabilidade inclui, entre outros, metas que levem em conta o reuso e a reciclagem como forma de diminuição do impacto ambiental proveniente da geração de resíduos em geral.

É notória a importância da construção civil na economia brasileira, uma vez que fomenta a produção e comercialização de produtos utilizados na estrutura, vedação e nos acabamentos dessas obras, como tijolos e revestimentos. Além disso, é socialmente importante, pois diminui o déficit habitacional e contribui para a geração de empregos, seja diretamente na construção ou na produção de componentes e sistemas destinados ao setor. A escolha adequada de materiais, técnicas construtivas e processos na construção civil vêm se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade, diminuindo o impacto ambiental causado pelo setor, reduzindo o consumo energético e otimizando custos (REZENDE; BRITO; FREITAS, 2017).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), em seu Guia de Produção e Consumo Sustentáveis, indica que:

a evolução humana paga um preço pelo aumento da demanda de recursos naturais disponíveis para a fabricação de bens e serviços que facilitam a vida das pessoas. Como uma das consequências dessa modernização, ocorre elevação da geração de resíduos sólidos em todas as origens, sejam urbanos, da construção civil, industriais etc.

e estimula que haja uma mudança no processo linear de produção e consumo para uma lógica circular, na qual os materiais são constantemente reciclados e reutilizados. (PNUMA, 2016)

Dentro desta lógica de consumo circular, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no âmbito da UFMG visando dar reuso aos rejeitos de minério para uso na construção civil. Esses estudos variam da caracterização das propriedades mecânicas e físicas de blocos e argamassas com uso de rejeito à investigação da possibilidade de uso destes como pigmentos, como argamassa de revestimento ou como elementos vazados (MAGALHÃES *et al.*, 2020; MORAIS *et al.*, 2020; NAVARRO *et al.*, 2019; MIRANDA *et al.*, 2019; BESSA *et al.*, 2018; LAURINO; PRETO; FERREIRA JR, 2020).

Mais especificamente sobre o desempenho térmico de construções feitas usando rejeito em seu sistema construtivo, Assis e Gomes (2016) apresentaram tijolos e argamassas produzidos no Laboratório de Geomateriais e Geotecnologias (LGG), instalado no Centro de Produção Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais. Foram feitos pelos autores e por Rossetti *et al.* (2017) estudos de desempenho térmico por meio de análises prescritivas e a partir de medições *in loco* e constatou-se que os materiais de construção civil produzidos a partir da reciclagem da lama ferruginosa proveniente das atividades de mineração de ferro no estado de Minas Gerais apresentaram melhor resistência mecânica do que seus similares convencionais, mantendo a trabalhabilidade e diminuindo consideravelmente o uso de cimento, areia natural e cal.

O presente artigo visa ampliar a análise de conforto térmico apresentada por Rossetti *et al.* (2017) e por Assis e Gomes (2017) para outros climas do estado, usando a simulação computacional para verificação do desempenho térmico anual de um protótipo de habitação desenvolvido no Centro de Produção Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que utiliza tijolos prensados do tipo solo-cimento, produzidos substituindo a parte de solo pelo rejeito de minério de ferro. Esse desempenho será comparado com aquele de sistemas tradicionais de construção.

2. Método

Os passos metodológicos seguidos no presente trabalho consistiram em avaliar o desempenho térmico do protótipo construído junto ao Centro de Produção Sustentável da Universidade Federal de Minas Gerais que usa em sua composição tijolos e revestimento com agregação de rejeito de mineração e com as características descritas em Assis e Gomes (2017). Para tal foi definido que seriam usados os limites para classificação junto ao Regulamento Técnico da Qualidade para edifícios Residenciais – RTQ-R (BRASIL, 2012) e que o protótipo com sua composição original e usando composições de sistemas construtivos tradicionais seriam simulados através do programa Energy Plus v.8.8.

O RTQ-R foi lançado em 2010 em conjunto entre Inmetro e Eletrobrás, através do Procel Edifica, tendo sido atualizado em 2012 (BRASIL, 2012). Nele estão definidos métodos para classificação do nível de eficiência energética de unidades habitacionais que varia de A a E, no qual A é o nível mais eficiente e E é o menos eficiente.

Selecionaram-se para comparação de desempenho três outros tipos de tijolos usualmente utilizados na construção civil – bloco de concreto, bloco cerâmico e parede pré-moldada de concreto. Posteriormente, foram definidas três cidades em zonas bioclimáticas distintas em que se pudesse utilizar o protótipo desenvolvido – as cidades de Ouro Branco (ZB 3), Ibitité (ZB 2) e Governador Valadares (ZB 5). As simulações foram feitas levando-se em consideração a operação da edificação conforme definido no RTQ-R (BRASIL, 2012) e foi considerada a cor original do revestimento utilizado no protótipo. Nos climas que não apresentaram bom desempenho, foram propostas alterações e foi verificada a influência das variáveis analisadas.

2.1. Objeto de estudo

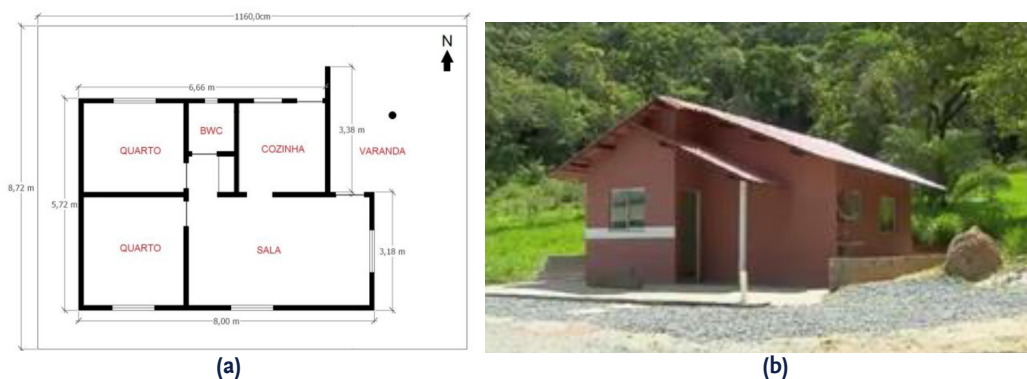
O objeto de estudo parte do modelo de habitação social (“Casa Protótipo 2”) construído na Fazenda Modelo da UFMG, Centro de Produção Sustentável (CPS), que abriga projetos de pesquisa da própria Universidade na cidade de Pedro Leopoldo (MG). Segundo o Zoneamento Bioclimático Brasileiro, classificado pela NBR-15220 (ABNT, 2005), a habitação se encontra na Zona Bioclimática 2.

A edificação implantada no eixo longitudinal de orientação leste-oeste, é composta por alvenaria autoportante de blocos de cimento com adição de rejeito de minério (375x125x200 mm). Em seu traço os blocos foram desenvolvidos a partir de

40kg cimento CP-V; 40 kg de metabásica calcinada; 200 kg brita 0; 300 kg areia quartzosa; 200kg rejeito arenoso; 100kg lama natural. Foi, ainda, desenvolvido um microconcreto para groutamento dos alvéolos dos blocos, usando cimento CP-III, CP-V ou ARI, areia lavada média grossa, brita 0 e pigmento (metabásica calcinada a 600 oC ou a lama calcinada a 600oC retida no ciclone), com traço em volume de 1:2:3, a/c = 1,0. Pigmentos inorgânicos foram gerados a partir da lama ferruginosa, em variadas cores em função do tipo de beneficiamento e temperatura de calcinação (ASSIS; GOMES, 2017).

Com uma área construída de 46 m² (Figura 1) o espaço é subdividido em sala, cozinha, dois quartos e banheiro com pé-direito de 2,60 m, laje de concreto com preenchimento de isopor (10 cm de espessura) e cobertura de telhas de PVC pré-fabricadas, as cores internas e externas levadas em consideração nas análises vem da própria cor do tijolo revestido por uma camada de argamassa de revestimento mineral de 3 mm (ASSIS; GOMES, 2017).

Figura 1 - (a) planta baixa da Casa Protótipo; (b) a Casa Protótipo implantada no terreno em Pedro Leopoldo – MG



Fonte: Rossetti *et al.* (2017)

O bloco utilizado nas paredes da Casa Protótipo é produzido com rejeito de minério e processado em forno de calcinação. A Tabela 1 apresenta a composição da envoltória (paredes e cobertura), suas respectivas espessuras e propriedades termofísicas dos materiais componentes.

Tabela 1- Propriedades termofísicas dos materiais empregados na Casa Protótipo construída na cidade de Pedro Leopoldo – MG.

Vedação externa	Componente	e (m)	λ (W/mK)	d (Kg/m ³)	c (kJ/kgK)
Paredes	Argamassa de revestimento mineral monocamada	0,030	1,02	1600	1,00
	Bloco de concreto:	0,015	0,98	1157	0,92
	parede concreto	0,110	-	-	-
	câmara de ar	0,015	0,98	1157	0,92
	parede concreto	0,030	1,02	1600	1,00
	Argamassa de revestimento mineral monocamada	0,0025	0,16	1470	0,96
Cobertura	Telha PVC tipo colonial	0,500	-	-	-
	Ático não ventilado	0,030	1,75	2200	1,00
	Laje pré-moldada:	0,080	1,75	2400	1,00
	capeamento superior	0,070	0,034	30	1,42
	vigota concreto armado	0,030	1,15	2000	1,00
	Bloco EPS	0,10	1,75	2400	1,00
	Argamassa interna	0,030	1,15	2000	1,00

Legenda: e - espessura; λ – condutividade térmica; d - densidade de massa aparente; c - calor específico.

A transmitância térmica final da parede é de $U = 2,54 \text{ W/m}^2\text{K}$. As absorptâncias a radiação solar das paredes externas e da cobertura foram consideradas, respectivamente, de $\alpha = 0,72$ e $\alpha = 0,65$.

Para esse mesmo protótipo, foram também testados outros sistemas construtivos tradicionais usados nas paredes externas para verificação comparativa do nível de eficiência energética obtido em cada caso. Sendo assim, foram testados bloco cerâmico, bloco de concreto e parede de concreto. Todos estes com argamassa interna e externa. A composição das paredes testadas é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2- Propriedades termofísicas dos materiais empregados nas paredes.

Vedação externa	Componente	e (m)	λ (W/mK)	d (Kg/m ³)	c (kJ/kgK)
Bloco cerâmico	Argamassa externa	0,030	1,15	2000	1,00
	Bloco de cerâmico: parede cerâmica	0,0195	0,9	1600	0,92
	câmara de ar	0,110	-	-	-
	parede cerâmica	0,0195	0,9	1600	0,92
	Argamassa interna	0,030	1,15	2000	1,00
Bloco cerâmico	Argamassa externa	0,030	1,15	2000	1,00
	Bloco de cerâmico: parede concreto	0,014	1,75	2400	1,00
	câmara de ar	0,110	-	-	-
	parede concreto	0,014	1,75	2400	1,00
	Argamassa interna	0,030	1,15	2000	1,00
Parede de concreto	Argamassa externa	0,030	1,15	2000	1,00
	Parede de concreto	0,10	1,75	2400	1,00
	Argamassa interna	0,030	1,15	2000	1,00

Fonte: NBR-15220 (ABNT, 2005)

As transmitâncias térmicas das paredes são de $2,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a parede de bloco cerâmico, $2,64 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a parede de bloco de concreto e $3,99 \text{ W/m}^2\text{K}$ para a parede de concreto.

2.2. Cidades estudadas

As cidades estudadas foram selecionadas de forma a minimizar o transporte de material pesado proveniente de barragens de Mariana e Brumadinho e a possibilitar análise de diferentes zonas bioclimáticas (ZB) presentes no estado do Minas Gerais. A identificação de zonas geográficas que agrupam os mesmos recursos de projeto para o condicionamento natural das edificações e que podem possibilitar conforto térmico são denominadas zonas bioclimáticas (EVANS, 2007). Atualmente, no Brasil existem 8 zonas bioclimáticas estabelecidas e estas estão descritas na NBR 15.220 (ABNT, 2005). Para este trabalho, foram selecionadas as cidades de Ouro Branco (ZB 3), Ibitiré (ZB 2) e Governador Valadares (ZB 5).

2.3. Simulação de Desempenho térmico

As simulações do desempenho térmico do protótipo com blocos e argamassa que utilizam rejeito de minério em sua composição foram realizadas por meio do software *EnergyPlus* v.8.8. O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação termoenergética com motor de simulação modular cujo código é baseado nos programas BLAST e DOE-2. O programa possui três componentes básicos: um gerenciador de simulação que controla todo o processo de simulação, um módulo de simulação de balanço térmico e de massa e um módulo de simulação do sistema construtivo. As cargas térmicas calculadas pelo mecanismo de balanço térmico em um determinado intervalo de tempo são passadas para o módulo de simulação de sistemas construtivos no mesmo intervalo de tempo, fornecendo uma previsão de temperatura espacial precisa (CRAWLEY *et al.*, 2000).

Simulações horárias do protótipo com elementos foram realizadas para o período de um ano para as três cidades de Minas Gerais e o desempenho obtido foi comparado aos outros três sistemas construtivos.

As características de uso da edificação, como padrão de uso e densidade instalada dos equipamentos (Tabela 3), taxas metabólicas (Tabela 4) e rotina de ocupação (Tabela 5) foram estabelecidas de acordo com o método de simulação do RTQ-R (BRASIL, 2012). O padrão mínimo de ocupação dos dormitórios considerado foi de duas pessoas por ambiente e a sala foi configurada para ser utilizada por todos os usuários dos dormitórios. Foi usada uma densidade de potência instalada para iluminação de 5 W/m² para os quartos e de 6 W/m² para a sala.

Tabela 3- Padrão de uso e densidade de cargas internas de equipamentos

Ambiente	Período de uso	Potência (W)
Sala	14 às 22hrs	120

Fonte: RTQ-R (BRASIL, 2012)

Tabela 4- Taxas metabólicas para cada atividade

Ambiente	Período de uso	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido para área de pele = 1,80m ² (W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: RTQ-R (BRASIL, 2012)

Tabela 5- Padrões de ocupação e do sistema de iluminação para dias de semana e final de semana

Hora	Ocupação		Iluminação	
	Dormitórios (%)	Sala (%)	Dormitórios (%)	Sala (%)
1h-7h	100	0	0	0
8h-13h	0	0	0	0
14h-15h	0	50	0	0
16h-18h	0	50	0	100
19h-21h	0	100	0	100
22h-23h	100	0	100	0
24h	100	0	0	0

Fonte: RTQ-R (BRASIL, 2012)

O padrão para controlar a abertura das janelas usado habilita a sua abertura quando a temperatura do ar do ambiente é igual ou superior à temperatura de *setpoint* ($T_{int} \geq T_{setpoint}$) e quando a temperatura do ar interno é superior à externa ($T_{int} \geq T_{ext}$). A temperatura de *setpoint* estipulada foi de 20 °C. Nesse padrão de ventilação, todas as portas da unidade habitacional foram consideradas fechadas por todo o período. O coeficiente do fluxo de ar por frestas (CQ) para janelas e portas retangulares foi de 0,001 kg/s.m e o expoente do fluxo de ar (n) foi de 0,65.

Como a casa está em contato com o solo, foi utilizado o programa *Slab* para as simulações, que está vinculado ao *EnergyPlus* para calcular as temperaturas do solo de cada cidade analisada.

2.4. Análise de resultados

Os resultados foram avaliados para os ambientes de quarto e sala utilizando os procedimentos estabelecidos pelo RTQ-R para estimativa de Graus-hora de Resfriamento (GHR) e Consumo por Aquecimento (CA). Os graus-hora de resfriamento ou de aquecimento são resultado do balanço térmico do ambiente analisado e podem ser utilizados para se comparar o desempenho de diferentes configurações construtivas (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; SILVA; GHISI, 2014).

Os graus-hora representam o somatório anual do número de graus acima da temperatura base de 26 °C a cada dia e é baseado em dados de temperatura operativa que representa o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média do ambiente. O Consumo por Aquecimento representa o consumo anual de energia por metro quadrado (em kWh/m²) necessário para manutenção da temperatura interna dos ambientes em 22° C no período de 21:00 às 8:00.

Os resultados para GHR e CA foram gerados e compararam-se os comportamentos térmicos para cada sistema testado em cada cidade analisada.

O cálculo do indicador de graus-hora deve utilizar a temperatura operativa horária extraída da simulação computacional (SILVA; GHISI, 2014). A temperatura base para o cálculo do GHR estabelecida no RTQ-R é de 26 °C. Assim, através da Equação 1, calcula-se o indicador de graus-hora de resfriamento para a temperatura operativa horária (T_o) para os ambientes de permanência prolongada da edificação analisada, que indicará o grau de horas de desconforto do ambiente (SCALCO *et al.*, 2012).

$$GR_R = \sum (t - 26^\circ) \quad \text{Equação 1}$$

De acordo com o RTQ-R, nas edificações naturalmente ventilados, a metodologia compara os indicadores de graus-hora (GHR) dos ambientes de permanência prolongada com os níveis de eficiência pré-estabelecidos de acordo com a Zona Bioclimática da edificação analisada. Estes níveis estão apresentados na Tabela 6 para cada uma das Zonas Bioclimáticas testadas.

Tabela 6- Taxas metabólicas para cada atividade

Nível de eficiência	ZB 2	ZB 3	ZB 5
A	GHR ≤ 2310	GHR ≤ 822	GHR ≤ 5209
B	2310 < GHR ≤ 4396	822 < GHR ≤ 1643	5209 < GHR ≤ 8365
C	4396 < GHR ≤ 6481	1643 < GHR ≤ 2465	8365 < GHR ≤ 11520
D	6481 < GHR ≤ 8567	2465 < GHR ≤ 3286	11520 < GHR ≤ 14676
E	GHR > 8567	GHR > 3286	GHR > 14676

Fonte: RTQ-R (BRASIL, 2012)

Para a análise também é preciso fazer a avaliação do consumo relativo para aquecimento (CA) e os níveis de eficiência tabelados no RTQ-R estão apresentados na Tabela 7. O consumo é calculado no período das 21h às 8h e no período restante deve-se considerar a edificação naturalmente ventilada. A temperatura do termostato de aquecimento é de 22 °C. O consumo relativo para aquecimento (CA) em kWh/m² deve ser calculado somente para as Zonas Bioclimáticas 1 a 4.

Tabela 7- Valores limites do consumo relativo para aquecimento (kWh/m²) para as Zonas Bioclimáticas 2 e 3.

Nível de eficiência	ZB 2	ZB 3
A	CA ≤ 15591	CA ≤ 6429
B	15591 < CA ≤ 31182	6429 < CA ≤ 12858
C	31182 < CA ≤ 46772	12858 < CA ≤ 19287
D	46772 < CA ≤ 62363	19287 < CA ≤ 25716
E	CA > 62363	CA > 25716

Fonte: RTQ-R (BRASIL, 2012)

3. Resultados

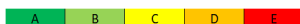
Os resultados da Tabela 8 mostram o desempenho obtido pelo protótipo para cada uma das paredes analisadas com o revestimento na cor original, ou seja, absorvância solar das paredes externas e da cobertura de respectivamente $\alpha = 0,72$ e $\alpha = 0,65$. Para melhor visualização, foram marcadas as células em verde escuro para A, verde claro para B, amarelo para C, laranja para D e vermelho para E.

Tabela 8 - Graus-hora para resfriamento e consumo relativo para aquecimento para os diferentes sistemas construtivos com revestimento na cor do rejeito de minério as cidades de Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.

absortâncias:
paredes 0,72
cobertura 0,65

			Tijolo Lama 2.5+14+2.5			Bloco concreto 2.5+14+2.5			Bloco Ceramico 2.5+14+2.5			Parede de concreto 2.5+10+2.5		
			sala	quarto 1	quarto 2	sala	quarto 1	quarto 2	sala	quarto 1	quarto 2	sala	quarto 1	quarto 2
Ibirité - MG	ZB2	GHR	2363	1738	1894	1934	1318	1390	1970	1321	1402	1273	834	817
		CA	63	2785	2151	95	2600	1621	51	2234	1634	58	2379	1735
Ouro Branco - MG	ZB3	GHR	3648	2911	3023	3190	2530	2542	3236	2538	2562	2475	2076	1974
		CA	72	2855	2294	72	2457	1899	66	2329	1803	112	2576	1117
Governador Valadares - MG	ZB5	GHR	20890	21545	22900	20635	21445	22724	20684	21432	22743	20191	21457	22487
		CA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda: Classificação RTQ-R
Fonte: os autores



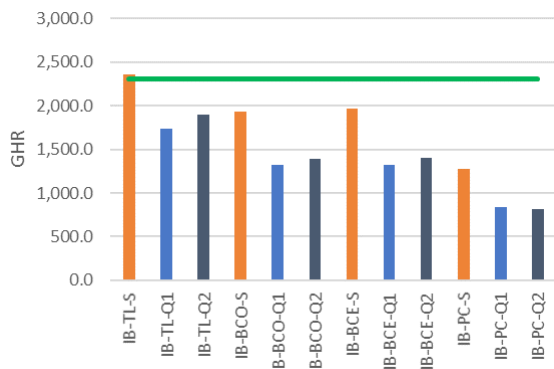
De forma geral, pode-se verificar que o sistema analisado apresentou para a Zona Bioclimática 2, uma zona de clima predominantemente frio, desempenho A para todos os ambientes analisados em todos os sistemas construtivos.

No entanto, ao se analisar a Tabela 8 para os climas mais quentes representados pelas Zonas Bioclimáticas 3 e 5, verifica-se que no verão o desempenho da sala dos protótipos, ambiente mais exposto à radiação solar por possuir 3 fachadas expostas ao sol, obteve níveis B, D e E. Neste caso, considera-se que a cor das fachadas possa ter tido significativa influência no desempenho do protótipo. Nota-se ainda que, na Zona Bioclimática 5, para todos os protótipos e em todos os ambientes, o nível de desempenho é E, mostrando que para a cidade de Governador Valadares, há estratégias a serem buscadas para melhoria de desempenho. Como em todos os protótipos os quartos 1 e 2 possuem fachada norte, considera-se que o beiral adotado ao sombrear a fachada pode ser responsável por um desempenho mais adequado destes ambientes, especialmente nos climas mais amenos.

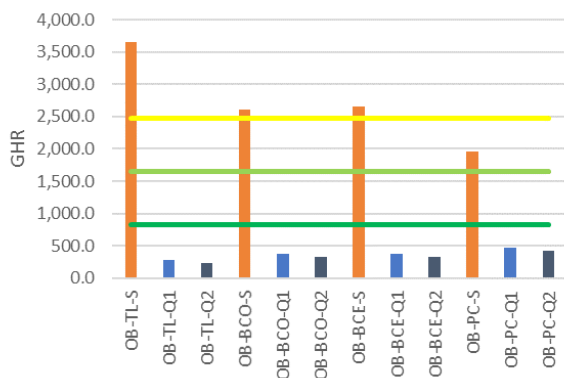
A Figura 2 a seguir apresenta os valores de Graus-hora de resfriamento para todos os sistemas testados com uso da cor original do minério nas paredes externas.

Figura 2 - Graus-hora para resfriamento para os diferentes sistemas construtivos com revestimento na cor do rejeito de minério para Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.

Ibirité (ZB₂)



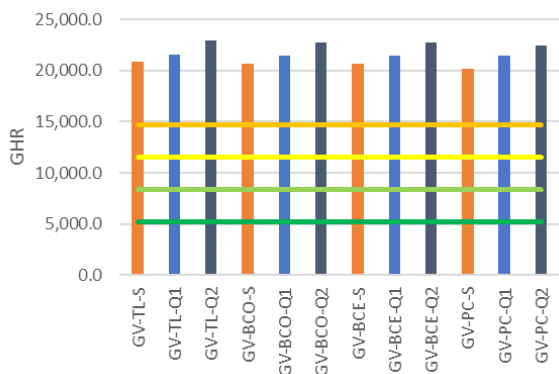
Ouro Branco (ZB₃)



Legenda: a ordem apresentada nos gráficos corresponde a cidade – tipo de bloco – ambiente: IB – Ibirité; OB – Ouro Branco; GV – Governador Valadares; TL – tijolo de lama; BCO – bloco de concreto; BCE – bloco cerâmico; PC – parede concreto; S – sala; Q1 – quarto 1; Q2 – quarto 2. As linhas horizontais coloridas apresentam os limites máximos para A (verde escuro), B (verde claro), C (amarelo), D (laranja), conforme determinado pelo RTQ-R e especificado na Tabela 6.

Fonte: os autores.

Governador Valadares (ZB₅)



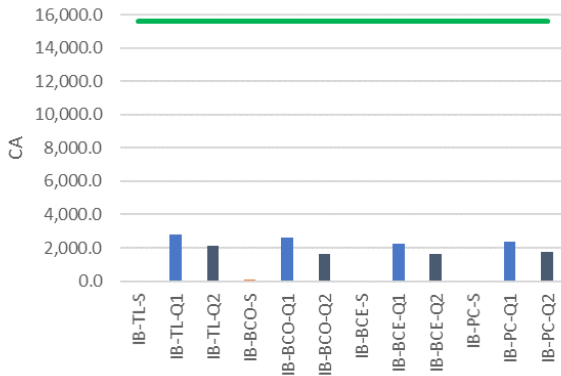
Ao se analisar o desempenho do sistema construtivo com rejeito de minério, em comparação aos demais sistemas, apresentado na Figura 2, verifica-se que a sala, mais exposta à radiação solar, apresentou maior ganho de calor, em relação aos demais ambientes para as ZBs 2 e 3. Tem-se ainda que para estes climas e para o protótipo com revestimento externo de cor escura, o sistema de melhor desempenho é o de parede em concreto. Já para o clima mais quente de Governador Valadares, pode-se considerar que nenhum ambiente ou sistema apresenta desempenho significativamente diferente. Para este clima, considera-se que a alteração na cor do revestimento deva ser indicada para todos os sistemas construtivos.

Quando o consumo por aquecimento é considerado (ver Figura 3), nota-se que, inversamente ao que acontece no período quente, a sala apresenta desempenho superior ao dos quartos para todos os sistemas construtivos e para os dois climas analisados, contudo, não há diferença significativa no desempenho entre os sistemas. Tem-se ainda que o nível A de desempenho é facilmente obtido.

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações com a substituição da cor do revestimento externo das paredes dos protótipos testados para uma cor mais clara, com absorvância de $\alpha = 0,30$. Pela figura nota-se que, quando há alteração da cor da parede pela pintura do revestimento externo, há uma substantiva melhoria no desempenho dos protótipos para o período quente, com diminuição dos graus-hora de resfriamento em todos os casos. No entanto, para Ouro Branco, cidade de clima ameno, tem-se que a sala ainda não consegue atingir o nível A de desempenho. A cidade de Governador Valadares, apesar de ter apresentado redução significativa do número de Graus-hora para resfriamento, tem ambientes com classificação B e C para todos os sistemas à exceção do sistema em paredes de concreto, para o qual o nível B é alcançado para todos os ambientes. Este desempenho indica que o uso de cobertura em cor clara seria também necessário. Nota-se ainda que para os climas da ZB 3 e da ZB 5 a parede com rejeito de minério de ferro possui desempenho ligeiramente inferior ao dos demais sistemas para a sala, que é mais exposta ao clima externo, mas sem diferença significativa para os demais ambientes.

Figura 3 - Consumo relativo para aquecimento (kWh/m²) para os diferentes sistemas construtivos com revestimento na cor do rejeito de minério para Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.

Ibirité (ZB₂)



Legenda: a ordem apresentada nos gráficos corresponde a cidade – tipo de bloco – ambiente: IB – Ibirité; OB – Ouro Branco; GV – Governador Valadares; TL – tijolo de lama; BCO – bloco de concreto; BCE – bloco cerâmico; PC – parede concreto; S – sala; Q1 – quarto 1; Q2 – quarto 2. As linhas horizontais coloridas apresentam os limites máximos para A (verde escuro) e B (verde claro), conforme determinado pelo RTQ-R e especificado na Tabela 7.

Fonte: os autores.

Ouro Branco (ZB₃)

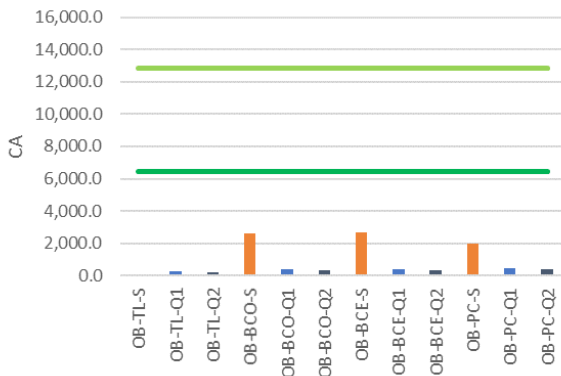


Figura 4 - Gráficos de Graus-hora para resfriamento para os diferentes sistemas construtivos na cor branca nas paredes externas ($\alpha = 0,3$) para as cidades de Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.

Ibirité (ZB₂)

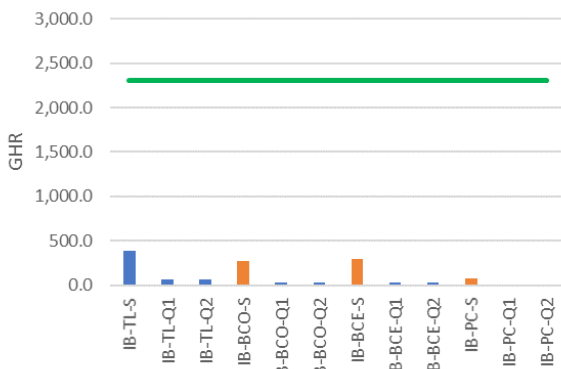
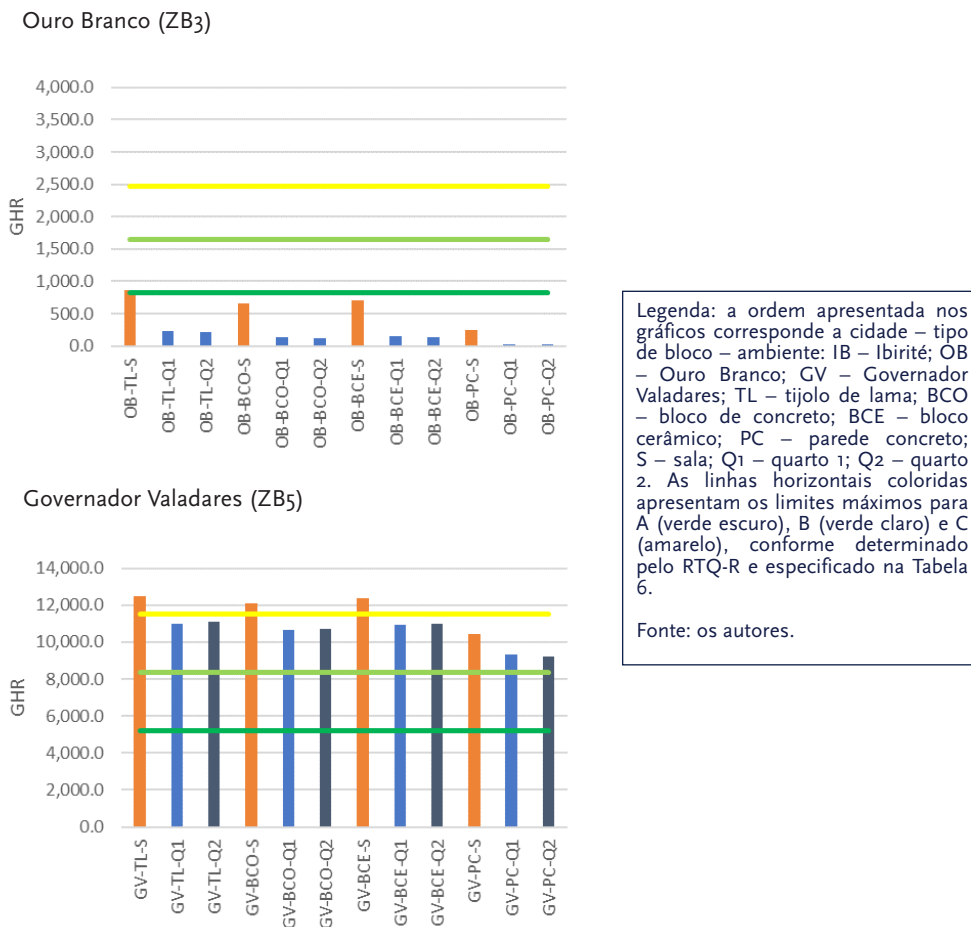


Figura 4 - Gráficos de Graus-hora para resfriamento para os diferentes sistemas construtivos na cor branca nas paredes externas ($\alpha = 0,3$) para as cidades de Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.

Conclusão



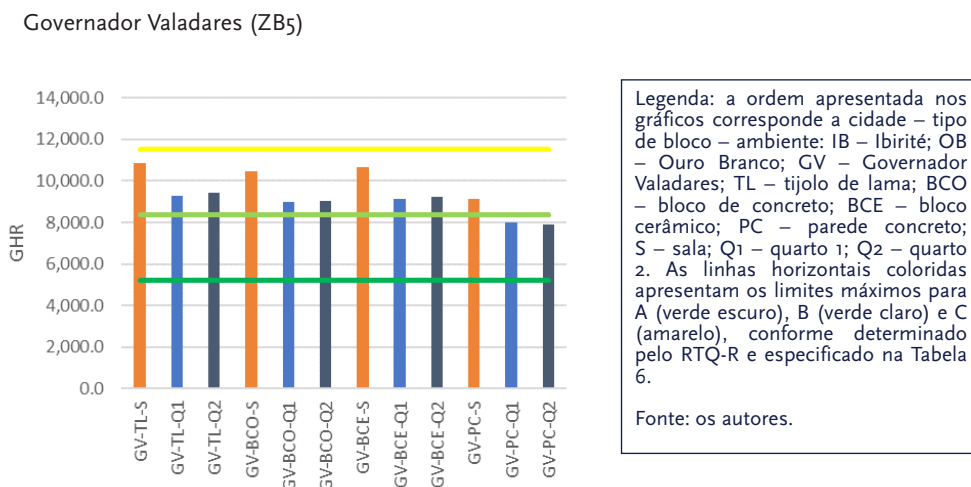
O Consumo por Aquecimento também se reduz nos dois casos analisados quando as paredes são pintadas de cor clara (ver Figura 5), sem que haja diferenças significativas entre os sistemas analisados.

Figura 5 - CGráficos de consumo relativo para aquecimento (kWh/m²) para os diferentes sistemas construtivos na cor branca nas paredes externas ($\alpha=0,3$) para as cidades de Ibirité, Ouro Branco e Governador Valadares.



A Figura 6 apresenta a avaliação do protótipo para a ZB 5, em Governador Valadares, quando tanto as paredes quanto a cobertura são pintadas de cores claras ($\alpha = 0,3$). Nota-se que apesar de ter havido diminuição dos graus-hora de resfriamento para todos os sistemas, em relação à situação anterior, esta alteração ainda não foi suficiente para que se alcançasse o desempenho A, indicando que, para este clima, alterações mais abrangentes deveriam ser consideradas.

Figura 6 - Gráfico de Graus-hora para resfriamento para os diferentes sistemas construtivos com paredes e cobertura na cor branca ($\alpha = 0,3$) para a cidade de Governador Valadares.



4. Considerações conclusivas

Tendo o sistema construtivo usado na Casa Protótipo construída na Fazenda Modelo da UFMG, Centro de Produção Sustentável (CPS), em que se utilizou os rejeitos de minério de ferro se mostrado com uma boa resistência mecânica em estudos anteriores, este artigo buscou avaliar seu desempenho térmico para construção em diversas regiões do estado de Minas Gerais. Foi testado o desempenho do protótipo usando os critérios de simulação colocados pelo RTQ-R (BRASIL, 2012) para três climas, comparando-o a sistemas de construção mais tradicionais.

Os resultados indicam de modo geral que o sistema construtivo com bloco com rejeito de minério de ferro e revestimento na cor do rejeito apresenta desempenho próximo ao de outros sistemas mais tradicionais, mas para cada tipo de clima e tipo de ambiente há variações no melhor desempenho quando os sistemas construtivos são considerados.

Este resultado se mostrou bastante satisfatório e a análise ganha importância por apresentar mais uma etapa na avaliação de um sistema construtivo – tijolos – criado a partir da substituição da parte de solo pelo rejeito de minério de ferro e que visa gerar um ciclo mais sustentável na construção de novos sistemas construtivos a partir dos rejeitos do minério ferro no estado de Minas Gerais.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSIS, E. S.; GOMES, A. M. **Conforto térmico em habitação popular construída com componentes reciclados da mineração de ferro no Estado de Minas Gerais, Brasil**, Anais do 4 Congresso Internacional da Habitação no Espaço Lusófono, Porto, Lisboa, 2017.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. **Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações**, Ambiente Construído, Volume 11, 4 out./dez 2011, <https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000400007>.

BESSA, S. A. L.; MENDONÇA, I. K. ; VIMIEIRO, J. I. C. ; GURGEL, G. ; MELLO, T. A. G. ; MAGALHAES, L. ; BEZERRA, A. C. S. ; LOURA, R. M. . **Análise de argamassas de revestimento produzidas com rejeito de minério de ferro**. In: XVII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2018, Foz do Iguaçu. Anais do XVII ENTAC. Porto Alegre: ANTAC, 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012: **Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>. Acesso em: junho/2020.

CARDOZO, F. A. C.; RUVEN, C. A., GEHLING, W. Y. Y. **Considerações a riscos geotécnicos em barragens de rejeito**. Tecnológica, Santa Cruz do Sul, v. 24, n. 1, p. 01-14, fev./jul. 2020, <http://dx.doi.org/10.17058/tecnolog.v24i1.14284>.

CRAWLEY, D. B.; PEDERSEN, C.O.; LAWRIE, L.; WINKELMANN, F.C. **Energy plus: energy simulation program**. ASHRAE journal, v. 42, n. 4, p. 49-56, 2000.

DUARTE, Denise **Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81 out./dez. 2006.

EVANS, J. M. **The Comfort Triangles: a new tool for bioclimatic design**. Thesis – (Doctor of Philosophy) - Technische Universiteit Delft. London, 2007.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Dezembro, 2012.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Economia Mineral do Brasil**. Março, 2018.

LAURINO, B. I.; PRETO, C. T. J. O.; FERREIRA JUNIOR, C. P., **Análise acidente em Brumadinho - Minas Gerais - utilização de rejeitos de barragens na construção civil**. Brazilian Journal of Natural Sciences, ISSN 2595-0584 - V.3 N.1, Março de 2020 - p. 231 – 238, <https://doi.org/10.31415/bjns.v3i1.86>.

MAGALHAES, L. F.; FRANCA, S.; OLIVEIRA, M. S.; PEIXOTO, R. A. F.; BESSA, S. A. L.; BEZERRA, A. C. S. **Iron ore tailings as a supplementary cementitious material in the production of pigmented cements**. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, v. 123260, p. 1-20, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123260>.

MIRANDA, M. A.; ARRUDA, E. A. M.; LIMA, S. A.; SACHT, H. M.; BEZERRA, A. C. S. . **Análise da produção de elementos vazados: microconcretos com rejeito de minério de ferro**. In: XXIII Congresso de Escolas e Faculdades Públicas de Arquitetura da América do Sul, 2019, Belo Horizonte. Anais do XXII Arquisur. Belo Horizonte: Arquisur, 2019.

MORAIS, C. F. ; BELO, B. R. ; BESSA, SOFIA ARAÚJO ; PORTO, M. P. ; LOURA, R. M. . **Análise da condutividade térmica de argamassas de revestimento com rejeito de minério de ferro**. In: XVIII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2020, Porto Alegre. In Press (aceito para publicação). Porto Alegre: ANTAC, 2020.

NAVARRO, A. C.; MARESTI, J. S.; ARRUDA, E. A. M.; HERMENEGILDO, G. C.; BESSA, S. A. L. **Estabilização de blocos de terra comprimida com cal e rejeito de mineração**. In: 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, 2019, Belém. Anais do 6o ENARC. Belém: UFPA, 2019.

PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE. **Guia PCS – Produção e Consumo Sustentáveis**, 2016. Disponível em: https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2015/06/PNUMA_Guia-de-Produção-e-Consumo-Sustentáveis.pdf

REZENDE, G. B. M.; BRITO, A. L. C.; FREITAS; L. S. **A prática do ecodesign na construção civil e a busca pelo direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado.** Holos, Ano 33, Vol. 4, 2017. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/3961>. Acesso em: junho/2020. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.3961>

ROSSETTI, I. B.; RAVAGNANI, N. O.; GOMES, W.; LACERDA, C. S.; ASSIS, E. S. **Avaliação de desempenho do conforto térmico de casa protótipo na fazenda modelo da UFMG.** Anais do XIV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, Balneário Camboriú, 2017.

SCALCO, V. A.; FOSSATI, M.; VERSAGE, R. S.; SORGATO, M. J.; LAMBERTS, R.; MORISHITA, C. **Innovations in the Brazilian regulations for energy efficiency of residential buildings,** Architectural Science Review, Volume 55, 1 February 2012, <http://dx.doi.org/10.1080/00038628.2011.641731>.

SILVA, A. S.; GHISI, E. **Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1,** Ambiente Construído, Volume 14, 1 jan./mar 2014, <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000100016>.

XIN, Z.; XIAOHU, X.; KAILI, X. **Study on the risk assessment of the tailings dam break.** Procedia Engineering, v. 26, p. 2261-2269, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2433>.