

# TEMPO DE RETORNO ENERGÉTICO DA ADIÇÃO DE LÃ DE ROCHA NO *RETROFIT* DE EDIFICAÇÕES: QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA EMBUTIDA E SIMULAÇÃO SOB CLIMA TEMPERADO NO BRASIL

Aloísio Leoni Schmid (1); Ricardo Cezar Mello Mattos Habib (2)

(1) Doutor, Professor da UFPR, Chefe do Departamento de Arquitetura e Urbanismo e membro dos programas de mestrado em Engenharia de Construção Civil e Design. Aloisio.schmid@gmail.com; UFPR, +55 41 3361-3084.

(2) Arquiteto e Urbanista, Engenheiro de Segurança, Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, ricardohabib@ufpr.br

## RESUMO

O aumento da resistência térmica do envelope das edificações é a técnica de maior potencial para aumento de sua eficiência em clima temperado. Paredes verticais opacas comumente correspondem à maior área de envelope, de onde o interesse pelo seu tratamento com materiais termicamente isolantes. Dentre os materiais cogitados, a lã de rocha se destaca por motivos de custo, durabilidade, estabilidade e não-toxicidade. Se tal investimento é atraente do ponto de vista do proprietário de imóvel, não é necessariamente do ponto de vista das políticas públicas, em especial ao se considerar que a lã de rocha é obtida mediante aquecimento de rochas à sua temperatura de fusão, acima de 1000 °C e, supostamente, sob alto consumo energético. Objetivos deste trabalho são dois: inicialmente, levantar a energia incorporada na lã de rocha na forma de mantas de baixa densidade, espessura 5cm. Depois, verificar qual a interpretação desse valor no contexto do *retrofit* de uma edificação residencial unifamiliar em clima temperado: da simulação computacional se obtém a economia de energia operacional e se calcula o tempo de retorno energético da lã de rocha. Considera-se um *retrofit* completo, de quatro etapas: adição de lã de rocha às paredes externas verticais; adição de lã de rocha ao forro; substituição de vidros simples por vidros duplos, e adição de lã de rocha à laje do piso. O tempo de retorno energético, ao se considerar condicionamento mecânico de ar no modo quente e frio o ano inteiro, é de 1,5 anos. Ao se considerar condicionamento mecânico de ar no modo quente e pressupondo, no verão, o uso da ventilação natural, o tempo de retorno energético é de um ano.

Palavras-chave: lã de rocha; tempo de retorno energético; simulação computacional

## ABSTRACT

For buildings in a temperate climate, the highest potential of improvement in energy efficiency accrues from the increment in the thermal resistance of the envelope. Opaque vertical walls usually correspond to the biggest area share and therefore demand treatment with thermal insulating materials, among which rock wool is noticeable for its low cost, durability, stability and non-toxicity. However, even allowing an attractive investment for the building owner, such technique may not be attractive from the point of view of public policies: rock wool is obtained by melting rocks above 1000°C and that supposes its embedded energy to be high. Purpose of this paper is twofold. First, to raise field data on the embedded energy of rock wool, considering a low-density mat of 5cm thickness. Second, to verify how such a result is to be interpreted in the context of the retrofit of a single-family residence in a temperate climate: from a computer simulation, the operation energy savings are obtained and the energy payback time of rock wool is calculated. A full retrofit is considered, consisting in four steps: addition of rock wool to external, vertical walls; addition of rock wool to the ceiling; replacement of single by double glazing windows; addition of rock wool to the floor concrete slab. When a year-round warm-cool air conditioning is considered, the payback time of all measures is of 1,5 years. When only a warm air conditioning is considered, if in summer the house is naturally ventilated, the payback time is of just one year.

Keywords: rock wool; energy payback time; computer simulation

# 1 INTRODUÇÃO

A busca de menores custos de energia na realização de conforto térmico em edifícios tem motivado o *retrofit* de edificações, aqui entendido como uma série de medidas de adequação de edificação existente à evolução de exigências funcionalidade e eficiência. Uma ação individual de *retrofit* de edificação, alcançando um consumo de energia mais baixo, considera custos e benefícios para o proprietário, comparando os custos de investimento e a redução dos custos variáveis e produzindo um tempo de retorno da ação do *retrofit*. A generalização da ideia poderia sugerir uma política pública, que promovesse, por meio de financiamento e incentivos fiscais, o *retrofit* de unidades de construção.

Quando a carga térmica da construção é principalmente de aquecimento, soluções clássicas para reduzir os custos da energia de operação são os seguintes:

- Aumento da resistência térmica do envelope do edifício;
- Minimização do fluxo de ar de ventilação, ou de recuperação de calor na ventilação;
- Aumento de ganhos solares diretos ou indiretos.

A ventilação torna-se relevante em edifícios que apresentem um envelope previamente eficiente. Já os ganhos solares são difíceis de adicionar a edifícios existentes, sendo que o mais comum é o fornecimento de nova área construída em estufas acopladas. Ambas as medidas, com maior frequência, representam baixo impacto em termos de acréscimo de materiais e, com eles, energia embutida.

No entanto, o mais provável é que o aumento da resistência térmica permita um maior impacto na economia de energia de operação. Isto acontece principalmente no caso de um envelope de uma baixa resistência térmica - por exemplo, paredes de alvenaria finas, ou outra construção usual em clima ameno.

Quando a carga térmica é principalmente de refrigeração, soluções clássicas são:

- Controle da radiação solar através das janelas e cobertura (telhado ou laje);
- Promoção ou melhoria da ventilação (ventilação cruzada, mais que efeito chaminé);
- Aumento da resistência térmica do envelope, principalmente.

Aqui, a sombra pode ser conseguida, também, por meio da vegetação. Árvores decíduas podem proteger as paredes de face Oeste no verão. Os painéis de vegetação são também utilizados em paredes e telhados, trazendo efeito de evaporação, útil para evitar as cargas de refrigeração, mas podem aumentar as cargas de aquecimento, devido à evaporação em si, e ao fato de que a umidade elevada diminui a resistência térmica de paredes e telhados. A ventilação é conhecida por ser o método de redução custo mais efetivo nos edifícios naturalmente condicionados. A última opção, de aumento da resistência térmica, deve ser tratada com cuidado, uma vez que impede o calor de ser liberado; no entanto, ajuda a proteger superfícies críticas (coberturas da construção e paredes de face Oeste), contra ganhos solares indiretos. No entanto, torna-se obrigatória em todo o edifício se a temperatura do ar no interior deve ser menor do que a de fora, uma vez que o uso da capacidade térmica para diminuir a amplitude térmica está sujeito a restrições espaciais e estruturais.

Em termos de energia embutida, o controle de ventilação não está associado a nenhum impacto relevante. A previsão do aumento de ganhos solares pode exigir o aumento de superfícies envidraçadas, sendo que seu contrário pode exigir a colocação de superfícies de sombreamento. Ambas as ações significam um aumento de materiais e, assim, de energia embutida. Enfim, o aumento da resistência térmica dos edifícios implica na adição de materiais e, portanto, incremento da energia embutida (WUPPERTAL INSTITUTE, 2010).

Por esse último motivo, e também pela utilidade tanto em situações de frio como de calor, adquire importância o estudo do aumento da resistência térmica da envolvente do edifício. Para aumentar a resistência térmica, na maioria dos casos, consideram-se os elementos opacos como transparentes do envelope. Elementos transparentes geralmente cobrem uma área proporcionalmente pequena dos envelopes, mas têm de ser cuidadosamente considerados, porque, tendo normalmente uma resistência térmica relativamente baixa, representam pontes térmicas entre o interior e o exterior. Elementos opacos, por outro lado, representam, quase sempre, as maiores superfícies e, assim, o maior acréscimo de energia embutida na operação de *retrofit*.

Para proporcionar um isolamento térmico mais eficaz são utilizados materiais com um elevado teor de células de ar fechadas. Isso inclui:

- Materiais naturais: cortiça, cocos fibra, algodão, lã;
- Minerais, materiais processados: lã de vidro, lã de rocha, perlita, vermiculita, argila expandida;
- Materiais sintéticos: poliestireno expandido (EPS), poliuretano expandido (EPU).

Em comparação com outras opções de isolamento térmico, a lã de rocha chama a atenção por ser, ao mesmo tempo, de baixo custo, durável, não-biodegradável, não inflamável, não tóxica e feita com base em

matéria-prima abundante. Por outro lado, a sua fabricação requer uma temperatura elevada, a fim de derreter a rocha e portanto, associada com um consumo de energia não desprezível. Além disso, o produto final é volumoso, o que limita a quantidade a ser carregada em caminhão abaixo da sua capacidade de peso real.

## 2 OBJETIVO

O presente trabalho tem dois objetivos. Inicialmente, determinar a energia embutida na lã de rocha em mantas de baixa densidade e espessura de 5cm, comumente utilizadas para *retrofit* energético.

Depois, determinar o tempo de retorno energético de uma ação de *retrofit* térmico utilizando lã de rocha para melhorar a resistência térmica do envelope.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a determinação da energia embutida na lã de rocha, utilizou-se inicialmente pesquisa bibliográfica e documental. Depois, foi realizada visita a uma fábrica do produto no Brasil, visando, mediante acompanhamento das etapas do processo de fabricação e entrevista com a direção da empresa, verificar se a indicação da literatura condizia com a realidade.

Depois, realizou-se cálculo do tempo de retorno energético, adotando-se como exemplo uma edificação unifamiliar padronizada. A energia embutida foi considerada nula no cenário inicial, e foram registrados acréscimos em quatro cenários - correspondentes a quatro etapas progressivas do *retrofit*. Tal cálculo se deu mediante simples contabilização de materiais utilizados na obra e sua energia embutida, da literatura, acrescidos de energia de transporte até o local de utilização. A energia operacional foi calculada a partir da simulação computacional do desempenho térmico da edificação, em clima temperado, para o estado inicial e também os mesmos quatro cenários.

### 3.1 Adição de material de isolamento térmico

Para determinar a energia embutida de lã de rocha, primeiramente, foram consideradas as informações da North American Insulating Material Association - NAIMA (PE AMERICAS, 2010. Em seguida, os autores visitaram a uma das fábricas de uma empresa de lã de rocha, que fornece produtos de lã de rocha para o mercado brasileiro, e entrevistou o CEO da empresa (MOTTA, 2013).

#### 3.1.1 Levantamento da NAIMA

A pesquisa da NAIMA demonstrou que para produzir 1 m<sup>2</sup> de placa lã de rocha, com um peso de 3,36 kg são utilizados como principais matérias primas 1,1 kg de basalto, 1,29 kg de escória da produção de ligas de ferro silício manganês, 1,32 kg de água e 1,43 kg de resíduos. Como fontes de energia, utilizam-se 16,9 MJ de carvão (para derreter rochas no forno de cúpula), 7,68 MJ de gás natural (para fornecer calor para o processo de cura, e também para empacotamento) e 3,87 MJ de energia elétrica (principalmente para o transportador). Aqui, o consumo de energia elétrica em kWh foi convertido em MJ considerando uma usina de energia eficiente 100%. Isto significam 8,467 MJ/kg ou ainda 569 MJ/m<sup>3</sup>, ou 28,4 MJ/m<sup>2</sup> da manta de 5cm. A Figura 1 ilustra o processo de produção de lã de rocha.

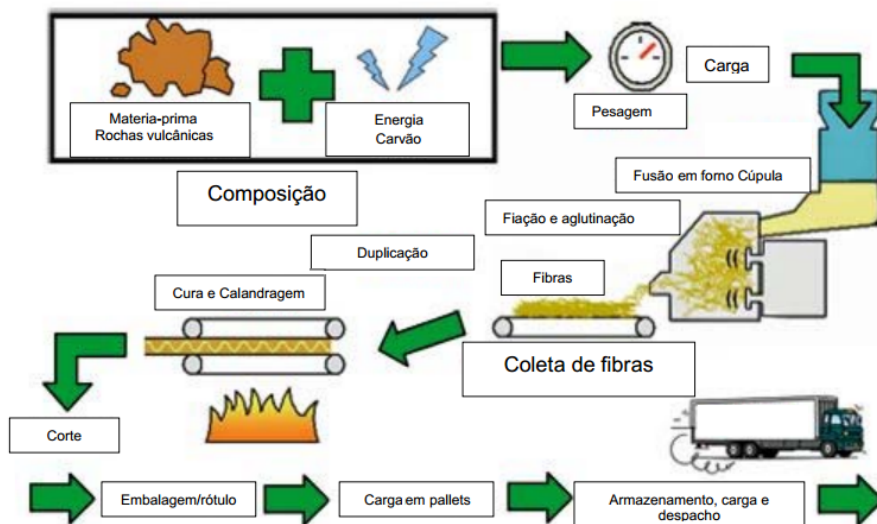


Figura 1 – Esquema de produção de lã de rocha (GRODAN, 2004)

### 3.1.2 Visita à Rockfibras

Em setembro de 2013 os dois autores visitaram a fábrica Rockfibras, 100 km a nordeste de São Paulo. A visita permitiu-lhes acompanhar cada passo da produção de lã de rocha. O sistema é semelhante ao relatado na América do Norte (MOTTA, 2013).

As figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ilustram parte do processo de produção na indústria. Todas as fotos foram produzidas pelos autores.



Figura 2 – aspecto geral da indústria

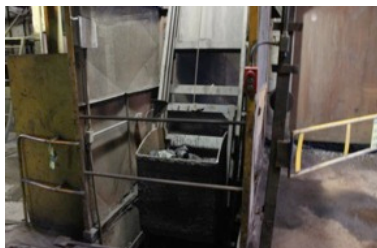


Figura 3 – caçamba com os agregados, subindo para descarga no forno



Figura 4 – Saída da rocha fundida, sobre os rolos centrfugos.

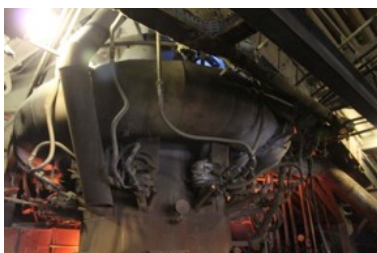


Figura 5 – Parte inferior do forno



Figura 6 – entrada da caixa onde os filamentos de lã de rocha entram e são pulverizados com o aglomerante para em seguida serem calandrados



Figura 7 – corte lateral da manta, dos dois lados, deixando as rebarbas que são reaproveitadas no processo.

De acordo com a Companhia, o consumo de energia para produzir 1 kg de lã de rocha é de 2349 kcal/kg ou 2,73 kWh/kg. Esse valor compreende carvão (70%), óleo BPF (14%) e Diesel (6%) além de energia elétrica (11%). Os custos do Diesel são devidos ao transporte da matéria-prima para a fábrica. Tais dados apontam um consumo específico de 9,828 MJ/kg, ou ainda 660 MJ/m<sup>3</sup>, ou 33,0 MJ/m<sup>2</sup> da manta de 5cm de lã de rocha.

Uma análise mais crítica dos dados fornecidos pela empresa exigiria converter este valor em energia térmica e, no caso da energia elétrica, utilizando uma termelétrica com eficiência de planta de 27,5% (valor usual em estatísticas energéticas). O resultado seria um valor maior, de 12,678 MJ/kg, ou ainda 852 MJ/m<sup>3</sup>, ou 42,6 MJ/m<sup>2</sup> da manta de 5cm de lã de rocha.

Quanto à energia necessária para transporte, considera-se o sítio correspondente ao local da simulação (Curitiba), a 500 km da fábrica. Considerou-se o valor de 3,56 MJ/km t de transporte em caminhão de 28t, de acordo com o inventário ecológico realizada por IFIB (1995, *apud* TAVARES, 2006). Computou-se o valor de 5,98 MJ/m<sup>2</sup> de placa de lã de rocha, embora este valor ainda devesse ser majorado pelo fato de a limitação volumétrica a cerca de 100m<sup>3</sup> reduzir o carregamento possível a somente 7t. O resultado é de 48,6 MJ/m<sup>2</sup> da manta de 5cm de lã de rocha ou, ainda, 972 MJ/m<sup>3</sup>.

## 3.2 Avaliação da edificação

Como uma geometria representativa para avaliar o efeito da lã de rocha sobre o desempenho de uma edificação, um projeto da casa unifamiliar denominado R1B foi escolhido de acordo com a descrição fornecida pela norma ABNT 12721, que estabelece o índice de um preço para a construção civil, o CUB - custo unitário básico- (ABNT, 2006). A Figura 8 traz a planta do projeto adotado.

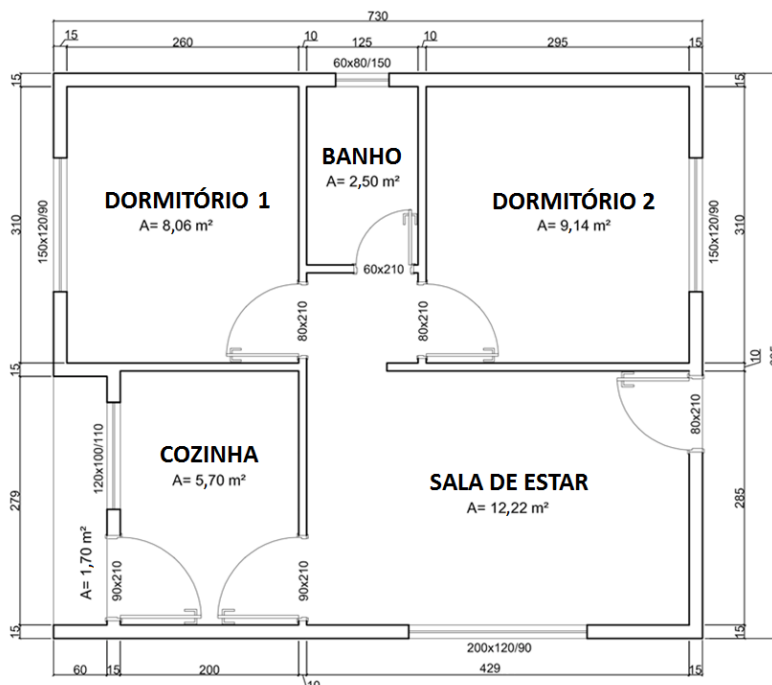


Figura 8- Planta do projeto R1B – NBR 12721

### 3.2.1 Caracterização da edificação

A edificação tem um único piso e usa seguintes materiais de construção:

- Paredes com 11 centímetros de espessura feita de tijolos furados, definidas com 1cm argamassa e acabamento de pintura PVA exterior, e 1 cm de gesso e pintura PVA interior;
- Janelas de madeira com vidro único liso de 4 mm;
- Portas de madeira com 35 mm;
- Laje de 10 cm de espessura de concreto considerada sobre pilotis (ou seja, sem contato com o solo), e forro de madeira com 1 cm de espessura;
- Cobertura de telhas de barro com 1cm de espessura, sobre estrutura de madeira.

### 3.2.2 Cenários considerados da edificação

O estudo, tanto de energia embutida, como de energia operacional, é feito em cinco cenários:

- A. nenhuma melhoria
- B. adição de uma camada de lã de rocha 5 cm e 1 cm gesso acartonado no lado interior das paredes exteriores
- C. adição de uma camada de lã de rocha cinco centímetros sobre o forro de madeira
- D. substituição de janelas com vidros simples por janelas com vidros duplos, esquadrias de alumínio
- E. adição de lã de rocha sob a laje de piso.

## 3.3 Determinação do custo e EE

Primeiramente calculam-se a energia embutida e a energia operacional iniciais do cenário A. Em seguida, para cada uma das variações B, C, D e E foi calculada a variação nestas quantidades. Dos cenários A - E, espera-se um aumento gradual da energia embutida, e diminuição na energia operacional.

## 3.4 Energia pré-operacional

Para efeito de comparação, foi considerada a energia embutida nos materiais de construção utilizados para realizar o projeto ABNT R1B. A energia embutida dos materiais foi obtida a partir de Tavares (2006), com adaptações necessárias. Está incluída a energia embutida dos transportes dos materiais da indústria até Curitiba, mas não se considerou o desperdício, nem transporte dos trabalhadores até a obra. O cenário A foi usado como linha de base, sendo sua energia embutida considerada nula. A Tabela 1 contém tais dados.

Tabela 1 – Energia embutida nos materiais de construção envolvidos no retrofit cenários A - E

<b>Cenário A – nenhuma melhoria</b>			
<b>Cenário B – Acréscimo de lã de rocha (5cm) e gesso acartonado (1cm) internamente às paredes externas</b>			
Discriminação	Volume (m <sup>3</sup> )	EE (MJ/m <sup>3</sup> )	Total (MJ)
Total cenário A			0
Lã de rocha 50 mm	2,7063	972	2.630,52
Gesso acartonado	0,6766	5.975	4.042,69
Perfil galvanizado 48mm x 29mm	0,0072	265.330	1.910,38
Total			8.583,58
<b>Cenário C – Acréscimo de lã de rocha (5cm) sobre o forro de madeira</b>			
Discriminação	Volume (m <sup>3</sup> )	EE (MJ/m <sup>3</sup> )	Total (MJ)
Total cenário B			8.583,58
Lã de rocha 50 mm	2,2886	972	2.224,52
Total			10.808,10
<b>Cenário D– Vidros duplos com camada de vácuo (8mm + 8mm + 6mm)</b>			
Discriminação	Volume (m <sup>3</sup> )	EE (MJ/m <sup>3</sup> )	Total (MJ)
Total cenário C			10.808,10
Esquadria de madeira (retirada)	-0,0439	2.100	-92,19
Vidros simples 3mm	-0,023	46.250	-1.063,75
Esquadria de alumínio	0,0078	567.000	4.422,60
Vidro duplo 6mm + 8mm	0,0614	46250	2.839,75
Total			16.914,51
<b>Cenário E– Acréscimo de lã de rocha (5cm) sob a laje de piso, com gesso acartonado (1cm)</b>			
Discriminação	Volume (m <sup>3</sup> )	EE (MJ/m <sup>3</sup> )	Total (MJ)
Total cenário D			16.914,51
Lã de rocha	2,3211	972	2.256,11
Gesso acartonado	0,5803	5.975	3.467,29
Perfil galvanizado 48mm x 29mm**	0,0062	265.330	1.645,05
Total			24.282,96

\*) Valores negativos significam que o material foi retirado da obra para reuso

\*\*\*) Fonte: valor para aço galvanizado por Tavares (2006) considerando perfil quadrado a 1m linear por m<sup>2</sup>

### 3.5 Energia operacional

Um modelo tridimensional da casa RB1 foi construído e simulado, quanto ao seu desempenho térmico, no programa de simulação Mestre. O programa considera várias zonas com geometria sólida detalhado, considerando-se a irradiação solar como uma aproximação numérica. Ele discretiza a dimensão de tempo para considerar um ano representativo conjunto, numa análise instável de transferência de calor.

O programa Mestre foi testado de acordo com o procedimento “Bestest” da International Energy Agency Bestest para zona múltipla, sem fluxo de ar, e demonstrou resultados próximos aos principais programas utilizados internacionalmente (SCHMID e GRAF, 2011).

A casa foi modelada em elementos sólidos em 3 dimensões e espaços, como na Figura 9. Não foram consideradas sombras projetadas por elementos ao redor como paredes, árvores ou edifícios. A entrada da casa foi considerada como voltada para o oeste.



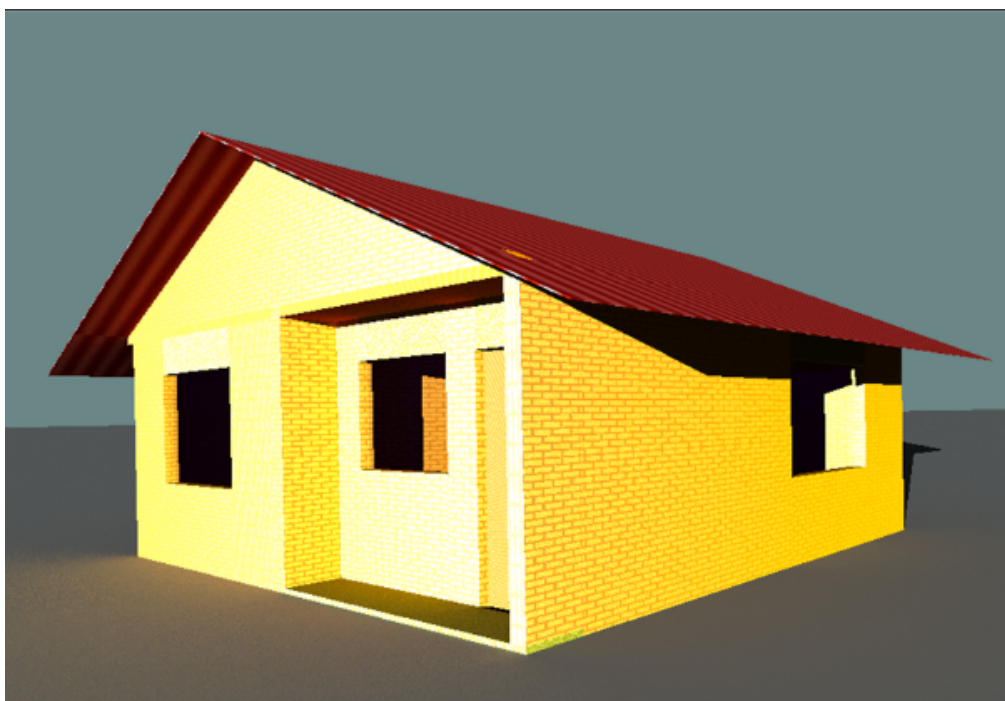


Figura 9 – Imagem do modelo de simulação obtida por renderização no programa Mestre

O efeito da orientação da construção no consumo de energia não foi considerado, uma vez que as aberturas são quase igualmente distribuídas e o telhado oferece proteção contra a radiação solar mais crítica. Observou-se que a rotação no sentido horário de 90° do modelo A não produziu diferença significativa no desempenho. Assim, foi utilizada somente a orientação com entrada a Oeste.

### 3.5.1 Descrição dos materiais usados na simulação

Foram utilizados os materiais constantes na Tabela 2, que ilustra os parâmetros de cada um deles.

Tabela 2 – Materiais utilizados na simulação (DIN 4108 apud Gösele et al., 1997)

Material	Características Unidades	Condutividade térmica W/mK	Calor específico J/kgK	Massa específica Kg/m <sup>3</sup>	Absorção vermelho	Absorção verde	Absorção, azul	Transmissiv. Vermelho	Transmissiv. verde	Transmissiv. azul
Alvenaria		0,80	1000	1000	0,1	0,9	0,9	0	0	0
Madeira (Gösele et al., 1997)		0,18	2100	600	0,4	0,2	0,1	0	0	0
Concreto		1,0	1000	2400	0,5	0,5	0,5	0	0	0
vidro, simples		1,0	1000	2500	0	0	0	0,9	0,9	0,9
Telhas		0,6	1000	2000	0,4	0,1	0,1	0	0	0
vidro, duplo (média ponderada)		0,11	1000	1500	0,1	0,1	0,1	0,9	0,9	0,9
madeira, forro		0,10	2100	600	0,1	0,9	0,8	0	0	0
alvenaria (11 cm)+lã rocha (5 cm)+gesso (1 cm)		0,121	641	1478	0,1	0,9	0,8	0	0	0
concreto+lã de rocha (5 cm) +gesso (1 cm)		0,117	641	861	0,5	0,5	0,5	0	0	0

### 3.5.2 Ganhos internos de calor por equipamentos

A Tabela 3 ilustra as zonas com suas capacidades caloríficas (em adição às dos elementos sólidos da modelagem) e a Tabela 4, taxas geração de calor interno por zona.

Tabela 3 – Valores de capacidade térmica e geração de calor das zonas adotados para a simulação.

Ambiente	Capacidade térmica (J/K)					
	Quarto 1	Banho	Quarto 2	Cozinha	Sala	Ático
peso (kg)	240	300	240	300	240	240
calor esp. (J/kgK) *	2100	1000	2100	1670	2100	2100
Capacidade térmica	500000	300000	500000	500000	500000	500000
Obs.	móveis	louças sanitárias	móveis	móveis, louças	móveis	estrutura

\*) segundo DIN 4108 apud Gösele et al. (1997)

Tabela 4 – taxas de geração interna de calor por zona

Tempo (h)	Geração interna de calor (W)*					
	0-1	160	0	160	300	30
1-2	160	0	160	300	30	0
2-3	160	0	160	300	30	0
3-4	160	0	160	300	30	0
4-5	160	0	160	300	30	0
5-6	160	0	160	300	30	0
6-7	160	0	160	300	30	0
7-8	0	6000	0	2800	30	0
8-9	0	0	0	300	30	0
9-10	0	0	0	300	30	0
10-11	0	0	0	300	30	0
11-12	0	0	0	5500	30	0
12-13	0	0	0	500	30	0
13-14	0	0	0	300	30	0
14-15	0	0	0	300	30	0
15-16	0	0	0	300	30	0
16-17	0	0	0	300	30	0
17-18	0	0	0	300	30	0
18-19	0	6000	0	5600	30	0
19-20	0	0	0	600	400	0
20-21	0	0	200	400	400	0
21-22	0	0	200	300	400	0
22-23	0	0	200	300	200	0
23-24	0	0	200	300	200	0

Obs.: \*) hipótese de cálculo adotada pelos autores

### 3.5.3 Taxas de ventilação

A Tabela 5 ilustra as zonas e suas taxas de ventilação.

Tabela 5 – Taxas de ventilação (m<sup>3</sup>/h)

Ambiente	Quarto 1	Banho	Quarto 2	Cozinha	Sala	Ático
	500000	300000	500000	500000	500000	500000
0-6	0,015	0,0015	0,015	0,015	0	0,1
6-12	0,015	0,0015	0,015	0,015	0	0,1
12-18	0,015	0,0015	0,015	0,015	0	0,1
18-24	0,015	0,0015	0,015	0,015	0	0,1

A sala não é ventilada, uma vez que os outros compartimentos têm capacidade de ventilação superior à taxa prescrita pelas normas de higiene, e supõe-se haver suficientes trocas de ar entre os ambientes.

A casa teve sua zona de conforto definido como entre 18 e 28 ° C. Assim, o consumo de energia para aquecimento e refrigeração foi calculado para cada uma das variações A - E.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6 apresenta valores de energia operacional para as variações de A - E.

Em termos gerais, pode-se observar que a redução da energia operacional anual para cada um dos cenários é expressiva, atingindo mesma ordem de grandeza que o acréscimo correspondente de energia embutida.

Tabela 6 – Energia operacional de aquecimento, resfriamento e total dos cenários A - E

Energia operacional	A	B	C	D	E
Energia operacional: aquecimento (kWh/ano)	5106	3016	2127	1858	534
Energia operacional diferencial, aquecimento (MJ/ano)	0	-27360	-38998	-42519	-59852
Energia operacional: refrigeração (kWh/ano)	-5877	-6368	-6642	-6725	-7602
Energia operacional: total (kWh/ano)	10984	9384	8769	8583	8136
Energia operacional diferencial, aquecimento (MJ/ano)	0	-20944	-28997	-31424	-37285



A diminuição visível dos custos do aquecimento se dá, principalmente quando se passa do cenário A para o B. Também se observa aumento dos custos de refrigeração. Apesar de o isolamento térmico trazer melhoria na prevenção de fluxos radiantes descendente do telhado, assim como fluxos de paredes opacas verticais, os quais geralmente, independentemente de cor, apresentam absorvidade não negligenciável de radiação solar infravermelha, um resultado líquido de aprisionamento do calor interno é observado.

Como limitação na entrada de dados, o programa Mestre considera um esquema de ventilação único para todo o ano. Portanto, os cenários A - E foram considerados com mesma taxa de ventilação higiênica, além de um ar condicionado quente e frio. A Fig.10 representa o tempo de retorno energético dos cenários A a E, caso se utilize indiscriminadamente o condicionamento mecânico de ar o ano inteiro.

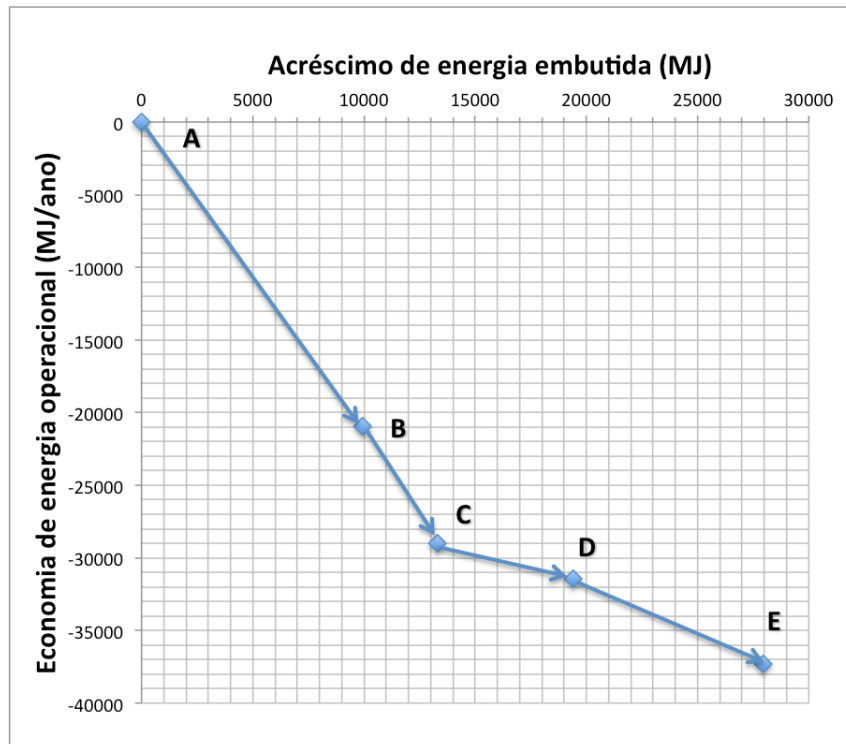


Figura 10 – Retorno energético progressivo dos cenários A até E, sob condicionamento de ar no modo quente e frio

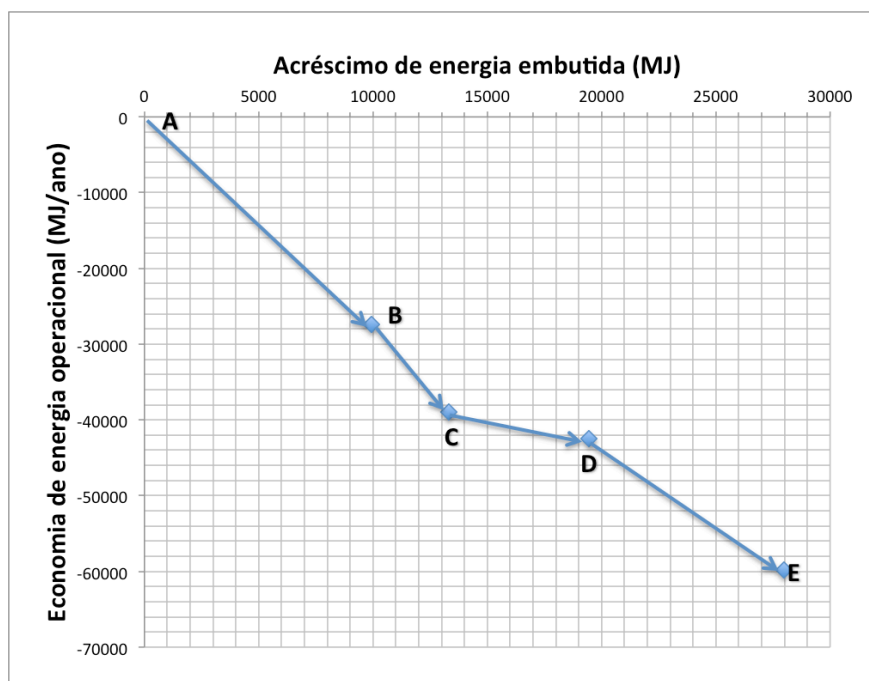


Figura 11 – Retorno energético progressivo dos cenários A a E sob condicionamento de ar no modo quente, e no verão com ventilação natural.

Em um sistema de ar condicionado todo mecanizado pode-se admitir a ventilação está de acordo com um modelo teórico. Entretanto, o uso de ventilação natural, as taxas de ventilação muito provavelmente estão em desacordo com as condições reais, já que há a influência das condições locais de vento, bem como os gradientes de temperatura verticais, que não são contabilizados pelo programa Mestre bem como pela maioria dos modelos de simulação de construção com base em redes de massa concentrada.

A Figura 11 corresponde ao caso em que se utiliza condicionamento mecânico do ar no inverno e, no verão, ventilação natural.

A ventilação natural, como estratégia para alcançar o conforto térmico no verão é suficiente para Curitiba. A execução de simulação do cenário E modificado para tomar um fluxo de ventilação 10 vezes mais elevado e também considerando a sala de estar a ser ventilada a 0,15 m<sup>3</sup>/s conduz a consumo de energia praticamente nulo no verão.

A análise realizada neste artigo foi limitada a uma casa unifamiliar de baixa renda, situada em Curitiba. Ela não deve ser generalizada para outros locais do Brasil, devido ao clima, e devido às distâncias de transporte.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As operações sucessivas de *retrofit* visando a uma redução de energia operacional fizeram sentido e se mostraram rentáveis. A partir da análise feita na Figura 11, depreende-se que o tempo de retorno energético de cada cenário é, em anos, de: B: 0,31; C: 0,28; D: 0,40; E: 0,41.

Como a análise foi realizada em um clima temperado, os efeitos são sentidos em ambos os casos (cargas térmicas de aquecimento e refrigeração). Uma análise semelhante realizada em climas frios e em climas quentes irá mostrar situações mais extremas devendo, em cada caso, conduzir a tempos de retorno muito mais curtos. É necessária consideração do modo passivo de operação da casa, mediante atenta participação do usuário.

Uma política pública visando a eficiência energética deve considerar o resultado líquido do *retrofit* de edifícios, bem como em toda a cadeia da indústria. É necessária a consideração do consumo de energia na fase de pré-operação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **NBR 12721: Avaliação de custos unitários e preparo de orçamento de construção para incorporação de edifícios em condomínio – Procedimento**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2006,
- GRODAN, Rockwool as a Growing Substrate for Hydroponic Systems, Roermond - The Netherlands 2004, Disponível em: <<http://grodan101.com/knowledge-center/rockwool-growing-substrate-hydroponic-systems>>, Acesso em: Dez,
- MOTTA, F, **Entrevista concedida quando da visita à Indústria Rockfibras - Guararema - SP**, HABIB, R, 2013,
- PE AMERICAS. **Lyfe Cycle Assesment of Rock & Slag Insulation Products**. NAIMA - National American Insulation Manufacturing Association. Boston - USA, p.112. 2010.
- ROCKFIBRAS, Produtos - Lã de Rocha, Guararema, 2014, Disponível em: <[http://www.rockfibras.com.br/produtos\\_la\\_de\\_rocha.html](http://www.rockfibras.com.br/produtos_la_de_rocha.html)>, Acesso em: Jan 2014,
- SCHMID, A, L.; GRAF, H, F, Validation of MESTRE Building Simulation System according to Best-Test Multi-Zone, Non-Airflow, In-Depth Diagnostic Cases, Proceedings of Building Simulation 2011 - , In-Depth Diagnostic Cases, In Proceedings of Building Simulation 2011, 12th Conference of the International Building Performance Simulation Association, 2011, Sydney, 14-16 Nov, p,1223-1228,
- TAVARES, S, F, **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energético de Edificações Residenciais Brasileiras**, 2006, 225 (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina Florianópolis - SC,
- WUPPERTAL INSTITUTE, **Final Report on the Material Efficiency and Resource Conservation (MaRess) Project**, Wuppertal: Wuppertal Institut for Climate, Environment and Energy (2011), disponível em [ressourcen.wuppertalinst.org/downloads/MaRess\\_FinalReport.pdf](http://ressourcen.wuppertalinst.org/downloads/MaRess_FinalReport.pdf), acesso em 08/07/2015

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sr. Fábio Motta (Rock Fibras) pela acolhida e pelas informações.