

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS SANDUÍCHE PARA
ISOLAMENTO TÉRMICO

ANA PAOLA SARTORI

CAXIAS DO SUL, 2009

ANA PAOLA SARTORI

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS SANDUÍCHE PARA
ISOLAMENTO TÉRMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, com a orientação da Prof^a. Dr^a. Janaina da Silva Crespo e co-orientação da Prof^a. Dr^a. Regina Célia Reis Nunes.

CAXIAS DO SUL, 2009

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS SANDUÍCHE PARA
ISOLAMENTO TÉRMICO

Ana Paola Sartori

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Processamento e Simulação de Materiais.

Caxias do Sul, 26 de outubro de 2009.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Janaina da Silva Crespo (Orientadora)

Universidade de Caxias do Sul

Prof^a. Dr^a. Regina Celia Reis Nunes (Co-orientadora)

Universidade de Caxias do Sul

Prof^a. Dr. Sérgio Henrique Pezzin

Universidade Estadual do Estado de Santa Catarina

Prof^a. Dr^a. Mara Zeni Andrade

Universidade de Caxias do Sul

Prof^a. Dr. Paulo Roberto Wander

Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Carlos Alberto Costa

Universidade de Caxias do Sul

TRABALHOS APRESENTADOS

Congresso: 10° Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL), 2009, Foz do Iguaçu, Brasil

Título: Determinação do coeficiente global de transferência de calor “U” em painéis sanduíche para isolamento térmico

Autores: Ana P. Sartori, Paulo R. Wander, Janaina S. Crespo e Regina C. Reis Nunes

Congresso: Congresso de Materiais Compósitos (COMATCOMP), outubro de 2009, San Sebastian, Espanha

Título: Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient “U” in Heat Insulation Sandwich Panels

Autores: Ana P. Sartori, Paulo R. Wander Marcelo Giovanela, Janaina S. Crespo e Regina C. Reis Nunes

ARTIGO EM PREPARAÇÃO

Periódico: Journal of Composite Materials

Título: Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient “U” in Heat Insulation Sandwich Panels

Autores: Ana P. Sartori, Paulo R. Wander, Marcelo Giovanela, Janaina S. Crespo e Regina C. Reis Nunes

AGRADECIMENTOS

À Deus, por tudo.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Janaina da Silva Crespo, pelos ensinamentos, dedicação, amizade e confiança em mim depositada para elaboração deste trabalho, e à minha co-orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Regina Célia dos Reis Nunes, por todo aprendizado, amizade, dedicação e apoio na elaboração desta dissertação.

Aos meus pais, Vilmar Sartori e Udila Mosená Sartori, meu irmão Josimar Sartori pelo amor, paciência e apoio incondicional.

Aos meus amigos e colegas da Randon Implementos, Fernando Bortolini, Léo Roberto Furlan, Joel Capelari, Edson Luiz Godinho, Cleiton Lima Boeno, Karine Guerra, Daiana Valéria Trombetta, Gilberto Kirsten e Vilson dos Santos que muito colaboraram para que este sonho se tornasse realidade.

A todos os meus amigos, que me compreenderam durante este período singular de minha vida.

À Randon Implementos, em especial as áreas de Engenharia de Processos, Engenharia de Furgões Frigoríficos, Engenharia Experimental, Laboratório da Qualidade e Setor de Fabricação de Furgões Frigoríficos que proporcionaram a confecção dos corpos de prova e a execução dos ensaios térmicos e mecânicos.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Wander pelo auxílio na análise dos dados obtidos na área térmica e ao Marcos que nos auxiliou nas termografias realizadas.

Aos professores e colegas do Mestrado em Materiais, em especial ao Prof. Dr. Marcelo Giovanela pelo auxílio nesta reta final e a todos mais que colaboraram, direta ou indiretamente, na elaboração deste trabalho.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS	xi
SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO	3
3 REVISÃO DA LITERATURA	
3.1 Transporte de Produtos Perecíveis	4
3.2 Compósitos Sanduíche	5
3.3 Materiais de Núcleo.....	10
3.3.1. Poliuretano	10
3.3.2. Poliestireno	13
3.3.3. Outros Materiais Isolantes	13
3.4 Materiais de Face (Revestimento)	14
3.4.1. Resina Poliéster com Fibra de Vidro	14
3.4.2. Revestimentos Metálicos.....	14
3.5 Características de Sustentabilidade	15
3.6 Transferência de Calor.....	15
3.7 ABNT/NBR 15457 - Implemento Rodoviário – Carroceria termicamente isolada – Desempenho Térmico.....	16
4 MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 Materiais	17
4.2 Equipamentos e Acessórios	18
4.2.1 Determinação do Índice Global de Transferência de Calor(U).....	18
4.2.2 Determinação das Propriedades Físico-Mecânicas.....	19
4.2.3 Determinação das Propriedades Térmicas	20
4.2.4 Determinação da Morfologia	21
4.3 Métodos	21
4.3.1 Preparação dos Corpos de Prova	21

4.3.2	<i>Obtenção dos Corpos de Prova por Moldagem por Injeção</i>	21
4.3.3	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura da Espuma Rígida de PU</i>	24
4.3.4	<i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	24
4.3.5	<i>Inflamabilidade da Espuma</i>	24
4.3.6	<i>Massa Específica Aparente</i>	24
4.3.7	<i>Resistência Mecânica à Compressão da Espuma</i>	25
4.3.8	<i>Ensaio de Névoa Salina</i>	25
4.3.9	<i>Resistência à Flexão do Compósito</i>	25
4.3.10	<i>Densidade Global</i>	26
4.3.11	<i>Obtenção dos Cubos para ensaio de Condutância</i>	26
4.3.12	<i>Cálculo Teórico do Coeficiente Global</i>	27
4.3.13	<i>Montagem do Experimento</i>	27
4.3.14	<i>Análise Termográfica</i>	29
4.3.15	<i>Dimensionamento dos Cubos</i>	30
4.3.16	<i>Cálculo Experimental do Coeficiente Global</i>	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES		
5.1	<i>Caracterização dos Materiais</i>	34
5.1.1	<i>Caracterização do Poliuretano</i>	34
	a) <i>Microscopia Eletrônica de Varredura da Espuma Rígida</i>	34
	b) <i>Análise Termogravimétrica</i>	35
	c) <i>Condutividade Térmica, Densidade e Resistência à Compressão</i>	36
5.1.2	<i>Caracterização da Resina Poliéster com Fibra de Vidro</i>	39
	a) <i>Análise termogravimétrica</i>	39
5.1.3	<i>Caracterização do Revestimento em Aço Galvanizado e Alumínio</i>	40
	b) <i>Comportamento em Atmosfera Salina</i>	40
5.2	<i>Caracterização dos Compósitos Sanduíches</i>	41
5.2.1	<i>Resistência à Flexão</i>	41
5.2.2	<i>Densidade Global, Peso/m² e Custo</i>	46
5.3	<i>Caracterização dos Cubos Teste</i>	47
5.3.1	<i>Coeficiente Global de Transferência de Calor</i>	47
5.3.2	<i>Análise Termográfica</i>	51
6	CONCLUSÕES	54
7	REFERÊNCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (a) Semirreboque frigorífico; (b) vista interna carga palletizada e (c) vista interna carga pendurada	6
Figura 2: Compósito sanduíche com diversos materiais de face.....	8
Figura 3: Equação química típica da obtenção do poliuretano.....	10
Figura 4: Curva do coeficiente k em função da densidade do PU	11
Figura 5: (a) Ensaio de flexão: medidor de deslocamento linear e (b) painel montado	20
Figura 6: (a) e (b) Detalhamento da obtenção do compósito sanduíche por injeção.....	23
Figura 7: Esquema de ensaio de flexão em 3 pontos	25
Figura 8: (a) e (b) Vista interna e externa dos corpos de prova.....	26
Figura 9: Coordenada dos termopares utilizados no ensaio para obtenção do coeficiente global de transferência de calor	28
Figura 10: Posicionamento dos termopares, da resistência elétrica e do ventilador no cubo...	29
Figura 11: (a) Detalhamento dos pontos de coleta e (b) ilustração do resultado	30
Figura 12: Micrografias do PU – ampliação de 25x (a) e 40x (b).....	34
Figura 13: (a) Curva de TGA e DTG em N ₂ e (b) Curva de TGA e DTG em O ₂	35
Figura 14: Densidade e resistência à compressão do PU	38
Figura 15: Curva de TGA e DTG do PRFV	39
Figura 16: Ensaio em névoa salina (a) inicial, (b) 240 horas e (c) 456 horas do AG.....	40
Figura 17: Ensaio em névoa salina (a) inicial, (b) 240 horas e (c) 456 horas do Alumínio	40
Figura 18: Curva tensão <i>versus</i> deformação dos compósitos sanduíche	42
Figura 19: Energia, deformação e resistência à flexão dos quatro compósitos.....	43
Figura 20: (a) Reforços metálicos do compósito Al Frisado/PU/PRFV e (b) detalhe após ensaio de resistência à flexão.....	44
Figura 21: (a) e (b) Compósito sanduíche PRFV/PU/PRFV posterior ao ensaio de flexão.....	44
Figura 22: (a) e (b) Detalhe da deformação do compósito Aço Galvanizado/PU/AG.....	45
Figura 23: (a) e (b) Detalhe da deformação do compósito Alumínio/PU/Al	45
Figura 24: Características dos painéis propostos quanto à custo, peso e densidade.	46
Figura 25: Coeficiente global de transferência de calor teórico <i>versus</i> experimental <i>versus</i> coeficiente de isolamento térmico do PU	48
Figura 26: Distribuição de temperatura no compósito PRFV/PU/PRFV	52
Figura 27: Distribuição de temperatura no compósito AG/PU/AG	52

Figura 28: Distribuição de temperatura no compósito Al Frisado/PU/PRFV.....53
Figura 29: Distribuição de temperatura no compósito Al/PU/Al 53

ÍNDICE DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1: Parâmetros para moldagem por injeção	22
Tabela 2: Parâmetros para injeção (massa <i>versus</i> tempo de injeção).....	23
Tabela 3: Dimensionamento dos corpos de prova	30
Tabela 4: Condutividade térmica e densidade da espuma de PU dos compósitos sanduíche desenvolvidos	36
Tabela 5: Parâmetros coletados no experimento	48
Quadro 1: Configuração das propostas dos compósitos sanduíche.....	18
Quadro 2: Posicionamento dos termopares no corpo de prova (cubo) no ensaio para obtenção do coeficiente global de transferência de calor	28
Quadro 3: Equações utilizadas no cálculo do coeficiente global de transferência de calor	31

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

A_{ext} : Área externa

AG: Aço Galvanizado

A_{int} : Área interna

Al Frisado: Alumínio conformado

Al: Alumínio

ASTM: *American Society for Testing and Materials Standards*

ATP: Acordo internacional de transportes

C_p : Calor específico

DTG: Derivada da curva da análise termogravimétrica

e : Espessura de poliuretano a ser injetado

EPS: Poliestireno expandido

g : Aceleração da gravidade

Gr: Número de Grashof

HCFC: Di-cloro fluoretano

h_{ext} : Coeficiente de transferência de calor do ar externo

h_{int} : Coeficiente de transferência de calor do ar interno

k : Condutividade térmica do ar

k : Coeficiente de isolamento térmico

L: Comprimento dos painéis

l_1 : Largura do corpo de prova

l_2 : Comprimento do corpo de prova

m : Massa a ser injetada no corpo de prova

MDI: 4,4 diisocianato de difenilmetano

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

Nu: Número de Nusselt (sistema turbulento)

Pr: Número de Prandtl

PRFV: Plástico reforçado com fibra de vidro

PU: Poliuretano

Q: Potência média dissipada no experimento

R: Resistência do compósito sanduíche

TGA: Análise termogravimétrica

TP1 à TP6: Termopares de 1 à 6

U: Coeficiente global de transferência de calor

UCS: Universidade de Caxias do Sul

U_i : Coeficiente global de transferência de calor

v : Volume do corpo de prova a ser preenchido com poliuretano

β : Inverso da temperatura média

δ : Massa específica

ΔT : Variação da temperatura

μ : Viscosidade

RESUMO

Um painel sanduíche consiste essencialmente em duas faces, podendo inclusive possuir reforços metálicos e um núcleo formado normalmente por um polímero celular. As faces deste tipo de painel podem estar unidas por um adesivo estrutural, ou por espuma rígida de poliuretano (PU) injetado diretamente sobre os substratos, quando a união ocorrerá naturalmente. A propriedade de maior relevância que o painel sanduíche deve ter para o transporte de cargas congeladas (0°C a -30°C) ou refrigeradas (7°C a 1°C) é a condutividade térmica (k). Dentro deste contexto o objetivo deste trabalho foi propor e caracterizar painéis sanduíches que possam ser utilizados em câmaras frigoríficas. Este trabalho apresenta as seguintes alternativas para compósito sanduíche: amostra 1 (PRFV/PU/PRFV); amostra 2 (AG/PU/AG); amostra 3 (Frisado/PU/PRFV); e amostra 4 (Al/PU/Al), onde PRFV é poliéster reforçado com fibra de vidro, PU é espuma rígida de poliuretano, AG é aço galvanizado, Frisado é alumínio frisado, e Al é alumínio. Estes painéis foram caracterizados quanto às propriedades físico-mecânicas, térmicas, morfológicas e custo. Foi possível concluir que o sistema (AG/PU/AG) mostrou o melhor custo *versus* desempenho dentre os compósitos propostos.

Palavras-chave: painel sanduíche, condutividade térmica, índice global de transferência de calor “U”, termografia.

ABSTRACT

A sandwich panel consists essentially of two face sheets and may even have metal reinforcements and a core formed, usually by a cellular polymer. The faces of this type of panel may be joined by a structural adhesive or in cases where the core is a rigid polyurethane foam injected directly on the substrates the union will occur naturally. The most relevant property of the sandwich panels for the transport of frozen (0°C a -30°C) or chilled (7°C a 1°C) cargo is thermal conductivity (k). Within this context the objective of this work is to obtain and characterize sandwich panels which can be used in refrigerated chambers. This work presents four alternatives for composite sandwich, sample 1 (PRFV/PU/PRFV), sample 2 (AG/PU/AG), sample 3 (Al Crimpy/PU/PRFV) and sample 4 (Al /PU/Al), where PRFV is a glass fibre reinforced plastics, PU is a rigid polyurethane, AG is galvanized steel, Al Crimpy is crimpy aluminum and Al is aluminum. These composites were characterized by physical-mechanical, thermal, morphologic and cost. It could be concluded that the AG/PU/AG showed the best cost *versus* performance.

Key-words: sandwich panel, thermal conductivity, overall heat transfer coefficient “U” and thermografia.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de produtos perecíveis e de alto grau de fragilidade tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. A forma como estes produtos são transportados e a integridade da carga tem estimulado os órgãos governamentais a utilizarem critérios de inspeção mais rigorosos, o que desencadeou, no Brasil, na elaboração de norma que regulariza e caracteriza carrocerias frigoríficas quanto ao seu índice de isolamento térmico (ABNT/NBR 15457).

O objetivo básico de uma câmara frigorífica é evitar a deteriorização dos produtos alimentícios perecíveis, mediante a manutenção e conservação destes em espaços confinados sob temperaturas controladas. Câmaras frigoríficas, estacionárias ou não, são fabricadas utilizando-se compósitos sanduíche, ou seja, materiais que permitem a conservação em temperaturas controladas devido às suas propriedades de isolamento térmico. Um compósito sanduíche consiste essencialmente de duas faces, podendo inclusive possuir reforços metálicos, e um núcleo, formado normalmente por um polímero celular. As faces deste tipo de compósito podem estar unidas por um adesivo estrutural ou por um núcleo de espuma rígida de poliuretano (PU), injetado diretamente sobre os substratos (DOW *et al.*, 2006).

A propriedade de maior relevância que o compósito sanduíche deve apresentar para o transporte de cargas congeladas (-30 a 0°C) e refrigeradas (1 a 7°C) é o coeficiente global de transferência de calor (U). Dentro deste contexto, este trabalho teve por objetivo preparar e caracterizar compósitos sanduíche para o uso em câmaras frigoríficas e que atendam a norma ABNT/NBR 15457, que caracteriza uma carroceria como fortemente isolada quando a mesma possui um coeficiente de isolamento térmico inferior a 0,40W/m²K.

Neste trabalho são propostas quatro alternativas de compósito sanduíche tendo como núcleo a espuma rígida de poliuretano (PU) e como substrato os seguintes materiais: placas de poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV/PU/PRFV); placas de aço galvanizado pré-pintado com revestimento poliuretânico através do processo de coil coating* (AG/PU/AG); placas de alumínio frisado pré-pintado com revestimento poliuretânico através do processo de coil coating (Al Frisado/PU/PRFV) e placas de alumínio pré-pintado com revestimento poliuretânico através do processo de coil coating (Al/PU/Al). Todos os compósitos foram analisados quanto ao coeficiente global de transferência de calor, propriedades físicas, mecânicas e morfológicas, tendo sido avaliado também o custo final para cada compósito proposto.

* Processo contínuo, totalmente automatizado para pintura de bobinas metálicas. Reúne inúmeras vantagens sobre sistemas convencionais, destacando-se a aderência e a uniformidade da camada dos revestimentos aplicados. (Fonte: National Coil Coating Association).

2. OBJETIVO

O objetivo desta Dissertação foi desenvolver e caracterizar compósitos sanduíche para o uso em câmaras frigoríficas no transporte de produtos perecíveis de forma congelada (-30 a 0°C) e refrigerada (1 a 7°C), com baixo custo e alto desempenho quanto às propriedades mecânicas e ao isolamento térmico.

Para atingir esses objetivos, serão realizadas as seguintes atividades:

- ✓ Fabricação de corpos de prova específicos para os ensaios de: coeficiente global de transferência de calor (U) e resistência à flexão;
- ✓ Desenvolvimento de método de coleta de parâmetros para a determinação do parâmetro U das propostas de compósitos;
- ✓ Análise dos parâmetros obtidos através de modelos matemáticos específicos para a determinação do parâmetro U;
- ✓ Análise das propriedades físicas, mecânicas e morfológicas dos compósitos desenvolvidos;
- ✓ Cálculo de custos das alternativas propostas.

Este trabalho apresenta relevância na área de compósitos sanduíche para câmaras frigoríficas por permitir controle no desempenho térmico de uma câmara estacionária ou não, destinada basicamente a manter a temperatura interna para a conservação de produtos perecíveis. O método de ensaio desenvolvido nesta Dissertação propicia o controle da eficiência no isolamento térmico de forma não destrutiva, ágil e de baixo custo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Transporte de produtos perecíveis

O transporte de produtos perecíveis e de alto grau de fragilidade tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. A forma como estes produtos são transportados e a integridade da carga tem estimulado órgãos governamentais a criar critérios de inspeção mais rigorosos, o que desencadeou na elaboração da norma NBR 15457, que regulariza e caracteriza carrocerias frigoríficas quanto ao seu desempenho térmico (Torreira, 1980).

O transporte de produtos alimentares para consumo humano deve garantir o estado natural e a qualidade dos produtos transportados sendo estes refrigerados ou não. O objetivo é impedir o seu contágio e degradação durante o transporte (Banco de Alimentos e Colheita Urbana, Transporte de Alimentos, 2003). Além disso, esse transporte deve apresentar determinadas características, e seguir diversas normas, para que a segurança alimentar dos consumidores não venha a ser prejudicada. Dentre os veículos de transporte, os de alimentos perecíveis são os que exigem maiores controles no que se refere à temperatura e higiene (Carnes, derivados e produtos cárneos, 1988).

O interior do veículo para o transporte de produto resfriado, refrigerado ou congelado deve ser feito com material liso, não tóxico e impermeável. O produto refrigerado deve ser mantido entre 1 e 7°C, o resfriado entre 7 e 10°C, e os congelados entre -30 e 0°C, tendo sempre em conta as especificações do fabricante. Este tipo de transporte refere-se a carnes, sucos, creme vegetal e margarina, gorduras em embalagens metálicas, produtos de pastelaria que necessitam de controle de temperatura e refeições prontas, gelados, congelados ou supercongelados. Este tipo de transporte necessita um controle de temperatura muito rígido e a adequação às normas específicas para estes (Transporte de alimentos perecíveis, 2008).

Os alimentos perecíveis estão regulamentados pela norma geral e pelo acordo internacional de transportes (APT). Este acordo tem por objetivo garantir a durabilidade com que os alimentos são transportados para o consumo, assim como o controle das condições técnicas necessárias do veículo (ATP, 2008).

O objetivo básico de funcionamento de uma câmara frigorífica é evitar a deteriorização dos produtos alimentícios perecíveis, mediante a manutenção e conservação destes em espaços confinados sob baixas temperaturas. Há produtos como a carne e o peixe congelado que podem ser armazenados por um período de 10 meses, em temperaturas entre -25 e -20°C , sem perda sensível de suas características peculiares. Outros produtos como frutas e verduras, em temperaturas próximas a 0°C , conservam praticamente íntegras suas propriedades durante vários meses (Torreira, 1980).

O equipamento frigorífico adequado deverá retirar calor do interior da câmara, para diminuir a temperatura, mantendo as mercadorias sob refrigeração. Os materiais utilizados para o isolamento térmico reduzem a transmissão de calor através das superfícies, devido ao seu baixo coeficiente de condutividade térmica. Em termos práticos, a função da câmara frigorífica é armazenar o frio produzido pelo aparelho de refrigeração no interior da câmara (Torreira, 1980).

3.2. Compósitos sanduíche

Compósitos sanduíche são utilizados na construção de câmaras frigoríficas estacionárias, veículos para transporte de congelados (-30 a 0°C) e refrigerados (1 a 7°C), além de outros fins como a construção civil (Naruse *et al.*, 2002; Seok Choi *et al.*, 2007; Shawkat *et al.*, 2008 e Alvarado *et al.*, 2009). Estes compósitos, por serem formados por camadas de diferentes materiais permitem grande flexibilidade nas propostas para este projeto, principalmente quanto a custos e propriedades, como mecânicas e térmicas.

Um compósito sanduíche consiste essencialmente de duas faces, podendo inclusive possuir reforços metálicos e um núcleo formado normalmente por um polímero celular. As faces deste tipo de painel podem estar unidas através de um adesivo ou em casos onde o núcleo é de espuma rígida de poliuretano, a união ocorrerá pelo próprio polímero (Bustamante, 2000; DOW *et al.*, 2006). Uma estrutura sanduíche resulta da união por colagem ou soldagem de duas faces e um núcleo extremamente leve que é utilizado para manter afastadas as faces. Estes compósitos apresentam ótimas propriedades, como baixíssima densidade, alta resistência à flexão e excelentes características quanto ao isolamento térmico (Gay & Hoa, 2007).

A propriedade de maior relevância que o compósito sanduíche deve ter para o transporte de cargas congeladas ou refrigeradas é o coeficiente global de transferência de calor (U). Atualmente, o conceito de compósito sanduíche utilizado no transporte de produtos perecíveis, em sua grande maioria, apresenta coeficiente global de transferência de calor (U) acima do valor que caracteriza uma carroceria como fortemente isolada, ou seja, $\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$, estando na maioria das vezes, caracterizada como normalmente isolada, de $0,70$ à $0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ABNT/NBR 15457). A Figura 1(a) apresenta uma imagem genérica de um furgão frigorífico. Nas Figuras 1(b) e 1(c) são apresentados o interior de um furgão frigorífico e a forma como a carga é disposta, respectivamente.



Figura 1(a): Semirreboque Frigorífico (compósito sanduíche aplicado nas laterais e teto)



Figura 1(b): Vista interna de um semirreboque frigorífico para pallet (produtos embalados em caixas ou estivados)



Figura 1(c): Vista interna de um semirreboque frigorífico para carne pendurada

As características importantes e desejáveis dos compósitos sanduíche são as boas propriedades estruturais aliadas à baixa densidade e a excelentes propriedades de isolamento térmico (DOW *et al.*, 2006). A Figura 2 mostra diversas propostas para compósitos sanduíche.



Figura 2: Compósitos sanduíche com diversos materiais de face e de núcleo

O uso dos compósitos sanduíche surgiu com a necessidade da construção de materiais resistentes e leves, como parte da estrutura de materiais bélicos da Segunda Guerra, principalmente na aviação. Embora possam ser encontrados estudos anteriores, foi nesta época que foi desenvolvida e aprimorada sua grande utilidade e vantagem de construção. Após o término da guerra e com a corrida armamentista, cresceu bastante o uso de materiais alternativos, com diferentes configurações, como o compósito sanduíche, que são utilizados amplamente no projeto de veículos aeronáuticos, espaciais, na construção civil, em painéis isotérmicos, etc (Bustamante, 2000).

Uma construção sanduíche típica consiste de três camadas: duas faces rígidas e relativamente finas separadas por um material com baixa densidade. As faces podem ser de material isotrópico ou um composto laminado. O núcleo pode ser de alumínio, espuma, madeira balsa, poliestireno expandido, poliuretano ou variações destes. A arquitetura da estrutura sanduíche provê excepcional resistência à flexão sem necessariamente aumentar o peso. Como resultado, as construções sanduíche possuem menores deformações laterais e maiores resistência à deformação (Bustamante, 2000).

A história do compósito sanduíche se confunde com a história da construção para a indústria aeronáutica, que busca alternativas de materiais com baixa densidade e excelentes

propriedades estruturais. Em 1938, foi utilizado, na construção do avião Morane 406, compósitos sanduíche com núcleo de madeira revestida com faces de ligas de baixa densidade (Gay & Hoa, 2007).

Materiais como este são utilizados desde 1950 com *honeycombs (alveolar)*, sendo que este tipo de estrutura permite formas complexas de núcleo. Materiais como fibra de boro e epóxi começaram a ser desenvolvidos neste tipo de estrutura a partir de 1960. Para compósitos com fibra de carbono/epóxi e fibra de Kevlar(aramida)/epóxi, os estudos iniciaram na década de setenta (Gay & Hoa, 2007).

Um dos primeiros trabalhos sobre compósitos sanduíche foi publicado por Reissner (1948). Ele apresentou as equações diferenciais básicas para a deflexão de uma placa sob tensões no plano médio do núcleo e uma variação da tensão sob a espessura das faces. Yu (1960) publicou alguns trabalhos sobre vibrações em uma dimensão em um painel sanduíche. Chan & Cheung (1972) utilizaram o método de elementos finitos para a resolução de problemas de flexão e vibração e desenvolveram as equações para uma placa sanduíche multicamadas. Na formulação destes elementos, foram consideradas a resistência à flexão das camadas das faces e a deformação por cisalhamento independente entre o núcleo e as faces.

Estudos mais recentes e relevantes para este trabalho estão relacionados ao uso de compósitos sanduíche para outras aplicações, como a indústria automotiva em geral e a construção civil.

3.3. Materiais de Núcleo (Isolantes)

3.3.1. Poliuretano (PU) - Os poliuretanos são polímeros produzidos pelo processo de policondensação em massa. O poliuretano é obtido pela mistura de um poliol e um isocianato, por meio da reação química descrita na Figura 3 (Vilar, 2005).

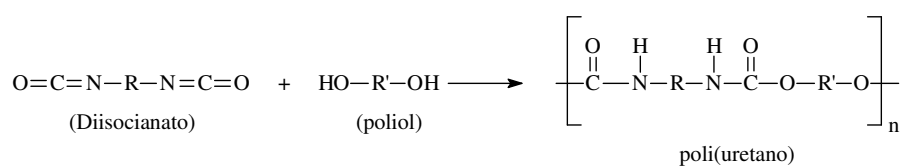


Figura 3: Equação química típica da obtenção do PU

O sistema poliuretânico normalmente utilizado para espumas rígidas é a base de uma mistura de polióis poliéteres, devido principalmente a sua funcionalidade e seu alto teor de hidroxilas e do isocianato (MDI) (4,4-diisocianato de difenilmetano) tendo como catalisador uma amina terciária. Neste sistema é também incorporado um tipo de silicone, que atua como surfactante para aumentar a atividade superficial, e o agente de expansão auxiliar (AEA) é o dicloro-1-fluoretano (HCFC-141b), que fica retido nas células fechadas das espumas rígidas proporcionando a baixa condutividade térmica (Vilar, 2005).

A relação de mistura utilizada nesta composição é 100 partes de poliol para 110 partes de isocianato com $\pm 5\%$ de tolerância na proporção de mistura. A densidade livre da espuma fica na ordem de 28 a 32 kg/m³ e para a peça moldada, escolhe-se a densidade na faixa de 38 a 42 kg/m³ que é a região de menor coeficiente de condutividade térmica (“k”), conforme pode ser observado na Figura 4 (DOW, 2009).

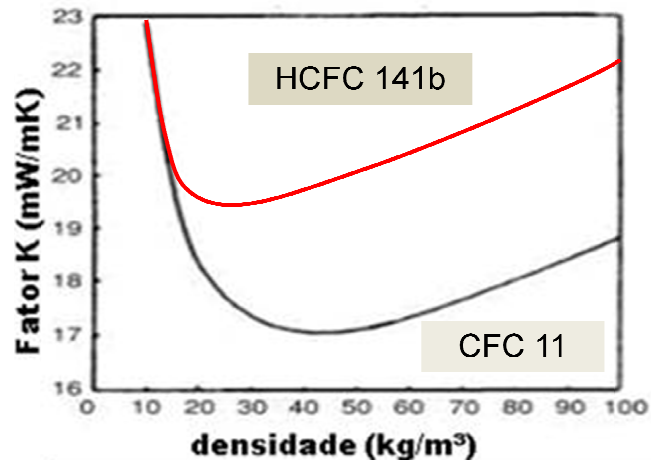


Figura 4: Curva de condutividade térmica (k) em função da densidade para uma espuma rígida de PU com agente de expansão HCFC 141b e CFC 11 (Vilar, 2005)

A baixa condutividade térmica das espumas rígidas de poliuretano resulta da sua baixa densidade e da sua estrutura de células pequenas e fechadas, cheias com agentes de expansão auxiliares (AEA). A condutividade térmica final de uma espuma (“k”) é determinada em função das contribuições devido à radiação, condutividade térmica do gás e do polímero e densidade da espuma. A curva da condutividade térmica (k) em função da densidade mostra um mínimo em torno de 30 a 50 kg/m³, o qual pode ser explicado em termos do balanço entre a condução do calor por radiação na fase gás e pelo esqueleto polimérico. A radiação é importante em densidades baixas, onde o número de janelas celulares por unidade de volume é pequeno. A contribuição da radiação diminui com o aumento do número de células fechadas por unidade de volume nas densidades maiores e a condutividade térmica (k) também decresce. Em altas densidades este efeito é contraposto pelo aumento da condutividade do PU, o que explica a elevação do fator “k”. A redução do tamanho das células é uma forma de diminuir o valor de k pela redução da radiação. A condutividade térmica do gás contribui com cerca de 40% do total do coeficiente “k” (Vilar, 2005).

A Agência de Proteção do Meio Ambiente (EPA) dos Estados Unidos e Nações Unidas têm alertado sobre a retirada dos hidroclorofluorcarbonados (HCFC's) utilizados como agentes de expansão física na fabricação de espumas de poliuretano. Estudos foram realizados com o ciclo de vida de vários agentes de expansão considerados como alternativa potencial para substituição dos HCFC's na manufatura de espuma rígida de poliuretano como isolamento térmico. O ciclo de vida do ciclopentano não produz impacto à camada de ozônio e elevação significativa do aquecimento global se comparado com o HCF-134a que, por sua vez, é menor que os efeitos causados pelo seu antecessor HCFC-22 (Katz, 2003).

Segundo Modal (2004), as propriedades da espuma rígida de poliuretano são significativamente afetadas pelo tamanho, distribuição e morfologia das células. As espumas são feitas a partir de diferentes tipos e teores de surfactantes, com variação da concentração de agentes de expansão, aditivos e catalisadores. Aumentando a concentração de surfactante tem-se a redução do tamanho celular. O aumento da proporção de catalisadores organometálicos sobre o total de catalisadores usados ocasiona uma redução ainda maior no tamanho celular.

O poliuretano como material de núcleo é comumente encontrado na literatura em aplicações que vão desde o transporte de produtos perecíveis até a construção civil (Griffith *et al.*, 1995; Swanson, 2003; Vaidya *et al.*, 2003; Sharma *et al.*, 2004; Bogdan *et al.*, 2005; Sarier, 2008 e Shawkat *et al.*, 2008).

3.3.2. Poliestireno (EPS) - O poliestireno expandido é um material que apresenta propriedades de isolamento térmico e que pode ser utilizado em câmaras frigoríficas estacionárias ou não.

Foi descoberto em 1949 pelos químicos Fritz Stastny e Karl Buchholz, quando trabalhavam nos laboratórios da Basf, na Alemanha. O EPS é um polímero celular rígido, resultante da polimerização do estireno em água. Em seu processo produtivo não se utiliza o gás CFC ou qualquer um de seus substitutos. Como agente expensor para a transformação do EPS, emprega-se o pentano. O produto final é composto de pérolas de até 3 mm de diâmetro, que se destinam à expansão. No processo de transformação, essas pérolas são submetidas à expansão em até 50 vezes o seu tamanho original, através de vapor, fundindo-se e moldando-se em formas diversas. Expandidas, as pérolas consistem em até 98% de ar e apenas 2% de poliestireno. Em 1m³ de EPS, por exemplo, existem de 3 a 6 bilhões de células fechadas e cheias de ar. Os produtos finais de EPS são inodoros, não contaminam o solo, água e ar, são recicláveis e podem voltar à condição de matéria-prima.

O EPS é comprovadamente um material isolante, muito utilizado na construção civil (Seok Choi, 2007). Destaca-se também, por sua baixa densidade, resistência, facilidade no manuseio e baixo custo. Pode-se tomar como valor de referência que 10 mm de PU tem a mesma capacidade de isolamento que uma camada de 15 mm de EPS (Luckmann, 1999).

3.3.3. Outros materiais isolantes - Existem vários tipos de materiais que foram utilizados para a propriedade de isolamento térmico ao longo dos tempos. Podem ser citados, desde o próprio ar até os isolantes de origem mineral (Galgano *et al.*, 2009) como a lã de vidro e a lã de rocha. Os materiais de núcleo comumente utilizados e que

apresentam o melhor desempenho térmico com um custo/benefício interessante são o PU e o EPS.

3.4. Materiais de Face (Revestimento)

3.4.1. Resina poliéster com fibra de vidro (PRFV 30%) - Painéis sanduíche com faces produzidas por resina poliéster reforçada com fibra de vidro são muito menos densos e mais elásticos que faces produzidas com metais, e são os mais usados para veículos comerciais (carrocerias, semi-reboques, dentre outros). Em relação a materiais compósitos, o PRFV tem um custo relativamente menor se comparado ao reforço por fibras de carbono ou poliamida aromática (aramida) (DOW *et al.*, 2006).

O material denominado como PRFV consiste em fibras alternadas de vidro distribuídas aleatoriamente ou não em uma matriz polimérica de resina poliéster insaturada. O resultado desta combinação proporciona as propriedades relevantes do termorrígido, como alta flexibilidade e resistência ao impacto, baixa densidade e boas propriedades de isolamento térmico, com a alta rigidez da fibra de vidro. A rigidez do compósito cresce em função do aumento do teor de fibra de vidro. A resina poliéster insaturada é obtida pela reação entre anidrido ftálico, anidrido maleico e glicol propilênico (Mano, 1985).

3.4.2. Revestimentos metálicos (alumínio e aço galvanizado) - Faces de alumínio ou metal galvanizado podem resistir mais a cargas pesadas, mas são mais densos que revestimentos poliméricos. Com pré-tratamento e pintura, sua resistência ao intemperismo e à corrosão aumenta. Uma vantagem deste tipo de revestimento metálico é que são

selantes herméticos, enquanto substratos de PRFV podem sofrer ataque através da umidade e de gases (DOW *et al.*, 2006 e Alvarado *et al.*, 2009).

Alguns estudos encontrados na literatura incluem revestimentos metálicos em compósitos sanduíche para diversas aplicações, incluindo o campo da refrigeração, onde o isolamento térmico ou a conservação de calor são muito importantes (Griffith *et al.* 1995; Naruse *et al.*, 2002; Tian *et al.*, 2007).

3.5. Características de sustentabilidade

O poliuretano é o material de núcleo comum a todas as propostas estudadas. Por ser um material termorrígido apresenta dificuldades em sua reciclagem, porém já existem métodos de reprocessamento onde a espuma é submetida a uma pirólise na qual se obtêm um novo polioliol, porém, com características inferiores às anteriormente observadas.

Para os materiais de face, o PRFV é um termorrígido, o que gera a necessidade de descarte em aterro sanitário. Para os materiais metálicos, como o aço galvanizado (AG) e o alumínio o aspecto ambiental é favorável, visto que, ambos podem ser reprocessados através de temperatura em usina.

3.6. Transferência de Calor

É a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor onde os corpos buscam o equilíbrio térmico (Quites e Lia - Wikipédia, 2009). A transferência de calor pode ocorrer por três mecanismos distintos, conforme segue (Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2008):

a) *Condução*: passagem de calor de uma região para outra de um mesmo corpo ou de um corpo para outro quando estes entram em contato.

b) *Radiação*: emissão de energia da superfície de um corpo sob a forma de ondas eletromagnéticas.

c) *Convecção*: passagem de calor de uma região para outro de um fluido em consequência do movimento relativo das partículas do mesmo.

3.7. ABNT/NBR 15457 – Implemento Rodoviário – Carroceria termicamente isolada – Desempenho Térmico

Esta norma especifica os requisitos de desempenho térmico para carrocerias termicamente isoladas com ou sem unidade frigorífica, destinadas ao transporte de produtos perecíveis por via terrestre.

A classificação para uma carroceria frigorífica é classe A até E, sendo que, cada classe corresponde a uma faixa de temperatura o qual o produto perecível pode ser transportado. Para o transporte de produtos congelados, a classificação da carroceria deve ser classe E, ou seja, possuir um coeficiente efetivo de isolamento térmico $\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ABNT/NBR 15457). Nesta dissertação, o desenvolvimento e caracterização dos compósitos sanduíche têm como objetivo atender ao transporte de classificação E.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Foram confeccionados na Empresa Randon Implementos e Participações S/A, quatro diferentes tipos de compósitos sanduíche. Os materiais confeccionados foram selecionados com base em pesquisa e dados coletados ao longo do desenvolvimento de produtos para o segmento de transporte e conservação de produtos perecíveis que ocorre na engenharia da Randon há algumas décadas.

Os materiais que compõem as quatro configurações de compósitos foram obtidos junto aos fornecedores e são os que seguem:

- ✓ Sistema de espuma rígida de poliuretano para isolamento térmico, lote WA1731O202 para o poliálcool poliéter, e lote VL1731O202 para o isocianato (MDI) fornecido pela DOW Casa de Sistemas;
- ✓ Chapa de aço galvanizado por imersão a quente com espessura de 0,43 mm, tipo 02/ST – 02, lote 251217, pré-pintado com sistema poliuretânico bi-componente de alta resistência ao intemperismo, através do processo coil coating fornecida pela Usiminas e pintada pela Tekno;
- ✓ Chapa de alumínio liga 5052 H38, com espessura de 0,70 mm, lote 0000250157, pré-pintado com sistema poliuretânico bi-componente de alta resistência ao intemperismo, através do processo coil coating fornecida pela Novelis e pintada pela Tekno;
- ✓ Poliéster reforçado com 30% de fibra de vidro (PRFV), na espessura de 1,9 mm, (tipo L-1062) fornecido pela Kemlite.

As configurações das quatro propostas de compósitos sanduíche são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Configuração das propostas dos painéis sanduíche

AMOSTRA	Revestimento externo (chapa)	Núcleo celular (espuma)	Revestimento interno (chapa)
PRFV/PU/PRFV	PRFV (1,9 mm)	PU (55 mm)	PRFV (1,9 mm)
AG/PU/AG	AG (0,43 mm)	PU (55 mm)	AG (0,43 mm)
Al Frisado/PU/PRFV	Al Frisado (0,70 mm)	PU (55 mm)	PRFV (1,9 mm)
Al/PU/Al	Al (0,70 mm)	PU (55 mm)	Al (0,70 mm)

PRFV- placa de poliéster com fibra de vidro; PU - espuma de poliuretano; AG - placa de aço galvanizado; Al Frisado - placa de alumínio frisado; Al - placa de alumínio.

4.2. Equipamentos e Acessórios

4.2.1. Determinação do índice global de transferência de calor (U) e condutividade térmica da espuma de poliuretano - Para a realização do experimento onde foram coletados os dados que permitiram a obtenção do coeficiente global de transferência de calor (U) foram utilizados os acessórios abaixo listados. Para todas as amostras a forma de coleta dos dados foi mantida.

- ✓ Notebook Toshiba;
- ✓ Câmera termográfica thermaCAM T360 (Incerteza de $\pm 2\%$ na determinação da temperatura);
- ✓ Equipamento lasecomp (condutividade térmica de espumas);
- ✓ Software de aquisição e análise de dados CATMAN v 4.0;
- ✓ Multímetro digital Fluke 87V/E2 – True RMS;

- ✓ Sistema de aquisição de dados MGC HBM;
- ✓ 06 Termopares tipo K (Incerteza de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ na determinação da temperatura);
- ✓ 01 Microventilador (220V, 0,07A, Marca Ventisilva);
- ✓ 01 Resistência elétrica;
- ✓ 01 Dimer (220V, potência 8.000W);

4.2.2. Determinação das propriedades físico-mecânicas - Para a determinação da densidade global, densidade de núcleo da espuma, resistência à compressão da espuma, resistência à flexão do compósito e ensaio em névoa salina foram utilizados os equipamentos abaixo listados:

- ✓ Equipamento de ensaio universal - marca EMIC, modelo DL 3000 (célula de carga de 500 kg) (Incerteza de $\pm 1\text{N}$ na determinação da força);
- ✓ Balança analítica marca Sartorius, modelo 2842 (Incerteza de 0,001g na determinação da massa);
- ✓ Paquímetro marca Mitutoyo de 300 mm (Incerteza de 0,01mm);
- ✓ Balança marca Toledo, modelo 3400 (Incerteza de $\pm 1\text{g}$ na determinação da massa);
- ✓ Câmara de ensaio Corrotest CA-680 (ensaio de névoa salina);
- ✓ Notebook Dell;
- ✓ Software de aquisição e análise de dados CATMAN v 4.0;
- ✓ Sistema de aquisição de dados Spider 8 - marca HBM;
- ✓ Célula de Carga com capacidade de 100 kN - marca HBM (Incerteza de 0,00001 V/V);
- ✓ Medidor de deslocamento linear LVDT (Wire Sensor) - Marca MicroEpsilon (ensaio de flexão) (Incerteza de 0,1mm).

Nas Figuras 5a e 5b são ilustrados respectivamente, o dispositivo usado para ensaio de flexão e o painel sanduíche já montado para o ensaio.



Figura 5 (a) – Ensaio de flexão: medidor de deslocamento linear



Figura 5 (b) – Ensaio de flexão: painel sanduíche montado

4.2.3. Determinação das propriedades térmicas - Para a determinação das temperaturas de degradação dos materiais poliméricos que compõem as amostras analisadas (PU e PRFV), foi utilizado analisador termogravimétrico Shimadzu TGA-50.

Para a classificação da espuma rígida de poliuretano quanto à inflamabilidade foi utilizado o bico de Bunsen e um cronômetro digital.

4.2.4. Determinação da morfologia - A morfologia do material de núcleo foi determinada no microscópio eletrônico de varredura marca PHILIPS modelo XL30. As amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido e metalizadas com ouro em um metalizador modelo P-S2 DIODE SPUTTERING SYSTEM. As imagens foram obtidas com tensão de aceleração dos elétrons de 10 kV e com aumento de 25 e 40 vezes.

4.3. Métodos

4.3.1. Preparação dos corpos de prova - Os corpos de prova foram confeccionados em tamanho reduzido em relação às placas de compósito comerciais. As dimensões dos compósitos utilizados nas carrocerias para transporte de alimentos variam de 2,4 m a 2,60 m na altura e de 13,0 m a 15,0 m no comprimento. Nesta Dissertação as dimensões dos corpos de prova para as caracterizações propostas foram de 1,00m x 1,00m.

Para cada alternativa proposta (vide quadro 1) foram confeccionados seis corpos de prova, que foram utilizados para o ensaio de obtenção do coeficiente global de transferência de calor (U) e determinação das propriedades físico-mecânicas.

4.3.2. Obtenção dos corpos de prova por moldagem por injeção - Os corpos de prova foram obtidos por moldagem por injeção em uma injetora de baixa pressão. Este equipamento requer controles constantes em relação à proporção na mistura e vazão dos componentes para a formação da espuma rígida de poliuretano. Com base nos dados de processamento, apresentados na Tabela 1, são calculados os tempos necessários para a injeção da espuma dos componentes polioli e isocianato para a obtenção da densidade desejada para a espuma moldada.

Tabela 1: Parâmetros para a moldagem por injeção

Componente	Temperatura (°C)	Pressão Injeção (MPa)	Rotação Motor (rpm)	Vazão Seca (g/s)
Poliol (A)	26,6	0,386	893	182
Isocianato (B)	27,4	0,814	873	182

Para o cálculo de volume da espuma rígida de poliuretano são necessários os dados dimensionais dos painéis, bem como a densidade pretendida para a espuma moldada.

A Equação 1 apresenta o cálculo para o volume de espuma rígida de poliuretano que deve ser injetado no corpo de prova. Com base nos dados encontrados na Equação 1 é obtida a massa de espuma rígida que deve ser injetada no corpo de prova, utilizando-se a Equação 2.

$$v = (l_1 \times l_2 \times e) \quad (\text{Equação 1})$$

$$m = (v \times \delta) \quad (\text{Equação 2})$$

onde,

v é o volume do corpo de prova a ser preenchido com poliuretano (m³)

l_1 é a largura do corpo de prova (m)

l_2 é o comprimento do corpo de prova (m)

e é a espessura de poliuretano a ser injetado (m)

m é a massa a ser injetada no corpo de prova (kg)

δ é a densidade desejada para a espuma (kg/m³)

Para a moldagem por injeção em equipamento de baixa pressão, o parâmetro que caracteriza o volume injetado é função do tempo de injeção. Com base nas Equações 1 e 2 e nos dados obtidos nas avaliações dimensionais, foram calculados os tempos de injeção que constam na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros para injeção (massa *versus* tempo de injeção)

Amostra	Altura (m)	Largura (m)	Espessura (m)	Volume (m ³)	Massa (kg)	t (s)
PRFV/PU/PRFV	0,990	0,990	0,056	0,055	2,305	12,7
AG/PU/AG	0,986	0,980	0,056	0,054	2,273	12,5
Al Frisado/PU/PRFV	0,983	0,980	0,056	0,054	2,266	12,4
Al/PU/Al	0,987	0,980	0,056	0,054	2,275	12,5

A Figura 6 ilustra a forma como os corpos de prova foram obtidos e o porta-molde utilizado na obtenção dos mesmos.



Figura 6 – Detalhamento da obtenção do painel sanduíche por injeção: (a) painel sanduíche sendo injetado e (b) painel sanduíche aguardando a cura do PU

4.3.3. Microscopia eletrônica de varredura da espuma rígida de PU (MEV) –

A morfologia das amostras foi obtida em um microscópio eletrônico de varredura marca PHILIPS modelo XL30, do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina. As amostras foram fraturadas em nitrogênio líquido e metalizadas em um metalizador modelo P-S2 DIODE SPUTTERING SYSTEM. As imagens foram obtidas com tensão de aceleração dos elétrons de 10 kV e com aumento de 25 e 40 vezes.

4.3.4. Análise termogravimétrica (TGA) da espuma rígida de PU e da resina poliéster (PRFV) - As análises termogravimétricas foram realizadas em um analisador termogravimétrico Shimadzu TGA-50, com uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ em atmosfera de nitrogênio e ar sintético, sob um fluxo de 50 mL min^{-1} . As análises foram realizadas da temperatura ambiente até 900°C , sendo a massa de 10 mg.

4.3.5. Inflamabilidade da espuma - O PU foi classificado quanto à inflamabilidade, segundo norma ABNT/NBR 7358. O PU desta Dissertação recebeu classificação R1 para os cinco corpos de prova que, segundo a norma, significa que o material é retardante à chama.

4.3.6. Massa específica aparente em espuma rígida para isolamento térmico - O material de núcleo (PU) de cada compósito sanduíche desenvolvido foi submetido à verificação da massa específica aparente baseada na norma ABNT/NBR 11506.

4.3.7. Resistência mecânica à compressão da espuma rígida - A espuma rígida de poliuretano do núcleo dos compósitos desenvolvidos foi submetida ao ensaio de resistência à compressão. A determinação desta propriedade para poliuretanos celulares

rígidos é expressa pela tensão compressiva máxima que um material suporta a 10% de deformação, ou no seu colapso em caso da força máxima em MPa a ser atingida antes de 10% de sua deformação. O método foi baseado na ABNT/NBR 8082.

4.3.8. Ensaio de névoa salina (salt spray)- Os materiais metálicos de revestimento utilizados (aço galvanizado e alumínio pré-pintado) foram submetidos ao ensaio em névoa salina segundo norma ASTM B117. Para o ensaio foram utilizadas as seguintes condições: pressão do ejetor: 0,8 kgf/cm²; temperatura da câmara igual à 35° C e solução de cloreto de sódio com 5% de concentração peso/volume.

4.3.9. Resistência à flexão com apoio em três pontos - O ensaio realizado para a determinação da resistência à flexão foi do tipo três pontos, com a adaptação de um dispositivo desenvolvido na área da engenharia experimental da Randon Implementos. O corpo de prova, com dimensões aproximadas de 1,00 m x 1,00 m, foi apoiado em dois pontos, e submetido, na parte central, à flexão por um apoio de mesma dimensão da largura do corpo de prova. Três corpos de prova de cada compósito sanduíche proposto (PRFV/PU/PRFV, AG/PU/AG, Al Frisado/PU/PRFV e Al/PU/Al) foram ensaiados, sendo que o resultado do ensaio corresponde à média aritmética das determinações. A Figura 7 ilustra esquematicamente um exemplo de ensaio de flexão em três pontos.

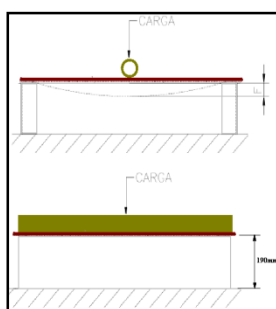


Figura 7: Esquema de um ensaio de resistência à flexão em 3 pontos

Todos os ensaios de flexão foram realizados a uma temperatura de 23°C e umidade relativa do ar na faixa de 76%.

4.3.10. Densidade global - Após a determinação do coeficiente global de transferência de calor (U), os cubos foram desmontados preservando os painéis sanduíche injetados, para a determinação da densidade global. Para cada proposta foram cortados novos corpos de prova com dimensões aproximadas de 270 mm x 300 mm para determinação da densidade global através da verificação da massa específica do compósito.

4.3.11. Obtenção dos cubos (corpos de prova) para ensaio de condutância - Após a moldagem por injeção e estabilização dos compósitos sanduíche propostos (72 h), foram montados os corpos de prova na forma de cubos para a realização do ensaio de condutância térmica. Com a realização deste ensaio, obtêm-se o índice global de transferência de calor (U).

A Figura 8 mostra a forma como os cubos foram montados. Na união dos seis painéis para a montagem destes corpos de prova de cada amostra foi utilizado adesivo monocomponente poliuretânico.

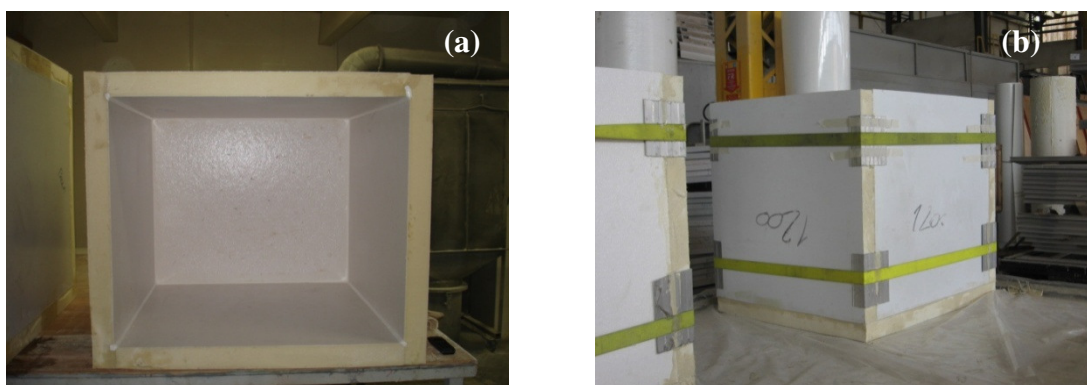


Figura 8 – Montagem dos corpos de prova: (a) vista interna e (b) vista externa

Todos os cubos foram montados sem a tampa, visto que antes de seu fechamento foi necessário o posicionamento dos termopares utilizados no experimento.

4.3.12. Cálculo teórico para o coeficiente global de transferência de calor (U) -

Foram realizados cálculos teóricos sem levar em consideração a influência do ar de convecção interno e externo (h) e estes dados foram comparados com os experimentalmente coletados, levando-se em conta a influência do meio. Para o cálculo teórico deste coeficiente foi utilizado a Equação 3 (ASHRAE, 1997).

$$U = \frac{1}{\left[\frac{L_{MF}}{k_{MF}} + \frac{L_{PU}}{k_{PU}} + \frac{L_{MF}}{k_{MF}} \right]} \quad (\text{Equação 3})$$

onde,

L_{MF} é a espessura do material de face (m)

k_{MF} é a condutividade térmica do material de face (W/mK)

L_{PU} é a espessura do poliuretano (m)

k_{PU} é a condutividade térmica do poliuretano (W/mK)

4.3.13. Montagem do experimento para a obtenção do coeficiente global de

transferência de calor (U) - A sistemática de montagem dos corpos de prova (cubos) foi mantida constante para cada uma das quatro configurações de painéis propostos nesta Dissertação. Primeiramente, foram posicionados e afixados os termopares (TP1 a TP6) conforme descrito no Quadro 2 e ilustrado na Figura 10. Após a fixação dos termopares, aguardou-se a estabilização da temperatura média interna do corpo de prova (cubo) e iniciou-se a coleta dos dados (corrente e voltagem) a cada 15 min, sendo este monitoramento realizado por um período de 2 h. A diferença entre a temperatura média

interna e a temperatura ambiente foi estabelecida em 45°C. O software utilizado na coleta de dados foi o Catman versão 4.0.

Quadro 2: Posicionamento dos termopares no corpo de prova (cubo) no ensaio para obtenção do coeficiente global de transferência de calor

Termopar	Posicionamento
TP1	Fundo Interior
TP2	Frente Inferior
TP3	Centro Interior
TP4	Parede Interior
TP5	Parede Exterior
TP6	Ambiente Externo

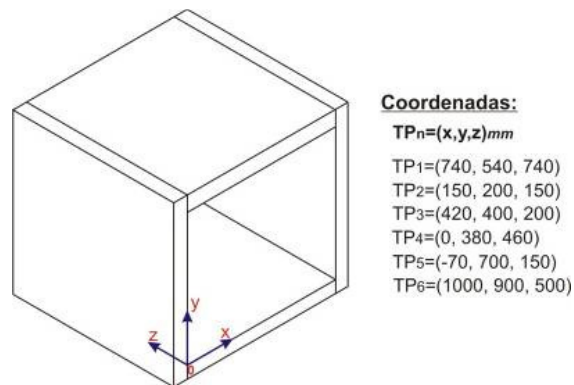


Figura 9 – Coordenada dos termopares utilizados no ensaio para obtenção do coeficiente global de transferência de calor

Na Figura 10 estão ilustradas as posições dos termopares internos do corpo de prova, a resistência, e o ventilador que auxilia na turbulência do ar interno (ventilação forçada). As posições dos termopares foram mantidas para cada experimento.

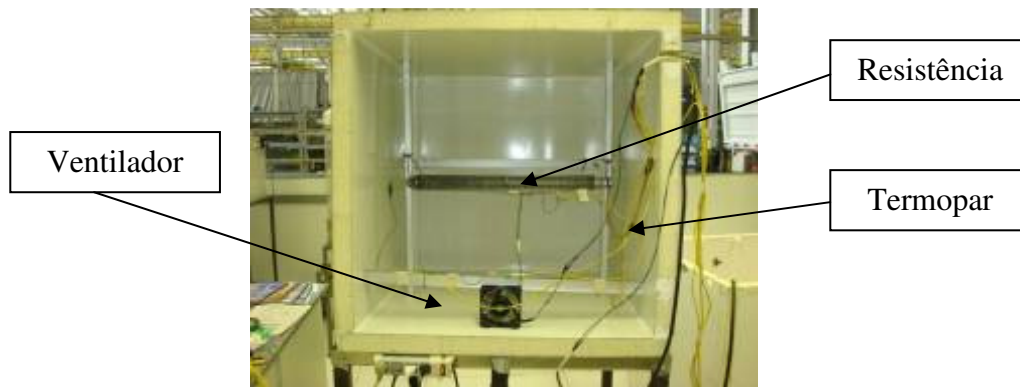


Figura 10: Posicionamento dos termopares, da resistência elétrica e do ventilador no cubo teste

4.3.14. Análise termográfica - Durante o experimento para a obtenção do parâmetro “U”, todos os corpos de prova foram submetidos à análise por termografia. Inicialmente a câmara termográfica teve sua emissividade calibrada através do termopar externo (temperatura ambiente). Após o início da coleta de dados (temperatura interna equalizada), foram obtidas imagens termográficas. Para cada imagem termográfica foram captados 76800 pontos e colocados em uma planilha com o uso do programa Excel para análise. Estas imagens termográficas proporcionam a identificação correta da temperatura nos diversos pontos de abrangência da imagem, permitindo um desvio padrão de 0,5°C. O equipamento termográfico utilizado foi uma câmara ThermoCAM T360, sendo seu princípio de funcionamento: captura a energia infravermelha (o calor) emitido pelo objeto enquadrado pela lentes e converte esta energia, que é concentrada pelas lentes em um detector infravermelho, formado por milhares de sensores infravermelhos (pixels), em um sinal eletrônico. Este sinal é processado de forma a mostrar a imagem térmica em um display ou monitor de vídeo ao mesmo que calcula a temperatura de cada pixel. A precisão de uma câmara infravermelha depende de vários componentes como as lentes, filtros, o detector, circuitos de leitura e tratamento de sinal e programas de linearização e compensação (FLIR, 2009). A Figura 11a ilustra o posicionamento de onde as imagens

termográficas foram obtidas e na Figura 11b é exemplificado um resultado fornecido pelo software utilizado.

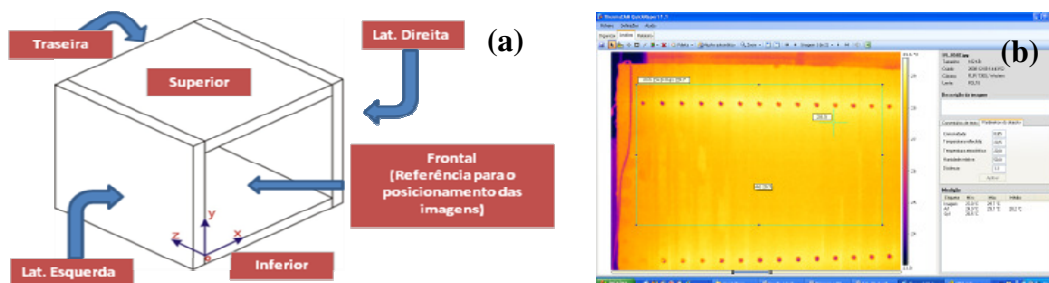


Figura 11: (a) Detalhamento dos pontos de coleta e (b) Ilustração de resultado pelo software utilizado

4.3.15. Dimensionamento dos cubos (corpos de prova) - Para a determinação do coeficiente global de transferência de calor, todos os corpos de prova (cubos) foram medidos. Os resultados estão mostrados na Tabela 3 .

Tabela 3: Dimensionamento dos corpos de prova

Dimensões	PRFV/PU/PRFV	AG/PU/AG	AI Frisado/PU/PRFV	AI/PU/AI
Comprimento externo (m)	0,990	0,986	0,983	0,987
Comprimento interno (m)	0,860	0,865	0,870	0,865
Largura externa (m)	0,990	0,980	0,980	0,980
Largura interna (m)	0,870	0,860	0,870	0,860
Altura externa (m)	0,980	0,980	0,980	0,980
Altura interna (m)	0,860	0,860	0,872	0,860
Espessura Poliuretano (m)	0,056	0,056	0,056	0,056
A_{int} - Área interna (m ²)	4,472	4,455	4,548	4,455
A_{ext} - Área externa (m ²)	5,841	5,786	5,774	5,790
A - Área média (m ²)	5,156	5,120	5,161	5,122

4.3.16. Cálculo para determinação do coeficiente global de transferência de calor - O cálculo para a determinação do coeficiente global de transferência de calor “U”, foi baseado nos dados experimentais, ou seja, nas temperaturas coletadas durante o experimento (temperaturas interna e externa do cubo e paredes) e nos dados de tensão e corrente que resultaram na potência dissipada para cada sistema visando a manutenção da temperatura interna (ASHRAE, 1997; Gamage *et al.*, 2006).

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U) (Equação 4) foi utilizado o coeficiente teórico de transferência de calor do ar (h), de convecção interna e externa, a densidade e a viscosidade do ar para as temperaturas obtidas em cada sistema estudado. No Quadro 3 estão mostradas as equações usadas no cálculo do coeficiente global de transferência de calor (ASHRAE, 1997).

Quadro 3: Equações utilizadas no cálculo do coeficiente global de transferência de calor

Equação	Descrição	
$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext} \times A_{ext}} + R + \frac{1}{h_{int} \times A_{int}}} \times A_{int}$	Coeficiente global de transferência de calor	(Equação 4)
$h_{ext} = \frac{Nu \times k}{L}$	Coeficiente de transferência de calor do ar externo e interno	(Equação 5)
$Nu = 0,13 (Gr \times Pr)^{0,33}$	Número de Nusselt	(Equação 6)
$Gr = \frac{g \times \beta \times \Delta T \times L^3}{\left(\frac{\mu}{\delta}\right)^2}$	Número de Grashof	(Equação 7)
$Pr = \frac{\mu \times C_p}{k}$	Número de Prandtl	(Equação 8)
$R = \frac{\Delta T}{Q}$	Resistência do compósito	(Equação 9)

onde,

U_i	é o coeficiente global de transferência de calor	(W/m ² K)
h_{ext}	é o coeficiente de transferência de calor do ar externo	(W/m ² K)
h_{int}	é o coeficiente de transferência de calor do ar interno	(W/m ² K)
A_{ext}	é a área externa	(m ²)
A_{int}	é a área interna	(m ²)
R	é a resistência do compósito sanduíche	(°C/W)
Nu	é o número de Nusselt (sistema turbulento)	-
k	é a condutividade térmica	(W/mK)
L	é o comprimento dos painéis	(m)
Gr	é o número de Grashof	-
Pr	é o número de Prandtl	-
g	é a aceleração da gravidade	(m/s ²)
β	é o inverso da temperatura média	(K ⁻¹)
ΔT	é a diferença da temperatura	(°C)
μ	é a viscosidade	(μPa.s)
δ	é a massa específica	(kg/m ³)
C_p	é o calor específico	(J/kg.K)
Q	é a potência média dissipada no experimento	(W)

Para a obtenção do parâmetro U , é necessário o cálculo para os valores de h_{ext} e h_{int} , e da resistência do compósito em avaliação. No caso dos coeficientes de transferência de calor por convecção natural (h_{ext} e h_{int}), foi utilizada a Equação 5.

O número de Nusselt (Equação 6), considera o comportamento em regime laminar quando o número de Prandtl estiver entre 10^4 e 10^8 , e uma faixa em regime turbulento

quando este número estiver entre 10^8 e 10^{12} . Neste experimento verificou-se que os valores encontrados situam-se na região de regime turbulento, faixa de 10^4 e 10^8 , para o cálculo de h_{ext} e h_{int} .

Para as quatro propostas de compósitos (PRFV/PU/PRFV, AG/PU/AG, Al Frisado/PU/Al e Al/PU/Al), os cálculos utilizados para a obtenção do coeficiente global de transferência foram baseados nas Equações de 4 a 9.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são analisados os resultados pertinentes aos materiais que compõem os quatro compósitos sanduíche, seguido da caracterização de cada painel compósito e, posteriormente, da avaliação dos painéis compósitos, montados em forma de cubo.

5.1. Caracterização dos Materiais

5.1.1. Poliuretano – A espuma rígida de PU foi o material de núcleo de todas as propostas de compósitos sanduíche, onde foram mantidas constantes, sua estrutura e espessura.

a) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) - Na Figura 12 estão ilustradas as micrografias da espuma de PU em dois aumentos diferentes. Observou-se uma distribuição homogênea de tamanho e forma, e que as células são do tipo fechadas, onde ocorre a retenção do gás isolante. Estas características são desejáveis para que a espuma tenha alto isolamento térmico.

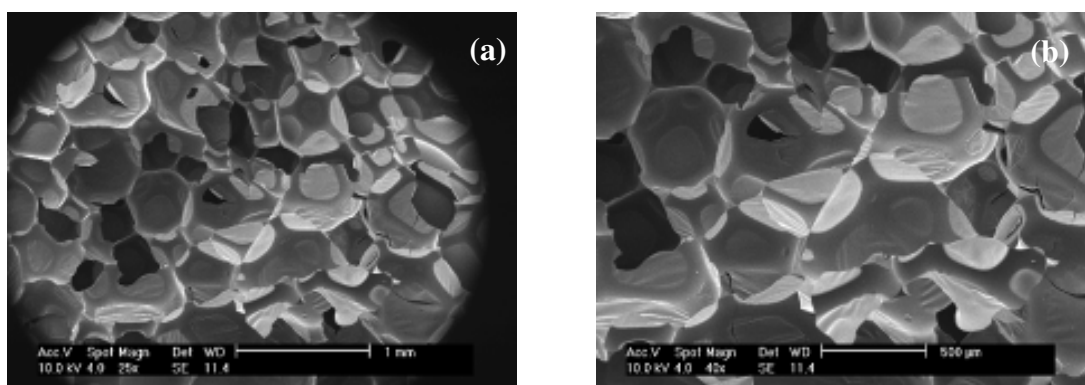


Figura 12: Microscopia eletrônica de varredura da espuma de PU. (a) Ampliação de 25X e (b) Ampliação de 40X

b) Análise termogravimétrica (TGA) - As curvas de TGA e DTG da espuma rígida de poliuretano, utilizada como material de núcleo dos compósitos sanduíche são apresentados na Figura 13 (a) e (b). Para a análise em atmosfera de N₂ observou-se uma perda mássica de 78,5% na faixa de temperatura de 324,5°C e que corresponde à degradação parcial do poliuretano. Para a análise em atmosfera de ar sintético, observou-se resíduo de 4,0%, característico de espuma rígida de poliuretano. O primeiro ponto de degradação corresponde à fase rígida (MDI) e o segundo ponto de degradação corresponde à fase flexível (poliol).

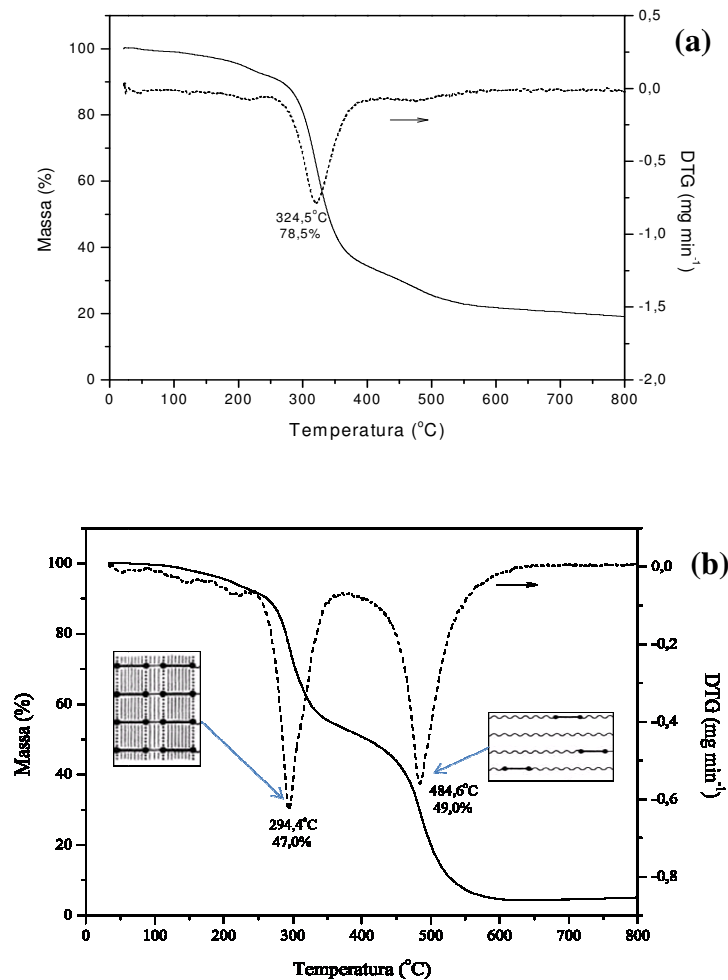


Figura 13: Curvas de TGA e DTG da espuma rígida de poliuretano. (a) em atmosfera de nitrogênio e (b) em atmosfera de ar sintético

c) **Condutividade térmica, densidade e resistência à compressão** - Os resultados de densidade e condutividade térmica da espuma de poliuretano utilizada como materiais de núcleo nas quatro propostas de compósito sanduíche são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Condutividade térmica e densidade da espuma de PU dos compósitos sanduíche desenvolvidos

Compósito	Condutividade Térmica* do PU (k) - (W/mK)	Densidade do PU (kg/m³)
PRFV/PU/PRFV	0,02348±0,00045	46,3±1,8
AG/PU/AG	0,02458±0,00055	49,6±1,6
Al Frisado/PU/PRFV	0,02430±0,0010	39,8±3,0
Al/PU/Al	0,02333±0,00032	45,1±2,6

* Ensaios realizados pela Dow Polyurethane Systems House, Jundiaí-SP, Brasil

A espuma de PU apresenta seu melhor desempenho quanto ao isolamento térmico na faixa de densidade de 38kg/m³ a 43kg/m³, não sendo significativas as variações até 50kg/m³ (Vilar, 2005). À medida que aumenta a densidade, aumenta a resistência da espuma ao colapso de sua célula, e também aumenta a compactação da espuma, reduzindo o tamanho da célula, responsável pela retenção do gás (HCFC 141-b). Desta forma, a baixa condutividade térmica das espumas rígidas de poliuretano resulta da sua baixa densidade e da estrutura de células pequenas e fechadas, onde ocorre a retenção dos agentes de expansão auxiliares (AEA).

A condutividade térmica final de uma espuma (k) é determinada em função de contribuições como radiação (emissão de energia), condutividade térmica do gás e do polímero, e densidade da espuma (Vilar, 2005).

Se a condutividade térmica (k) da espuma de PU for colocada graficamente em função da densidade da espuma, aparecerá um valor mínimo para k em torno de 30 a 50 kg/m^3 que está relacionado à condução do calor por radiação (emissão de energia) na fase gás, e pelo esqueleto polimérico (Vilar, 2005). A radiação é importante em baixas densidades onde o número de janelas celulares por unidade de volume é pequeno. A contribuição da radiação diminui com o aumento do número de células fechadas por unidade de volume em altas densidades e o k também decresce. Em altas densidades este efeito é contraposto pelo aumento da condutividade do PU, o que explica a elevação do k (Vilar, 2005). A redução do tamanho das células é uma forma de diminuir o k , pela redução da radiação. A condutividade térmica do gás contribui com cerca de 40% do total do fator k pelo isolamento térmico da espuma (Vilar, 2005).

Pode ser observado na Tabela 4, que não houve diferença significativa nos valores da condutividade térmica das espumas de poliuretano. Os resultados de densidades são diferentes, mesmo o cálculo tendo sido realizado para obtenção de uma densidade teórica na ordem de 42 kg/m^3 . Esta diferença pode ser justificada pela provável alteração da viscosidade do material, bem como da temperatura dos substratos, visto que a injeção ocorreu em dois dias distintos.

A Figura 14 ilustra os resultados de resistência à compressão e densidade para a espuma de PU dos compósitos sanduíche desenvolvidos. As propriedades mecânicas das espumas rígidas são dependentes da densidade, estrutura celular e do processo de fabricação. A aplicação de esforços externos deforma a estrutura celular, podendo conduzir ao colapso das células (Vilar, 2005).

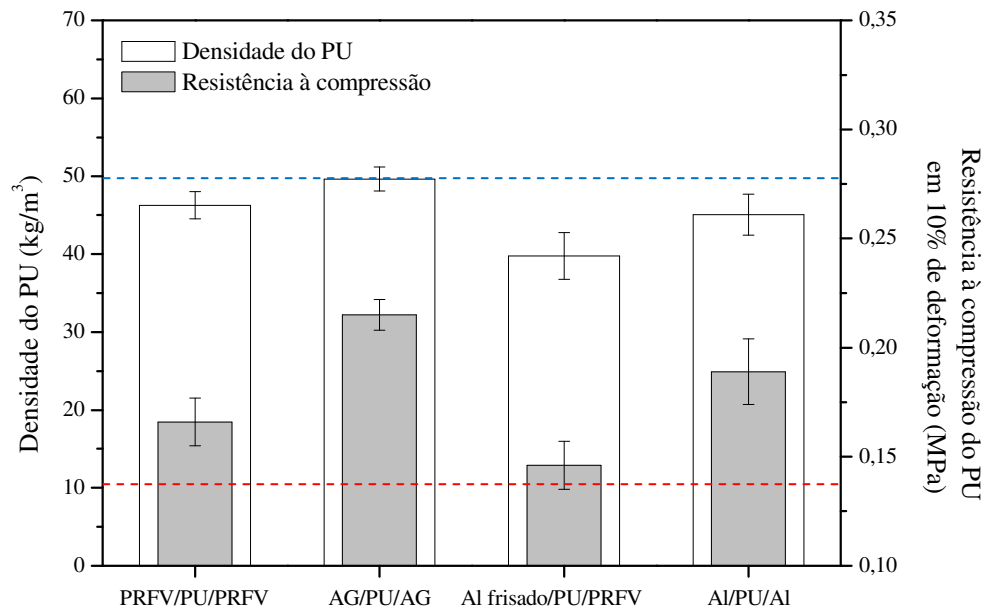


Figura 14: Densidade e resistência à compressão da espuma de PU dos compósitos sanduíche desenvolvidos. A linha tracejada superior corresponde a maior densidade sem perda de eficiência no isolamento térmico e a linha tracejada inferior corresponde a mínima resistência à compressão para uma espuma rígida para isolamento térmico.

A resistência à compressão da espuma é relevante no controle da injeção de compósitos sanduíche que são utilizados para isolamento térmico, devido principalmente à variação brusca de temperatura (até -30°C) que os mesmos são submetidos. Sabe-se que o gás responsável pela baixa condutividade térmica da espuma de poliuretano fica retido nas células desta espuma, sendo que suas paredes devem resistir à dilatação e contração do material conforme a variação de temperatura que este material é submetido. São valores típicos para espuma rígida de poliuretano, resistências à compressão na ordem de 0,120 à 0,210 MPa (Vilar, 2005).

A resistência à compressão da espuma está relacionada à deformação da célula no interior da espuma e conseqüente perda do gás, responsável pelo isolamento. Valores inferiores a 0,100 MPa prejudicam a qualidade da espuma, devido a sua resistência ser

menor que a pressão atmosférica, causando a retração da espuma e consequente redução das propriedades de isolamento térmico (Vilar, 2005).

Na Figura 14 foi observado que os valores típicos encontrados para as resistências à compressão apresentam-se dentro da faixa de 0,146 a 0,215 MPa. Estes resultados indicam que os compostos sanduíches desenvolvidos podem ser utilizados na aplicação proposta.

5.1.2. Caracterização da resina poliéster com fibra de vidro (PRFV)

a) Análise termogravimétrica (TGA) - As curvas de TGA e DTG da resina poliéster reforçada com fibra de vidro utilizada como material de face nos compósitos sanduíche estudados está apresentada na Figura 15. Foram observadas duas perdas mássicas, de 67,5% e 2,7% na faixa de temperatura de 379,0°C e 663,3°C, que correspondem à degradação da resina e de uma carga inorgânica, respectivamente. O resíduo de 29,8% corresponde à fibra de vidro constituinte do material, confirmando os dados do fornecedor.

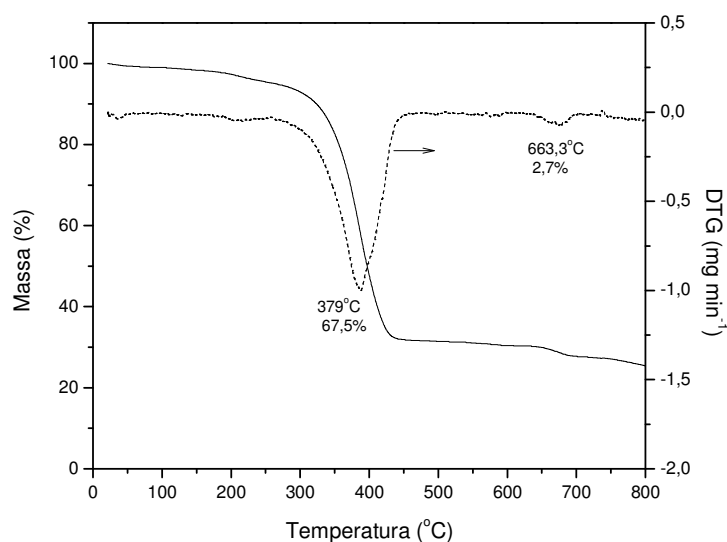


Figura 15: Curvas de TGA e DTG do PRFV em Nitrogênio

5.1.3. Caracterização do revestimento de aço galvanizado e do revestimento do alumínio (AG e Al)

a) **Ensaio em atmosfera salina (salt spray)** - O método interno Randon para caracterização de materiais quanto à resistência em atmosfera salina (salt spray) é de 456 h de exposição. Este ensaio é realizado de forma comparativa entre os materiais a serem analisados. Para os materiais de face utilizados o comportamento é apresentado comparativamente nas Figuras 16 e 17. Para a realização do ensaio, é seguido o método ASTM B117.

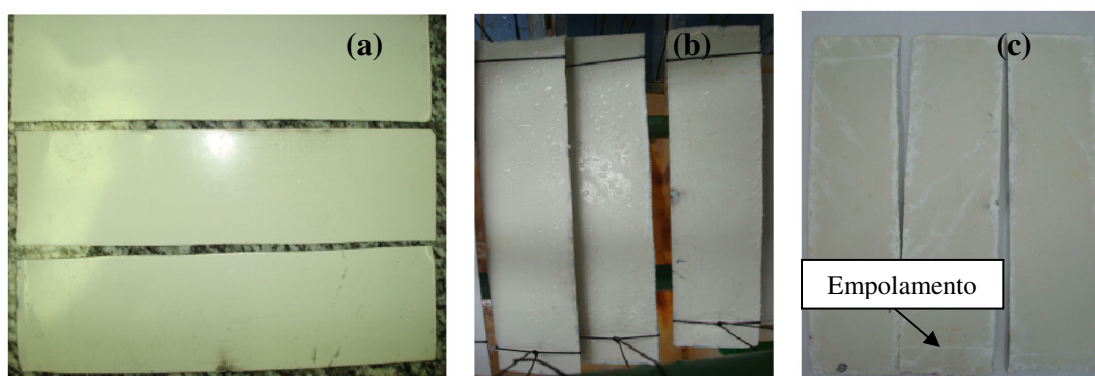


Figura 16: Corpos de prova com revestimento em aço galvanizado após ensaio de névoa salina. (a) inicial; (b) 264 h; (c) 456 h

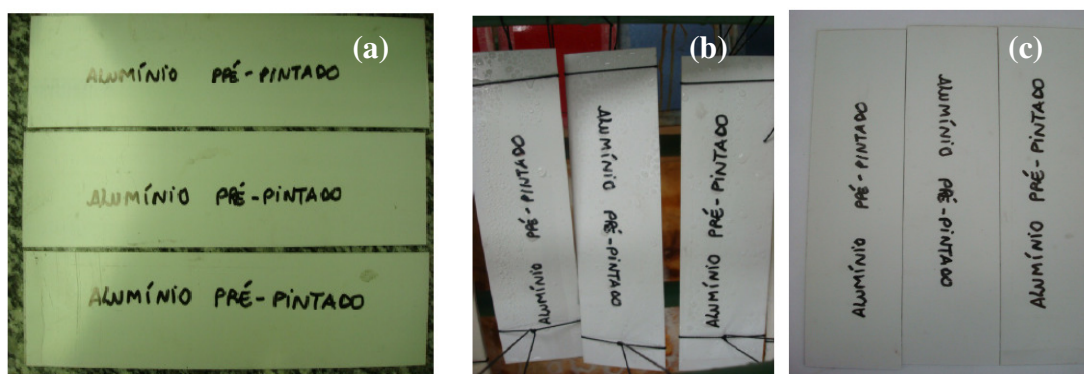


Figura 17: Corpos de prova com revestimento em alumínio pré-pintado após ensaio de névoa salina. (a) inicial; (b) 264 h; (c) 456 h

As Figuras 16 e 17 mostram que o revestimento em alumínio pré-pintado não apresentou variação após 456 h de exposição (valor referência interna Randon) ao passo que, o revestimento em aço galvanizado apresentou empolamento após as 264 h. Esta é uma característica não desejável neste compósito, pois é típico de materiais que poderão sofrer corrosão. Este item é relevante, tendo em vista que estes compósitos sanduíche terão aplicação no transporte de alimentos.

Como alternativa, pode ser avaliada a possibilidade de o revestimento do produto frigorífico ser em aço inoxidável a fim de minimizar a probabilidade de corrosão e garantir o ambiente higienizado.

5.2. Caracterização dos compósitos sanduíche

5.2.1. Resistência à flexão - A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento e aplica-se aos materiais rígidos, ou seja, aqueles que não vergam excessivamente sob ação de uma carga (Vilar, 2005).

Para este estudo, por se tratar de compósitos sanduíche que serão utilizados em câmaras frigoríficas não estacionárias, ou seja, em reboques e semirreboques frigoríficos, o esforço mecânico que os painéis estarão sujeitos refere-se à flexão que estes poderão sofrer em virtude das cargas em caixas armazenadas de forma estivada (solta) ou penduradas (carcaça do animal) que se chocam livremente contra as paredes internas do produto. As Figuras 1(b) e 1(c) apresentam este tipo de carga. As espessuras dos compósitos sanduíche encontram-se no quadro 1, página 17 desta dissertação.

A Figura 18 apresenta os valores de tensão *versus* deformação para os compósitos desenvolvidos nesta Dissertação.

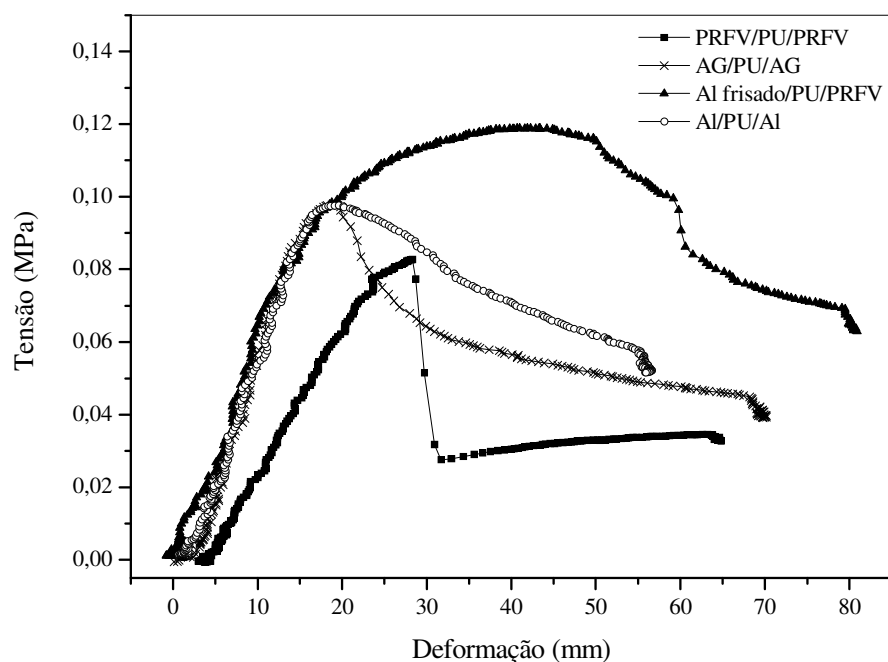


Figura 18: Curva tensão e deformação dos compósitos sanduíche desenvolvidos

Para o compósito PRFV/PU/PRFV observou-se que, a uma deformação de 30 mm, ocorreu escoamento das camadas do compósito, momento onde há a descolagem do PU das paredes do PRFV. O compósito AG/PU/AG mostra similaridade de resultados de flexão com o compósito Al/PU/Al. Quanto ao ponto de escoamento das camadas destes materiais, é determinado pela mesma característica anteriormente observada, ou seja, a deformação dos materiais de face. O compósito Al Frisado/PU/PRFV é o que apresenta os melhores resultados, devido provavelmente à presença de colunas de aço em sua estrutura.

Para todos os compósitos sanduíche estudados, a flexão foi realizada da face interna do produto para a face externa, ou seja, a face do painel que ficaria no interior do reboque ou do semirreboque.

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão para os compósitos sanduíche estudados.

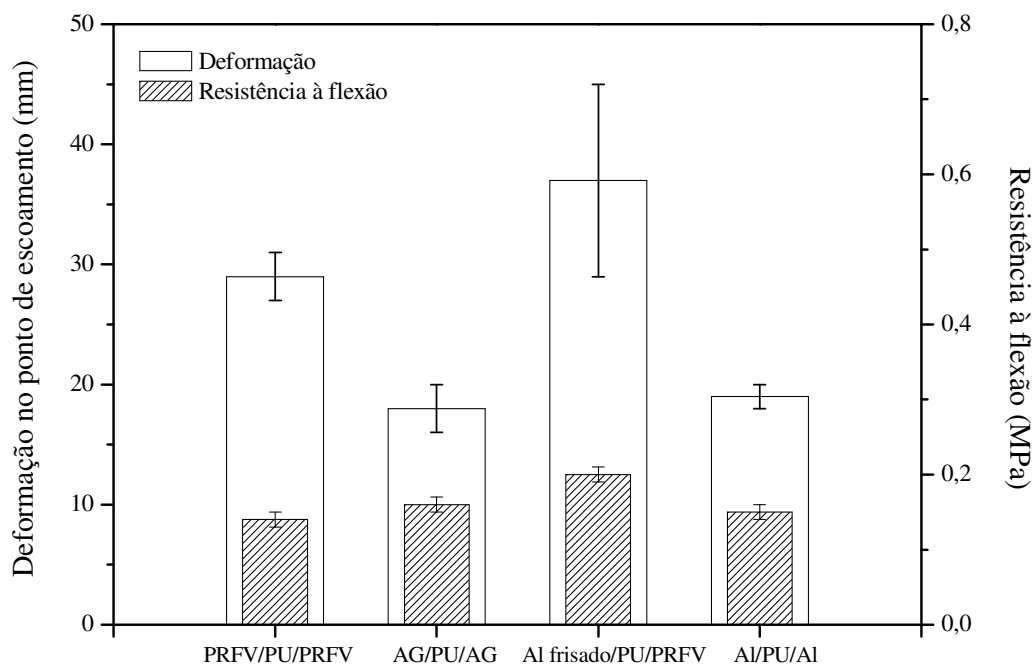


Figura 19: Deformação e resistência à flexão dos quatro compósitos sanduíche

Como o núcleo tem as mesmas características em todos os painéis, as variações nos resultados estão relacionadas aos materiais de face, ou seja, externo à espuma, e à adesão com o núcleo de poliuretano.

O compósito Al Frisado/PU/PRFV foi o que apresentou a maior resistência à flexão e maior deformação para que ocorresse a flexão do material. Esta maior resistência está associada aos reforços metálicos existentes neste compósito. Os demais compósitos apresentaram resultados aproximados para os demais parâmetros nesta propriedade.

A Figura 20 ilustra o compósito sanduíche Al Frisado/PU/PRFV e mostra este compósito após ensaio de resistência à flexão.

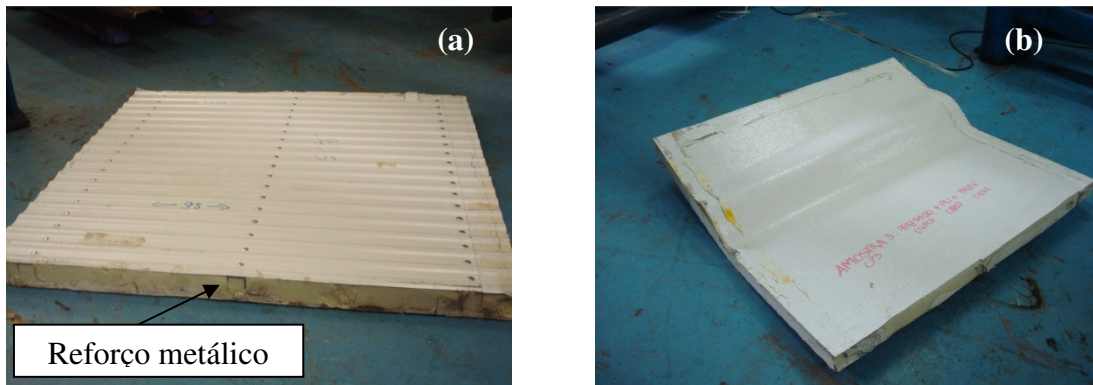


Figura 20: (a) Reforços metálicos do compósito Al Frisado/PU/PRFV e (b) Detalhe após teste de resistência à flexão

A Figura 21 mostra o comportamento do compósito sanduíche PRFV/PU/PRFV após o ensaio de resistência à flexão, onde é verificada a quebra da camada de espuma que se une às faces da resina poliéster reforçada com fibra de vidro (PRFV).

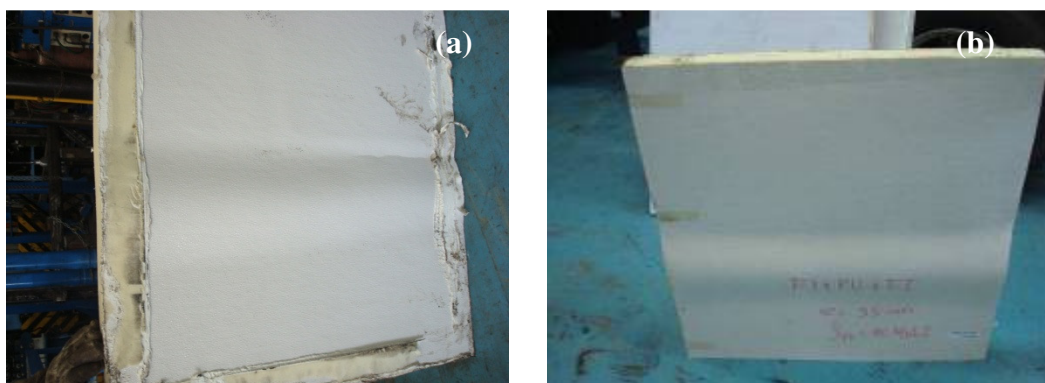


Figura 21: (a) e (b) Pannel PRFV/PU/PRFV posterior ao ensaio de flexão

No ensaio de resistência à flexão, o compósito AG/PU/AG foi o que apresentou o menor desempenho. Este comportamento se deve basicamente a deformação do revestimento de aço galvanizado. A Figura 22 mostra o comportamento do compósito sanduíche AG/PU/AG após o ensaio de resistência à flexão.

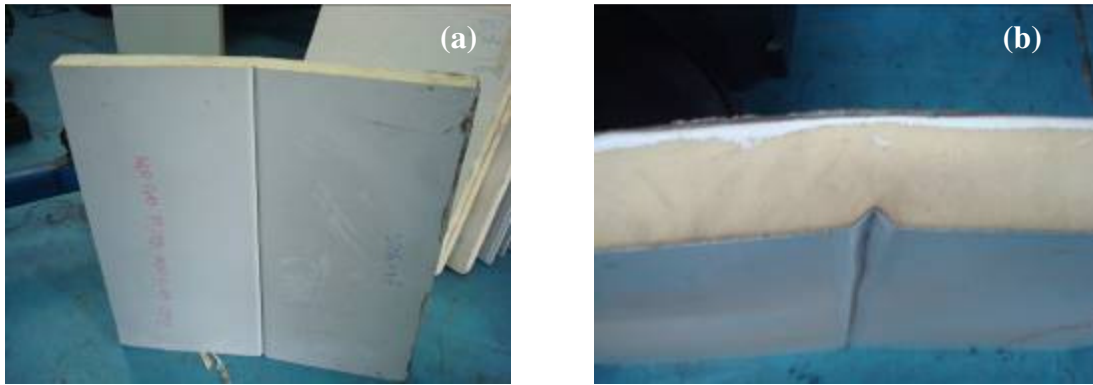


Figura 22: (a) Deformação do revestimento em aço galvanizado; (b) Detalhe da deformação

O compósito Al/PU/Al apresentou um comportamento semelhante ao compósito com o material de face em aço galvanizado. Neste compósito a resistência à flexão reflete também a resistência do poliuretano. A Figura 23 mostra o comportamento do compósito sanduíche após o ensaio de resistência à flexão.



Figura 23: (a) e (b) Detalhe da deformação do compósito Al/PU/Al

De uma forma geral, a energia de deformação é menor no aço galvanizado e no alumínio o que facilita o processo de conformação mecânica proporcionando maior liberdade de projeto. Para o compósito onde o material de face é o PRFV esta liberdade de projeto fica comprometida devido à alta rigidez do material. Para o compósito Al

frisado/PU/PRFV a energia para deformação é maior devido principalmente aos reforços metálicos internos.

Observou-se que a resistência à flexão está diretamente ligada à deformação da espuma rígida de poliuretano, visto que as camadas externas se deformam e posteriormente as paredes das células acabam rompendo.

5.2.2. Densidade global, peso/m² e custo - Os compósitos sanduíche foram caracterizados pela sua densidade aparente. A expressão densidade aparente é usada para os materiais celulares, devido a sua densidade ser calculada com o volume do material expandido e não somente o volume do polímero sólido. Para efeitos de análise de custos é importante o peso/m², o que proporciona o cálculo de custos destes materiais.

Na Figura 24 são apresentados os resultados referentes à densidade global, ao peso/m² e o custo/m² dos compósitos sanduíche desenvolvidos.

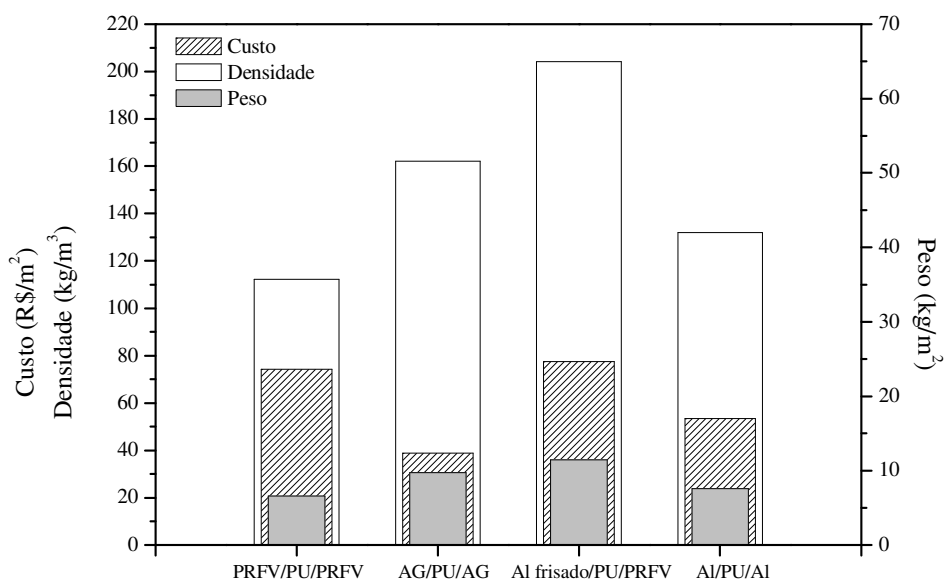


Figura 24: Características dos painéis propostos quanto ao custo, peso e densidade

O compósito AG/PU/AG é o que apresenta o menor custo/m² e a segunda maior densidade global, sendo inferior somente ao compósito Al Frisado/PU/PRFV que possuem reforços metálicos na região dos rebites. Na avaliação de densidade, o material com o melhor resultado é o PRFV/PU/PRFV, porém o seu custo/m² é o dobro que do compósito AG/PU/AG. Na construção de um semirreboque utilizam-se aproximadamente 115 m² de painel sanduíche, podendo variar conforme seu comprimento. Desta forma, o compósito Al Frisado/PU/PRFV foi descartado.

5.3. Caracterização dos cubos teste

5.3.1. Coeficiente global de transferência de calor - O coeficiente global de transferência de calor (U) dos compósitos sanduíche propostos, montados como cubos para simular um reboque, foi calculado utilizando-se as equações mostradas no Quadro 3 com dados obtidos durante os experimentos, como temperatura externa e interna do cubo, corrente e voltagem. Para a avaliação do coeficiente global de transferência de calor dos painéis propostos, programou-se uma variação entre a temperatura interna e externa na ordem de 45°C, ou seja, havendo redução nesta variação a resistência era ligada. Os valores médios coletados encontram-se na tabela 5.

Foi realizado também o cálculo teórico para efeito de comparação. A Figura 25 mostra os valores encontrados para as diferentes propostas e os compara com o coeficiente de isolamento térmico (k) encontrado para o material de núcleo (PU).

Tabela 5: Parâmetros coletados no experimento

Compósito	Temperatura Externa (°C)	Temperatura Interna (°C)	Diferença de Temperatura (°C)	Potência (W)
PRFV/PU/PRFV	23,6 ± 0,5	72,2 ± 1,0	48,8	55
AG/PU/AG	22,3 ± 1,2	64,6 ± 0,6	42,4	73
Al Frisado/PU/PRFV	28,1 ± 0,7	68,3 ± 0,3	40,1	81
Al/PU/Al	27,1 ± 1,5	66,6 ± 0,4	39,6	101

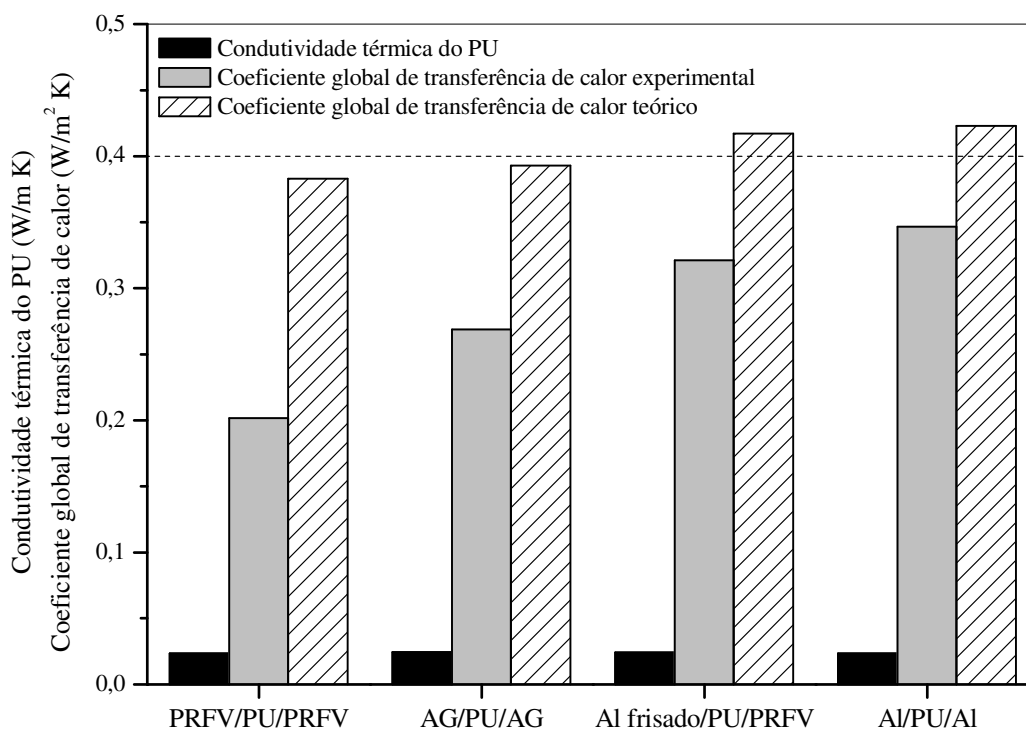


Figura 25: Coeficiente global de transferência de calor teórico e experimental para os compósitos propostos e coeficiente de isolamento térmico para a espuma de PU. A linha tracejada corresponde ao valor máximo estabelecido na norma ABNT NBR 15457.

Todos os compósitos propostos apresentaram coeficiente global de transferência de calor abaixo do limite máximo previsto na norma ABNT/NBR 15457 ($\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$). O núcleo dos compósitos sanduíche é o principal responsável pelo maior ou menor isolamento térmico e neste ensaio foi possível quantificar a influência significativa dos materiais utilizados na face.

Os valores do coeficiente global de transferência de calor teórico são superiores ao obtido experimentalmente em virtude de não ser considerada a influência do coeficiente de transferência de calor do ar.

O compósito PRFV/PU/PRFV onde o material de face é a resina poliéster reforçada com fibra de vidro, tem o menor coeficiente global de transferência de calor. O coeficiente efetivo de isolamento térmico (k) do PRFV, tabelado, é de $0,058 \text{ W/mK}$ (fonte: Technical data 6275 Kemlite) e o coeficiente efetivo de isolamento térmico (k) do PU varia de $0,021$ à $0,025 \text{ W/mK}$ para espumas com agente expensor HCFH 141b. No cálculo teórico (Equação 3) para obtenção do U global deste compósito PRFV/PU/PRFV, o resultado encontrado foi de $0,383 \text{ W/m}^2\text{K}$ ao passo que, experimentalmente encontrou-se $0,202 \text{ W/m}^2\text{K}$ o que mostra a influencia do ar no meio analisado.

O compósito AG/PU/AG onde o material de face é o aço galvanizado obteve-se coeficiente global de transferência de calor 33% superior ao encontrado para o compósito PRFV/PU/PRFV, porém, os materiais de face, nesta proposta apresentam coeficiente efetivo de isolamento térmico (k) de 52 W/mK (DOW *et al.*, 2006). No cálculo teórico (Equação 3) para obtenção do U global deste compósito AG/PU/AG, o resultado encontrado foi de $0,393 \text{ W/m}^2\text{K}$ ao passo que, experimentalmente encontrou-se $0,269 \text{ W/m}^2\text{K}$ mostrando, como comentado anteriormente, uma variação significativa entre os resultado teórico e experimental.

Para o compósito Al Frisado/PU/PRFV onde o material da face externa é o alumínio e o material da face interna é o PRFV, obteve-se coeficiente global de transferência de calor 59% superior ao encontrado para o compósito PRFV/PU/PRFV. Nesta proposta, como comentado anteriormente, a forma (frisada) influencia as características de interesse neste trabalho. Para esta composição, os materiais de face Al e PRFV, apresentam, respectivamente, coeficiente efetivo de isolamento térmico (k) de 138 W/mK e 0,058 W/mK (fonte: Technical data 6275 Kemlite).

No cálculo teórico (Equação 3) para obtenção do U global deste compósito Al Frisado/PU/PRFV, o resultado encontrado foi de 0,417 W/m²K ao passo que, experimentalmente encontrou-se 0,322 W/m²K. Para o compósito Al Frisado/PU/PRFV observou-se que há perda térmica na região dos rebites, onde há reforços metálicos internos. Nesta região do painel ocorre ponte térmica devido à menor espessura de poliuretano expandido, responsável pelo isolamento térmico.

Para o compósito Al/PU/Al, onde o material das faces é o alumínio, obteve-se coeficiente global de transferência de calor 72% superior ao encontrado para o compósito PRFV/PU/PRFV, material com o menor coeficiente global encontrado das propostas estudadas. Para esta composição, os materiais de face apresentam, respectivamente, coeficiente efetivo de isolamento térmico (k) de 138 W/m K e 0,058 W/m K (fonte: Technical data 6275 Kemlite). No cálculo teórico (equação 3) para obtenção do U global deste compósito AG/PU/AG, o resultado encontrado foi de 0,423 W/m²K ao passo que, experimentalmente encontrou-se 0,347 W/m²K.

No reboque ou semirreboque frigorífico existem perdas térmicas na região das portas (folgas) e dos assoalhos, que são configurados com compensado naval e alumínio perfilado. Desta forma as propostas Al Frisado/PU/PRFV e Al/PU/Al estão descartadas por

apresentarem valores mais próximos ao limite estabelecido pela norma ABNT/NBR 15457.

5.3.2. Análise Termográfica - Esta técnica foi usada durante as medições de temperatura, corrente e amperagem quando foram obtidas imagens térmicas de cada experimento. Este teste é não destrutivo e foi de fundamental importância por permitir avaliar as temperaturas externas que os painéis propostos estavam apresentando durante o ensaio. Para cada imagem termográfica apresentada foi possível, de forma precisa, obter a temperatura nos diversos pontos e analisar os pontos de perdas térmicas de cada sistema proposto.

A Tabela 5 apresenta resumidamente as temperaturas médias coletadas nas paredes internas, através de um termopar e das paredes externas, através da análise termográfica. Verificou-se que o compósito AG/PU/AG apresenta a menor temperatura externa média. Este resultado se justifica porque a temperatura interna para este cubo teste também foi inferior.

Para o compósito PRFV/PU/PRFV a temperatura média externa, considerando as imagens térmicas realizadas, foi de $23,6 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Na Figura 26 observa-se a distribuição das temperaturas da superfície externa da parede da placa em análise. Os pontos onde a temperatura está mais elevada, da ordem de $26,3^{\circ}\text{C}$ refere-se ao adesivo poliuretânico utilizado na montagem do cubo teste.



Figura 26: Distribuição de temperatura no compósito PRFV/PU/PRFV

Para o compósito AG/PU/AG a temperatura média externa, considerando as imagens térmicas realizadas, foi de $22,2 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$ e como comentado anteriormente os pontos onde a temperatura está mais elevada, da ordem de $41,6^{\circ}\text{C}$ refere-se ao adesivo poliuretânico utilizado na montagem do cubo teste. A faixa com coloração mais clara na figura 27 refere-se basicamente à forma de união do cubo. Para a placa que compõe o cubo, a temperatura máxima encontrada foi de $23,8^{\circ}\text{C}$.

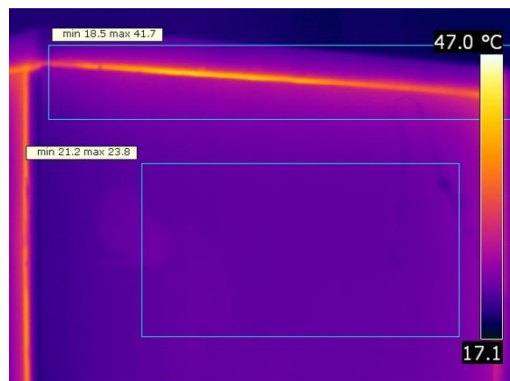


Figura 28: Distribuição de temperatura no compósito AG/PU/AG

Para o compósito Al Frisado/PU/PRFV a temperatura média externa, considerando todas as imagens térmicas realizadas para esta proposta de painel, foi de $28,1 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$. A Figura 29 mostra a distribuição das temperaturas da superfície externa da parede da placa em análise bem como os pontos onde a temperatura está mais elevada, da ordem de $31,9^{\circ}\text{C}$

referente ao reforço metálico com o revestimento externo em alumínio rebitado. Os pontos mais claros na Figura 28 se referem à ponte térmica causada pelos rebites e pelo reforço metálico interno do compósito sanduíche.

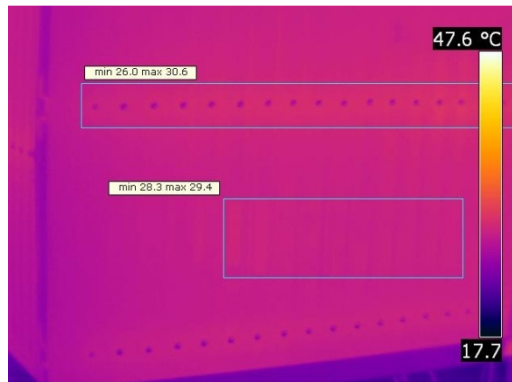


Figura 28: Distribuição de temperatura no compósito Al Frisado/PU/PRFV

Para o compósito Al/PU/Al, a temperatura média externa, considerando todas as imagens térmicas realizadas para esta proposta de painel, foi de $27,1 \pm 1,5^\circ\text{C}$. Na Figura 29 está mostrada a distribuição das temperaturas da superfície externa da parede da placa em análise. Os pontos onde a temperatura está mais elevada, da ordem de $47,0^\circ\text{C}$ se referem ao adesivo poliuretânico utilizado como união entre as paredes do cubo teste. Para a superfície da placa, observou-se que a temperatura máxima ficou em 28°C .

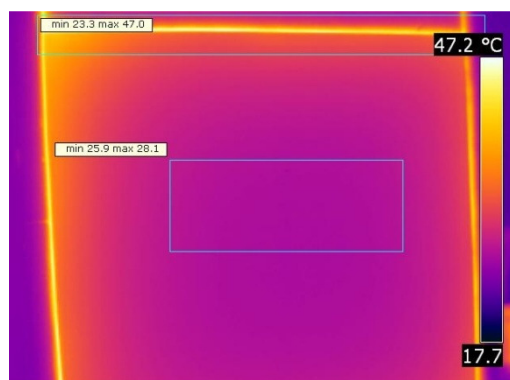


Figura 29: Distribuição de temperatura no compósito Al/PU/Al

6. CONCLUSÕES

Todos os compósitos propostos apresentaram resultados de resistência à flexão similares com exceção do compósito Al Frisado/PU/PRFV. Esta constatação pode ser justificada pela presença de reforços metálicos estruturais neste compósito em particular. Esta resistência está correlacionada ao momento em que as células de poliuretano, unidas as paredes se rompem. O compósito que apresentou menor energia de flexão na ruptura foi o AG/PU/AG, o que proporciona maior liberdade de design dos painéis.

Com relação ao comportamento das faces não poliméricas em atmosfera salina, o revestimento em aço galvanizado (AG) apresentou empolamento antes do período previsto de resistência ao passo que nada foi observado no revestimento em alumínio (Al).

A densidade global dos compósitos é uma característica relevante em virtude do consumo maior de combustível no caminhão frigorífico. Para os compósitos propostos a alternativa a ser descartada foi o Al frisado/PU/PRFV.

Em relação ao custo os compósitos, as propostas Al Frisado/PU/PRFV e PRFV/PU/PRFV seriam descartadas nesta análise.

Para o coeficiente global de transferência de calor (U), característica principal para um produto frigorífico, o melhor desempenho encontrado foi o do compósito PRFV/PU/PRFV (não metálico). Dentre as propostas com revestimentos não poliméricos (AG e Al) a que apresentou o melhor desempenho foi o compósito AG/PU/AG.

Em relação a características de sustentabilidade, as alternativas não poliméricas (AG e Al) proporcionam o reprocessamento e a conseqüente reutilização das faces de revestimento. O revestimento polimérico (PRFV) é um termorrígido e não apresenta características de reciclabilidade, sendo seu destino final, aterro sanitário como resíduo classe 1.

Em consequência do exposto, das quatro alternativas propostas para carroceria frigorífica, a melhor alternativa para esta aplicação é o compósito AG/PU/AG.

7. REFERÊNCIAS

ALLIANTZ PORTUGAL S/A. Disponível em <<http://www.alliantz.pt>>, acessado em março de 2007.

ALVARADO, J. L.; TERRELL JR. W.; JOHNSON, M. D. Passive cooling systems for cement-based roofs. *Building and Environment*, v. 44, p. 1869-1875, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL STANDARDS (ASTM). ASTM B 117: *Standard pratics for operatin Salt Spray (fog) apparatus* – EUA, 2007.

_____. ASTM C 177: *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus* – EUA, 2004.

ASHRAE Handbook, *Fundamentals Volume*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15457 – *Implemento Rodoviário – Carroceria termicamente isolada – Desempenho Térmico*. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto 10:501.07-001/1 – *Painéis e Placas Industrializadas com Espuma Rígida de Poliuretano*, Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 11506 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação da massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 1991.

_____. NBR 11620 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação do conteúdo de células fechadas*. Rio de Janeiro, 1988.

_____. NBR 3431 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação da condutividade térmica*. Rio de Janeiro, 1990.

_____. NBR 7358/89 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Determinação das características de inflamabilidade*. Rio de Janeiro, 1989.

_____. NBR 8024 – *Plásticos Rígidos – Determinação de resistência ao impacto Izod*. Rio de Janeiro, 1984.

_____. NBR 8081 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Permeabilidade ao vapor de água*. Rio de Janeiro, 1983.

_____. NBR 8082 – *Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico – Resistência à compressão*. Rio de Janeiro, 1983.

ATP HANDBOOK, *Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the special equipment to be used for such carriage* (ATP), 2008.

BANCO DE ALIMENTOS E COLHEITA URBANA: *Transporte de alimentos*. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em <http://www.mesabrasil.sesc.com.br/>, acessado em agosto de 2009.

BOGDAN, M.; HOERTER, J. MOORE JR, F. O. Meeting the insulation requirements of the building envelope with polyurethane and polyisocyanurate foam. *Journal of Cellular Plastics*, v. 41, p. 41-56, 2005.

BUSTAMANTE, R. C. R. *Dissertação de Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE – São José dos Campos/SP, 2000.

CALLISTER Jr, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais uma Introdução*, 5ª edição, editora LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2002.

CARNES, DERIVADOS E PRODUTOS CÁRNEOS NP 1988:1982. *Torresmos. Definição, características e acondicionamento*. Lisboa: IPQ. Disponível em www.wikipedia.org, acessado em agosto de 2009.

CHAN, H. C.; CHEUNG, Y. K. Static and dynamic analysis of multi-layered sandwich plates. *International Journal of Mechanics Science*, v. 14, p. 399-406, 1972.

CHOI, G.; KANG, J. S.; JEONG, Y. S.; LEE, S. E.; SOHN, J.Y. An experimental study on thermal proprieties of composite insulation. *Thermochimica Acta*, V. 455, p. 75-79, 2007.

DATA SHEET POLIOL EXPERIMENTAL E ISOCIANATO, The Dow Chemical Company, 2006.

DOSSIÊ TÉCNICO – *Fabricação de Peças em Fibra de Vidro* – Instituto Tecnológico do Paraná, Maio – 2007. Disponível em <<http://www.sbirt.ibict.br>> Acessado em setembro de 2007.

DOW, HENKEL, PECOLIT and SIKA COMPANY, *Sandwich Panels in Vehicle Construction*, Verlag Moderne Industrie, 2006. (First published in Germany in the series “Die Bibliothek der Technik” with Original Title Sandwichelemente für den Fahrzeugbau).

EAVES, D. *Handbook of Polymer Foams*, Rapra Technology, Crewe, 2004.

FABIAN, P. E.; BAUER-McDANIEL, T. S.; REED, R. P. Low temperature thermal properties of composite insulation systems. *Cryogenics*, v. 35, p. 719-722, 1995.

FLIR. Disponível em www.flir.com/thermography, acessado em setembro de 2009.

FOLDER SCHMITZ CARGOBULL AG. Disponível em www.cargobull.com, acessado em maio de 2008.

GALGANO, A.; DI BLASI, C.; BRANCA, C.; MILELLA, E. Thermal response to fire of a fibre-reinforced sandwich panel: Model formulation selection of intrinsic

properties and experimental validation. *Polymer Degradation and Stability*, v. 94, p. 1267-1280, 2009.

GAMAGE, J.C.P.H.; AL-MAHAIDI, R.; WONG, M.B. Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures. *Composite Structures*, v. 75, p. 199-205, 2006.

GAY, D. ; HOA, S. V. *Composite Materials – Design and Applications*, 2^a edição, CRC Press, EUA, 2007.

GLASS REINFORCED PLASTICS. Disponível em [www. //en.wikipedia.org/Glass-reinforced_plastics](http://www.en.wikipedia.org/Glass-reinforced_plastics), acesso em julho de 2008.

GRIFFITH, B.; ARASTEH, D. Advanced insulations for refrigerator/freezers: the potential for new shell designs incorporating polymer barrier construction. *Energy and Buildings*, v. 22, p. 219-231, 1995.

HOSUR, M. V.; MOHAMMED, A. A.; JEELANI, S. Processing of nanoclay filled sandwich composites and their response to impact loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 27, p. 797-818, 2008.

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO - Departamento de Física (ISEP/DEFI), *Condutividade Térmica*, Porto, 2008. Disponível em <<http://www.defi.isep.ipp.pt>>. Acesso em 25 jul. 2008.

KATAOKA FILHO, M. *Optimization of nonhomogeneous facesheets in composite sandwich plates*. PHD Thesis, University of Toronto, 1997.

KATAOKA FILHO, M.; HANSEN, J. S. Optimization of nonhomogeneous facesheets in composite sandwich plates. *Structural Optimization*, v. 17, p. 199-207, 1997.

KATZ, S.; LINDNER, A. S. A life-cycle comparison of several auxiliary blowing agents used for manufacture of rigid polyurethane foam. *Air and Waste Manage*, v. 53, p. 469-477, 2003.

KAWASAKI, T.; KAWAI, S. Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors. *The Japan Wood Research Society*, v. 52, p. 75-83, 2006.

LUCKMANN, L. Relatório Final de Estágio – Engenharia Química, 1999. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

MANO, E. B. *Introdução a Polímeros*, editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo/SP, 1985.

MANO, E. B. *Polímeros como Materiais de Engenharia*, editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo/SP, 1991.

MEDINA, M. A.; KING, J. B.; ZHANG, M. On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs). *Energy*, v. 33, p. 667-678, 2008.

MODAL, P.; KHAKHAR, D. V. Regulation of cell structure in water blown rigid polyurethane foam. *Macromolecular Symposia*, v. 216, p. 241-254, 2004.

NARUSE, A.; NANNO, H.; KURITA, M.; INOHARA, H.; FUKAMI, T. Development of all water-blown polyisocyanurate foam system for metal-faced continuous sandwich panels. *Journal of Cellular Plastics*, v. 38, p. 385-401, 2002.

NATIONAL COIL COATING ASSOCIATION, disponível em www.coilcoating.org, acessado em setembro de 2009.

OERTEL, G. *Polyurethane Handbook*. Hanser Publisher, New York, 1993.

OLIVEIRA, J. E.; SAKOMURA, N. K.; FIGUEIREDO, J. L. J.; SANTOS, T. M. B. Efeito do isolamento térmico de telhado sobre o desempenho de frangos de corte alojados em diferentes densidades. *Revista Brasileira de Zootecologia*, v. 29, p. 1427-1434, 2000.

OLSSON, R. Engineering method for prediction of impact response and damage in sandwich panels. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, v. 4, p. 3-29, 2002.

ORSIOLI, D. A. *Estudo da Relação entre os parâmetros do processo de Injeção em alta pressão de espuma rígida de poliuretano na indústria de refrigeração*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2005.

PACHECO, M. F. M. *Síntese e Caracterização de Elastômeros Microcelulares de Poliuretano*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de Caxias do Sul, 2006.

PORTARIA CVS-15. *Normas para transporte de alimentos para consumo humano* (07/11/1991), Disponível em www.engetecno.com.br/legislacao, acessado em maio de 2008.

QUITES, E. E. C.; LIA R. L. B. Introdução a transferência de calor. Disponível em <http://wiki.sj.cefetsc.edu.br/wiki/index.php>, acessado em setembro de 2009.

RAJU. M.; REDDY C. R.; SWAMY, M.R.N.; GIRIDHAR, G.; SRIKANTH, L.; PRAKASH, M.R.; RAO, R.M.V.G.K. Repair effectiveness studies on impact damaged sandwich composite constructions. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 25, p. 5-16, 2006.

RANDON IMPLEMENTOS E PARTICIPAÇÕES S/A, disponível em <http://www.randon.com.br> Acessado em abril de 2008.

REISSNER, E. Finite deflections of sandwich plates. *Journal of Aerospace Science*, v. 38, p. 435-440, 1948.

RODOLFO JR, A.; NUNES, L. R.; ORMANJI, W. *Tecnologia do PVC – Braskem S/A – 2002.*

SARIER, N.; ONDER, E. Thermal insulation capability of PEG-containing polyurethane foams. *Thermochimica Acta*, v. 475, p. 15-21, 2008.

SCHACKELFORD, J. F. *Introduction to Materials Science for Engineers*, 5^a edição, Prentice Hall, New Jersey, 2000.

SHANSON, S.R.; KIM, J. Failure modes and optimization of sandwich structures for load resistance. *Journal of Composite Materials*, v. 37, p. 649-667, 2003.

SHARMA, R.S.; RAGHUPATHY, V.P. A holistic approach to static design of sandwich beams with foam cores. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, v. 10, p. 429-441, 2008.

SHARMA, S.C.; NARASIMHA MURTHY, H.N.; KRISHNA, M. Effect of foam density and skin material on the damping behavior of polyurethane sandwich structures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 23, p. 893-903, 2004.

SHAWKAT, W.; HONICKMAN, H.; FAM, A. Investigation of a Novel Composite Cladding Wall Panel in Flexure. *Journal of Composite Materials*, v. 42, p. 315-330, 2008.

SWANSON, S. R.; KIM, J. Failure Modes and Optimization of Sandwich Structures for Load Resistance. *Journal of Composite Materials*, v. 37, p. 649-667, 2003.

SEOK CHOI, G.; KANG, J. S.; JEONG, Y. S.; LEE S. E.; SOHN, J. Y.; An experimental study on thermal properties of composite insulation. *Thermochimica Acta*, v. 455, p. 75-79, 2007.

TECHNICAL DATA 6275 KEMLITE, A Crane Co. Company, Rev.6, 2002.

TIAN, J.; LU, T.J.; HODSON, H.P.; QUEHEILLALT, D.T.; WADLEY, H.N.G. Cross flow heat exchange of textile cellular metal core sandwich panels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 50, p. 2521-2536, 2007.

TORREIRA, R. P. *Isolamento Térmico – Calor e Frio*, Fulton Editora Técnica Ltda, São Paulo/SP, 1980.

TRANSPORTE DE ALIMENTOS PERECÍVEIS. *Qualfood: Base de dados de Qualidade e Segurança Alimentar*. Porto, 2008. Disponível em <http://qualfood.biostrument.com>, acessado em maio de 2008.

TRANSPORTE DE BENS ALIMENTARES: *características dos carros de transporte*.

O portal de hotelaria, restauração e bebidas. Lisboa, 2004. Disponível em <http://www.portalimentar.com/Artigo>, acessado em maio de 2008.

TSENG, C.; YAMAGUCHI, M.; OHMORI, T. Thermal Conductivity of Polyurethane foams from room temperature to 20 K. *Cryogenics*, v. 37, p. 305-312, 1997.

VAIDYA, U. K.; ULVEN, C.; PILLAY S.; RICKS, H. Impact Damage of Partially Foam-filled Co-injected Honeycomb Core Sandwich Composites. *Journal of Composite Materials*, v. 37, p. 611-626, 2003.

VILAR, W. D. *Química e Tecnologia dos Poliuretanos*, 3ª edição, Rio de Janeiro – RJ, 2005.

WILKES, K. E.; YARBROUGH, D. W.; GABBARD, W. A.; NELSON, G. E. Aging of polyurethane foam insulation in simulated refrigerator panels – Three-year results with third-generation blowing agents. *Journal of Cellular Plastics*, v. 38, p. 337-339, 2002.

WILKES, K. E.; YARBROUGH, D. W.; GABBARD, W. A.; NELSON, G. E. Aging of Polyurethane Foam Insulation in Simulated Refrigerator Panels – Three-year Results with Third-Generation Blowing Agents. *Journal of Cellular Plastics*, v. 38, p. 317-337, 2002.

YO, J.; YANG, C.; TIAN, L.; LIAO, D. A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. *Applied Energy*, v. 86, p. 2520-2529, 2009.

YU, Y. Y. Flexural vibrations of elastic sandwich plates. *Journal of the Aerospace Science*, v. 27, p. 272-290, 1960.