
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UM PROCESSO DE RECICLAGEM DE POLIESTIRENO EXPANDIDO (ISOPOR)

Zilmara V. Grote*

José L. Silveira*

Resumo

Realizam-se, neste trabalho, estudos energéticos e exergéticos associados a um processo de reciclagem de resíduos de Isopor, considerando dados reais de uma indústria. A análise consiste em verificar a relação do benefício da reciclagem comparando a produção de materiais moldados com os rejeitos (reciclando-os) e materiais moldados com matéria-prima nova (virgem). Conclui-se com as análises da 1ª e da 2ª Lei da Termodinâmica, comprovando o benefício desse tipo de reciclagem.

* Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Guaratinguetá
E-mail: zilmaragrote@yahoo.com
joseluz@feg.unesp.br

Abstract

This work aims to accomplish energetic studies associated to the recycling of expanded polystyrene-based materials, considering their several applications and the existing recycling processes. The analysis consists of verifying, mainly, the benefit relation of the recycling process, taking into consideration the manufacturing of products molded from recycled and raw materials. It is also intended to propose solutions for the final use of the rejected or recycled materials, adapting them to their new applications, considering their qualities and properties.

1 INTRODUÇÃO

Na busca de novos métodos e materiais alternativos mais eficientes, justificados pela necessidade da redução de custos e pelo aumento de competitividade da indústria, a reciclagem de materiais que são rejeitados (resíduos de processos que usam materiais à base de poliestireno expandido) vem atender a essas necessidades de mercado e conseqüentemente ajudar no desenvolvimento do País.

Essa contribuição ocorre evitando o mau uso dos resíduos, que atualmente são depositados em aterros sanitários ou lixões sem nenhum controle, causando, devido ao grande volume ocupado e à dificuldade de evitar que se espalhem por ação eólica, danos ao meio ambiente. Outro aspecto é o gasto com energia associado ao processo de fabricação de poliestireno expandido (Isopor): no caso da reciclagem, pode-se permitir redução de insumo (eletricidade, combustível etc.), já que várias etapas iniciais da fabricação da matéria-prima virgem podem ser eliminadas. Deve-se considerar que o poliestireno expandido é obtido do petróleo, que é um recurso mineral natural esgotável, e sua reciclagem implica uma melhor utilização desse insumo energético.

Assim, o objetivo deste trabalho consiste em comparar energeticamente e exergeticamente a reciclagem de materiais à base de poliestireno expandido em relação a processos que utilizam matéria-prima virgem, de modo que sejam traduzidos os resultados dos benefícios da reciclagem, incorporando unicamente os fatores associados à energia e exergia, complementando os trabalhos desenvolvidos anteriormente.¹

2 POLIESTIRENO EXPANDIDO – ISOPOR

2.1 Aplicações dos materiais à base de poliestireno expandido

O poliestireno expandido tem como sigla internacional EPS, e o nome Isopor é uma marca registrada. De acordo com a norma ISO-1043/78, esse material é identificado como celular rígido, resultante da polimerização do estireno (um derivado de petróleo) em água e pertencendo ao grupo dos termoplásticos.²

O EPS é composto por 98% de ar e 2% de matéria-prima (em massa), e desde a sua criação, há aproximadamente 50 anos, tem sido amplamente aplicado de diversas formas, como embalagens industriais, conservação de produtos alimentícios, proteção de equipamentos, artigos de consumo, materiais para construção civil,

isolante térmico, aplicação em processos de fundição de blocos de motores na indústria automobilística etc.¹

A seguir, têm-se algumas aplicações na construção civil:³

- Caixão perdido e formas para concreto
- Pisos compostos
- Isolamento térmico de lajes impermeabilizadas
- Concreto leve
- Isolamento térmico de dutos de ar-condicionado
- Painéis divisórios
- Drenagem em muro de arrimo
- Juntas de dilatação
- Forros isolantes e decorativos
- Fundação para estradas
- Isolamento térmico de telhados

A produção mundial de poliestireno expandido é de aproximadamente 2 milhões de toneladas anuais, e no Brasil o segmento que mais o consome é o de embalagens, com 50% da produção total, seguido da construção civil, com 35%, e utilidades domésticas, com 15%.⁴

Os dados de uma página da Internet⁵ mostram que o EPS é um material inerte quimicamente, não é biodegradável, isto é, não se decompõe, não se desintegra, não desaparece no ambiente e não contém CFC; com isso, não contamina quimicamente o solo, a água ou o ar, mas constitui um problema ambiental se não reciclado, pois é um material considerado eterno e ocupa muito espaço devido à sua baixa densidade, causando problemas nos lixões ou aterros sanitários municipais, como já mencionado.

2.2 O processo de fabricação do EPS

A Figura 1 ilustra o processo de fabricação da matéria-prima, e a Figura 2 mostra o processo de fabricação para o processo de transformação da matéria-prima em artigos finais, conforme a utilização.

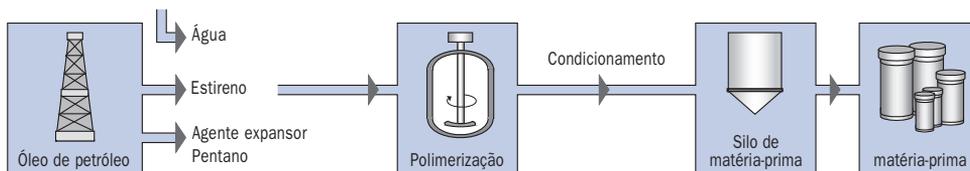


Figura 1 Processo de fabricação da matéria-prima de poliestireno⁶

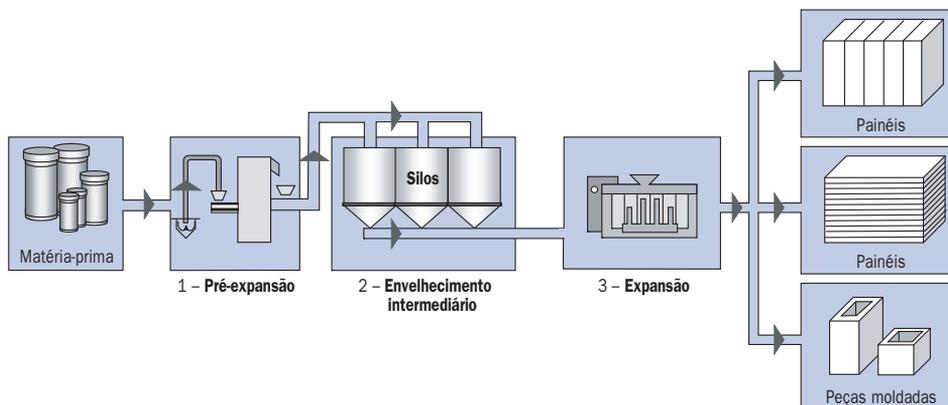


Figura 2 Processo de transformação da matéria-prima (poliestireno)⁶

2.3 A reciclagem de EPS

Existem alguns processos para a reciclagem dos materiais à base de EPS, estes são aplicados conforme a utilização final do produto. Os rejeitos podem ser processados para serem novamente moldados em forma de blocos, injetados para formar peças para embalagens; ser usados como substratos para melhoramento de solo, para drenagens e jardineiras, na aeração de substâncias para melhoria da decomposição; podem ser reutilizados na construção civil; ou até gerar energia elétrica ou calorífica; por combustão direta e também podem ser aplicados como complemento em moldes de peças injetadas ou fundição no ramo industrial.⁷

A Figura 3 ilustra os processos de transformação dos resíduos em seus usos finais.⁸ Verifica-se existir vários processos para reciclar o EPS (Isopor).

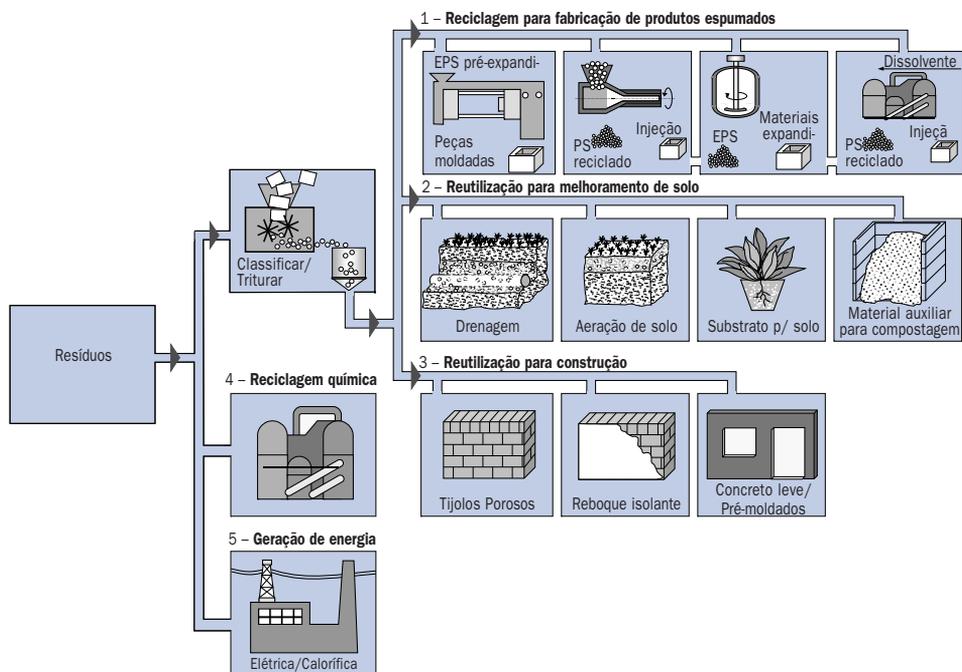


Figura 3 Processos de reciclagem de resíduos à base de poliestireno expandido⁸

Acredita-se que qualquer forma de reciclagem deve estar relacionada com o meio ambiente, e não somente interligada à relação econômica tradicional, isto é, ao se quebrar a cadeia de produção de um produto inserindo matéria-prima reciclada, diminui-se parte do processo de fabricação, o que conseqüentemente traz economias, tanto em termos de custos diretos e conservação de energia (energia gasta no processo, combustível, eletricidade) como em termos de preservação do meio ambiente, pois esse produto quando não reciclado poluirá locais de despejo (aterros sanitários, rios, mares etc.), e por sua vez, se o processo usar algum tipo de combustível, haverá poluição devido à queima inerente.

A Figura 4 esquematiza o ciclo de vida do EPS (Isopor), considerando a sua reciclagem, com base no texto anteriormente citado.

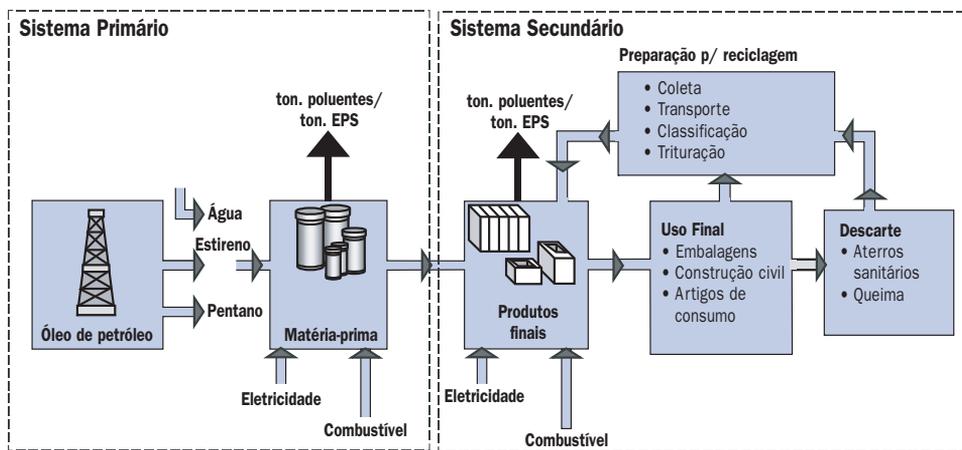


Figura 4 Esquema do ciclo de vida do EPS (Isopor), considerando sua reciclagem⁹

Ao se produzirem produtos com os resíduos de Isopor, no caso da reciclagem por meio de processo térmico para produção de blocos, placas e/ou painéis, necessita-se que na composição haja também uma parte de matéria-prima virgem para efetivar a união entre as partículas dos resíduos. Essa composição é de aproximadamente 60% a 70% de matéria-prima virgem para, respectivamente, 40% a 30% de resíduos de Isopor, como já verificado experimentalmente em ensaios, para obter uma composição ideal, conforme as características desejadas e exigíveis para cada produto final, em função das densidades exigidas, que variam em faixas entre 12kg/m^3 a 45kg/m^3 .⁹

No processo de fabricação, deve-se considerar que com os produtos reciclados haverá uma etapa no sistema primário, (Figura 4) com os devidos custos, para a preparação da reciclagem, em que estão incluídos a coleta dos resíduos de isopor, a classificação ou seleção, o transporte do local de despejo ou de utilização até o local de processamento do produto e a trituração, quando necessária.

3 ESTUDO DE CASO

Trata-se da modelagem termodinâmica de uma indústria localizada no sul de Minas Gerais que produz blocos de EPS de diferentes densidades para serem cortados em forma de placas ou painéis, conforme a utilização final de cada cliente. A densidade dos blocos de EPS produzidos é chamada de P1 (12kg/m^3 a 16kg/m^3).

A produção anual de blocos de EPS é de aproximadamente 8.000m^3 ; o consumo anual de óleo combustível é de 100.000 litros e o de energia elétrica é de aproximadamente 4.500kWh/mês , conforme dados coletados pelos autores na própria empresa (2001).

A Figura 5 esquematiza o processo de fabricação dos blocos, painéis e placas de EPS, com os fluxos energéticos e o fluxo de material. Na caldeira é produzido vapor saturado para alimentar o pré-expansor e a bloqueira, componentes nos quais ocorre a expansão das pérolas de poliestireno. O material virgem, poliestireno (PS), entra no pré-expansor para uma primeira expansão, depois vai para um tanque de descanso, perdendo calor para o meio ambiente, em seguida vai para a bloqueira, para a segunda e última expansão. Quando o bloco está pronto, no devido tempo irá para o corte. Esses tempos são variáveis conforme a densidade desejada, tanto no pré-expansor como na bloqueira (em função da pressão), isto é, no pré-expansor o tempo para o PI é de 140 segundos e na bloqueira, de 120 segundos.

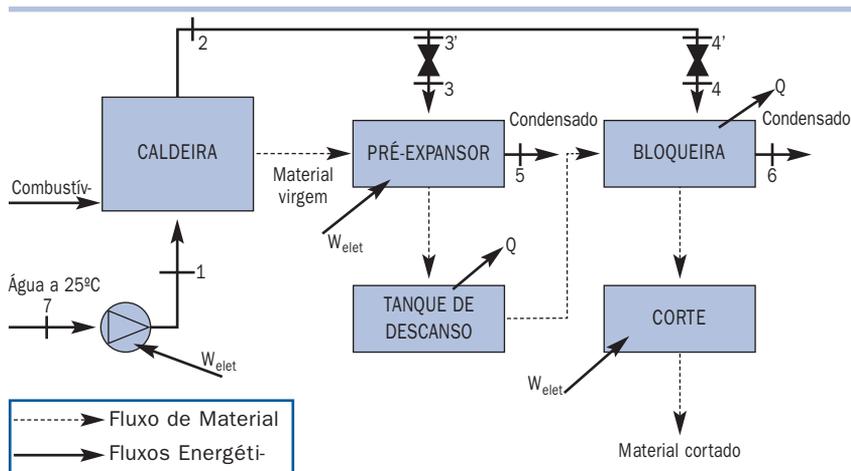


Figura 5 Esquema do processo de fabricação de blocos, painéis e placas de EPS

O processo estudado opera em um ciclo aberto, não tendo retorno de condensado para a caldeira. Os dados e os resultados obtidos do processo são fornecidos e calculados por m^3 de EPS produzido. A captação de água é feita em um poço aberto por uma bomba, o consumo de água no processo é de $4,37\text{m}^3/\text{dia}$. Na caldeira é usado óleo BPF tipo 1A ($\text{PCI} = 41.553,056\text{kJ/kg}$) e, antes de ser queimado, sua temperatura é elevada de 25°C a 125°C por resistência elétrica de 20kW . Os dados de vapor, pressão e temperatura usados na bloqueira estão citados na Tabela 1 e na Tabela 4; no pré-expansor, além do vapor para essa primeira expansão, é necessário um motor elétrico de agitação de 4 HP ($4 \times 0,746\text{kW}$); no tanque de descanso o

material perde calor para o meio ambiente, atingindo a temperatura ambiente. No corte, a potência usada é de aproximadamente 1,1 kW.

3.1 Sistema de reciclagem proposto

O processo de reciclagem analisado está esquematizado na Figura 6. Esta mostra a inserção de resíduos com o material virgem na bloqueira, isto é, é misturada uma porcentagem de material virgem pré-expandido com resíduos, selecionados e cortados num tamanho adequado ao processo; depois é feita a expansão para permitir a união dos resíduos com o material virgem, formando assim um bloco para ser cortado conforme as necessidades do cliente. O fluxo de vapor é o mesmo no caso de processo sem reciclagem, porém o tempo de uso do pré-expansor é reduzido. Os blocos de EPS reciclados produzidos são divididos em dois novos grupos, isto é, PIR (12kg/m^3 a 16kg/m^3), que usa o rejeito mais limpo, proveniente da produção, e REC (12kg/m^3 a 16kg/m^3), que usa rejeitos gerados de outras indústrias, da construção civil etc.

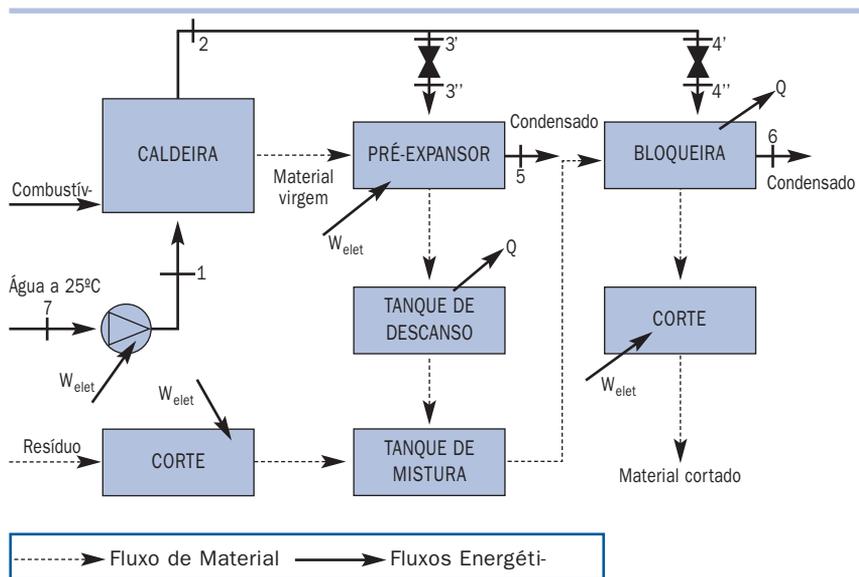


Figura 6 Esquema do processo de fabricação de blocos de EPS inserindo a reciclagem de resíduos

3.2 Análise termodinâmica

O balanço energético sobre o volume de controle considerado em torno de cada componente da Figura 5 é dado pela Equação (1):

$$1 \quad Q - W = \Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep$$

sendo Q [kW] o calor transferido no equipamento, W o trabalho no equipamento [kW], ΔH a variação de entalpia [kW], ΔEc a variação na energia cinética [kW] e ΔEp a variação na energia potencial [kW]. Desprezando-se as variações nas energias cinética e potencial, a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser escrita como:¹⁰

$$2 \quad Q - W = \Delta H$$

O conceito de exergia permite calcular perdas termodinâmicas e classificar a verdadeira transformação das diferentes formas de energia.¹¹ A exergia pode ser definida como o máximo trabalho que pode ser obtido de uma dada forma de energia, utilizando os parâmetros do meio ambiente como estado de referência. Um dos principais usos desse conceito está no balanço exerético, que pode ser consultado como uma “contagem da degradação da energia”. Essa “degradação” é equivalente à destruição irreversível da exergia em processos reais. Essa medida da “ineficiência” de um processo real é chamada irreversibilidade.

Na ausência de efeitos magnéticos, elétricos e nucleares, a exergia, em geral, é dada por:¹²

$$3 \quad Ex = Ex_c + Ex_p + Ex_f + Ex_{ch}$$

sendo:

Ex = exergia total [kW]

$Ex_c = 1/2 \dot{m}.c_0^2$ = exergia cinética [kW]

$Ex_p = g.\dot{m}.z_0$ = exergia potencial [kW]

Ex_f = exergia termodinâmica [kW], que é dada pela Equação (4):

$$4 \quad Ex_f = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

$Ex_{ch} = \text{exergia química} = \sum_{i=1}^n x_i . Ex_{ch,i}^0 + \dot{m} . R . T_0 . \sum_{i=1}^n x_i \ln(x_i)$

sendo h entalpia específica [kJ/kg], s entropia específica [kJ/kg], h_0 entalpia específica e s_0 entropia específica na pressão e temperatura (T_0) do meio ambiente no estado de referência, \dot{m} é o fluxo mássico [kg/s], c_0 a velocidade de referência, g a aceleração da gravidade, z_0 a cota de referência, ex_i é a fração molar dos componentes i em uma mistura de gases.

Desprezando as variações nas exergias cinética, potencial e química, tem-se que a exergia total será igual à exergia termodinâmica dada na Equação (5).

5

$$Ex = + Ex_f$$

A irreversibilidade, I [kW], é determinada pela relação:

6

$$I = \sum Ex_{\text{sai}} + \sum Ex_{\text{entra}}$$

Para o estado de referência, foram utilizados os valores de temperatura (T_0) de 25°C (298 K) e pressão (P_0) de 1 atm (101 kPa).

A transferência de calor do material para o ar, dada, neste caso, no tanque de descanso e na bloqueira, pode ser calculada por convecção livre. A convecção livre ou convecção natural ocorre sobre um fluido no qual existe gradiente de temperatura. A transferência de calor (Q) do material para o ar pode ser dada por:¹³

7

$$Q = h'A (T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}})$$

sendo h' o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K], A área superficial [m²], T_{sup} a temperatura na superfície [K] e T_{inf} a temperatura do ar livre da ação viscosa [K].

O coeficiente de transferência de calor por convecção pode ser calculado por:¹³

8

$$\frac{h'L}{k} = C Ra_L^n$$

em que Ra_L é o número de Rayleigh. A constante C e o coeficiente n têm valores em função do intervalo de Ra_L ; foi adotado para esses cálculos escoamento turbulento, sendo $C = 0,1$ e $n = 1/3$.¹³ O número de Rayleigh é obtido pela Equação (9), conforme Incropera & DeWitt:¹³

$$9 \quad Ra_L = \frac{g \beta (T_{sup} - T_{inf}) L^3}{\nu \alpha}$$

$$10 \quad \beta = \frac{2}{(T_{sup} - T_{inf})}$$

sendo L o comprimento característico [m], k a condutividade térmica [W/mK], g a aceleração da gravidade [m/s^2], β coeficiente volumétrico de expansão térmica [K^{-1}], ν a viscosidade cinemática [m^2/s] e α a difusividade térmica [m^2/s].

3.3 Resultados

A metodologia apresentada neste trabalho engloba conceitos relativos à 1ª e à 2ª Lei da Termodinâmica, aplicadas para a análise dos processos de produção de EPS com e sem reciclagem. Levando-se em consideração o fluxo mássico (m), a temperatura (T), a entalpia (h), a entropia (s) e a exergia total (Ex) e a exergia específica (ex) em cada ponto do processo, a Tabela 1 mostra os resultados obtidos para os pontos indicados na Figura 5. Na Tabela 2 são mostrados os resultados da análise energética para o processo sem incorporar a reciclagem e a Tabela 3 mostra os resultados de performance exérgica desse mesmo processo.

As seguintes considerações foram feitas para a análise termodinâmica pretendida:

- Tempo de operação do processo de 160h/mês (informações coligidas pelos autores)
- C_p dos gases de exaustão de 1,08kJ/kgK.¹⁴

As nomenclaturas usadas nas tabelas são: E_{comb} – Energia do combustível, $Rt(\text{óleo})$ – energia para aquecimento do óleo de 25°C a 125°C, W_{bomba} – trabalho da bomba de água, $Q_{pre\acute{e}x}$ – calor fornecido ao material no pré-expansor, Q_{perd1} – calor perdido no condensado do pré-expansor, W_{motor} – trabalho do motor de agitação, Q_{bloc} – calor fornecido ao material na bloqueira, Q_{perd2} e Q_{perd3} – calor perdido no condensado e no material ao meio, W_{corte} – trabalho necessário para o corte do material, Q_{perd4} – calor perdido ao meio no tanque de descanso, e I – irreversibilidade.

TABELA 1

Dados para os pontos da Figura 5, processo de produção de blocos de EPS com densidade P1 – 12kg/m³ a 16kg/m³ (**sem reciclagem**)

Tipo	Pontos	Pressão [MPa]	Temp. [°C]	Massa [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	ex [kJ/kg]	Ex [kW]
P1	1	0,863	25,0	0,152	105,7	0,3671	0,86	0,13
P1	2	0,863	173,6	0,152	2772,0	6,6370	797,83	121,27
P1	3	0,069	110,0	0,076	2700,0	7,5970	439,60	33,41
P1	4	0,539	154,7	0,076	2752,0	6,7960	730,42	55,51
P1	5	0,101	100,0	0,076	419,0	1,3066	34,09	2,59
P1	6	0,101	100,0	0,076	419,0	1,3066	34,09	2,59
P1	7	0,101	25,0	0,076	104,8	0,3673	0,00	0,00

TABELA 2

Resultados de performance energética para a produção de blocos de EPS com densidade P1 – 12kg/m³ a 16kg/m³ (**sem reciclagem**)

Tipo	Caldeira		Bomba	Pré-expansor			Bloqueira			Corte	Tanque
	Ecomb [kWh/m ³]	Rt(óleo) [kWh/m ³]	Wbomba [kWh/m ³]	Qpréex [kWh/m ³]	Qperd1 [kWh/m ³]	Wmotor [kWh/m ³]	Qbloqu [kWh/m ³]	Qperd2 [kWh/m ³]	Qperd3 [kWh/m ³]	Wcorte [kWh/m ³]	Qperd4 [kWh/m ³]
P1	25,828	0,8285	0,0052	8,584	1,182	0,148	5,910	0,796	0,047	0,0894	1,593

TABELA 3

Resultados de performance exergética para a produção de blocos de EPS com densidade P1 – 12kg/m³ a 16kg/m³ (**sem reciclagem**)

Componente	Tipo	Ex(entra) [kWh/m ³]	Ex(sai) [kWh/m ³]	I [kWh/m ³]
Pré-expansor	P1	1,8020	0,1283	1,6737
Bloqueira	P1	1,8504	0,0864	1,7640
Caldeira	P1	25,8884	5,5123	20,3761
Bomba	P1	0,0059	0,0054	0,0004
Corte	P1	0,0894	0,0000	0,0894

A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para os pontos indicados na Figura 6, correspondentes ao processo de fabricação do EPS incorporando a reciclagem. As Tabelas 5 e 6 mostram os resultados de performance energética e exergética.

TABELA 4

Dados para os pontos da Figura 6, processo de produção de blocos de EPS com densidade P1R/REC – 12kg/m³ a 16kg/m³ (com reciclagem)

Pontos	Pressão [MPa]	Temp. [°C]	Massa [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kgK]	ex [kJ/kg]	Ex [kW]
1	0,863	25,0	0,152	105,7	0,3671	0,86	0,13
2	0,863	173,6	0,152	2772,0	6,6370	797,83	121,27
3	0,069	110,0	0,076	2700,0	7,5970	439,60	33,41
4	0,539	154,7	0,076	2752,0	6,7960	730,42	55,51
5	0,101	100,0	0,076	419,0	1,3066	34,09	2,59
6	0,101	100,0	0,076	419,0	1,3066	34,09	2,59
7	0,101	25,0	0,076	104,8	0,3673	0,00	0,00

TABELA 5

Resultados de performance energética para a produção de blocos de EPS com densidade P1R/REC – 12kg/m³ a 16kg/m³ (com reciclagem)

Tipo	Caldeira		Bomba	Pré-expansor			Bloqueira			Corte	Tanque
	Ecomb [kWh/m ³]	Rt(óleo) [kWh/m ³]	Wbomba [kWh/m ³]	Qpréex [kWh/m ³]	Qperd1 [kWh/m ³]	Wmotor [kWh/m ³]	Qbloqu [kWh/m ³]	Qperd2 [kWh/m ³]	Qperd3 [kWh/m ³]	Wcorte [kWh/m ³]	Qperd4 [kWh/m ³]
P1R	21,197	0,6799	0,0043	6,009	0,827	0,103	5,910	0,796	0,047	0,1073	1,115
REC	19,654	0,6304	0,0040	5,150	0,709	0,089	5,910	0,796	0,047	0,1073	0,956

TABELA 6

Resultados de performance exérgica para a produção de blocos de EPS com densidade P1R/REC – 12kg/m³ a 16kg/m³ (com reciclagem)

Componente	Tipo	Ex(entra) [kWh/m ³]	Ex(sai) [kWh/m ³]	I [kWh/m ³]
Pré-expansor	P1R	1,2614	0,0898	1,1716
	REC	1,7378	0,0770	1,6608
Bloqueira	P1R	1,8504	0,0864	1,7640
	REC	1,8504	0,0864	1,7640
Caldeira	P1R	21,2467	4,5240	16,7228
	REC	19,6995	4,1945	15,5050
Bomba	P1R	0,0048	0,0044	0,0004
	REC	0,0045	0,0041	0,0003
Corte	P1R	0,0894	0,0000	0,0894
	REC	0,0894	0,0000	0,0894
Corte de resíduos	P1R	0,0179	0,0000	0,0179
	REC	0,0179	0,0000	0,0179

A Figura 7 mostra os resultados obtidos da análise exergética (Tabelas 3 e 6) para produção de blocos de EPS com matéria-prima virgem P1 e o reciclado P1R (12kg/m³ a 16kg/m³) na forma de Diagrama de Grassman. Os valores dos blocos reciclados REC não foram colocados na figura por serem muito próximos ao P1R.

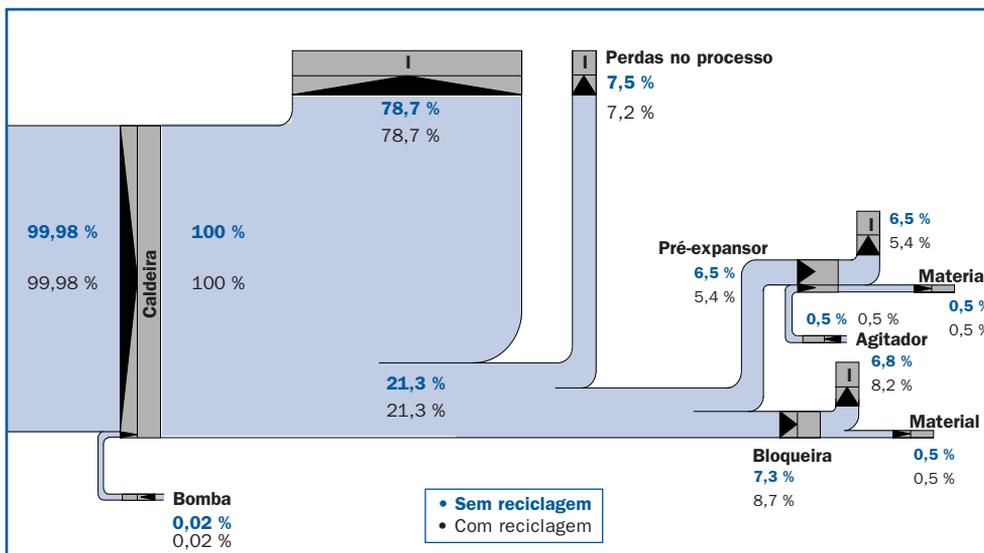


Figura 7 Diagrama de Grassman para a produção de EPS – P1 e P1R (12kg/m³ a 16kg/m³)

Os resultados indicam que, tanto no processo sem reciclagem como no que incorpora a reciclagem, o componente de maior índice de irreversibilidade é a caldeira, cuja eficiência exergética é consideravelmente baixa (cerca de 21,29%), tratando-se, neste caso, de uma antiga caldeira flamotubular com pressão de operação de 0,863MPa, evidenciando a inerente necessidade de melhoria no processo de geração de vapor. Ainda em termos de irreversibilidades, os resultados mostram que os maiores índices consecutivos de irreversibilidades estão associados à bloqueira, seguidos do pré-expansor. Comparando os valores de irreversibilidade das Tabelas 3 e 6, pode-se concluir que existem benefícios exergéticos com a reciclagem, pois há uma diminuição de 17,9% na irreversibilidade da caldeira no processo com reciclagem em relação ao sem reciclagem.

A Tabela 7 mostra a totalização da análise energética dos dois processos de produção do EPS considerados, indicando também a redução percentual. A Figura 8 mostra graficamente os resultados obtidos na análise para os tipos de blocos P1, P1R e REC.

TABELA 7

Totalização da análise energética dos processos sem reciclagem e com reciclagem e a redução percentual energética comparativa entre P1, P1R e REC

TOTAL DA ANÁLISE ENERGÉTICA				
Tipo	Ecomb [kWh/m ³]	QT [kWh/m ³]	WT [kWh/m ³]	QP [kWh/m ³]
P1	25,828	14,494	1,0708	3,617
P1R (reciclado)	21,197	11,919	0,8949	2,785
REC (reciclado)	19,654	11,060	0,8303	2,507

COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS				
Tipo	Ecomb [%]	QT [%]	WT [%]	QP [%]
P1R - P1	17,9	17,8	16,4	23,0
REC - P1	23,9	23,7	22,5	30,7

Obs.: Ecomb – energia do combustível, W_T – trabalho total no ciclo, Q_T – calor total fornecido, e Q_P – calor total perdido para o meio.

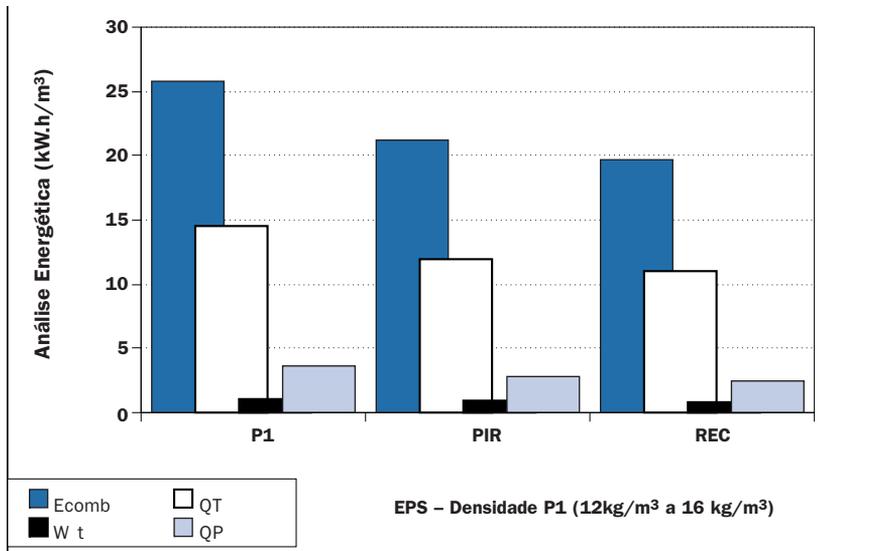


Figura 8 Gráfico comparativo das análises energéticas

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Este estudo mostra e deixa em evidência a vantagem da reciclagem do EPS, tanto pelo aspecto energético como pelo exergético. A redução indireta dos impactos ambientais associados ao sistema primário e secundário, em termos de emissões de poluentes devido à queima de combustível para produção de vapor, assim como quanto ao aspecto de redução de uso de insumos energéticos (petróleo, combustível e eletricidade), também está associada como vantagem da reciclagem do EPS.

Em termos energéticos, os resultados, apresentados na Tabela 7, indicam que, no caso da reciclagem PIR (caso de EPS com densidade tipo P1, com resíduos mais limpos na proporção de mistura 30%), ocorrem consideráveis reduções de uso de combustível, cerca de 17,9%; de calor fornecido ao material (calor de processo), cerca de 17,8%; de eletricidade, cerca de 16,4%, com considerável redução de perdas de calor de processo (condensado, tanque de descanso e bloqueira) ao meio ambiente, num percentual de 23,0%. No caso da reciclagem REC (caso de EPS com densidade tipo P1, com uso de resíduos mais sujos na proporção 40%), os percentuais de redução são mais significativos, com valores de 23,9% no uso de combustível, 23,7% de calor de processo fornecido ao material, 22,5% na eletricidade e 30,7% nas perdas de calor. Fica evidente o benefício energético oriundo da reciclagem.

Em termos exergéticos, os resultados indicam que, tanto no processo sem reciclagem como no que incorpora a reciclagem, o componente de maior índice de irreversibilidade é a caldeira, seguida da bloqueira e do pré-expansor, conforme resultados apresentados nas Tabelas 3 e 6 (com e sem reciclagem). Esses resultados evidenciam a inerente necessidade de melhoria no processo de geração de vapor.

Comparativamente, o processo com reciclagem tem irreversibilidade menor que o processo que não utiliza resíduos de EPS, isto é, a irreversibilidade na caldeira é 17,9% menor no processo com reciclagem.

Finalmente, conclui-se que a contribuição da reciclagem se consolida a partir do momento que ela evita o descarte dos resíduos no meio ambiente e proporciona reduções nos consumos de energéticos e redução de poluentes devido à diminuição da quantidade de uso de combustível associado ao processo de produção de matéria-prima e EPS. No caso do petróleo como matéria-prima extraída da natureza, a reciclagem permite reduzir o uso desse insumo esgotável, tendo em vista que, neste caso, o processo produtivo de EPS é iniciado em um estágio secundário. Considerando ainda as previsões de extinção das atuais reservas mundiais de petróleo, que implicam

aumentos nos custos dos seus derivados, somadas ao crescente risco de colapso energético no Brasil e ao constante aumento da poluição, a reciclagem do poliestireno expandido propicia cenários ideais para minimizar os danos causados por esses fatores, com inerentes benefícios para sociedade em geral.

Não se envolveram estudos econômicos associados à reciclagem do EPS neste trabalho, ficando esses objetivos para um próximo trabalho, em fase de preparação.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Fapesp, pelo apoio financeiro à pesquisa em escopo. Também agradecem à Polinco Indústria e Comércio de Polímeros Ltda. e à General Motors do Brasil pelo fornecimento de dados e auxílio nos ensaios experimentais realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GROTE, Z. V., SILVEIRA, J. L. Processo térmico de reciclagem de poliestireno expandido (isopor): uma realidade para a redução de custos e a conservação de energia. In: *Proceedings of Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*. Uberlândia, MG, 2001.
2. TECHNICAL INFORMATION. *Properties – General*. [CD-ROM]. Ludwigshafen, Alemanha: Catálogo Técnico da BASF, n. 22246, 1992.
3. CENTRAL EPS – Tecnologia e Serviços. *Características Exigíveis para o Poliestireno Expandido*. São Paulo: Catálogo Técnico da BASF, Shell, Resinor e Tupy, (sd).
4. FRANCA, A. B. M.; VIANA, M. F. A.; RODRIGUES, M. F. *Estudo Comparativo entre Laje Convencional e Lajes com Blocos de EPS nas Modernas Construções de Concreto Armado*. João Pessoa: UFP – Universidade Federal da Paraíba, 1997.
5. GRUPO POLIMEX. *Reciclabilidade y ecologia*. [on line]. México: Grupo Polimex. Disponível em: <<http://www.Polimex.com.mx/reciclado.html>>. Acesso em: 1997.
6. STYROPOR. *Expandable Polystyrene – Construction with Styropor*. [CD-ROM]. São Paulo: Catálogo Técnico da BASF, 1993.
7. GROTE, Z. C. V. *Estudo do uso do EPS na construção civil: uma opção para a conservação de energia*. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 1999.

8. INFORMACIÓN TÉCNICA. *Reciclar/Eliminar – Procedimientos de reciclado y eliminación de materiales expandidos de EPS usados*. [CD-ROM]. Ludwigshafen, Alemanha: Catálogo Técnico da BASF, n. 23734, 1998.
9. GROTE, Z. V.; SILVEIRA, J. L. Termodinâmica de um processo de reciclagem de poliestireno expandido (isopor): um estudo de caso. In: *Proceedings of Jornada de Iniciação Científica e Pós Graduação*. Guaratinguetá, SP, 2001.
10. WARK Jr, K. *Advanced thermodynamics for engineers*. McGraw-Hill: New York, 1995.
11. BEDRINGÅS, K. W.; ERTESVÅG, I. S., BYGGSTØYL, S., MAGNUSSEN, B. F. Exergy Analysis of Solid-Oxide Fuel-Cell (SOFC) Systems. *Energy*, v. 22, 1997.
12. UTGIKAR, P. S.; PRASADA RAO, P. J. Thermoeconomic analysis of gas turbine cogeneration plant – a case study. *Journal of Power and Energy*, Part A, 1995.
13. INCROPERA, F.; DEWITT, D. P. *Fundamentos da transferência de calor e massa*. 4. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1998. 494 p.
14. DIAS, R. A. *Impactos da substituição de equipamentos na conservação de energia*. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mecânica). Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 1999.