



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA SANDUÍCHE DE BASE  
POLIMÉRICA, PRODUZIDA COM RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE  
MINERAÇÃO E METALURGIA, PARA APLICAÇÃO COMO PAINEL DIVISÓRIO  
DE AMBIENTES INTERNOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Rossana Martins Miranda

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Belém

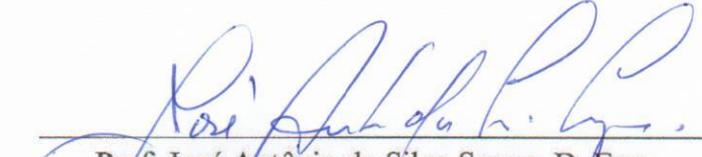
Julho de 2016

DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA SANDUÍCHE DE BASE  
POLIMÉRICA, PRODUZIDA COM RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE  
MINERAÇÃO E METALURGIA, PARA APLICAÇÃO COMO PAINEL DIVISÓRIO  
DE AMBIENTES INTERNOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Rossana Martins Miranda

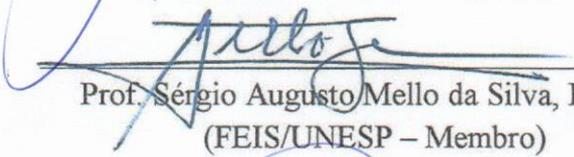
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovado por:



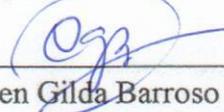
---

Prof. José Antônio da Silva Souza, D. Eng.  
(PRODERNA/UFPA – Orientador)



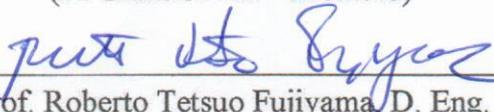
---

Prof. Sérgio Augusto Mello da Silva, D. Eng.  
(FEIS/UNESP – Membro)



---

Profa. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias, D. Eng.  
(PPGEM/UFPA – Membro)



---

Prof. Roberto Tetsuo Fujiyama, D. Eng.  
(PPGEM/UFPA – Membro)



---

Prof. Jean da Silva Rodrigues, D. Eng.  
(PPGEI/UFPA – Membro)

BELÉM – PARÁ – BRASIL

JULHO DE 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Miranda, Rossana Martins, 1961-

Desenvolvimento de uma estrutura sanduíche de base polimérica, produzida com resíduos das indústrias de mineração e metalurgia, para aplicação como painel divisório de ambientes internos na construção civil / Rossana Martins Miranda. - 2016.

Orientador: José Antônio da Silva Souza;

Coorientador: - -.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2016.

1. Engenharia de materiais. 2. Painel sanduíche. 3. Lama vermelha. 4. Caulim. I. Título.

CDD 22. ed. 620.11

---

Aos meus pais, Raymundo e Francisca, ao meu marido, Mauro e aos meus filhos Gabriela, Mariana e Gabriel.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

Aos meus pais, Raymundo Oliveira Miranda e Francisca Martins Miranda, porque sem eles, eu não chegaria aonde cheguei.

Ao meu marido Prof. Me. Mauro José Guerreiro Veloso (FEM-UFPA), por todo apoio recebido, profissional, material e emocional. Também, pela colaboração na realização do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche, apoio na interpretação dos ensaios e revisão final.

Ao Prof. Dr. José Antônio Silva Souza (FEQ-UFPA) pela orientação.

Ao Professor Dr. Roberto Tetsuo Fujiyama (FEM-UFPA) pela colaboração na elaboração da estrutura sanduíche e na realização do ensaio de compressão transversal nessa estrutura.

Ao Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo (FEM-UFPA), ao Prof. Me. Fábio Antônio do Nascimento Setúbal (FEM-UFPA), ao Eng. Civil Me. Wagner Sousa Santos, à Eng. Mecânica Dayara Souza de Sá, aos graduandos de Eng. Mecânica Gerardo Alves Nogueira Braga Neto e Gabriel Soares Quixala pela colaboração na realização do ensaio de perda de transmissão acústica.

À Profa. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias por ter me ensinado a enxergar os materiais além da forma e pela disponibilização de seu laboratório de Eco-compósitos para a realização do ensaio de flexão.

Ao Professor Dr. José Maria do Vale Quaresma, pela colaboração através da disponibilidade de seu bolsista para a realização do ensaio de flexão.

Ao Eng. Mecânico Me. Everaldo Afonso Fernandes pela realização do ensaio de flexão.

Ao Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva (UNESP – Ilha Solteira) e ao Prof. Dr. Maximiliano dos Anjos Azambuja (UNESP – Bauru), respectivamente, pela colaboração na viabilização e realização dos ensaios de tração longitudinal na lâmina, de tração transversal e de compressão longitudinal na estrutura sanduíche;

Ao professor Dr. Sílvio Alex Pereira da Mota (UFESSPA), pela colaboração na realização do ensaio de impacto e disponibilização de seu bolsista Hélio Almeida para a realização do mesmo.

À Profa. Me. Lianne Maria Magalhães Dias (FEQ-UFPA) e à Engenheira Química Me. Kamila Silva Nunes pela colaboração na realização dos ensaios de massa específica e porosidade.

À Química Industrial Dra. Raimunda Figueiredo Maia pela realização das imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Ao Eng. Químico Osvaldo Pires pela colaboração na realização do ensaio de flamabilidade.

Ao Eng. Químico Me. Emerson Cardoso Rodrigues pela colaboração na obtenção do resíduo do processamento do caulim.

Ao Eng. Químico Me. Diego Hildebrando dos Santos pela colaboração na obtenção do resíduo do processamento da bauxita (lama vermelha).

Ao graduando de Eng. Mecânica Aglailson pelo recorte dos corpos de prova.

À Françoize de Andrade dos Santos e Jose Paula Farias Andrade, minhas ajudantes nos primeiros testes para elaboração dos painéis.

Resumo da tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D. Eng.).

**DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTRUTURA SANDUÍCHE DE BASE POLIMÉRICA, PRODUZIDA COM RESÍDUOS DAS INDÚSTRIAS DE MINERAÇÃO E METALURGIA, PARA APLICAÇÃO COMO PAINEL DIVISÓRIO DE AMBIENTES INTERNOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Rossana Martins Miranda

Julho/2016

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Área de concentração: Transformação de recursos naturais

A pesquisa propôs o aproveitamento de resíduos sólidos da indústria regional de mineração e metalurgia do caulim e da bauxita em um compósito em estrutura sanduíche para aplicação como painel divisório de ambientes internos. A lâmina da estrutura sanduíche foi constituída de uma matriz de poliéster insaturada, tela dupla de juta, e 20% em massa do poliéster de resíduo de caulim e, o núcleo da estrutura, de poliuretano expansivo e lama vermelha (resíduo do processamento da bauxita para obtenção da alumina), em porcentagens 0% a 50% em massa da resina de PU (variando de 10 em 10%), totalizando 6 tratamentos diferentes. Os ensaios realizados foram os seguintes: de massa específica da lâmina da estrutura sanduíche (ASTM C271/271M – 11), de massa específica aparente (MEA) da estrutura sanduíche, de porosidade aparente (PA) da estrutura sanduíche, de tração na lâmina da estrutura (ASTM D5083-10), de tração transversal na estrutura sanduíche (ASTM C297/C297M - 04), de compressão longitudinal na estrutura sanduíche (ASTM C364/C364M–07), de compressão transversal na estrutura sanduíche (ASTM C365/C365M – 11a), de flexão por três pontos na estrutura sanduíche (ASTM D7250/D7250M – 06 e ASTM C393/C393M – 11), de impacto Charpy na estrutura sanduíche (ASTM D6110 – 10), de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche (UL 94 - 96) e de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche (ISO 140-3:1995 - E). Os resultados indicaram que a escolha de matrizes poliméricas foi apropriada para uma das características principais de uma estrutura sanduíche, que é a redução de peso, principalmente quanto à utilização da resina de poliuretano expansiva no núcleo. O incremento da lama vermelha não contribuiu para um aumento significativo da massa específica aparente da estrutura. O resíduo do caulim aumentou a resistência à tração na lâmina. O incremento da lama vermelha diminuiu as resistências à tração transversal, à flexão e ao impacto na estrutura. Quanto às compressões longitudinal e transversal na estrutura, o incremento na concentração de lama vermelha não influenciou nesses resultados, somente o acréscimo da lama vermelha diminuiu a resistência da estrutura sanduíche no primeiro

ensaio e aumentou a resistência da mesma no segundo ensaio. A alta flamabilidade do PU foi retardada por ter sido enclausurado pelas lâminas de poliéster e resíduo de caulim, comprovando que esse resíduo apresenta propriedade de retardante de chama e quanto ao ensaio de perda de transmissão acústica, o incremento de lama vermelha aumentou a perda até a concentração de 20%, depois, ficou estabilizada em 25 dB (STC) até os 50% de lama. O material, como um todo, apresentou característica de uma estrutura sanduíche, com um núcleo de baixa massa específica, contribuindo para a redução de peso da estrutura e de lâminas de maiores resistências, que proporcionaram ao compósito a funcionalidade estrutural desejada de um painel divisório de ambientes internos.

Palavras-chave: Estrutura sanduíche, poliéster, poliuretano, lama vermelha, caulim.

Abstract of thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial requirement needed to get the degree of Doctor in Natural Resources Engineering (D. Eng.)

**DEVELOPMENT OF A SANDWICH STRUCTURE BASED POLYMER,  
PRODUCED WITH MINING AND METALLURGICAL INDUSTRIAL SOLID  
WASTE, FOR APPLICATION AS INTERNAL PARTITION PANEL IN  
CONSTRUCTION**

Rossana Martins Miranda

July/2016

Advisor: José Antônio da Silva Souza

Research Area: Transformation of Natural Resources

The research proposed to use solid wastes from kaolin and bauxite mining and metallurgical regional industries in a composite of sandwich structure to apply as internal divider panel environments. The blade was of unsaturated polyester matrix, double jute fabric and, kaolin waste (20 wt% polyester) and, the core, of polyurethane expansive and red mud (bauxite waste at process to get alumina), from 0 to 50 wt% PU (increasing by 10 to 10 wt%), in a total of 6 different treatments). The tests carried out were: blade density (ASTM C271/271M – 11), sandwich structure bulk density apparent, sandwich structure porosity, tensile test on the blade (ASTM D5083-10), flatwise tensile test on sandwich structure (ASTM C297/C297M - 04), edgewise compressive test on sandwich structure (ASTM C364/C364M–07), flatwise compressive test on sandwich structure (ASTM C297/C297M - 04), 3-point flexural test on sandwich structure (ASTM D7250/D7250M – 06 e ASTM C393/C393M – 11), Charpy impact test on sandwich structure (ASTM D6110 – 10), flammability test on blade and on sandwich structure (UL 94 - 96) and sound transmission loss test on sandwich structure (ISO 140-3:1995 - E). The results indicated that the choice of polymeric matrices was suitable to reduce weight of such structure mainly the use of a PU expansive. Increasing red mud not contributed to significant increase of sandwich structure bulk density apparent. Kaolin waste reinforcement increased resistance to blade on tensile test. Red mud reinforcement reduced sandwich structure resistance on flatwise tensile, flexural and impact tests. Increasing of red mud didn't influenced sandwich structure edgewise compressive and flatwise compressive tests but, but it's use at this sandwich structure, decreased their resistance at the first test and increased at the second test. The PU high flammability was delayed for being cloistered by two blades of polyester and kaolin, proving flame retardant property of kaolin waste. And about sound transmission loss test, the increase of red mud increased that until 20% concentration, after this, stabilized at 25 dB (STC) until 50% red mud. The composite, as a whole, presented feature of a sandwich structure, with a low density core,

contributing to reduce structure weight and with higher resistant blades, providing it the desired structural feature to be a divider indoor panel.

**Keywords:** Sandwich structure, polyester, polyurethane, red mud, kaolin.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE GRÁFICOS.....	xviii
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE QUADROS.....	xxiii
NOMENCLATURA.....	xxiv
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>27</b>
1.1 – Considerações iniciais.....	27
1.2 – Objetivos.....	29
1.3 – Contribuições da tese.....	30
1.4 – Síntese da pesquisa.....	30
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>32</b>
2.1 – Materiais compósitos.....	32
2.1.1 - Classificação dos compósitos.....	34
2.1.2 - Propriedades dos compósitos.....	35
2.1.3 – Os processos de fabricação.....	36
2.2 – Compósitos de polímeros.....	37
2.2.1- Matriz polimérica.....	38
2.2.1.1. – Matriz de poliéster.....	41
2.2.1.2 – Matriz de poliuretano.....	43
2.3 – Os reforços.....	44
2.3.1 - O reforço fibroso vegetal.....	44
2.3.1.1 – O tecido ou tela de juta.....	48
2.4 – As cargas.....	49
2.4.1 – O caulim.....	50
2.4.2 - A lama vermelha.....	54
2.5 – O compósito em estrutura sanduíche.....	58
2.5.1 - As lâminas de uma estrutura sanduíche.....	59
2.5.2 - O núcleo de uma estrutura sanduíche.....	60
2.5.3 - Os adesivos.....	62
2.5.4 – Modos de falha.....	65
2.5.5 – A carga em estrutura sanduíche.....	67
2.6 – Considerações gerais sobre os ensaios na estrutura sanduíche da pesquisa.....	67
2.7 - Pesquisas em compósitos similares.....	79

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	92
3.1 – A metodologia da pesquisa.....	92
3.2- A constituição da estrutura sanduíche da pesquisa.....	93
3.3 - Os materiais utilizados para a elaboração da estrutura sanduíche.....	93
3.3.1 - O tecido ou tela de juta.....	95
3.3.2- A Resina de poliuretano.....	95
3.3.3- A Resina poliéster.....	96
3.3.4 - O Caulim.....	96
3.3.5 – A lama vermelha.....	97
3.4 - Laboratórios e equipamentos.....	97
3.5 – Etapas da confecção dos painéis sanduíche.....	98
3.5.1 – Preparação das lâminas dos painéis sanduíche.....	98
3.5.2 – Montagem do painel sanduíche.....	103
3.6 – Os ensaios realizados para caracterização de propriedades físicas e mecânicas dos painéis sanduíche.....	106
3.6.1 – O ensaio de massa específica da lâmina, de massa específica aparente e de porosidade aparente da estrutura sanduíche.....	106
3.6.1.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	106
3.6.1.2 – Os corpos de prova.....	107
3.6.1.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	107
3.6.1.4 – Procedimento.....	107
3.6.1.5 – O cálculo.....	107
3.6.2 - O ensaio de tração na lâmina.....	108
3.6.2.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	108
3.6.2.2 – Os corpos de prova.....	108
3.6.2.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	109
3.6.2.4 – Procedimento.....	109
3.6.2.5 – O cálculo.....	110
3.6.3 - O ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche.....	110
3.6.3.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	111
3.6.3.2 – Os corpos de prova.....	111
3.6.3.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	111
3.6.3.4 – Procedimento.....	112
3.6.3.5 – O cálculo.....	112
3.6.4 – O ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	112
3.6.4.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	112
3.6.4.2 – Os corpos de prova.....	113
3.6.4.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	113
3.6.4.4 – Procedimento.....	113
3.6.4.5 – O cálculo.....	114
3.6.5 - Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.....	114
3.6.5.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	114
3.6.5.2 – Os corpos de prova.....	114
3.6.5.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	114

3.6.5.4 – Procedimento.....	115
3.6.5.5 – O cálculo.....	115
3.6.6 – O ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche.....	116
3.6.6.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	116
3.6.6.2 – Os corpos de prova.....	116
3.6.6.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	116
3.6.6.4 – Procedimento.....	116
3.6.6.5 – O cálculo.....	118
3.6.7 – O ensaio de impacto Charpy na estrutura sanduíche.....	119
3.6.7.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	120
3.6.7.2 – Os corpos de prova.....	120
3.6.7.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	120
3.6.7.4 – Procedimento.....	120
3.6.7.5 – O cálculo.....	120
3.6.8 – O ensaio de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche.....	121
3.6.8.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	121
3.6.8.2 – Os corpos de prova.....	122
3.6.8.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	122
3.6.8.4 – Procedimento.....	122
3.6.8.5 – O cálculo.....	123
3.6.9 – O ensaio de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche.....	123
3.6.9.1 – Equipamentos e material para o ensaio.....	124
3.6.9.2 – Os corpos de prova.....	124
3.6.9.3 – Condicionamento dos corpos de prova.....	124
3.6.9.4 – Procedimento.....	124
3.6.9.5 – O cálculo.....	125
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES.....	128
4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica da lâmina, de massa específica aparente (MEA) e de porosidade aparente (PA) na estrutura sanduíche.....	128
4.2 – Resultados do ensaio de tração na lâmina.....	130
4.3 – Resultados do ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche.....	135
4.4 – Resultados do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	138
4.5 - Resultados do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.....	141
4.6 – Resultados do ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche.....	144
4.7 – Resultados do ensaio de impacto Charpy na estrutura sanduíche.....	149
4.8 – Resultados do ensaio de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche.....	151
4.9 – Resultados do ensaio de perde de transmissão sonora da estrutura sanduíche.....	156

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	172
5.1 – Conclusões.....	172
5.2 – Sugestões para trabalhos futuros.....	173
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	174
GLOSSÁRIO.....	183

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Combinação de materiais para constituir compósitos.....	33
Figura 2.2 – Curva tensão-deformação da fibra (frágil), da matriz (dúctil) e do compósito resultante com fibras alinhadas na direção do carregamento.....	33
Figura 2.3 – Classificação dos materiais compósitos.....	34
Figura 2.4 – Diagrama tensão x deformação dos materiais.....	37
Figura 2.5 – Fratura em material dúctil e em material frágil.....	38
Figura 2.6 - Análise termogravimétrica de alguns polímeros.....	40
Figura 2.7 – Representação esquemática de uma molécula de poliéster insaturado ortoftálico.....	42
Figura 2.8 – Reação química para se obter uma uretana.....	43
Figura 2.9 – Reação química para se obter a polimerização da poliuretana.....	43
Figura 2.10 – Tela de juta natural C-9 100.....	49
Figura 2.11– Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim.....	51
Figura 2.12 - Difração de raios X do caulim.....	53
Figura 2.13 - Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do caulim.....	53
Figura 2.14 - Análise granulométrica do caulim.....	54
Figura 2.15 – Fluxograma e desenho esquemático do processo Bayer.....	56
Figura 2.16 – Difração de raios X da lama vermelha.....	57
Figura 2.17 – Análise térmica diferencial da lama vermelha.....	58
Figura 2.18 – Constituição de um painel sanduíche.....	59
Figura 2.19 – Tipos de núcleos: (a) homogêneo e (b) e (c) não homogêneos.....	60
Figura 2.20 - Mecanismos de ruptura numa ligação por meio de adesivos.....	64
Figura 2.21 - Modos de falha em estruturas sanduíche.....	66
Figura 2.22 – Falha de uma estrutura sanduíche ao impacto.....	69
Figura 2.23 – Esquema dos estágios de combustão.....	70
Figura 2.24 – Limiar da audição humana.....	74
Figura 2.25 – Frequências audíveis e infra/ultra sons.....	77
Figura 2.26 - Espectro de frequências da voz humana.....	77
Figura 2.27 – Difração de raios X da lama vermelha.....	85
Figura 2.28 – Tempo médio de queima e taxa média de queima dos compósitos.....	86
Figura 3.1 – Fluxograma da pesquisa.....	92
Figura 3.2 – Constituição da estrutura sanduíche da pesquisa.....	94
Figura 3.3 - Alguns materiais utilizados: (a) resina de poliéster, catalizador e balança de precisão, (b) as cargas: lama vermelha e caulim, (c) resina de poliuretano: componente A (o amarelo), componente B (o escuro) e o PU expandido e (d) tecido de juta, EVA, rolo com ranhuras, misturador plástico, espátula, máscara antigases, óculos de proteção, luvas, níveis, grampos, estilete, cera desmoldante, acetona, peneira, tacos de madeira, bacias plásticas, estopa e fita adesiva.....	95
Figura 3.4 – (a) Limpeza dos vidros, (b) e (c) colocação de bordas e (d) vedação para colocação da resina.....	98

Figura 3.5 – Aplicação da cera desmoldante.....	99
Figura 3.6 – (a) Dimensionamento, (b) corte dos pedaços da tela de juta e (c) ajuste nas bordas.....	99
Figura 3.7 – Nivelamento horizontal das placas de vidro.....	100
Figura 3.8 – Homogeneização da resina poliéster e caulim: (a) colocação do caulim peneirado na resina, (b) misturados até a homogeneização e por último, o acréscimo do catalizador.....	100
Figura 3.9 – Aplicação da resina de poliéster com 20% de caulim sobre o molde: (a) despejo e (b) espalhamento.....	101
Figura 3.10 – Aplicação da tela de juta sobre a resina poliéster com 20% de caulim: (a) disposição da tela e (b) estiramento da tela para impregnação da resina com o rolo estriado.....	101
Figura 3.11 – Conclusão da elaboração da lâmina do painel: (a) aplicação do restante da resina poliéster com 20% de caulim, (b) espalhamento da resina, (c) sobreposição da segunda tela e (d) fixação da mesma sobre a anterior.....	102
Figura 3.12 – Finalização da lâmina do painel: (a) colocação da segunda placa de vidro, pressionando-o sobre a face para (b) retirada do excesso de resina.....	102
Figura 3.13 – Desforme da lâmina do painel: (a) utilização da espátula para separação dos vidros, (b) descolagem da face e finalmente, (c) a face pronta.....	103
Figura 3.14 – Homogeneização da lama vermelha no poliuretano para depois, acrescentar o isocianato.....	104
Figura 3.15 – Despejo da mistura sobre uma das lâminas do painel.....	105
Figura 3.16 – Saída do excesso da mistura ao expandir entre as lâminas do painel.....	105
Figura 3.17 – Compósito na prensa para uniformização da espessura.....	105
Figura 3.18 – Painéis sanduíche prontos.....	106
Figura 3.19 – (a) Obtenção da massa seca e da massa úmida do corpo de prova e (b) obtenção da massa imersa do corpo de prova.....	107
Figura 3.20 – Corpos de prova a serem ensaiados: (a) cp's sem caulim e (b) cp's com caulim; (c) início do ensaio e (d) final do ensaio.....	109
Figura 3.21 – Ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche: (a) máquina de ensaio, (b) aparato do ensaio e (c) cp sem LV sendo ensaiado.....	111
Figura 3.22 – O ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche: (a) corpo de prova com marcação para centralização entre os pratos e (b) o ensaio sendo realizado.....	113
Figura 3.23 – Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche: (a) cp antes do ensaio, com a marcação para centralização entre os pratos e (b) a realização do ensaio.....	115
Figura 3.24 – Configuração do carregamento para o ensaio de flexão por 3 pontos (Vão de 100 mm).....	117
Figura 3.25 – Configuração do carregamento para o ensaio de flexão por 3 pontos (Vão de 150 mm).....	117
Figura 3.26 – Ensaio de flexão por 3 pontos na estrutura sanduíche.....	118

Figura 3.27 – O ensaio de impacto Charpy: (a) os corpos de prova com suas marcações, (b) o equipamento de ensaio e (c) o posicionamento do cp no equipamento.....	121
Figura 3.28 – Ensaio de flamabilidade: (a) cp's antes do ensaio: lâmina com caulim, lâmina sem caulim e a estrutura sanduíche (de cima para baixo, resp.) e (b) aparato de ensaio.....	122
Figura 3.29 – Aparelhagem de teste de queima horizontal.....	123
Figura 3.30 – Esquema da instalação dos equipamentos para o ensaio de acústica.....	125
Figura 3.31 – (a) As duas minicâmaras abertas, (b) colocação do corpo de prova para o ensaio, (c) fechamento das minicâmaras com o corpo de prova entre elas e (d) detalhe do corpo de prova entre as minicâmaras aparafusadas. O cabo é o da fonte.....	126
Figura 3.32 – (a) ambiente emissor (microfone e fonte), (b) ambiente receptivo (microfone), (c) medidor de pressão sonora e (d) amplificador.....	127
Figura 4.1 – Corpos de prova pós-ensaio: (a) cp's sem caulim e (b) cp's com caulim.....	132
Figura 4.2 - MEV da face sem caulim: (a) as fibras foram seccionadas, indicando boa adesão fibra/matriz; (b) detalhe da fibra seccionada e (c) fibras do fio do tecido: sem molhabilidade pela matriz.....	133
Figura 4.3 - MEV da face do compósito (com caulim): (a) o caulim sedimentou no processo de cura, indo mais para a parte mais externa da face; (b) o caulim penetrou juntamente com a matriz nos vazios do tecido e (c) boa aderência da fibra na matriz com carga.....	134
Figura 4.4 – Ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche: (a) cp's sem LV e (b) cp's com LV pós-ensaios.....	137
Figura 4.5 – Ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche: (a) rompimento do corpo de prova e (b) detalhe dos corpos de prova rompidos.....	139
Figura 4.6 – Trincas nos cp's no ensaio de compressão longitudinal: (a) na lâmina/núcleo na extremidade, (b) de delaminação total e (c) no núcleo, próximas à ruptura da lâmina.....	140
Figura 4.7 – Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche: (a) cp antes do ensaio, (b) cp com esmagamento do núcleo após ensaio e (c) trincas na lâmina inferior após ensaio.....	143
Figura 4.8 – Ensaio de flexão na estrutura sanduíche: (a) corpo de prova sofrendo ruptura nas lâminas, (b) corpo de prova com 0% de LV rompido totalmente, sem apresentar descolamento ou trincas no núcleo e (c) detalhe do corpo de prova com 40% de LV rompido, com trinca no núcleo.....	147
Figura 4.9 – Corpos de prova pós-ensaio de impacto Charpy.....	151
Figura 4.10 – Ensaio de flamabilidade: (a) evolução da queima do cp, (b) o núcleo foi consumido mais rapidamente pela chama, (c) cp da estrutura sanduíche após ensaio e (d) lâmina sem caulim e lâmina com caulim (de cima para baixo, resp.).....	155

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Massas específicas das lâminas.....	128
Gráfico 4.2 – Massa específica aparente da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	129
Gráfico 4.3 – Porosidades aparentes da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	129
Gráfico 4.4 – Força x deslocamento em tração na lâmina.....	131
Gráfico 4.5 - Resistência à tração das lâminas.....	131
Gráfico 4.6 - Módulo de elasticidade à tração das lâminas.....	132
Gráfico 4.7 – Resistência à tração transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos .....	136
Gráfico 4.8 – Módulo de elasticidade à tração transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	136
Gráfico 4.9 – Força x deslocamento no ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	138
Gráfico 4.10 – Comparação entre as tensões máximas à compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	139
Gráfico 4.11 – Força x deslocamento no ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.....	141
Gráfico 4.12 – Tensão máxima à compressão transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	142
Gráfico 4.13 – Módulo de elasticidade à compressão transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	142
Gráfico 4.14 – Relação força x deslocamento à flexão na estrutura sanduíche para o vão de 100mm.....	145
Gráfico 4.15 – Tensões máximas à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100mm.....	145
Gráfico 4.16 – Módulos de elasticidade à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100mm.....	145
Gráfico 4.17 – Relação força x deslocamento à flexão na estrutura sanduíche para o vão de 150mm.....	146
Gráfico 4.18 – Tensões máximas à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 150mm.....	146
Gráfico 4.19 – Módulos de elasticidade à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100mm.....	147
Gráfico 4.20 - Energia absorvida no ensaio de impacto na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	149
Gráfico 4.21 - Resistência ao impacto na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	150
Gráfico 4.22 – Tempo de queima da lâmina da estrutura sanduíche.....	153
Gráfico 4.23 – Tempo de queima da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	153
Gráfico 4.24 – Taxa de queima linear da lâmina da estrutura sanduíche.....	154

Gráfico 4.25 – Taxa de queima linear da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	154
Gráfico 4.26 – Perda de transmissão sonora da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	158
Gráfico 4.27 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 0% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	157
Gráfico 4.28 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 10% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	159
Gráfico 4.29 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 20% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	159
Gráfico 4.30 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 30% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	160
Gráfico 4.31 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 40% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	160
Gráfico 4.32 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 50% de lama vermelha e sua respectiva STC.....	161
Gráfico 4.33 – Comparação entre as classes de transmissão sonora (STC) da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	161
Gráfico 4.34 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 100Hz.....	162
Gráfico 4.35 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 125Hz.....	163
Gráfico 4.36 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 160Hz.....	163
Gráfico 4.37 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 200Hz.....	164
Gráfico 4.38 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 250Hz.....	164
Gráfico 4.39 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 315Hz.....	165
Gráfico 4.40 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 400Hz.....	165
Gráfico 4.41 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 500Hz.....	166
Gráfico 4.42 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 630Hz.....	166
Gráfico 4.43 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 800Hz.....	167
Gráfico 4.44 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 1.000Hz.....	167
Gráfico 4.45 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 1.250Hz.....	168
Gráfico 4.46 – Perda de transmissão acústica das estruturas sanduíche na frequência de 1.600Hz.....	168

Gráfico 4.47 – Perda de transmissão acústica das estruturas sanduíche na frequência de 2.000Hz.....	169
Gráfico 4.48 – Perda de transmissão acústica das estruturas sanduíche na frequência de 2.500Hz.....	169
Gráfico 4.49 – Perda de transmissão acústica das estruturas sanduíche na frequência de 3.125Hz.....	170

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Amplitude de algumas propriedades por classe de material.....	36
Tabela 2.2 - Comparação de densidades de alguns materiais.....	39
Tabela 2.3 - Propriedades da resina termofixa de poliéster.....	42
Tabela 2.4 - Propriedades das fibras naturais e sintética de vidro-E.....	47
Tabela 2.5 - Composição química da juta.....	48
Tabela 2.6 - Substâncias orgânicas presentes na juta.....	48
Tabela 2.7 - Características físicas e mecânicas da tela de juta C-9 100.....	49
Tabela 2.8 - Demanda mundial de caulim.....	50
Tabela 2.9 - Características gerais do caulim.....	52
Tabela 2.10 - Composição química do caulim beneficiado em Barcarena.....	52
Tabela 2.11 - Características do óxido de alumínio presente nas rochas de bauxita.....	54
Tabela 2.12 - Composição química da lama vermelha gerada no Brasil (em %)......	56
Tabela 2.13 - Composição química média da lama vermelha.....	57
Tabela 2.14 - Propriedades físicas e mecânicas de alguns polímeros utilizados como matrizes em lâminas de estruturas sanduíche.....	61
Tabela 2.15 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas espumas utilizadas como núcleos em estruturas sanduíche.....	63
Tabela 2.16 - Temperatura de decomposição de alguns polímeros.....	71
Tabela 2.17- Pressões sonoras e níveis de pressão sonora para sons do cotidiano e correspondentes sensações subjetivas de intensidade associadas.....	75
Tabela 2.18 - Valores da perda de transmissão para sons aéreos de partições diversas.....	76
Tabela 2.19 - Classe de transmissão sonora (STC), condições de privacidade e classificações subjetivas associadas.....	78
Tabela 2.20 - Classe de transmissão sonora de partições feitas de materiais construtivos mais comuns.....	78
Tabela 2.21 - Classificação do isolamento acústico.....	79
Tabela 2.22 - Massas específicas das lâminas da pesquisa de Ferreira.....	80
Tabela 2.23 – Resultados do ensaio de tração das faces da pesquisa de Ferreira.....	80
Tabela 2.24 - Propriedades da resina de poliéster Polyte 10316-10.....	85
Tabela 2.25 – Propriedades da resina de poliéster insaturado da pesquisa de Gehlen.....	89
Tabela 2.26 – Formulação dos compósitos de polipropileno, polifosfato de amônio e caulim em proporção de fase.....	89
Tabela 2.27 – Resultados da pesquisa de Caldas.....	91
Tabela 3.1 - Especificações da resina de poliuretano.....	96
Tabela 3.2 - Características da resina poliéster cristal.....	96
Tabela 3.3 - Características do catalizador Butanox.....	96
Tabela 4.1 – Resultados das massas específicas das lâminas.....	128
Tabela 4.2 – Resultados das massas específicas aparentes e porosidades aparentes médias da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.....	128
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de tração na lâmina.....	130

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche.....	135
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	138
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche .....	141
Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche – Vão de 100mm.....	144
Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche – Vão de 150mm.....	146
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de impacto Charpy na estrutura sanduíche.....	149
Tabela 4.10 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal na lâmina e na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (valores médios).....	152
Tabela 4.11 – Grupos de frequências no estudo de acústica.....	156
Tabela 4.12 – Frequências de ensaio recomendadas pela norma de acústica.....	156

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1- Classificação química dos materiais.....	34
Quadro 2.2- Classificação dos reforços fibrosos vegetais.....	45
Quadro 2.3 - Tipos de estrutura sanduíche da pesquisa de Wen-Chao e Chung-Fai.....	84
Quadro 3.1 – Tratamentos no painel sanduíche.....	104
Quadro 4.1 – Comportamento dos corpos de prova após ensaio de tração nas lâminas.....	132
Quadro 4.2 – Comportamento dos corpos de prova após ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche.....	137
Quadro 4.3 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.....	140
Quadro 4.4 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de compressão transversal na estrutura sanduíche.....	143
Quadro 4.5 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 100 mm.....	148
Quadro 4.6 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 150 mm.....	148
Quadro 4.7 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de impacto Charpy.....	150
Quadro 4.8 – Comportamento dos corpos de prova de estrutura sanduíche pós-ensaio de flamabilidade.....	156

## NOMENCLATURA

$A$  – área

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio

$A_R$  = absorção sonora

ATH – alumina tri-hidratada

$b$  – base

$c$  – distância da linha neutra à superfície do corpo de prova

cp – corpo de prova

CTC – Companhia Têxtil de Castanhal

DTA - análise térmica diferencial

$E$  - constante de proporcionalidade, módulo de elasticidade ou Módulo de Young

EVA – etilenovinilacetato

$E_T$  – módulo de elasticidade na direção  $z$  ( $T$ , espessura)

$e$  – espessura

$e_f$  – espessura de uma face

$F$  – força

$F_{\max}$  – força máxima

$f$  - flecha

$f_{\tau LT}$  - tensão limite cisalhante no plano  $xz$  ( $L$ , comprimento e  $T$ , espessura)

$G$  – módulo de cisalhamento

$G_{LT}$  – módulo de cisalhamento no plano  $xz$  ( $L$ , comprimento e  $T$ , espessura)

$h$  – altura

IRCC - Imerys Rio Capim Caulim S/A

HDT – temperatura de distorção térmica

Hydro Alunorte – Alumina do Norte do Brasil SA

$J$  – momento de inércia

$L$  – comprimento útil

LV – lama vermelha

$l_f$  – comprimento final

$l$  - largura

$l_0$  - comprimento inicial

$L_d$  – comprimento do dano

$L_p$  - nível de pressão sonora

$L_R$  - média do nível de pressão sonora no ambiente receptivo

$L_S$  - média do nível de pressão sonora no ambiente fonte

MEA - massa específica aparente

MEV – microscopia eletrônica de varredura

$M_f$  – o momento fletor

Mt - megatonelada

$m$  – massa

$m_i$  – a massa imersa do material

$m_s$  - a massa seca do material

$m_u$  - a massa úmida do material  
 Neoprene - elastômeros clorados  
 $P$  - propriedade do compósito  
 $PA$  - porosidade aparente  
 $PE$  - polietileno  
 $PEEK$  - polieteretercetona  
 $PET$  - poliésteres  
 $PLA$  - poli-ácido-láctico  
 $PP$  - polipropileno  
 $PS$  - poliestireno  
 $PTFE$  - politetrafluoretileno  
 $PU$  - poliuretano  
 $PVC$  - polivinilcloro  
 Plano LT - plano xz (L, comprimento e T, espessura)  
 Plano WT - plano yz (W, largura e T, espessura)  
 $PT$  - perda de transmissão  
 $P_a$  - propriedade do componente A  
 $P_b$  - propriedade do componente B  
 $p$  - profundidade  
 $p_{eficaz}$  - valor eficaz da pressão sonora  
 $p_0$  - pressão sonora de referência  
 $S$  - área do corpo de prova em teste exposta no ambiente receptivo  
 $T$  - tempo de reverberação  
 $TGA$  - análise termogravimétrica  
 $TL$  - a perda de transmissão  
 $T_g$  - temperatura de transição vítrea  
 $t$  - tempo  
 $USGSMRP$  - *United States Geological Survey Mineral Resources Program*  
 $V$  - volume  
 $V_i$  - a velocidade do pêndulo no momento do impacto  
 $V_a$  - fração volumétrica do componente A  
 $V_b$  - fração volumétrica do componente B  
 $V_q$  - razão linear de queima  
 $W_r$  - módulo de resistência da seção transversal  
 $\alpha$  - coeficiente de dilatação térmica  
 $\Delta l$  - alongamento  
 $\delta$  - deslocamento  
 $\varepsilon$  - deformação ou deformação específica  
 $\rho$  - densidade  
 $\rho_{mi}$  - a densidade do meio em que o material foi imerso  
 $\mu$  - viscosidade  
 $\sigma$  - tensão  
 $\sigma_{esm}$  - tensão limite à compressão (esmagamento)

$\sigma_f$  – tensão de flexão

$\sigma_{max}$  – tensão na força máxima

$\sigma_t$  – ruptura à tração

$\sigma_c$  – ruptura à compressão

$\nu$  - Coeficiente de Poisson

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 - Considerações iniciais

Ocorre, regionalmente, a geração de uma grande quantidade de resíduos sólidos da indústria de mineração e metalurgia do caulim e da bauxita que se apresenta como uma preocupação real devido ao seu impacto sócio-ambiental. Esses resíduos precisam de uma destinação mais segura, do que somente as bacias de contenção e, por esse motivo, há a necessidade do aproveitamento dos mesmos como matérias-primas de outras indústrias, como a da construção civil. A pesquisa trata do estudo de um material compósito em estrutura sanduíche para aplicação como painel divisório de ambientes internos, utilizando os resíduos da indústria de mineração e metalurgia do Estado do Pará, resultantes dos processos para obtenção do caulim e da alumina, nesse caso, denominado de lama vermelha. Segundo Mostafa *et al.* (2015, p. 1545), compósitos em estrutura sanduíche consistem de um núcleo (ou miolo) de baixa densidade entre duas faces (ou lâminas) constituídas de material mais rígido, que são muito utilizados na engenharia naval e aeronáutica em estruturas e elementos estruturais que exigem alta rigidez e resistência, juntamente com baixo peso específico. A estrutura sanduíche da pesquisa é constituída de um núcleo em resina de poliuretano expansivo com adição de lama vermelha, em quantidade variando de 0 a 50% em massa dessa resina e de duas lâminas externas em camada dupla de tela de juta e resina de poliéster insaturada, acrescida de caulim (20% em massa da resina), sendo as lâminas elaboradas pelo processo *hand lay up* (laminação manual) e o núcleo, por moldagem de espuma expandida.

Um material para aplicação como painel divisório deve apresentar resistências compatíveis com a sua utilização e leveza, para que essas placas possam ser apoiadas em perfis estruturais metálicos, plásticos ou de madeira, constituindo, assim, um material pré-moldado, devendo, também, ter características acústicas e suas superfícies externas devem ter boa aparência e bom acabamento. A escolha de uma estrutura sanduíche ocorreu para a obtenção de uma estrutura de peso, rigidez e resistência adequada para utilização como painel divisório de ambientes internos. A seleção dos materiais constituintes e do processo construtivo dessa estrutura foi feita levando em consideração fatores sociais, econômicos, ambientais e estéticos, embasada em preocupações com o meio ambiente e com redução de custos que, segundo O'Donnell *et al.* (2003, p. 1135) e Müeller e Krobjilowski (2003, p. 112 - 114), tem incentivado pesquisas de materiais de base natural, particularmente de compósitos, pela utilização de materiais renováveis, biodegradáveis ou menos prejudiciais ao meio ambiente quanto do seu processamento e descarte pós-uso em substituição, sempre que possível, de matrizes e reforços derivados do petróleo, dentre elas, as fibras sintéticas tradicionalmente empregadas como reforço em materiais compósitos, tais como, as fibras de carbono, de vidro e aramida, considerando que as fibras naturais apresentam vantagens como reforço tais como, baixa densidade (as fibras naturais são constituídas

de espaços vazios denominados lúmens, que fazem com que a densidade das fibras seja 40% menor do que a das fibras de vidro), proporcionando compósitos de baixo peso com elevadas propriedades específicas, baixo custo e processamento mais barato se comparadas às fibras sintéticas (a demanda de energia para fabricação de um tecido de fibra natural, incluindo cultivo, colheita e dissociação da fibra, é 30 - 40% menor do que para produzir uma manta de fibra de vidro, por exemplo).

O tecido (ou tela) de juta foi empregado como reforço no painel para dar outra aplicação a esse material, que, atualmente, é empregado basicamente em sacarias (serapilheiras) e artesanatos. Segundo a Companhia Têxtil de Castanhal (no Município de Castanhal, no Estado do Pará)<sup>1</sup>, de onde a tela de juta foi adquirida, a Juta (*Corchorus capsularis*) é uma fibra vegetal que foi introduzida no Brasil pelos japoneses, tornando-se uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental na fixação de mais de 15 mil famílias no campo. A companhia afirma que no processo de transformação da fibra em tecido são utilizados apenas aditivos orgânicos e óleos vegetais, que associado às características naturais da planta, faz com que os produtos de juta sejam totalmente biodegradáveis, ou seja, quando do descarte após uso, ele se desintegra completamente em menos de um ano sem deixar qualquer resíduo ou dano ambiental. Além do que, as sacarias de fibra de juta, atualmente, estão sendo substituídas por sacarias de fios sintéticos (polietileno) mais baratos e resistentes para o transporte de grãos e legumes, trazendo prejuízos na produção dessa empresa que tem grande importância econômica para aquela região.

A resina de poliuretano, empregada como núcleo, foi a expansiva (que forma uma espuma) para contribuir na redução de peso do painel, fundamentado em Almeida (2009, p. 6) que afirma que as espumas de poliuretano têm aplicações em diversas áreas da engenharia, como por exemplo, na redução de peso nas estruturas, em isolamento acústico de janelas, em reparos de concreto, de fundações e de dutos, como núcleo de coletes para absorção de impacto, isolantes térmicos em câmaras e caminhões frigoríficos, dentre outras aplicações.

A lama vermelha é o rejeito da indústria de beneficiamento da bauxita para produção da alumina ( $Al_2O_3$ ) através do processo Bayer e a estimativa de geração desse rejeito no Brasil é de 0,3 t lama vermelha/t de alumina para bauxitas de alta qualidade (alto teor de alumínio), segundo o *United States Geological Survey Mineral Resources Program* (USGSMRP) e de 2,5 t lama vermelha/t de alumina para bauxita de baixa qualidade segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) (SILVA FILHO *et al.*, 2007, p. 327). A lama vermelha dessa pesquisa é proveniente da empresa de refinaria de alumina Hydro Alunorte<sup>2</sup>, localizada no Município de Barcarena, Estado do Pará e foi utilizada como carga no núcleo da estrutura, com o objetivo de incrementar propriedade de perda de transmissão acústica, dando outra destinação a esse rejeito que não seja as

---

<sup>1</sup> [http:// www.castanhal.com.br/](http://www.castanhal.com.br/). Acesso em: 09 mai.2014.

<sup>2</sup> <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Operacoes-no-Brasil/Alunorte-Alumina-do-Norte-do-Brasil-SA/>. Acesso em: 11 mai.2014.

bacias ou depósitos de contenção. Também, a lama vermelha foi inserida no núcleo da estrutura com o objetivo de enclausurá-la, devido à presença de hidróxido de sódio (soda cáustica), ferro, alumínio, dentre outros agentes químicos nesse rejeito.

O caulim é aplicado principalmente na indústria de papel, mas também, na de tintas, de cerâmicas, na construção civil, de borrachas e plásticos, de fertilizantes, de inseticidas e farmacêuticas. O caulim utilizado na pesquisa é um resíduo proveniente do processo de beneficiamento do caulim produzido pela Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC<sup>3</sup>, localizada no Município de Barcarena, Estado do Pará e ele foi utilizado para incrementar propriedades mecânicas e térmicas nas lâminas da estrutura sanduíche.

A utilização dessas cargas também contribui para a economia de resina, já que elas são inseridas na estrutura como porcentagem em massa das resinas empregadas.

A resina de poliéster insaturada foi empregada nas lâminas com objetivo estrutural, juntamente com a tela de juta, propiciando rigidez ao compósito e função estética, dando um bom acabamento ao painel, e que por ser incolor e transparente, é passível de receber aplicação de corantes, influenciando bastante na estética do produto final.

A escolha dos processos construtivos *hand lay up* (laminação manual) para elaboração das lâminas e moldagem de espuma expandida para elaboração do núcleo e finalização da estrutura sanduíche, foi devido à possibilidade de produção desses painéis com capacitação técnica no laboratório, com controle adequado de parâmetros e variáveis do processo de produção dos painéis e consequente avaliação de suas propriedades físicas e mecânicas.

## 1.2 – Objetivos

O objetivo principal é desenvolver uma estrutura sanduíche com duas fases, uma fase compacta de base poliéster como material estrutural, reforçada com tela de juta e com a utilização do resíduo da mineração do caulim e outra fase porosa de base poliuretano, utilizando o resíduo resultante do processo Bayer da indústria de alumínio, visando sua utilização como painel divisório de ambientes internos na indústria da construção civil.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar as propriedades mecânicas de tração, compressão, flexão e impacto em função dos teores de adição dos resíduos minerais;
- Avaliar propriedade de retardo de chama (flamabilidade) deste material;
- Estudar as propriedades acústicas apresentadas pelo par das resinas poliéster/uretano e a influência da adição de lama vermelha nesta propriedade e
- Avaliar a possibilidade de uso deste material como painéis divisórios internos na indústria da construção civil.

---

<sup>3</sup> <http://www.imerysno para.com.br/caulim/caulim/>. Acesso em: 19 set.2014.

### 1.3 – Contribuições da tese

As contribuições da tese foram:

- Possibilitar a utilização da lama vermelha como isolante acústico no núcleo do painel, dando a ela outra destinação além do descarte em piscinas de contenção, contribuindo para diminuir problemas ecológicos;
- Possibilitar a utilização do caulim como retardante de chama nas lâminas do painel;
- Possibilitar a utilização das telas de juta como reforço no painel divisório, dando uma destinação mais nobre a este material, do que somente o emprego em sacarias e artesanatos;
- Possibilitar a utilização de recursos naturais renováveis como a fibra de juta em compósitos;
- Proposta de um novo material.

### 1.4 - Síntese da pesquisa

A pesquisa trata da proposta de um compósito para emprego como material alternativo para painéis divisórios de ambientes internos. Esse painel divisório se apresenta como um compósito híbrido em estrutura sanduíche, onde as lâminas são constituídas de um laminado em camada dupla reforçado com tela de juta numa matriz de resina poliéster insaturada (termofixa), acrescido de 20% em massa da resina de resíduo de caulim e o núcleo, constituído de uma resina de poliuretano expandido (termofixa) e lama vermelha, com sua porcentagem em massa da resina variando de 0 até 50%, com incremento de 10 em 10%, constituindo assim, seis tipos diferentes de tratamentos.

Os ensaios realizados nesta pesquisa foram para a:

- determinação da massa específica da lâmina, da massa específica aparente e porosidade aparente da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM C271/271M – 11);
- determinação da resistência à tração da lâmina da estrutura sanduíche (ASTM D5083-10);
- determinação da resistência à tração transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM C297/C297M - 04);
- determinação da resistência à compressão longitudinal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM C364/C364M – 07);
- determinação da resistência à compressão transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM C365/C365M – 11a);
- determinação da resistência à flexão por 3 pontos da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM D7250/D7250M – 06 e ASTM C393/C393M – 11);
- determinação da resistência ao impacto da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ASTM D6110 – 10);

- determinação das características de flamabilidade da lâmina e da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (UL 94 – 96) e
- determinação da perda de transmissão sonora da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (ISO 140-3:1995 – E).

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Materiais compósitos

A humanidade, no seu processo evolutivo da passagem de um sistema social/econômico/tecnológico de caçadores-coletores (selvageria) para agricultores e pastores (barbárie) até a concentração em cidades e divisão social (civilização), sempre fez uso de materiais/técnicas que permitiram sua sobrevivência, como a utilização da pedra, de peles, de ossos e chifres de animais, da fiação de fibras, do controle do fogo, da invenção da roda, da utilização do ferro, do bronze, do ouro, etc (CHILDE, 1978, p. 10). Os materiais compósitos são originários das primeiras sociedades agrícolas que utilizavam paus, pedras, ossos de animais para elaboração de ferramentas, armas, carroças. Nessa evolução, era feito também uso de fibras naturais, de ramos de plantas, da palha, de fios, de fiações e de tecidos para fazer barcos, velas e cordas, como os egípcios faziam desde o ano 4000 a. C. e utilização da argila e da palha para fazer tijolos estruturais há mais de 2000 anos a. C. Os compósitos com fibras sintéticas são produtos do século XIX, quando foi feito o primeiro polímero, o fenol-formaldeído, reforçado com fibra de linho para fazer o baquelite, muito utilizado para equipamentos elétricos. Durante a segunda metade do século XX, houve o reaparecimento desses materiais pela necessidade de estruturas compósitas leves, inicialmente utilizadas em aplicações elétricas como dielétricos e cúpulas de radar pelas suas propriedades eletromagnéticas. O uso de compósitos se tornou muito comum nas décadas de 80 e 90, para melhorar o desempenho de veículos espaciais e aviões militares (VENTURA, 2009, p. 10 e 11).

Define-se material como sendo aquilo que empregamos na confecção de bens materiais tais como: habitações, veículos, máquinas e equipamentos, utensílios, etc. Os materiais são classificados tecnicamente em três classes principais independentes, que são os metais, cerâmicos e polímeros e uma composta, denominada de compósitos. A combinação de materiais, na constituição de um compósito, pode ser entre metais, cerâmicas e polímeros (FIG. 2.1). Essa combinação, a princípio, depende da finalidade do emprego do compósito. Depende também, das características de cada material constituinte e da compatibilidade entre eles. Os materiais metálicos, combinações de elementos metálicos, têm aplicações estruturais, devido serem resistentes e deformáveis. São também bons condutores de eletricidade e calor e, apresentam opacidade. Os materiais cerâmicos, compostos de elementos metálicos e não-metálicos, resistem às altas temperaturas, à eletricidade e quanto ao comportamento mecânico, são duros, porém, quebradiços e os materiais poliméricos, que são compostos orgânicos quimicamente a base de carbono, hidrogênio e outros elementos não-metálicos, apresentam estruturas moleculares muito largas, são materiais de baixa densidade, podendo ser extremamente flexíveis, incluindo aqui os plásticos e borrachas (CALLISTER, 2003, p. 5).

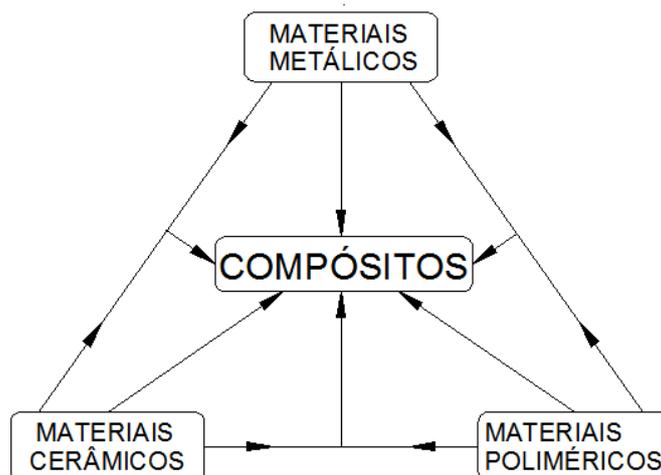


Figura 2.1 – Combinação de materiais para constituir compósitos.  
Fonte: Adaptada de Silvestre Filho, 2001, p. 6.

Compósito é um material constituído por dois ou mais materiais diferentes, designados por fases, que são reunidos, em escala macroscópica, para apresentar propriedades (físicas, químicas, mecânicas, etc) que, individualmente, não seriam capazes de ter para emprego em determinadas aplicações (MENDONÇA, 2005, p. 3 e VENTURA, 2009, p. 12). A FIG. 2.2 ilustra isso através de um gráfico de tensão-deformação de um material compósito, onde é possível observar a combinação de dois materiais com propriedades complementares, a fibra (frágil) e a matriz (dúctil) para a elaboração de um material que apresentará uma propriedade intermediária entre os dois.

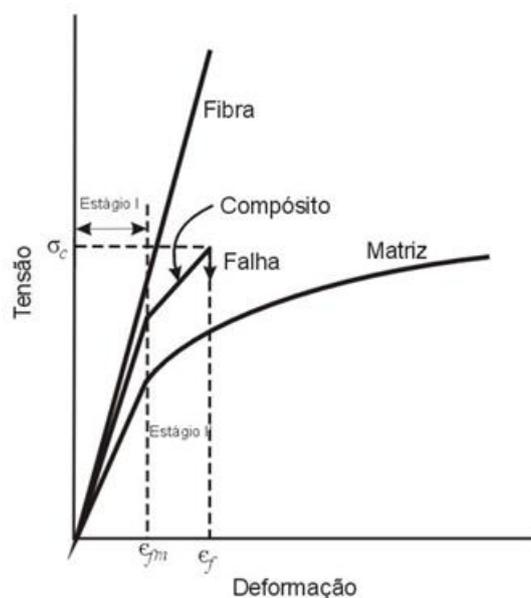


Figura 2.2 – Curva tensão-deformação da fibra (frágil), da matriz (dúctil) e do compósito resultante com fibras alinhadas na direção do carregamento.

Fonte: Callister, 2003, p. 365.

As **fases** de um material compósito são duas: uma **contínua** e outra **dispersa**. A **fase contínua** constitui a **matriz**, que envolve a outra fase, agindo como aglomerante, protegendo e dando forma ao compósito e a fase **dispersa ou descontínua** constitui o reforço/as cargas, que são materiais insolúveis na fase matriz. Os reforços são utilizados para melhorar as propriedades mecânicas do compósito e as cargas são empregadas para diminuir custos ou melhorar propriedades que se deseja que o compósito apresente, tais como leveza, estabilização, resistência ao calor, resistência à corrosão, resistência à propagação de chamas, de condutividade elétrica (resistência/propagação), etc (MENDONÇA, 2005, p. 3 e 5).

### 2.1.1 - Classificação dos compósitos

A classificação química dos materiais, quanto ao tipo de ligação, menor partícula e estrutura, está no QUADRO 2.1. Os polímeros, que na maioria das vezes, possuem origem orgânica, são hidrocarbonetos, com ligações intramoleculares covalentes, que podem formar hidrocarbonetos saturados (com ligações simples) ou hidrocarbonetos insaturados (formados por ligações covalentes duplas ou triplas). A menor partícula característica de um polímero é uma cadeia de moléculas e sua estrutura é geralmente amorfa.

Quadro 2.1 - Classificação química dos materiais

Material	Ligação	Menor partícula	Estrutura
Metais	Metálica	Átomo	Cristalina
Semicondutores	Covalente (iônica)	Átomo	Cristalina (raram. amorfa)
Cerâmicos	Covalente (iônica)	Molécula	Cristalina
Vidros	Covalente (iônica)	Molécula	Amorfa
Polímeros	Covalente (lig. secundárias)	Cadeia de moléculas	Amorfa (raram. cristalina)

Fonte: Callister, 2003, resumido do cap. 1 e 2.

Os compósitos podem, também, ser classificados baseados na geometria dos seus componentes estruturais, conforme sejam reforçados por fibras ou por partículas (ver FIG. 2.3).

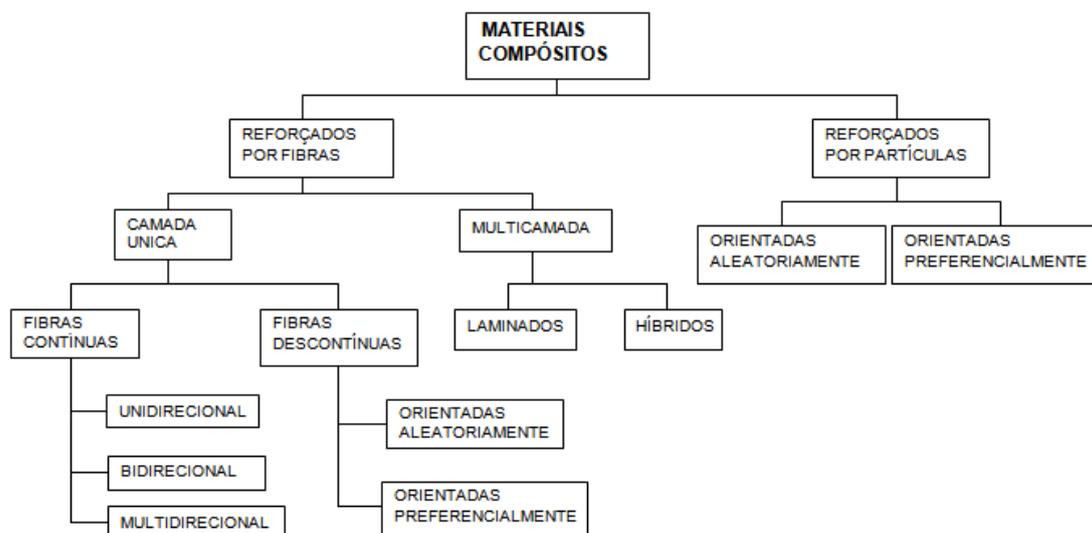


Figura 2.3 – Classificação dos materiais compósitos.

Fonte: Silvestre Filho, 2001, p. 10.

Razão de aspecto (*aspect ratio*) de um reforço, relação entre comprimento (L) e diâmetro (D) do mesmo, é a característica que diferencia fibra de partícula. Quando  $L/D \geq 100$ , o reforço é denominado de fibra, caso contrário, é denominado de partícula<sup>4</sup>. Essa característica classifica os materiais compósitos em reforçados por fibras ou por partículas. Os reforçados por fibras podem se apresentar constituídos por uma única camada ou por duas ou mais camadas, denominada multicamada. Um compósito de única camada pode se apresentar com fibras contínuas ou descontínuas (denominados *whiskers*). As fibras contínuas em um compósito podem ser dispostas seguindo uma única direção (unidirecional), duas direções (bidirecional) ou mais de duas direções (multidirecional). Um compósito constituído por fibras descontínuas pode apresentá-las orientadas aleatória ou preferencialmente. Os compósitos classificados como multicamadas são denominados de laminados ou híbridos; dentro dos híbridos estão os que apresentam estrutura sanduíche. E finalmente, os compósitos reforçados por partículas, semelhante aos reforçados por fibras descontínuas, também podem apresentá-las orientadas aleatória ou preferencialmente.

### 2.1.2 - Propriedades dos compósitos

As propriedades dos compósitos não dependem unicamente das características dos materiais que os constituem, mas, também das suas quantidades relativas, da geometria da fase dispersa [sua concentração, tamanho (particulados, fibras descontínuas e fibras contínuas), forma, distribuição e orientação] e da compatibilidade interfacial entre os constituintes da mistura. Portanto, as propriedades dos compósitos são funções das propriedades de suas fases constituintes e da sua utilização conjunta, expressa pela seguinte equação denominada de Regra das Misturas:

$$P = P_a V_a + P_b V_b \quad (1)$$

Onde:

$P$  – é a propriedade do compósito;

$P_a$  – é a propriedade do componente A;

$V_a$  – é a fração volumétrica do componente A;

$P_b$  – é a propriedade do componente B;

$V_b$  – é a fração volumétrica do componente B;

De acordo com essa regra, cada fase constituinte do compósito contribui para as propriedades efetivas do compósito, sendo essa contribuição dependente das frações volumétricas dos constituintes. Essa formulação possibilita apenas estimativas aproximadas, pois não leva em conta a presença de vazios nem o efeito da interface, considerando uma interface perfeita entre matriz e carga (CUPERTINO, 2009, pp. 29 e 30).

---

<sup>4</sup> <http://www.braskem.com.br/>. Acesso em: 8 mai.2016.

A fase contínua é a matriz que pode ser um material metálico, cerâmico ou polimérico, que serve para dar a forma ao compósito, manter o reforço no lugar e preencher os vazios entre o reforço. As matrizes metálicas apresentam limitações devido ao fator temperatura, com poucas aplicações à baixa temperatura. Altas temperaturas no fabrico das matrizes cerâmicas implicam em reforços que as suportem. Os compósitos com matriz cerâmica são resistentes à oxidação e a deterioração sob temperaturas elevadas, porém, predispostos à fratura. Um grupo importante de compósitos quanto ao desempenho e campo de aplicação é o de matriz polimérica (PMC – Polymer Matrix Composites) (VENTURA, 2009, p. 12-14).

O que ocorre na interface fibra/matriz é de grande importância num compósito, pois a fibra deve estar muito bem aderida à matriz para receber da mesma as solicitações de esforços a que é submetida. Porém, dependendo das características físicas e químicas da fibra e da matriz, elas podem apresentar problemas que dificultem essa aderência tais como: incompatibilidade química, dificuldade de molhabilidade da resina (presença de espaços vazios), etc. Para melhorar a interface fibra/matriz se faz necessário a utilização de agentes de acoplamento, tratamentos químicos e maior controle no processo construtivo dos compósitos para evitar espaços vazios. A presença de vazios é um problema decorrente da manufatura dos materiais compósitos, que influencia na qualidade e resistência dos mesmos. Muitos fatores contribuem para a grande concentração de vazios, dentre eles a mistura da resina, a molhabilidade das fibras, o processamento como um todo, quando realizado principalmente sem bolsas de vácuo (O'DONNELL *et al.*, 2003, p. 1140).

As propriedades variam entre os materiais, mesmo entre os materiais de uma mesma classe, contudo, é possível observar certo grau de correlação entre as classes de materiais e suas propriedades. Na TAB. 2.1 está apresentada a amplitude de algumas propriedades interessantes para as diferentes classes de materiais.

Tabela 2.1 - Amplitude de algumas propriedades por classe de material

Propriedade	Unidade	Metais	Cerâmicas	Polímeros	Compósitos*
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	2 - 10	1 - 5	1 - 2	1,5 - 2,0
Módulo de elasticidade	GPa	50 - 200	10 - 1000	0,01 - 10	10 - 200
Resist. à tração	MPa	50 - 2000	1 - 800	5 - 100	100 - 1000

\*Com matriz polimérica.

Fonte: Ashby; Johnson, 2011, Apêndice B, p. 180-185.

### 2.1.3 – Os processos de fabricação

Os processos de fabricação de compósitos se resumem a: processos de conformação molhada e processos com preformados (*premixes*). Os processos de conformação molhada são: manual (*hand lay-up*), bobinamento (*filament winding*), trefilação (*pultrusion*) e moldagem por membrana (*bug molding*) e os processos com preformados (*premixes*) são: *premix* em bloco – BMC (*Bulk Molding Compound* – composto para moldagem em massa), *premix* em folha – SMC (*Sheet Molding Compound* – composto para moldagem de chapa) e os *prepregs* (MENDONÇA, 2005, p. 25-40). Já Ashby e Johnson (2011, p. 266 – 287) preferem fazer essa classificação

pelos processos de conformação ou perfis de conformação: **por moldagem** (por injeção, rotacional, por sopro, de espuma expandida, por compressão e por transferência de resina), **por fundição** (sob pressão, em areia, de precisão e de polímeros), **por conformação em massa** (laminação de perfis, forjamento em matriz e extrusão), **por conformação de chapas** (sob pressão, por laminação em rolos e repuxamento e termoconformação), **método de laminação de compósitos** (*hand lay-up*), **metalurgia do pó** e **prototipagem rápida** (a laser e por deposição).

## 2.2 – Compósitos de polímeros

Embora os primeiros compósitos tenham sido constituídos de polímeros naturais (madeira, lã, couro, osso, fibra vegetal), atualmente, os polímeros amplamente comercializados quase todos são sintetizados do petróleo, resultantes de combinações de átomos simples de carbono, hidrogênio e oxigênio (ASHBY; JOHNSON, 2011, p. 197).

Porém, preocupações ecológicas fizeram ressurgir pesquisas em materiais poliméricos menos agressivos ao meio ambiente, como a utilização não só de fibras naturais (animais, vegetais e minerais), mas também de matrizes de origem vegetais, como, por exemplo, de óleo de mamona, de milho, de girassol, de soja (ALVES *et al.*, 2007) e matrizes biodegradáveis, tais como, de amido/glúten, milho/glicerol (CORRADINI *et al.*, 2008) e poli-ácido-láctico (PLA) (SILVA, 2014) para elaboração de compósitos poliméricos.

No estudo da resistência à tração de um material é importante analisar a relação tensão x deformação e o Módulo de Elasticidade (constante de proporcionalidade ou Módulo de Young) (E), que proporciona uma medida de rigidez de um material sólido. O Módulo de Young tem origem na energia de ligação entre os átomos do material e divide os materiais em aproximadamente duas grandes classes: os flexíveis e os rígidos. Um material com elevado valor do Módulo de Young é um material rígido. Os polímeros estão entre os materiais de menor módulo de elasticidade enquanto que os materiais cerâmicos estão no outro extremo e constituem os materiais mais rígidos (FIG. 2.4).

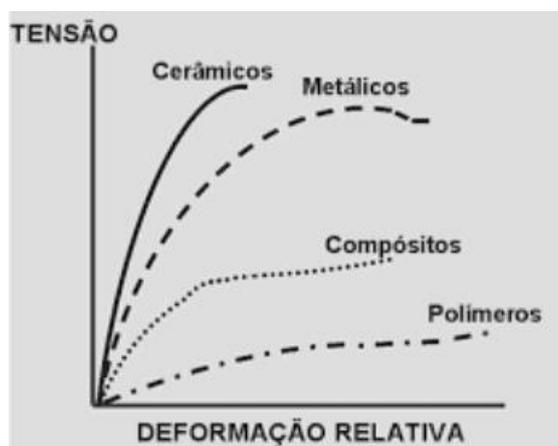


Figura 2.4 – Diagrama tensão x deformação dos materiais.  
Fonte: Gomes (2010).

A FIG. 2.5 mostra como se apresenta a fratura num material dúctil e num material frágil, como o polímero.

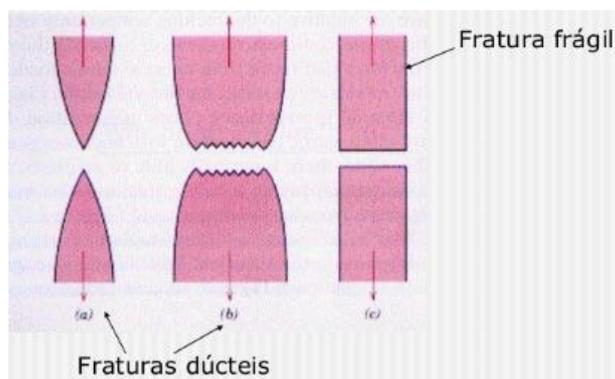


Figura 2.5 – Fratura em material dúctil e em material frágil.  
Fonte: Callister (2003).

### 2.2.1 – Matriz polimérica

A palavra polímero deriva do grego poli (muitas) + mero (partes), e é exatamente isto, a repetição de muitas unidades (poli) de um tipo de composto químico (mero). E polimerização é o nome dado ao processo no qual as várias unidades de repetição (monômeros) reagem para gerar uma cadeia de polímero. Os polímeros podem ser obtidos por adição ou condensação. Polímeros de adição obtêm-se a partir de monômeros que contêm uma ou várias duplas ligações. O resultado da polimerização de uma só classe de monômeros é um homopolímero. Quando polimerizam juntos dois monômeros distintos obtêm-se um copolímero. Polímeros de condensação são polímeros formados a partir de monômeros iguais ou diferentes (homopolímero e copolímero), havendo eliminação de moléculas simples ( $H_2O$ ,  $NH_3$ , etc). Os epóxis, os poliuretanos e os poliésteres são exemplos de polímeros de rede fabricados por reações de condensação, nos quais uma das duas moléculas reagentes é multifuncional (poliéster é trifuncional), gerando uma rede tridimensional, e não filetes lineares e o polímero resultante é um termofixo (ASHBY; JONES, 2007, pp. 276 e 277). Portanto, um material polimérico é constituído de moléculas grandes (macromoléculas) formadas pela combinação de um grande número de unidades de repetição (meros) ligadas quimicamente entre si. Sua massa molar está entre  $10^3$  a  $10^6$  g/mol. As principais classes de polímeros são constituídas de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N), unidos por ligações covalentes. Os materiais poliméricos são na maioria orgânicos, derivados de plantas e animais, tais como madeira, borracha, algodão, lã, couro, seda e petróleo, constituídos de proteínas, enzimas, amido e celulose. As pesquisas científicas modernas determinaram essas estruturas moleculares, dando origem a inúmeros polímeros sintetizados de pequenas moléculas orgânicas. Esses polímeros são produzidos a baixo custo e suas propriedades podem ser combinadas para alcançar características superiores aos naturais (CALLISTER, 2003, p. 452).

Os polímeros, quanto ao comportamento térmico, podem ser classificados em termoplásticos, termofixos e elastômeros. Os termoplásticos podem ser amolecidos sob

ação do calor, deformam-se sob ação de tensões e após o resfriamento, recuperam a natureza sólida e o processo pode ser repetido algumas vezes, sem perder suas propriedades. PE (Polietileno), PP (Polipropileno), PS (Poliestireno), PVC (Polivinilcloroto), PTFE (Politetrafluoretileno), PA (Poliamida), PEEK (Polieteretercetona), PET (Poliésteres) são exemplos de termoplásticos. Os termofixos são materiais que podem ser amolecidos sob ação de calor, deformam-se sob ação de tensões e após o resfriamento, recuperam a natureza sólida, porém, o processo de remoldagem não pode ser repetido, pois os mesmos apresentam uma estrutura mais rígida, com ligações cruzadas unindo os fios de polímeros, formando pontes fixas na estrutura polimérica. Fenólicos, poliéster, poliuretano e epóxi são exemplos de polímeros termofixos, ressaltando que existem, também, as resinas poliéster e de poliuretano do tipo termoplásticas. As borrachas ou elastômeros podem ser naturais ou sintéticos e exibem elasticidade em longas faixas de deformação na temperatura ambiente, após o processo de vulcanização. Apresentam cadeias com ligações cruzadas, semelhante as dos termofixos, porém em menor densidade de reticulação. Isopreno, silicone, etilenovinilacetato (EVA), elastômeros clorados (Neoprene), borracha natural são exemplos de elastômeros (ASHBY; JOHNSON, 2011, p. 197-200).

As principais vantagens na utilização de matrizes poliméricas em relação às matrizes metálicas e cerâmicas nos compósitos são: facilidade de fabricação, baixa densidade, resistência a ataques químicos, isolamento térmico e elétrico, autolubrificação, aparência decorativa, transparência e amortecimento mecânico (usado para absorção de energia) e as principais desvantagens são: baixa resistência, rigidez inferior, mais frágil que muitos metais, dureza baixa (risca com facilidade), expansão térmica superior à dos metais (pode ser de 5 a 10 vezes maior), mais inflamáveis que os metais, temperatura de serviço baixa, suscetíveis à deterioração pela exposição à radiação ultravioleta, muito suscetíveis às deformações de fluência e baixa resistência a produtos químicos orgânicos (MENDONÇA, 2005, p. 20). Entretanto, a facilidade de processar polímeros em temperaturas não muito elevadas e de combiná-los com outros materiais para fabricar compósitos possibilita a criação de novos materiais que possuam propriedades desejadas para determinadas aplicações. Neste sentido, é grande o número de estudos acerca do desenvolvimento de compósitos poliméricos que, ao serem combinados com outros materiais, possam aumentar sua condutividade térmica, sua condutividade elétrica, suas propriedades físicas (ópticas e acústicas) e suas propriedades mecânicas.

Na TAB. 2.2 são apresentadas as densidades de alguns materiais metálicos e cerâmicos para efeito comparativo com as dos polímeros, comprovando as baixas densidades desses materiais.

Tabela 2.2 - Comparação de densidades de alguns materiais

Material	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Aço 405	7,80
Alumínio 1100	2,71
Vidro cerâmico	2,60
Diamante natural	3,51
Polímeros	0,91-1,60

Fonte: Callister, 2003, p. 738-740.

A dilatação e condutividade térmica são as duas propriedades térmicas mais importantes para o design de um produto. Os materiais metálicos e certas cerâmicas têm alta condutividade térmica aliada à baixa dilatação. Os polímeros e elastômeros têm condutividade 1000 vezes menores e se expandem, no mínimo, 10 vezes mais (ASHBY; JOHNSON, 2011, p. 190). Os polímeros são materiais promissores para muitas aplicações, porém apresentam baixa condutividade térmica entre  $0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e  $0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  que, se desejado, pode ser incrementada pelo acréscimo de cargas inorgânicas com altas condutividades térmicas, tais como C, Al, Ag, Si e Cu (DUARTE; REIS, 2014, pp. 1590 e 1591). Porém, quanto à degradação térmica, todos os polímeros são sensíveis à temperatura, variando com o tipo de estrutura química do polímero. A energia de dissociação dos átomos unidos por ligações covalentes presentes num polímero, está na faixa de  $300 \text{ kJ/mol}$  a  $850 \text{ kJ/mol}$ . A energia das ligações químicas que constituem os polímeros é influenciada pelos substituintes ao longo da cadeia, pelo número de ramificações da cadeia do polímero, pela presença ou não de co-mônômeros e contaminações intrínsecas ao material geradas pelo processo de polimerização. A condutividade térmica, que é a forma como o calor é transportado pela massa polimérica, afeta as interações inter e intramoleculares, fazendo com que a ação da temperatura nos polímeros possa provocar a quebra de cadeias (energia de ligação) com consequente fragilização, retração, perda de massa e aparecimento de microfissuras, com evaporação de voláteis, liberando gases e aparecimento de amarelecimento e pode também provocar indução de ligações cruzadas, levando ao endurecimento do polímero. A verificação da estabilidade térmica de um polímero pode ser feita por análise termogravimétrica (TGA), onde uma determinada massa do polímero é aquecida a uma taxa constante enquanto a sua perda de massa vai sendo monitorada. Na FIG. 2.6 é mostrado um ensaio de TGA comparativo entre vários polímeros.

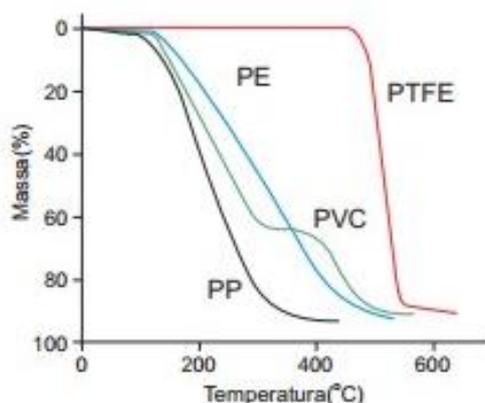


Figura 2.6 - Análise termogravimétrica de alguns polímeros.  
Fonte: Stuart, 2002, p. 203.

A degradação mecânica é representada por mudanças químicas induzidas por esforços de cisalhamento. Num material polimérico, a degradação mecânica pode ocorrer durante operações de corte, serragem, furação, usinagem ou na sua utilização. Durante a aplicação do esforço mecânico a temperatura ambiente, haverá dois

comportamentos: o elástico, reversível e o escoamento viscoso, que é irreversível. Tanto num quanto no outro comportamento, ocorre o alinhamento e extensão das cadeias poliméricas. Depois do ponto em que a deformação é reversível, começa a romper as interações intermoleculares, provocando o desentrelaçamento (escoamento) das cadeias na fase amorfa. Depois do estiramento e o desentrelaçamento das cadeias, haverá o rompimento das ligações na cadeia principal. O mecanismo das reações de ruptura de ligações químicas induzidas por esforço mecânico depende da morfologia, do estado físico do material (ou seja, da temperatura), do modo e do tempo de imposição do esforço mecânico (STUART, 2002, p. 205).

#### 2.2.1.1 – Matriz de poliéster

O poliéster é um composto orgânico derivado do petróleo e constitui uma família de polímeros de alto peso molecular, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular. Poliéster é um termo que significa: poli (muitos, portanto muitos grupos ésteres); éster (é uma função química; um éster é obtido através da seguinte reação: ácido + álcool = éster + água). Desta maneira moléculas de biácido e de biálcool originarão várias moléculas formando o poliéster (ASPLAR, 2005, p.7). O poliéster saturado é obtido pela reação entre um biálcool e um biácido saturado, resultando num produto termoplástico, já o poliéster insaturado consiste basicamente de um polímero alquídic, contendo insaturações vinílicas dissolvidas em um monômero reativo, normalmente o monômero de estireno. É obtido pela reação entre um ácido insaturado, um ácido saturado e um biálcool, resultando num produto termofixo, cuja cadeia molecular é composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono. É diluído num monômero vinílico, inibido, para facilitar sua utilização. Inicialmente encontra-se no estado líquido e após a adição de promotores transforma-se no estado sólido, caracterizando uma estrutura termofixa irreversível. Pode ser utilizado com ou sem reforço, se bem que uma vez reforçado se transforma em um plástico de engenharia com ótimas propriedades físico-mecânicas, substituindo muitas vezes materiais como ferro, aço e concreto. A resina poliéster insaturada é a família mais importantes de resinas termofixas utilizadas em materiais compósitos. A cura desta resina pode ser realizada de várias maneiras, com aditivos químicos ou aquecimento por radiação. A composição e configuração química da resina de poliéster endurecida determinam suas características e propriedades (flexibilidade, tenacidade, resistência mecânica, químicos, etc), de modo que a escolha dos parâmetros pode variar consideravelmente as características da resina seleccionada. Em suma, as resinas de poliéster insaturadas são o sistema mais versátil, que pode ser personalizado para muitos processos e necessidades. A resina de poliéster utilizada nesta pesquisa é do tipo insaturado ortoftálico. Este poliéster possui em sua composição o ácido ftálico/anidrido, que se dissolve em álcool e outros solventes. Sua composição é feita por um ácido insaturado, um ácido saturado e um bi-álcool, conforme a FIG. 2.7. O

processo de cura do poliéster insaturado é uma reação exotérmica irreversível, formando ligações primárias de átomos de duas cadeias lineares e pontes de moléculas de monômero de estireno, formando as ligações cruzadas. Para inicialização do processo de cura são utilizados catalizadores, geralmente à base de peróxidos de benzoíla ou de metil-etil-acetona, em concentrações de 0,5 à 3% em massa da resina, que geram os radicais livres responsáveis pela cura do poliéster insaturado, levando-o ao estado termofixo (FERREIRA, 2013, p. 25).

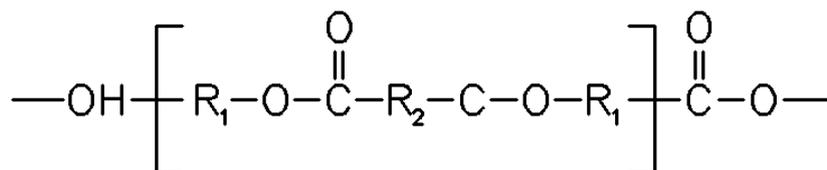


Figura 2.7 – Representação esquemática de uma molécula de poliéster insaturado ortoftálico.

Fonte: Ferreira, 2013, p. 25.

Na TAB. 2.3 estão algumas propriedades da resina termofixa de poliéster.

Propriedade	Poliéster
Massa específica ( $\rho$ )	1,10 – 1,40 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade à tração (E)	2,1 – 4,4 GPa
Ruptura à tração ( $\sigma_t$ )	34 – 100 MPa
Ruptura à compressão ( $\sigma_c$ )	90 – 250 MPa
Deformação ( $\epsilon$ )	<2,6%***
Tenacidade à fratura	0,6 MPa***
Temperatura de transição vítrea ( $T_g$ )	140 – 200 °C 143 °C***
Temperatura de trabalho contínuo	250 °C
Coefficiente de dilatação térmica ( $\alpha$ )	55 – 100 x 10 <sup>-6</sup> /°C 100 – 180 x 10 <sup>-6</sup> /°C***
Absorção de água em 24hs	0,15 – 0,6 % em volume
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,4 *
Módulo de cisalhamento (G)	1,4 MPa *
Viscosidade a 250°C	250 – 350 $\mu$ (mPa.s)**
Temperatura de distorção ao calor	85°C**
Temperatura de degradação	334°C***
Resistência à flexão	45 MPa**
Calor específico	710 -920 J/kg-K
Condutividade térmica	0,1574 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> **

Fontes: Mendonça, 2005, p. 21.

\* ASPLAR, 2003, p. 11.

\*\* Duarte; Reis, 2014, p. 1592.

\*\*\*Callister, 2003, Apêndice B e F.

## 2.2.1.2 – Matriz de poliuretano

Uretano (ou uretana) é o produto da reação química entre um grupo isocianato e um grupo hidroxila (VILAR, 2001, p. 1.21). Na FIG. 2.8 está a reação química para se obter uma uretana.

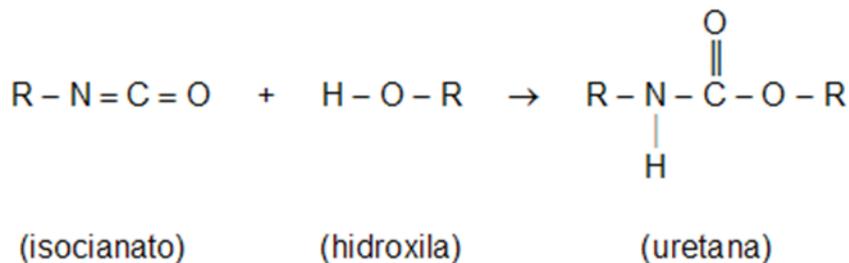


Figura 2.8 – Reação química para se obter uma uretana.  
Fonte: Silva, 2003, p. 21 [33].

Os poliuretanos (PU's) foram desenvolvidos por Otto Bayer, em 1937. São obtidos pela reação de poliadição de um isocianato (di ou polifuncional) com um poliálcool e outros reagentes como agentes de cura (extensores de cadeia), catalisadores, agentes de expansão, etc. Os isocianatos podem ser aromáticos ou alifáticos. Os compostos hidroxilados podem variar quanto ao peso molecular, natureza química e funcionalidade. Os polióis podem ser poliéteres, poliésteres ou possuir estrutura hidrocarbônica. A flexibilidade na combinação do isocianato e dos reagentes possibilita a obtenção de materiais com diferentes propriedades físicas e químicas (VILAR, 2001, p. 1.1).

Na FIG. 2.9 está a reação química para se obter a polimerização da poliuretana.

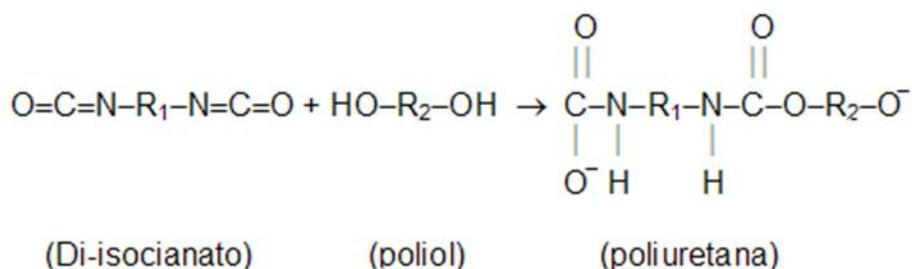


Figura 2.9 – Reação química para se obter a polimerização da poliuretana.  
Fonte: Silvestre Filho, 2001, Apêndice I.

Os compostos de grupos isocianatos são altamente reativos, por isso, é feita uma pré-polimerização que consiste da reação de um poli-isocianato com um poliálcool, nas proporções previamente determinadas, para a obtenção do teor de isocianato livre desejado. A reação de polimerização ocorre pela mistura a frio do pré-polímero com o poliálcool final, que conduz a policondensação uretana, gerando o PU de alto peso molecular (SILVA, 2003, p 22). Vilar (2001, p. 1.10) afirma que além dessa reação

principal, podem ocorrer outras reações paralelas, onde a mais comum é a reação do isocianato com a água, resultando na liberação de uréias e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), responsável pela expansão do polímero.

As espumas podem ser produzidas de polímeros termoplásticos ou termofixos, que são obtidas mediante a inserção de um agente soprador, que no aquecimento se decompõe com a liberação de gás através da massa fluida, que no resfriamento remanesce como poros, dando origem a uma estrutura esponjosa (FERREIRA, 2013, p. 46).

Dentre as vantagens da utilização de núcleo de espuma num compósito, tem-se: o aumento da resistência à flexão pelo aumento da espessura sem a necessidade de um material sólido de maiores dimensões; contribuição na redução de peso do compósito (apresenta baixa densidade); operam numa amplitude de temperatura de -297 a +300°C, além de promover bom isolamento térmico e acústico (DWEIB *et al.* 2004, p. 150).

A resina à base de poliuretano é bicomponente e desenvolvida para fabricação de moldes, peças e componentes na área de prototipagem em geral, isolamento de ambientes refrigerados, preenchimento de cavidades, isolamento de canalizações térmicas, etc. Esta resina apresenta baixo fator de condutibilidade térmica, ótima estabilidade dimensional às variações de temperaturas e umidade, cura rápida em temperatura ambiente e reduzida contração, que conferem excelente adequação em diversas aplicações industriais.

### 2.3 – Os reforços

Os reforços são responsáveis pelo aumento da resistência a esforços mecânicos e, portanto, são os componentes estruturais dos compósitos. Os compósitos podem ser reforçados por fibras ou partículas. As fibras podem ser contínuas, longas ou curtas e quanto à disposição, podem ser paralelas, unidirecionais ou bidirecionais, podendo ser orientadas aleatoriamente (MENDONÇA, 2005, p. 5). As fibras podem ser naturais (vegetais, animais ou minerais) ou sintéticas (de vidro, de aramida, de carbono).

#### 2.3.1 - O reforço fibroso vegetal

A necessidade tecnológica de materiais resistentes e de grande leveza fez com que, no século XX, houvesse uma ampla aplicação de reforços poliméricos, que apesar de apresentar estas características importantes para as aplicações desejadas, são obtidos por processamentos caros e poluentes. Porém, a preocupação com o meio ambiente (poluição, aquecimento global), esgotamento de recursos (como o petróleo) e com redução de custos, fez surgir, novamente, o interesse por uma indústria mais sustentável utilizando recursos mais naturais e abundantes como a celulose (KENGKHEK; AMORNSAKCHAI, 2012, p. 55).

As fibras naturais, que podem ter aplicação como reforços em compósitos substituindo as fibras sintéticas em algumas aplicações que não exigem resistência a grandes esforços, podem ser de origem orgânica (vegetal ou animal) ou inorgânica (mineral). As fibras de origem vegetal podem ser obtidas das sementes (ex: algodão), do caule (ex: linho, cânhamo, juta) das folhas (ex: sisal) e dos frutos (ex: côco) e, as fibras

de origem animal, são obtidas de secreções (sêda), pelos e fios. As fibras naturais inorgânicas são as minerais (ex: fibras de asbestos ou amianto e fibras de basalto) (MÜELLER; KROBJILOWSKI, 2003, p. 112).

O reforço fibroso vegetal pode ser de plantas monocotiledôneas ou de dicotiledôneas. As plantas monocotiledôneas são aquelas cujo embrião contém um só cotilédone, apresentam raiz fasciculada (ramificadas) e folhas paralinérvias (nervuras paralelas). Já as dicotiledôneas são plantas com flor, cujo embrião contém dois ou mais cotilédones, apresentam raiz axial e folhas com nervuras reticuladas. Essas fibras podem ser obtidas da semente, do caule, do fruto, da folha e do “cabelo” da semente (ver QUADRO 2.2).

A composição das fibras vegetais é quase 99% de matéria orgânica e o restante de material inorgânico (cinzas). A celulose, a hemicelulose e a lignina são os principais polímeros da matéria orgânica e a pectina, celobiose e os extrativos (resinas, polifenóis, óleos e graxas), do material inorgânico. A celulose é o principal componente estrutural dos vegetais e é um polissacarídeo linear de alto peso molecular, não solúvel em água, constituído exclusivamente de unidade  $\beta$ -D-glicose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, originando um polímero linear. A hemicelulose é um polissacarídeo que apresenta estrutura semelhante à da celulose e resulta da polimerização de vários açúcares; sua configuração amorfa e baixa massa molecular ajuda na absorção de água, o que contribui para o intumescimento, molhabilidade interna e aumento da flexibilidade das fibras. A lignina é um polímero tridimensional complexo, de elevado peso molecular e estrutura amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos, que unem as fibras celulósicas, formando a parede celular. Já o material inorgânico é facilmente solúvel em solventes orgânicos neutros ou água (FERREIRA, 2013, p. 30 e 31).

Quadro 2.2 - Classificação dos reforços fibrosos vegetais

Tipo	Parte da planta				
	semente	caule	“cabelo”	folha	fruto
Monocotiledónea	-	-	-	Sisal Abacá Petiolus (palma chinesa) Curauá	Coco Açaí
Dicotiledónea	Algodão	Linho Cânhamo Juta Rami Juta do Sião (ou de Java) Urtiga	Sumaúma Paina	-	-

Fonte: Müller; Krobjilowski, 2003, p. 112.

A presença de hidroxilas e outros grupos polares nas fibras vegetais comprometem a adesão fibra/matriz, pois as matrizes são geralmente hidrofóbicas, levando à pobre molhabilidade das fibras pela resina, tendo como consequência a fraca adesão interfacial. Para que as fibras possam apresentar-se como um bom reforço num compósito, se faz necessário a utilização de tratamentos químicos, como o tratamento

alcalino com NaOH (hidróxido de sódio) para diminuir a absorção da umidade, aumentar a molhabilidade das fibras pela resina e melhorar a resistência da ligação interfacial, fatores esses críticos para melhorar propriedades mecânicas dos compósitos (MOHANTY *et al.*, 2000, p. 1117).

Na TAB. 2.4 estão as principais propriedades das fibras vegetais mais utilizadas como reforço e uma comparação com a fibra sintética de vidro-E. Ainda que seja visível que, os dados mecânicos absolutos das fibras naturais sejam inferiores, os valores das propriedades específicas podem alcançar níveis comparáveis à da largamente utilizada fibra de vidro-E.

Os compósitos com fibras naturais combinam boas propriedades mecânicas com baixa massa específica (aproximadamente 1,2 – 1,5 g/cm<sup>3</sup>). O maior problema na aplicação das fibras vegetais nas resinas de matriz orgânica é a presença de hidroxila e outros grupos polares em vários constituintes da fibra que ao serem inseridas numa matriz hidrofóbica, apresentam alta absorção da umidade, conferindo pobre molhabilidade da fibra pela matriz e fraca adesão interfacial fibra/matriz, levando ao descolamento em condições de umidade, interferindo negativamente nas propriedades mecânicas dos compósitos (VARMA *et al.*, 1989, p. 383).

A resistência à tração das fibras naturais é somente de 20 – 50% das fibras de vidro-E e todas as propriedades mecânicas e físicas das fibras naturais são influenciadas por suas condições de crescimento, pelas técnicas de processamento das fibras e pelos comprimentos e espessuras utilizados nos compósitos. O tratamento com NaOH para a remoção da lignina e hemicelulose, que são a base cimentícia das fibras vegetais, provoca o encolhimento da fibra e o surgimento de fibrilas, o que otimiza propriedades mecânicas tais como resistência à tração, módulo e rigidez. Entretanto, o aumento da rigidez da fibra diminui a resistência ao impacto (GASSAN e BLEZKI, 1999, p. 1303).

Müller e Krobjilowski (2003) afirmam que a utilização de fibras naturais como reforço, reduz peso e melhora propriedades específicas como resistência ao impacto e absorção sonora. Em sua pesquisa com fibras de linho, cânhamo e juta do Sião, demonstraram que o compósito com o linho apresentou maiores propriedades de reforço devido à morfologia da fibra, que apresentam maior fineza (maior razão de aspecto) e também uma distribuição de diâmetro mais uniforme, resultando numa melhor molhabilidade da fibra durante a moldagem à compressão, contribuindo para elevar as propriedades mecânicas de tração, módulo e rigidez do compósito. Quanto ao ensaio de impacto, os pesquisadores observaram que uma fraca adesão entre fibra e matriz resultou numa maior absorção de energia de impacto, suportando o arrancamento das fibras (*fiber-pull-out*), ao contrário da boa adesão que resulta na fratura abrupta da fibra com menor energia de absorção.

Tabela 2.4 - Propriedades das fibras naturais e sintética de vidro-E

Propriedade	Unidade	Algodão	Linho	Cânhamo	Juta	Juta de Java	Rami	Sisal	Fibra de Vidro-E
Diâmetro	µm	-	11 - 33	15 - 50	200	200	40 - 80	50 - 200	5 - 25
Comprimento	mm	10 - 60	10 - 40	15 - 28	1 - 5	2 - 6	60 - 260	1 - 5	-
Tensão Máxima	cN/tex	25 - 50	30 - 62	35 - 70	30 - 34	34,50 - 50	40 - 70	30 - 45	-
Resistência à Tração	MPa	330 - 585	345 - 1035	690 - 1000	393 - 773	930	400 - 1050	511 - 635	1800
Módulo de Young	GPa	4,50 - 12,60	27,60 - 45,00	50,00	26,50	53,00	61,50	9,40 - 15,80	69,00 - 73,00
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	1,50 - 1,54	1,43 - 1,52	1,47 - 1,50	1,44 - 1,50	1,50	1,50 - 1,60	1,16 - 1,50	2,50
Deformação Máxima	%	7,00 - 8,00	2,70 - 3,20	1,00 - 1,60	1,50 - 1,80	1,60	3,60 - 3,80	2,00 - 2,50	2,50 - 3,00

Fonte: Müller; Krobjilowski, 2003, p. 118 [3].

### 2.3.1.1 - O tecido ou tela de juta

A Juta (*Corchorus capsularis*) é uma fibra têxtil vegetal que provém da família *Tilioideae*. Ela é obtida da parte lenhosa do talo e alcança uma altura de 3 a 4 metros e o seu talo tem uma grossura de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e tropicais. As fibras de melhor qualidade e resistência são obtidas de talos mais claros e brilhantes. O comprimento das células elementares da juta é em média de 0,80  $\mu\text{m}$ , e o diâmetro varia de 0,01 a 0,03  $\mu\text{m}$ . O principal componente da juta é a celulose, sob a forma de linho-celulose (ver TAB. 2.5) e ela é muito higroscópica, regulando a umidade em 12%<sup>5</sup>.

Tabela 2.5 - Composição química da juta

Componentes	%
Cinza	0,70
Água	9,72
Gorduras cerosas	0,36
Extrato aquoso	1,06
Celulose	64,10
Substâncias incrustantes	24,06

Fonte: [www.castanhal.com.br](http://www.castanhal.com.br)

A TAB. 2.6 apresenta, na proporção centesimal, as substâncias orgânicas presentes na juta.

Tabela 2.6 - Substâncias orgânicas presentes na juta

Componentes	%
Carbono	46,30
Oxigênio	47,60
Hidrogênio	6,10

Fonte: [www.castanhal.com.br](http://www.castanhal.com.br)

As telas (ou tecidos) são produzidas para diversas aplicações e finalidades, dependendo de suas características, tais como decoração, artesanato, fabricação de sacolas, curtumes e proteção de pisos. As telas podem ser produzidas com até três metros de largura, engomadas ou não. A tela de juta escolhida foi a classificada como C-9 100, da Companhia Têxtil de Castanhal - CTC (empresa localizada no município de Castanhal, Pará), por apresentar uma trama não muito fechada, permitindo melhor penetração da resina entre os fios. A denominação 100 é de 100 cm, ou seja, a tela tem 1m de largura. Na FIG. 2.10 é apresentado o detalhe da trama. Ela foi cortada e sobreposta na direção do rolo (urdume a 0°) para formar a camada dupla das lâminas no alinhamento do rolo, evitando assim desperdícios.

<sup>5</sup> <http://www.castanhal.com.br/>



Figura 2.10 – Tela de juta natural C-9 100.  
Fonte: [www.castanhal.com.br](http://www.castanhal.com.br).

A tela de juta C-9 100, segundo informações no *site* da CTC, foi elaborada com fibra 100% natural, de origem celulósica, biodegradável, inofensiva ao meio ambiente e à saúde humana. A cultura desta juta não desmata, não utiliza queimadas, defensivos agrícolas ou fertilizantes, com ciclo totalmente integrado ao bioma amazônico. Sua composição é de 97% de fibra de juta e 3% de oleína de palma refinada (para consumo humano). As características físicas e mecânicas da tela C-9 100 estão apresentadas na TAB. 2.7.

Tabela 2.7 - Características físicas e mecânicas da tela de juta C-9 100	
Dados relativos à fiação	
Resistência	5,33 Kgf/cm
Deformação	1,96%
Dados relativos à tecelagem	
Gramatura linear	287 g/m ( $\pm 3\%$ )
Largura	100 cm ( $\pm 3\%$ )
Estrutura do tecido	Tafetá
Ensaio de tração ao rasgo	
Resistência	13,23 Kgf/cm <sup>2</sup> (urdume)
	12,93 Kgf/cm <sup>2</sup> (trama)
Deformação	4,04 % (urdume)
	4,80 % (trama)

Fonte: Companhia Têxtil de Castanhal (laudo de qualidade).

#### 2.4 – As cargas

As cargas de enchimento (*fillers*) ou inertes são utilizadas com o principal objetivo de reduzir custos mas elas também podem ser aplicadas visando o incremento de outras propriedades tais como: condutividade ou isolamento térmico e elétrico, resistência a altas temperaturas, redução de atrito, resistência ao desgaste superficial, melhoria de usinabilidade, etc. Como exemplo, carbono, alumínio, prata, silício e cobre, são materiais com altas condutividades térmica, utilizados como carga para incrementar a condutividade de resinas poliméricas. As características mais importantes de uma

carga mineral para produção de um compósito são: as propriedades mineralógicas (composição química, estrutura cristalina, propriedades ópticas, hábito, clivagem e dureza, massa específica, brilho cor e propriedades físico-químicas de superfície), granulometria, área de superfície específica e razão de aspecto. Quanto à granulometria, as cargas minerais mais utilizadas em compósitos poliméricos a apresentam, na maioria, inferior a 45  $\mu\text{m}$  e, à medida que ela se torna mais fina, a área de superfície específica da carga mineral aumenta exponencialmente. As cargas minerais mais utilizadas são: talco, pirofitita, calcita, dolomita, caulinita, esmectita, muscovita, quartzo, wollastonita e barita (LIMA, 2007, pp. 4-7).

#### 2.4.1 - O Caulim

O termo caulim, também conhecido como *China Clay*, deriva da palavra chinesa kauling (colina alta), referência à colina Jauchau Fu, localizada na China, onde o caulim é extraído há muitos séculos. É provavelmente um dos seis minerais mais abundantes do topo da crosta terrestre. No Brasil, as reservas são da ordem de 5 bilhões de toneladas e quase 93% concentram-se nos depósitos sedimentares dos três maiores distritos caulíniferos do país: Rio Capim, no Estado do Pará, Jari, no Estado do Amapá e no Estado do Amazonas, no município de Manaus. Este último com 68% das reservas conhecidas do país. Os depósitos da região Norte do Brasil são denominados de secundários por serem formados pela deposição de caulim na forma de sedimentos em ambientes lacustres, lagunares ou deltaicos. Nas outras regiões do Brasil, a maioria dos depósitos de caulim conhecidos é do tipo primário, derivado de alterações hidrotermais e intempéricas de pegmatitos e granitos, utilizadas notadamente para cerâmicas branca e vermelha, cimento, borracha, plástico, tintas, refratários e, também, em menor proporção para enchimento (*filler*) e cobertura (*coating*) na indústria de papel (FARIAS, 2009, p. 4 e 7). Na TAB. 2.8 é apresentada a demanda mundial de caulim.

Tabela 2.8 - Demanda mundial de caulim

Setor	Mt	Participação em porcentagem
Papel	10,1	45,9
Cerâmicas	4,6	20,9
Refratários	2,2	10
Tintas	1,2	5,5
Outros	3,9	17,7
Total	22,0	100

Fonte: Farias, 2009, p. 34.

Caulim é uma rocha constituída principalmente pelo argilomineral caulinita. É um minério formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Também podem ocorrer os minerais do grupo da caulinita, a saber: diquita, nacrita, folerita, anauxita, colirita e tuesita. O caulim apresenta outros minerais em forma de impureza, que vão desde traços até 40-50% em volume, consistindo de areia, quartzo, mica, feldspato, óxidos de ferro, titânio, etc. Sua granulometria é fina, com baixo teor de ferro, de cor branca ou quase branca e essa denominação também é dada para o produto resultante de seu beneficiamento. A fórmula estrutural da caulinita é  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  (grupo da caulinita:  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{mSiO}_2\cdot\text{nH}_2\text{O}$ , onde  $m$  varia de 1 a 3 e  $n$  de 2

a 4. O caulim apresenta propriedades como alta reflectância, elevado índice de refração, na forma e distribuição granulométrica das partículas, na reologia e na compatibilidade com outros materiais, que o habilitam a grandes aplicações industriais, principalmente na indústria de papel, como também, na de tintas, de cerâmicas, na construção civil, de borrachas e plásticos, de fertilizantes, de inseticidas e farmacêuticas. Trata-se de um mineral argiloso branco, não inflamável, não tóxico e que não apresenta reatividade química (FARIAS, 2009, p. 28 e 29).

Excetuando particularidades de cada mina, a FIG. 2.11 apresenta um diagrama das etapas do beneficiamento do caulim.

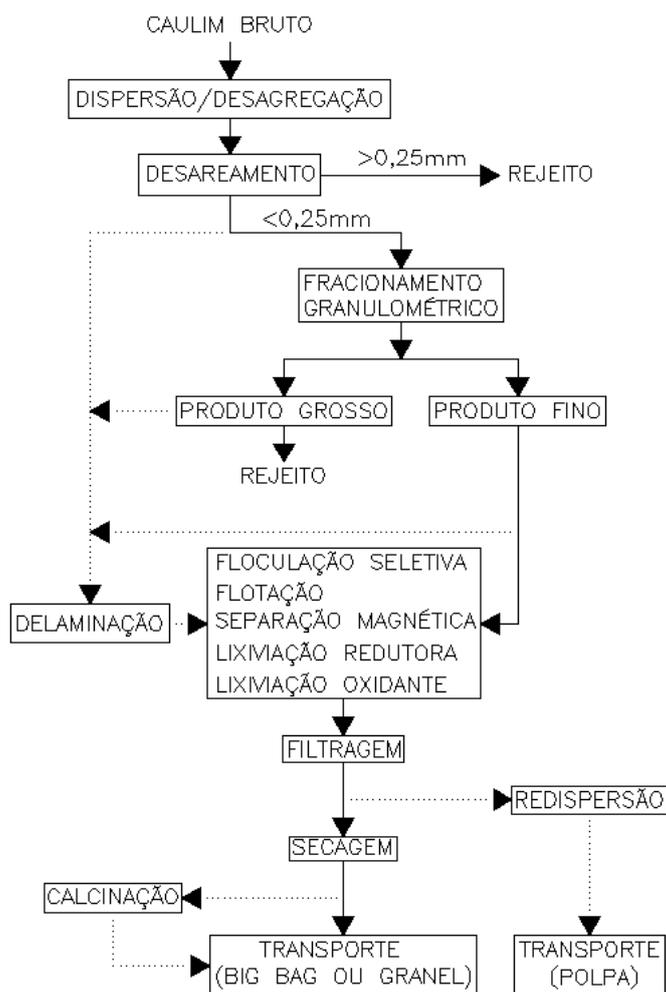


Figura 2.11 – Diagrama simplificado do beneficiamento de caulim.  
Fonte: Farias, 2009, p. 15.

A TAB. 2.9 apresenta algumas características físicas e químicas do caulim.

Tabela 2.9 - Características gerais do caulim

Propriedade	Característica
Granulometria	é mais grosseira que as dos demais tipos de argila (menos que 0,2 microns).
Cristalinidade	apresenta lamelas hexagonais bem cristalizadas.
Densidade real	2,6 g/cm <sup>3</sup> .
Ponto de fusão	de 1.650°C a 1.775°C.
Resistência mecânica	baixa em relação às outras argilas.
Plasticidade	menos plástico que as demais argilas.
Morfologia	apresenta partículas lamelares euédricas.
pH	depende do poder de troca do íons e das condições de formação do caulim, porém, oscila entre 4,3 e 7.
Condutividade térmica	baixa
Condutividade elétrica	baixa
Abrasividade	baixa

Fonte: Farias (2009), p. 28 e 29.

O material utilizado no presente trabalho foi o produto denominado caulim de enchimento, proveniente do processo de beneficiamento do caulim produzido pela Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC<sup>6</sup>, localizada no município de Barcarena, no estado do Pará.

Rodrigues (2013) realizou ensaios para determinação da composição química deste caulim por fluorescência de raios X e por difração de raios X; análise térmica diferencial (DTA); análise termogravimétrica (TG) e análise granulométrica. A composição química do caulim, obtida pela fluorescência de raios X está na TAB. 2.10.

Assim como na análise da composição química, a difração de raios X mostrou que o mesmo é constituído essencialmente por caulinita, com a presença dos seus dois picos principais de 7,15 Å e 3,57 Å; apresentando picos de quartzo de menores intensidades comparados aos principais da caulinita, com seus picos principais de 4,26 Å (FIG. 2.12).

Tabela 2.10 - Composição química do caulim beneficiado em Barcarena

Óxidos	Concentração (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,32
SiO <sub>2</sub>	47,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,53
TiO <sub>2</sub>	0,42
Na <sub>2</sub> O	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10
Perda ao fogo (H <sub>2</sub> O)	14,36
Total	100

Fonte: Rodrigues, 2013, p. 53.

<sup>6</sup><http://www.imerysno para.com.br/caulim/caulim/>

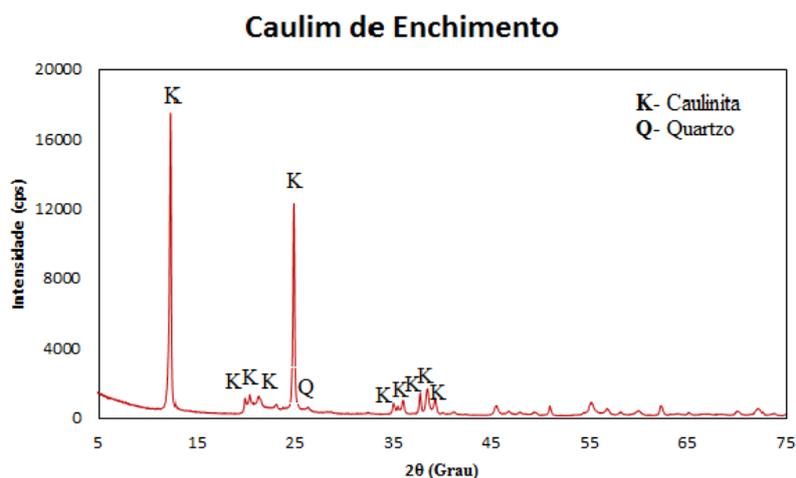


Figura 2.12 - Difração de raios X do caulim.  
Fonte: Rodrigues, 2013, p. 58.

Nas análises térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do caulim de enchimento (FIG. 2.13), a perda de massa é de aproximadamente 14%. O primeiro pico é endotérmico por volta de 534°C, gerado pela desidroxilação da caulinita na qual é originado um composto amorfo denominado de metacaulim. O segundo pico presente é exotérmico e encontra-se a 992°C, característico de uma reação de cristalização.

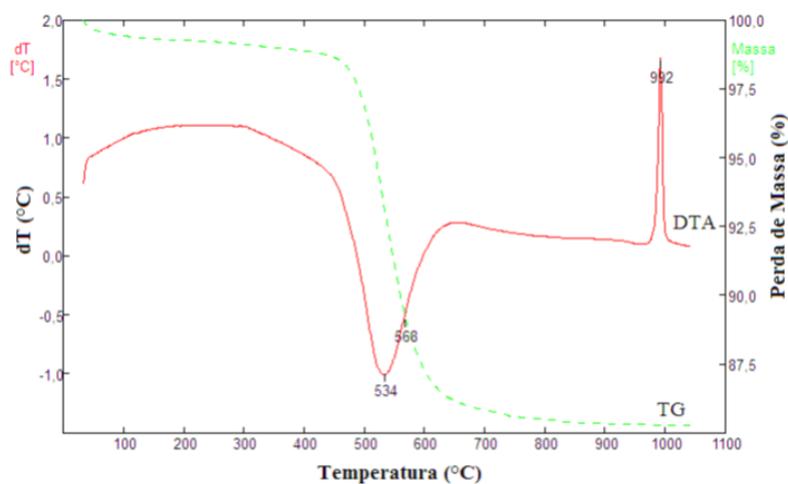


Figura 2.13 - Análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) do caulim.  
Fonte: Rodrigues, 2013, p. 55.

Na análise granulométrica do caulim aproximadamente 30% de suas partículas são abaixo de 2  $\mu\text{m}$  (FIG. 2.14), o que caracteriza o caulim utilizado neste trabalho como caulim de enchimento (são considerados caulins de cobertura aqueles que apresentam de 75% a 95% de suas partículas abaixo de 2  $\mu\text{m}$  e caulim de enchimento dentro da faixa de 20% a 65% de suas partículas abaixo de 2  $\mu\text{m}$ ).

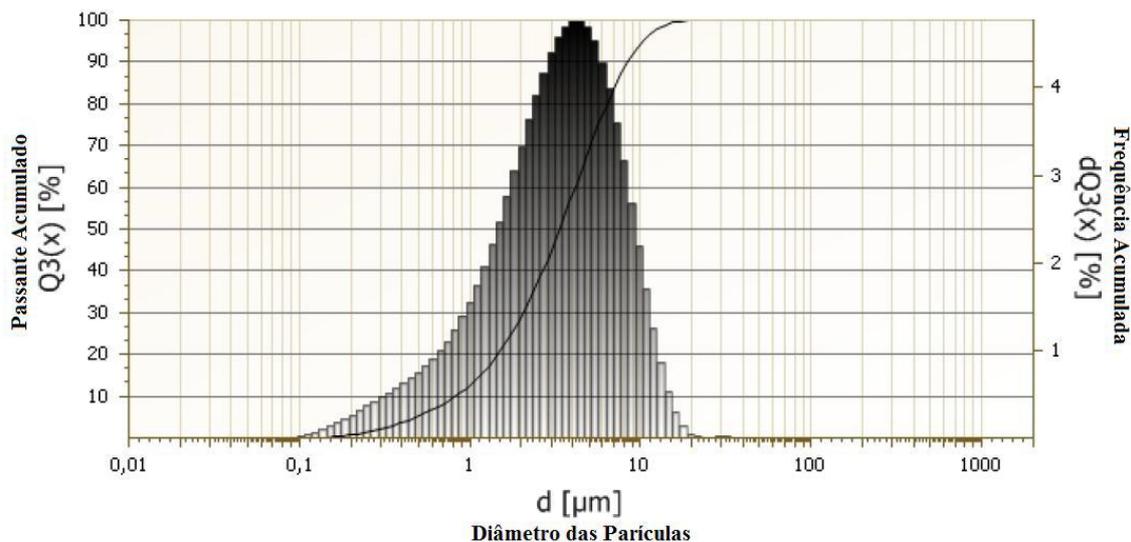


Figura 2.14 - Análise granulométrica do caulim.

Fonte: Rodrigues, 2013, p. 56.

#### 2.4.2 - A lama vermelha

O nome “bauxita” é derivado da cidade *Le Baux* na França onde foi identificada em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier. A bauxita não é considerada uma espécie mineral e, sim uma rocha, cujos principais constituintes são a gibbsita, a bohemita, e a diáspora. Na Europa predomina a bohemita, na China depósitos por diáspora, e nas regiões tropicais como Brasil, Guiana, Jamaica e países africanos, as jazidas são compostas predominantemente por gibbsita. A bauxita é constituída por óxido de alumínio hidratado de composições variáveis, contendo impurezas como: sílica, óxido de ferro, titânio e outros elementos. Na TAB. 2.11 é apresentada a quantidade de óxido de alumínio presente nas rochas de bauxita.

Tabela 2.11 - Características do óxido de alumínio presente nas rochas de bauxita

	gibbsita	bohemita	diáspora
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (em %)	65,4	85,0	85,0
Peso específico (em N/m <sup>3</sup> )	2,3 - 2,4	3,01 - 3,06	3,3 - 3,5

Fonte: Quaresma, 2009, p. 4.

Do total da bauxita comercial, em geral, cerca de 90% é usada para a produção metalúrgica da cadeia do alumínio (alumina e alumínio primário), e o restante 10% usadas para outros fins, como refratário, abrasivo, cimentos argilosos, química (sulfato de alumínio) e outros. A maior parte das reservas de bauxita no mundo encontra-se localizada em regiões tropicais e subtropicais. A bauxita ocorre em três principais tipos de climas: Tropical (57%), o Mediterrâneo (33%) e o Subtropical (10%). As reservas mundiais conhecidas somam 34 bilhões de toneladas. São reservas de bauxita do tipo trihidratadas as encontradas na Guiné, Austrália, China, Brasil, Jamaica e Índia. As bauxitas desse tipo apresentam custos mais baixos na sua transformação em alumina uma vez que requerem pressões e temperatura mais baixas do que as bauxitas do tipo monohidratadas encontradas, por exemplo, na França, Grécia e Hungria. No Brasil, 92%

destas reservas são de bauxita tipo metalúrgico, e o restante 8% para outros usos (refratário e químico). O Estado do Pará é o principal produtor de bauxita metalúrgica nacional e o Estado de Minas Gerais, vem em 2º lugar com produção de bauxita metalúrgica e não-metalúrgica (QUARESMA, 2009, p. 3-6 e p. 24).

A lama vermelha (*red mud*) é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação da bauxita para produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) através do processo químico denominado Bayer, na indústria de beneficiamento do alumínio. Desconsiderando as peculiaridades de cada planta, a produção de alumina através do processo Bayer está esquematicamente apresentada conforme a FIG. 2.15, através de um fluxograma e de um desenho esquemático. Nos fluxos tradicionais para a obtenção do alumínio se efetua as etapas de mineração, refinaria e redução. A bauxita é extraída, lavada e secada antes de ser enviada à refinaria onde se produz a alumina. O processo Bayer é o mais utilizado na indústria da alumina e nele a alumina é produzida desde a entrada do minério, dissolvida, filtrada, cristalizada e calcinada e enviada para a redução para a obtenção do alumínio através de eletrólise pelo processo conhecido como *Hall-Héroult*. Com a limitação máxima de teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de até 3% (base calcinada), o processo de beneficiamento da bauxita consiste basicamente em três etapas: lavagem para remoção da argila, processamento da fração fina e concentração para remoção da laterita presente no minério (QUARESMA, 2009, p. 17). A lama vermelha sofre uma lavagem, através de um processo de sedimentação com fluxo de água em contracorrente e posterior deságüe para a recuperação do NaOH. A estimativa da geração de lama vermelha a partir da produção de alumina no Brasil é de 0,3 t lama vermelha/t de alumina para bauxitas de alta qualidade (alto teor de alumínio), segundo o United States Geological Survey Mineral Resources Program (USGSMRP) e de 2,5 t lama vermelha/t de alumina para bauxita de baixa qualidade segundo a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL) (SILVA FILHO *et al.*, 2007, p. 327).

A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada planta industrial. A lama vermelha é constituída por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44  $\mu\text{m}$ , i.e. 325 *mesh*), apresenta uma área superficial de 13-22  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  e tem como principal característica uma elevada alcalinidade (pH 10-13). Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Adicionalmente, óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb podem estar presentes como elementos-traço. As fases minerais mais comuns são a hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), a goetita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), a boemita ( $\gamma\text{-AlOOH}$ ), o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a sodalita ( $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$ ) e a gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), com menor presença de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ). A TAB. 2.12 apresenta a composição percentual de lama vermelha no Brasil.

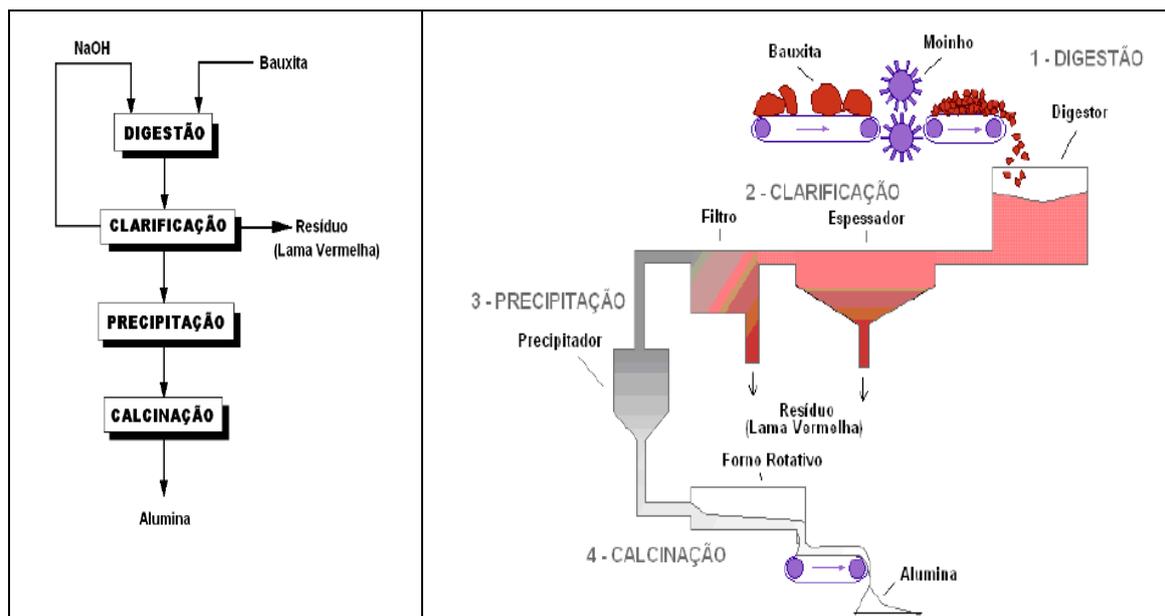


Figura 2.15 – Fluxograma e desenho esquemático do processo Bayer.

Fonte: Silva Filho *et al.*, 2007, p. 322 e 323.

Tabela 2.12 - Composição química da lama vermelha gerada no Brasil (em %)

Referência	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62
Alves (1992)	49,50	17,50	9,50	2,70	5,00	-	4,00

Fonte: Silva Filho *et al.*, 2007, p. 326 e 327.

A lama vermelha foi cedida pela ALUNORTE localizada no município de Barcarena, no estado do Pará. SOUZA (2010) utilizou essa lama em sua pesquisa e fez a caracterização física e química da mesma com auxílio de técnicas de fluorescência de raios X e análise química via úmida por absorção atômica (AA); análise granulométrica; ATD/TG, para verificar a decomposição térmica do material e DRX, para determinação do grau de cristalinidade, identificação e quantificação das fases cristalinas.

O autor determinou as seguintes características da lama vermelha:

- pH = 12,8 (no local de coleta);
- Umidade = 48% em peso (no local de coleta) e
- Massa específica ( $\rho$ ) = 2,13 g/cm<sup>3</sup> (p. 73).

Na TAB. 2.13 está a composição química média da lama vermelha utilizada, obtida da análise química via úmida, com auxílio do método de absorção atômica (AA).

Na difração de raios X (FIG. 2.16), o autor identificou e classificou os minerais presentes na amostra de lama vermelha em duas categorias: primeiro aqueles provenientes da própria bauxita, tais como a gibbsita (G), hematita (H), goetita (Go), anatásio (A), quartzo (Q) e caulinita (K) e, numa segunda categoria, aqueles formados durante o processo Bayer, tais como sodalita (S) e cancrenita (C). Esta argila era constituída pelo argilomineral caulinita (K), pelos minerais hematita (H) e quartzo (Q).

Tabela 2.13 - Composição química média da lama vermelha

Constituintes	% em peso
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,9
SiO <sub>2</sub>	18,3
CaO	1,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,6
TiO <sub>2</sub>	5,56
Na <sub>2</sub> O	9,31
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28
MgO	-
K <sub>2</sub> O	0,13

Fonte: Souza, 2010, p. 74.

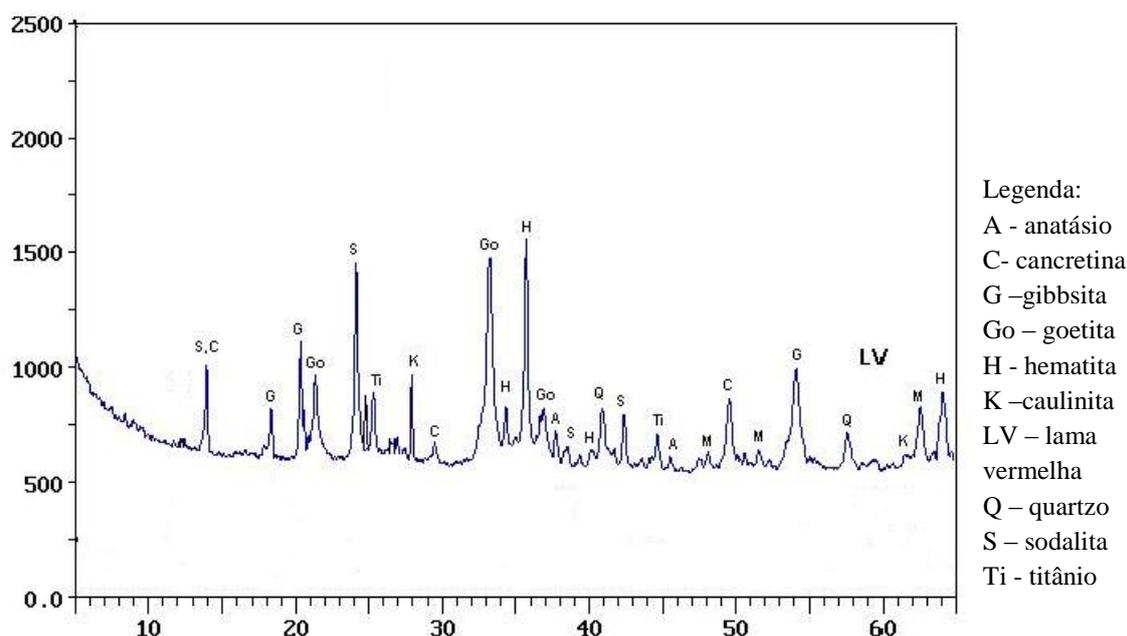


Figura 2.16 – Difração de raios X da lama vermelha.

Fonte: adaptado de Souza, 2010, p. 74.

Na análise térmica diferencial (FIG. 2.17), a argila apresentou dois picos endotérmicos devido à perda de água de umidade e outro entre 250 e 550°C que corresponde à perda de água por desidroxilação, muito característico do argilomineral caulinita. Logo após esses picos, ele observou um pico exotérmico de baixa intensidade às proximidades de 970°C caracterizando a nucleação de mulita ou a formação do espinélio alumínio-silício. E a lama vermelha apresentou uma grande banda endotérmica na região de 100 a 280°C, que foi atribuída até 150°C à perda de água. A região da banda endotérmica entre 150 a 280°C pode ser atribuída à perda de água zeolítica e a desidroxilação dos compostos de ferro presentes na lama vermelha. O pico endotérmico a 310°C corresponde à temperatura de decomposição do hidróxido de alumínio gibbsita.

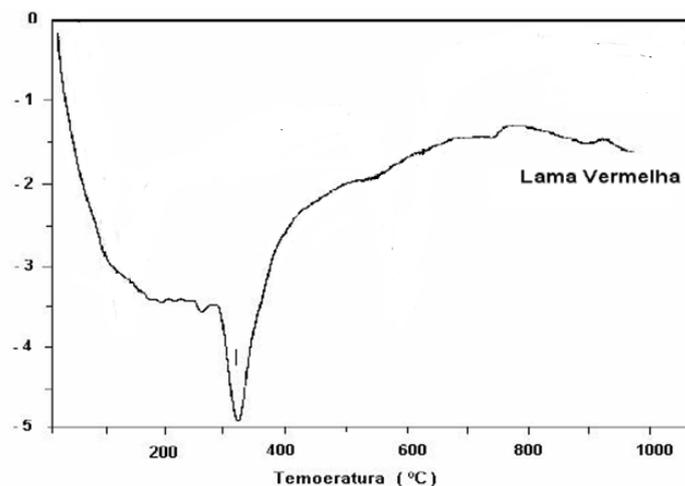


Figura 2.17 – Análise térmica diferencial da lama vermelha.  
Fonte: Souza, 2010, p. 75.

A destinação da lama vermelha é objeto de muitas pesquisas como a de Oliveira (2013), que a utilizou como carga em um compósito de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de curauá, concluindo que a lama vermelha aumentou a densidade do compósito de maneira proporcional a sua porcentagem volumétrica e que com 10% em peso de lama na resina houve redução da resistência à tração do compósito e que, ao ser incrementado para 20 e 30% em peso, a resistência à tração voltou a ser próxima ao da resina sem lama. Manfroi (2009) avaliou a lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas, Resende (2013) que estudou a aplicação da lama vermelha como catalisador em processos oxidativos/reduativos, Souza (2010) que avaliou o uso da lama vermelha como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil, dentre outras.

## 2.5 - O compósito em estrutura sanduíche

A estrutura sanduíche foi idealizada por Da Vinci e patenteada por Von Kármán. Este método construtivo foi grandemente impulsionado pela indústria aeronáutica e, atualmente, é o principal método de construção utilizado nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e naval, por apresentarem como principal vantagem a sua elevada relação resistência/peso, ou seja, maior resistência mecânica aliada ao menor peso. Porém, a utilização da estrutura sanduíche atualmente, tem se expandido e diversificado, podendo ser utilizada em caminhões frigoríficos (atuando como estrutura e isolamento simultaneamente), pranchas de surf, dentre outros empregos. Na construção civil, sua aplicação é voltada para elementos de fechamento, como paredes divisórias, forro e coberturas. A estrutura sanduíche é composta por três camadas: duas lâminas finas externas, rígidas, de elevada resistência, constituídas de material denso, denominada face, casca ou lâmina e uma interna, menos rígida, menos resistente e de baixa densidade, denominada núcleo ou miolo, que pode ser sólido ou composto de material corrugado, colados por adesivos (FIG. 2.18) e a possibilidade de uma combinação muito grande de materiais, ajuda na proposta e elaboração de novas estruturas sanduíches.

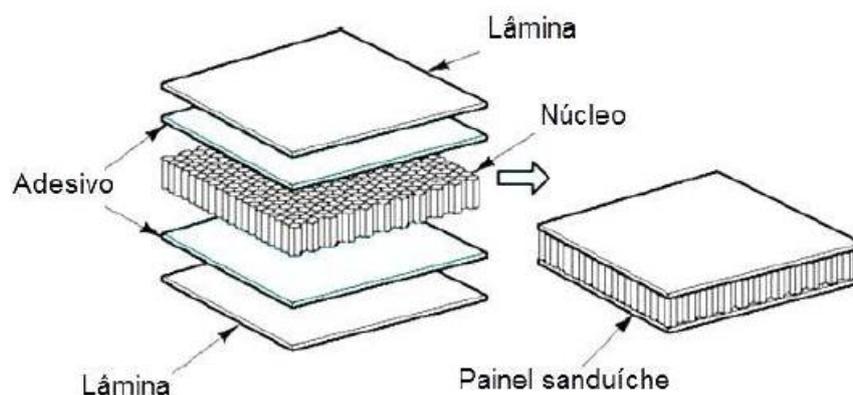


Figura 2.18 – Constituição de um painel sanduíche.

Fonte: Almeida, 2009, p. 7.

As estruturas sanduíche são, quanto ao seu funcionamento, comparáveis às vigas em “I”, onde as lâminas, funcionando como banzos, suportam os esforços em flexão, trabalhando uma lâmina à compressão e a outra à tração e o núcleo, funcionando como a alma do perfil, suporta os esforços de cortes gerados por esforço transversal e torção de modo a impedir que as lâminas deslizem. O núcleo terá que suportar adicionalmente esmagamento e enrugamento, devido à concentração de cargas. A resistência de um painel sanduíche depende dos materiais constituintes (lâminas e núcleo), da aderência entre eles, das dimensões do painel e da geometria da estrutura. No dimensionamento de um painel sanduíche, o parâmetro de deformação é determinante, seguido da resistência ao cisalhamento. No comportamento do painel sanduíche ainda devem ser avaliados os parâmetros de rigidez e de resistência à ruptura, sabendo que estes parâmetros são independentes entre si, ou seja, um painel pode apresentar elevada rigidez (deformação reduzida) e baixa resistência à ruptura, ou vice-versa (FERREIRA, 2013, p. 49).

### 2.5.1 - As lâminas de uma estrutura sanduíche

As propriedades requeridas aos materiais das lâminas são: elevada resistência mecânica, resistência ao impacto, à corrosão, ao desgaste e ao fogo; devem apresentar uma boa qualidade superficial quanto ao acabamento e permitir elaboração de formas complexas. As lâminas devem apresentar espessuras adequadas para resistir às tensões de tração e compressão induzidas pelo carregamento e um módulo de elasticidade em compressão apropriado para evitar o encurvamento do painel.

Quase todos os materiais podem ser utilizados como material de lâmina, tais como as ligas de alumínio, plásticos reforçados por fibras, titânio, aço, aço inoxidável, cobre, cimento com amianto e madeira compensada ou laminada. As lâminas metálicas são as mais utilizadas por apresentarem elevada resistência, bom acabamento e custo reduzido, porém, apresentam problemas como densidade elevada, susceptibilidade à corrosão, dificuldade de aderência lâmina/núcleo e necessidade de tratamentos especiais nas superfícies de acordo com as condições que o painel estará exposto. As lâminas de madeira podem ser de compensado ou de laminados. Os dois grandes problemas com estes tipos de lâmina estão relacionados à descontinuidade e à instabilidade dimensional

devido à variação de umidade. Já as lâminas poliméricas apresentam vantagens na relação resistência/peso próprio e rigidez/peso próprio, leveza, durabilidade em ambientes agressivos, resistência à fadiga e facilidade de emprego em formas mais complexas, porém, ainda apresentam elevado custo de produção e susceptibilidade a fenômenos de instabilidade (FERREIRA, 2013, p. 42 e 43). Na TAB. 2.14 é apresentada as propriedades físicas e mecânicas de alguns polímeros utilizados como matrizes em lâminas de estruturas sanduíche.

### 2.5.2 - O núcleo de uma estrutura sanduíche

Quanto ao núcleo, os materiais a serem utilizados devem ter baixa densidade, alguma rigidez e resistência ao corte (rigidez no sentido perpendicular às faces), isolamento térmico e acústico. O material do núcleo é dividido em dois grupos: homogêneos e os não-homogêneos. Os homogêneos apresentam sua estrutura sólida, tais como as espumas [de PVC, de poliuretano (PU), de isopor (poliestireno expandido - EPS), de poliestireno (PS), de poliestireno extrudido (XPS), de resina fenólica (PF)], lã de rocha, lã de vidro, madeira de balsa, concreto leve, produtos de argila, etc e os não-homogêneos ou estruturados, apresentando núcleo corrugado (com suporte unidirecional das lâminas), conhecidos como treliças ou núcleo colmeia (com suporte bidirecional das lâminas) (FIG. 2.19). Dentre os inúmeros materiais comercialmente utilizados como núcleos homogêneos, têm-se o PVC, o poliestireno (PS), o poliuretano (PU), o Rohacell® (em aplicações aeronáuticas e aeroespaciais) e o Divinycell® e, dentre os não-homogêneos, têm-se o alumínio corrugado e o Ninho de Abelha (colmeia) (SOARES, 2007, p. 20 e 21).

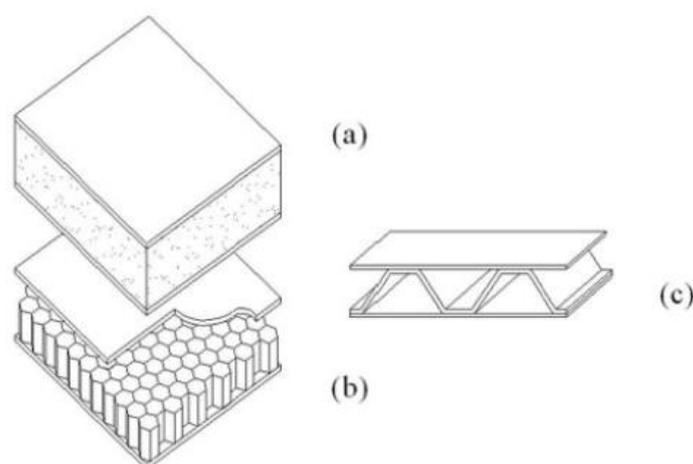


Figura 2.19 – Tipos de núcleos: (a) homogêneo e (b) e (c) não homogêneos.  
Fonte: Gagliardo e Mascia, 2010, p. 249.

Tabela 2.14 - Propriedades físicas e mecânicas de alguns polímeros utilizados como matrizes em lâminas de estruturas sanduíche

Matrizes	Massa específica (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação de ruptura (%)	Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	Temperatura de transição vítrea (°C)	Temperatura limite de utilização (°C)	
Termoplásticas	Polipropileno (PP)	900	1,2	0,03	20 - 400	90	-10	70 - 140
	Poliamida (PA)	1100	2,0	0,07	200	80	50	170
	Policarbonato (PC)	1200	2,1 - 3,5	0,055 - 0,07	125	-	150	-
	Poli-éter-éter-cetona (PEEK)	1300 - 1350	3,5 - 4,4	0,1	50	50	143	140 - 250
	Polisulfureto de fenileno (PPS)	1300 - 1400	3,4	0,08	110	-	85	240
	Polyethersulfone (PES)	1350	3,0	0,085	60	60	-	180
Termofixas	Poliéster	1200	4,0	0,08	2,5	80	70 -120*	60 - 200
	Fenólica	1300	3,0	0,07	2,5	10	260*	120 - 200
	Epóxi	1200 - 1300*	2,0 - 4,0*	0,06 - 0,08*	1,0 - 8,0*	-	180 100 - 270*	-
	Silicone	1100	2,2	0,035	-	-	-	100 - 350
	Poliamida	1400	4,0 - 19	0,07	1	80	-	250 - 300

Fontes: Serra, 2013, p. 8.

\*Ferreira, 2013, p. 43.

Os núcleos de espumas surgiram nos anos 1960 e que permitiram obter maiores relações de rigidez de torção/peso próprio e resistência/peso próprio. A partir daqui, os painéis começaram a ter muitas outras aplicações, nomeadamente na construção, nas indústrias marítima e automóvel e na pré-fabricação de elementos para outras utilizações (ALMEIDA, 2009, p. 6 e 7). A utilização de espumas no núcleo de uma estrutura sanduíche dificulta o estudo de seu comportamento teórico, pois as espumas formam uma intrincada rede tridimensional que se distorce durante a deformação e que é de difícil identificação (SOARES, 2007, p. 22 e 23).

As propriedades e a estrutura das espumas dependem da sua formulação e de seu processo de fabricação, podendo se obter uma espuma rígida ou flexível, com estrutura aberta ou fechada. Com exceção do poliestireno expandido, todas as outras espumas citadas anteriormente possuem uma estrutura celular com aproximadamente 90% de células fechadas. As espumas caracterizam-se por apresentarem uma densidade reduzida e um elevado isolamento térmico, devido a esta estrutura, onde o gás aprisionado (agente difusor) dificulta a transferência de calor através da espuma. As condições de umidade e a variação de temperatura afetam diretamente as espumas. Com o aumento da temperatura, a pressão do gás das células aumenta e estas dilatam, dando-se o contrário para reduções de temperatura. Em temperaturas mais altas, as espumas tendem a se tornar mais flexíveis e viscoelásticas e em temperaturas mais baixas, tornam-se mais quebradiças, rígidas e resistentes. Na TAB. 2.15 são apresentadas algumas propriedades físicas de algumas espumas utilizadas como núcleos. As propriedades mecânicas das espumas dependem da densidade da espuma, variando também com a temperatura e com a umidade, sobretudo para carregamentos de longa duração devido à sua elevada fluência. Ao depender da densidade, a resistência varia com a direção que está a ser avaliada, pelo que as resistências à compressão e à tração devem ser avaliadas nos planos paralelo e normal às lâminas e à resistência ao corte no plano do painel. Em termos estruturais, o material de núcleo deve apresentar uma resistência adequada para resistir às tensões de corte e ao esmagamento provocado pelas tensões de compressão introduzidas pela flexão do painel ou por carregamentos localizados. A resistência do material de núcleo é, em geral, reduzida, mas um aumento da sua espessura permite conferir ao conjunto uma rigidez à flexão mais elevada. No entanto, se a densidade do núcleo for reduzida, essa contribuição é pequena e pode ser desprezada. A ruptura à tração das espumas, por exemplo, é frágil, sendo a tensão máxima influenciada pela taxa de deformação, isto é, pela velocidade do carregamento (ALMEIDA, 2009, p. 16-19).

### 2.5.3 - Os adesivos

Uma estrutura sanduíche apresenta uma alta resistência por unidade de massa devido à combinação de duas placas rígidas funcionando como lâminas separadas por um núcleo de baixa densidade. Porém, se aparecer um descolamento nesse tipo de estrutura, sua resistência estrutural pode ser substancialmente reduzida devido à perda na transferência de tensões entre a lâmina e o núcleo, logo, a união lâmina/núcleo é muito importante para a integridade de uma estrutura sanduíche (STEWART *et al.*, 2010, p. 3490).

Tabela 2.15 – Propriedades físicas e mecânicas de algumas espumas utilizadas como núcleos em estruturas sanduíche

Propriedade	Poliuretano	Poliestireno expandido (isopor)	Poliestireno extrudido	fenólicos	PVC
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	35 – 59* 70	15 – 20* 40	30 – 50*	55	65
Condutividade térmica (W/m°C)	0,022 – 0,320 (dependendo do agente difusor)* 0,0354 (a 37,5°C)	0,033 – 0,039*	0,025 – 0,036*	-	-
Estabilidade dimensional (°C)	100* 120	80*	80*	130*	-
Temperatura de ignição (°C)*	300	Pouco mais que 300	Pouco mais que 300	530 – 580	-
Temperatura de decomposição (°C)*	150 – 200	300	300	350-500	-
Coefficiente de dilatação térmica $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	108	-	-	-	-
Coefficiente de absorção d'água $\beta$ , % em volume	1,3	-	-	-	-
Módulo de elasticidade $E_T$ (MPa)	19	11	-	7	55
Tensão limite à compressão $\sigma_{esm}$ (MPa)	0,50	0,27	-	0,17	1
Módulo de cisalhamento $G_{LT}$ (MPa)	5,0	4,5	-	3,5	9
Tensão limite cisalhante $f_{vLT}$ (MPa)	0,6	0,3	-	0,14	1,15

Sendo que L é comprimento (eixo x), W é largura (eixo y) e T é a espessura (eixo z) e os valores para o plano WT são idênticos aos do plano LT.

Fontes: Allen, 1969 in Gagliardo, 2008, p. 36.

\*Almeida, 2009, p. 18.

Um adesivo é um material que é aplicado às superfícies dos materiais constituintes de uma estrutura sanduíche ou de um laminado para ligá-los e oferecer resistência à separação dos mesmos, ao produzir uma junta com alta resistência ao cisalhamento. Para que ocorra uma boa adesão, o adesivo, no momento de sua aplicação, deve apresentar uma energia de coesão menor do que a energia de adesão, isto é, deve ser fluido o suficiente para molhar toda a superfície de contato do substrato, de modo a evitar a formação de bolhas de ar, que atuarão como concentradores de tensão, enfraquecendo a junta adesiva. O desempenho desta ligação depende da adesão entre o adesivo e o aderente, das características da superfície do aderente, das propriedades físicas, químicas e mecânicas do adesivo, bem como da geometria da junta a colar. O domínio do conhecimento da adesão dos adesivos às superfícies depende de investigações nas áreas da química, física, da reologia, da mecânica da fratura, dentre outras e ser aplicado para evitar que a junta colada seja o ponto mais fraco da estrutura (FERREIRA, 2013, p. 47).

Os adesivos podem ser classificados em três tipos de acordo com sua origem: naturais, semi-sintéticos e sintéticos. Os naturais são obtidos de fontes animais, tais como de peixes e de ossos, vegetais, tais como a dextrina e a goma arábica, e minerais, como os silicatos. Os adesivos semi-sintéticos são derivados de produtos naturais que sofrem modificação química, como o nitrato de celulose e o poliuretano (PU) de óleo de mamona. Os adesivos sintéticos são formados através da reação de poliadição e policondensação, como os polímeros de poli-acetato de vinila, poliuretano, resina uréica e resina epóxi. Os adesivos podem ser de base solvente ou de dois componentes, e a escolha entre essas opções é feita levando em consideração o tipo de material usado na face e no núcleo e o processo de fabricação do compósito. Os adesivos de base solvente são aplicados em ambas as superfícies a serem unidas e após um curto período de secagem, as superfícies são prensadas em conjunto. Este tipo de adesivo possui uma boa capacidade de aderência inicial e o seu tempo de endurecimento pode ser reduzido através da aplicação de pressão e temperatura. Já os adesivos bi-componentes são misturados no momento da aplicação e após um determinado período de tempo, os componentes reagem e endurecem rapidamente, porém, estas resinas necessitam ser mantidas sob pressão durante mais tempo do que outros tipos de adesivo (FERREIRA, 2013, p. 47 e 48).

Existem três tipos de mecanismos de ruptura numa ligação por meio de adesivos: um que ocorre na zona adesiva, outro que ocorre na zona coesiva e um terceiro, que ocorre na zona de transição (ver FIG. 2.20).

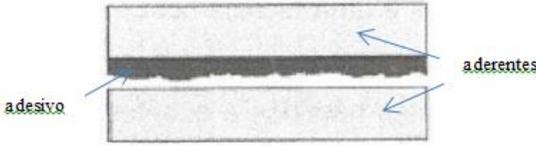
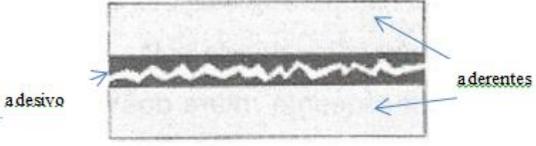
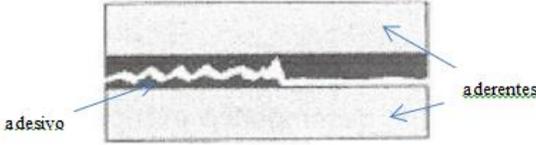
Tipos de ruptura	Características
 <p>Ruptura na zona adesiva</p>	Essa união possui uma baixa resistência mecânica, apresentando ruptura na interface adesivo/aderente.
 <p>Ruptura na zona coesiva</p>	Nela a força que se estabelece na interface é superior à força que mantém o adesivo unido.
 <p>Ruptura na zona de transição</p>	Ocorre uma ruptura mista adesiva/coesiva.

Figura 2.20 - Mecanismos de ruptura numa ligação por meio de adesivos.  
Fonte: Soares, 2007, p. 24 e 25.

A tecnologia de adesivos é aconselhável em detrimento das outras por diversos fatores, tais como:

- Os materiais a serem ligados podem ser de espessuras menores, diminuindo peso e custo, em contraste com a adesão por rebiteagem;

- Simplifica a concepção do projeto, diminuindo o número de peças;
- Reduz o número de maquinários;
- Operações de colagem podem ser realizadas por trabalhadores não especializados;
- Promove uma relação resistência/peso três vezes superior à resistência ao corte em ligações soldadas por pontos ou rebitadas;
- Contribui para maior eficiência aerodinâmica e melhor aparência final do material;
- Pode ser usada como isolante e/ou inibidor de corrosão quando aplicadas a materiais incompatíveis (aço/cobre);
- Excelente isolante térmico e elétrico;
- Melhora a resistência à fadiga em até 20 vezes às ligações de soldagem por pontos ou rebitadas em algumas peças idênticas
- Apresenta características de amortecimento de ruído superiores às ligações de soldagem por pontos ou rebitadas;
- Por ser geralmente flexível, permite a ligação de materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica (SOARES, 2007, p. 28).

A ligação por adesivo é uma técnica com enorme potencial para aplicações estruturais, porém, com limitações de durabilidade quando exposta a ambientes quentes e úmidos. Diversas variáveis podem influenciar no desempenho das juntas adesivo: tensões mecânicas, temperatura, ambiente físico-químico (por exemplo, vapor, água, radiação, vácuo, corrosão marinha), problemas de concepção (por exemplo, material do adesivo, material do aderente, tipo de junta, dimensões da junta/espessura do adesivo, considerações interfaciais) e problemas de execução (por exemplo, preparação inadequada da superfície, vazios na linha de colagem, cura inadequada do adesivo, alinhamento da junta) (SOARES, 2007, p. 25).

#### 2.5.4 – Modos de falha

As estruturas sanduíche apresentam danos mais complexos do que os que ocorrem nas estruturas laminadas. Os modos de falha dependem das propriedades dos materiais constituintes (lâmina, adesivo e núcleo), das dimensões geométricas e do tipo de carregamento (GDOUTOS e DANIEL, 2008). A FIG. 2.21 apresenta os modos de falhas possíveis nos painéis sanduíche e suas causas.

Portanto, no projeto de uma estrutura sanduíche, deve-se ter em consideração o tipo de carregamento e a escolha dos materiais de lâmina e do núcleo. As espessuras das lâminas devem ser tais que, suportem tensões normais de tração, de compressão, de flexão e de corte e a espessura do núcleo deve suportar tensões de corte pelo esforço transversal, de compressão, para evitar esmagamento e de flexão excessiva, para impedir a ocorrência de colapsos provocados por esses modos de falha nesse tipo de estrutura (MENDONÇA, 2005, p. 332 e 333 e SOARES, 2007, p. 6).

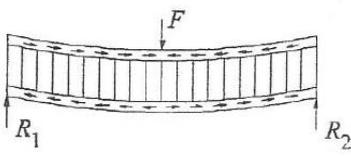
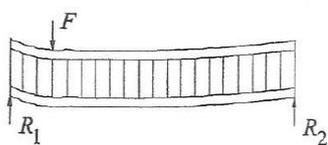
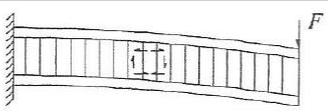
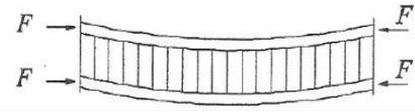
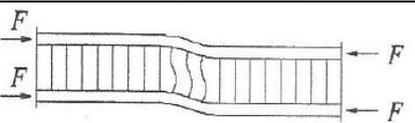
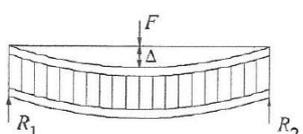
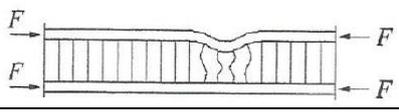
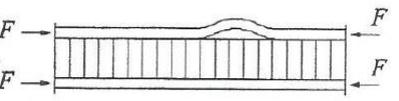
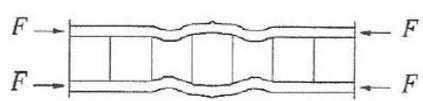
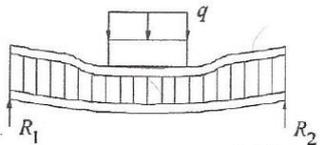
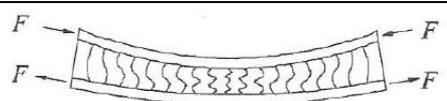
Modos de falha	Ocorrências
<p>Escoamento ou ruptura das faces (Falha das faces)</p> 	<p>As faces devem suportar as tensões de tração e compressão geradas pelo esforço de flexão. Esta falha ocorre quando as espessuras e/ou resistências das faces são insuficientes, podendo ocorrer tanto na face à tração, como na face à compressão.</p>
<p>Cisalhamento do núcleo (Falha por esforço transverso)</p> <p>(a)</p>  <p>(b)</p> 	<p>As tensões cisalhantes, resultantes dos esforços cortantes induzidos pelas cargas transversais, são distribuídas pelo núcleo. No caso (a) a falha ocorre devido ao esforço cortante ser provocado por grandes cargas próximas aos apoios e no caso (b), o adesivo não suportou o cisalhamento. Esta falha pode ocorrer quando a espessura do painel ou a resistência do núcleo ao corte são insuficientes.</p>
<p>Instabilidade do painel (Enrugamento geral)</p> <p>(c)</p>  <p>(d)</p> 	<p>O painel pode apresentar uma instabilidade quando submetido às cargas compressivas. No caso (c) a instabilidade foi global e no caso (d), a instabilidade foi mais localizada. Esta falha ocorre quando o material do núcleo apresenta baixa resistência à compressão, baixo módulo de corte ou devido à baixa resistência do adesivo ao corte.</p>
<p>Deflexão excessiva</p> 	<p>A deflexão excessiva ocorre quando a estrutura do painel não apresenta rigidez flexural suficiente ao ser submetido à ação das cargas de projeto.</p>
<p>Enrugamento das faces (<i>wrinkling</i>)</p> <p>(e)</p>  <p>(f)</p> 	<p>Ocorre devido à baixa resistência à compressão do núcleo em comparação com a resistência dos adesivos em tensão no plano. Se a falha for à compressão do núcleo, o enrugamento acontece para dentro (e) e se a falha ocorrer nos adesivos, o enrugamento ocorrerá para fora (f).</p>
<p>Flambagem intracelular (<i>dimpling</i>)</p> 	<p>Ocorre apenas em materiais celulares e é provocado quando as faces são muito finas em relação ao tamanho da célula.</p>
<p>Esmagamento do núcleo</p> <p>(g)</p>  <p>(h)</p> 	<p>No caso (g), a falha é provocada devido à área de concentração de carga ser muito pequena e no caso (h), a falha pode ser provocada pela baixa resistência normal do núcleo, pelo diâmetro da célula muito grande, pela espessura da parede muito fina ou por deflexão excessiva do painel.</p>

Figura 2.21 - Modos de falha em estruturas sanduíche.

Fontes: Mendonça, 2005, p. 332 e 333.

Soares, 2007, p. 5.

### 2.5.5 – A carga em estrutura sanduíche

A utilização de cargas podem melhorar propriedades mecânicas e térmicas de uma estrutura sanduíche, porém, a melhoria nessas propriedades e na resistência à fratura não acontecem para a mesma concentração de partículas. Uma maior concentração de partículas pode, por exemplo, elevar propriedades de compressão e flexão e pequenas concentrações de partículas pode maximizar a resistência ao cisalhamento. Com grandes concentrações de partículas, as trincas se propagam no núcleo, longe da interface face/núcleo, enquanto que pequenas concentrações, as trincas ocorrem muito próximas à interface face/núcleo (STEWART *et al.*, 2010, p 3495).

Finalizando, as principais vantagens das estruturas sanduíche são: a elevada resistência e rigidez específica, bom comportamento à flexão, baixo peso, boa resistência ao impacto, bom isolamento térmico e acústico. Porém, dentre as desvantagens, existem a incompatibilidade de materiais quanto à solicitação de esforços e quanto ao comportamento (à temperatura, resistência ao fogo, resistência à fadiga, etc), as resinas são perigosas à saúde, com pouca possibilidade de reciclagem e reparos (SOARES, 2007, p. 11).

### 2.6 – Considerações gerais sobre os ensaios na estrutura sanduíche da pesquisa

Mesmo com uma grande diversidade e combinações de materiais que são empregados em painéis sanduíche, constantemente, novos materiais e novas combinações estão sendo propostos. As propriedades mecânicas das estruturas sanduíche são diretamente afetadas pelos materiais selecionados para sua confecção, pela combinação entre eles e, também, por defeitos originados em sua fabricação (SERRA, 2013, p. 1).

Uma das características mais importantes que uma estrutura sanduíche deve apresentar é baixa massa específica. A **massa específica** de um material é a grandeza que indica a quantidade de massa existente em certo volume, e é, por definição, o resultado da divisão da sua massa pelo seu volume, conforme a equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde:

m - é a massa, que pode ser expressa em g ou kg;

V - é o volume, que pode ser expresso em cm<sup>3</sup> ou m<sup>3</sup>;

$\rho$  - é a massa específica, que pode ser expressa em g/cm<sup>3</sup> ou no SI, kg/m<sup>3</sup>.

A massa específica de um mesmo material depende da temperatura, da umidade e, no caso de gases, depende da pressão. Mudanças de estado físico também provocam alterações na densidade de uma substância. A estrutura sanduíche com núcleo de PU expansivo se apresenta como um material poroso, e o cálculo adequado a esse tipo de material, é o cálculo de **massa específica aparente (MEA)** e da **porosidade aparente (PA)**.

O **ensaio de tração** pode ser realizado **paralelo** ou **perpendicular à lâmina** da estrutura sanduíche, com núcleos contínuos (tipo espuma) ou com núcleos descontínuos (tipo colmeia). O **ensaio de tração paralelo à lâmina** é realizado para *determinar a resistência à tração da própria lâmina da estrutura*, pois, nesse tipo de compósito com núcleo de espuma somente a lâmina pode apresentar resistência à tração nessa direção e o **ensaio de tração perpendicular à lâmina** pode ser realizado para *determinar a resistência à tração do núcleo, da adesão lâmina-núcleo ou da lâmina de um painel sanduíche e seu modo de falha*. Esse método consiste em submeter uma estrutura sanduíche a uma força de tração uniaxial perpendicular ao plano do sanduíche, com a força sendo transmitida à estrutura através de garras presas às lâminas ou presas diretamente ao núcleo.

Semelhante ao ensaio de resistência à tração, o **ensaio de compressão** pode ser realizado **paralelo** ou **perpendicular à lâmina** da estrutura sanduíche. O ensaio de compressão é usado principalmente quando se deseja conhecer o comportamento de um material submetido à deformações grandes e permanentes ou quando o material é frágil sob tração. No **ensaio de compressão paralela ao plano da lâmina** da estrutura, esta, ao ser carregada, fica sujeito à instabilidade por **flambagem**, exceto se as espessuras das lâminas forem tal que o esmagamento das mesmas ocorra antes da instabilidade. O modo de ruptura das lâminas em compressão paralela à lâmina traduz-se no seu enrugamento, podendo o material do núcleo acompanhar esta deformação (ALMEIDA, 2009, p. 82). Já o **ensaio de compressão perpendicular ao plano da lâmina** da estrutura (compressão transversal) é importante para a avaliação do comportamento da zona dos apoios dos painéis sanduíche quando submetidos a carregamentos de flexão, uma vez que o material, nesta zona, fica sujeito a compressão na direção transversal ao plano das lâminas (ALMEIDA, 2009, p. 77). A relação tensão-deformação, em compressão e em corte, das espumas é, em geral, não linear - não apresenta um ponto de cedência, sendo a tensão máxima dada pela tensão última ou pela tensão correspondente a uma extensão de 10% (ALMEIDA, 2009, p. 19).

Os modos de falha no **ensaio de flexão** de uma estrutura sanduíche dependem do que se esteja querendo estudar. Se o estudo é sobre o núcleo, o modo de falha tido como normal é o da falha por corte do núcleo e no estudo sobre as lâminas, as falhas variam conforme elas estejam à compressão ou à tração. A lâmina contraída falha a compressão por um dos seguintes mecanismos: esmagamento, cedência causada por grande deflexão, descolamento ou enrugamento da lâmina. A lâmina estirada à tração, falha por quebra das fibras que a compõe (SOARES, 2007, p. 32).

O **ensaio de impacto** é muito utilizado para caracterização do comportamento dúctil-frágil dos materiais. Existem dois tipos de ensaios padronizados que são mais amplamente utilizados: Charpy e Izod. No ensaio Charpy o golpe é desferido na face oposta ao entalhe, com o corpo de prova na horizontal. Neste ensaio são observadas a energia absorvida e as características da fratura para a análise do comportamento desse tipo de estrutura, que muitas vezes são aplicadas para absorver impactos balísticos, de acidentes, em embalagens de proteção, dentre outras (SERAFIM, 2015, p. 4). Impactos

de baixa velocidade são definidos como se situando entre 1 a 10 m/s e as cargas de impacto induzem danos localizados nas lâminas, no núcleo e na interface lâmina/núcleo. A extensão dos danos depende de vários fatores, tais como: das lâminas (material, configuração, elaboração e espessura), do núcleo (do material e espessura), das propriedades da interface lâmina/núcleo, do processo de fabricação da estrutura, da velocidade do impacto, da geometria do material impactor, temperatura, dentre outros. No caso particular de impactos de baixa velocidade em estruturas sanduíche com núcleos de espuma, a interface núcleo/lâmina impactada pode descolar-se na região em torno do impacto e o núcleo apresentará uma deformação permanente. Os modos de falha mais comuns em estruturas sanduíche são basicamente de quatro modos: (1) falha à compressão da lâmina superior (ou frontal) seguida pelo esmagamento ou ruptura por corte do núcleo, (2) falha por esmagamento da lâmina superior (ou frontal), (3) falha ao corte do núcleo e (4) falha da lâmina inferior (ou posterior) devido às cargas de tração (FIG. 2.22). O aumento da espessura das lâminas não melhora necessariamente a resistência ao impacto de uma estrutura sanduíche, mas sim, o aumento da resistência ao esmagamento do material do núcleo (SERRA, 2013, p. 14, 16 e 17).

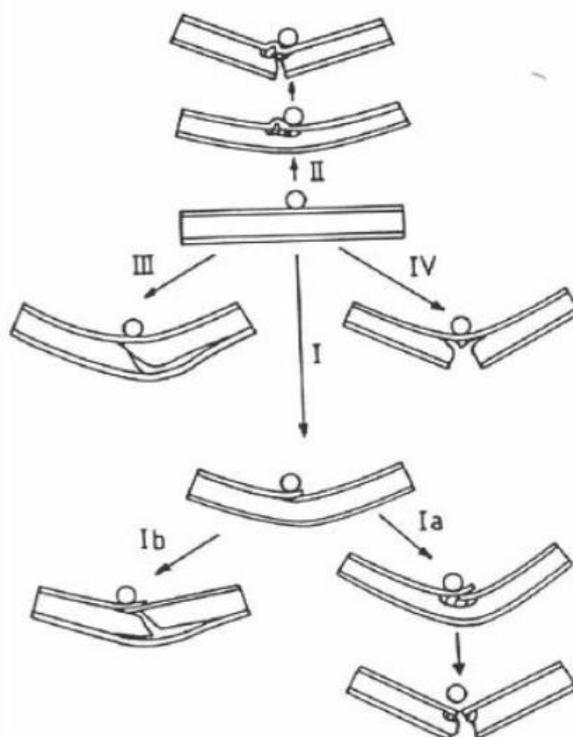


Figura 2.22 – Falha de uma estrutura sanduíche ao impacto.  
Fonte: Mines *et al.*(1994) *in* Serra (2013), p. 17.

O emprego de materiais poliméricos em ambientes fechados gera preocupações com riscos de incêndios, devido à alta **flamabilidade** desses materiais. A flamabilidade de qualquer polímero pode ser reduzida ou extinta bastando para isso aplicar uma camada isolante evitando assim o contato da resina com o oxigênio do ar ou pela incorporação física, na matriz, de compostos retardadores de chama.

O fogo é formado pelo calor, combustão e oxigênio. Ao se remover qualquer um dos três componentes do fogo, a chama se extingue e é num desses componentes que os retardantes de chama atuam. O retardante de chama pode atuar sobre o calor, liberando água durante o processo de combustão diluindo os gases inflamáveis, pode formar uma camada carbonizada sobre a superfície polimérica isolando-a, evitando o contato do oxigênio com a superfície do substrato e pode, também, reagir com um dos combustíveis do fogo formando compostos incombustíveis, resultando na extinção do fogo.

A combustão é o resultado de processos físicos e químicos em que as substâncias reagem com o oxigênio atmosférico liberando calor e formando produtos como água, CO e CO<sub>2</sub> e envolve basicamente quatro estágios conforme a FIG. 2.23 (NUNES, 2010, p. 33-35).

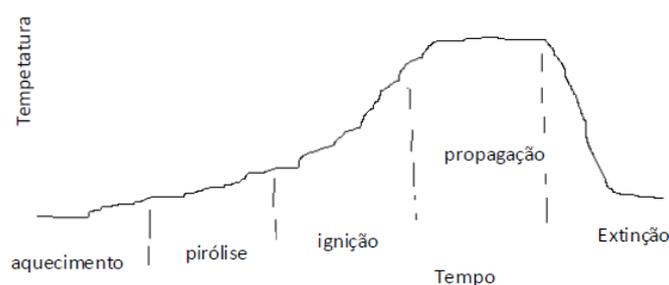


Figura 2.23 – Esquema dos estágios de combustão.  
Fonte: Rabello, 2000, in Nunes, 2010, p. 35.

A combustão num material plástico inicia por aquecimento no ponto de decomposição do mesmo. Muitos combustíveis são formados a partir desta decomposição, dentre eles os gases já citados e esses gases de pirólise são misturados com o oxigênio do ar e atingem o limite de ignição, passando a combustíveis de alta ignição, iniciando a propagação da chama. A incorporação de um retardante de chama num compósito pode inibir ou até suspender o processo de combustão, agindo química ou fisicamente no polímero durante um estágio particular do processo de queima, que pode ser no aquecimento, na decomposição, na ignição, na combustão ou na propagação das chamas. O processo de combustão pode ser retardado ou extinguido por ação física ou química. Por ação física, pode ser por refrigeração do substrato, como o hidróxido de alumínio (tri-hidratado) ou hidróxido de magnésio; por formação de camada protetora (*coating*) sólida ou gasosa, formando uma barreira física entre o oxigênio e o comburente, como os compostos halogenados fosforados e por diluição através da incorporação de substâncias inertes que diluem o combustível no sólido e incidem na redução do comburente na fase gasosa para limitar a ignição, como por exemplo, incorporar a bentonita como carga no compósito. Por ação química, as reações químicas interferem no processo de combustão do sólido e na fase gasosa, interferindo na formação de radicais livres gerando subprodutos menos energéticos, promovendo o retardo ou paralisação da queima. Na queima de um substrato polimérico, que contém vários elementos químicos inflamáveis, ocorre a liberação de fumaça e/ou vapores geralmente tóxicos prejudiciais à saúde dos seres vivos, causando irritação aos olhos, coriza, náuseas, falta de ar e até a morte. A quantidade de fumaça liberada dependerá da

fonte de ignição, da disponibilidade de oxigênio no ar, da constituição e das propriedades do material combustível. Na fase de crescimento do fogo, os materiais compósitos entram em combustão quando a temperatura for superior a 350-500°C. Numa fase denominada de *flashover*, quando o fogo está completamente desenvolvido, a temperatura média do gás na parte superior do ambiente excede 600°C. Quando o fogo está completamente desenvolvido, a temperatura máxima de pico típico pode chegar a 900°C, 1.000°C e até 1.200°C e, a partir daí, ocorre o decaimento, quando o combustível e os materiais combustíveis tornam-se insuficientes para a queima. O PVC, o poliestireno, o poliuretano e alguns poliésteres insaturados tem forte tendência em gerar fumaças durante a combustão.

O emprego dos retardantes de chama poderá influenciar positiva ou negativamente em outras propriedades do compósito, porém, compensando em características como maior tempo de fuga em caso de combustão, menor geração de calor durante a queima, redução na liberação de agentes tóxicos, inibição de gotejamento, etc. A maioria dos compostos inorgânicos não é apropriada para utilização como retardante de chama por ser inerte no intervalo de temperatura de decomposição dos polímeros (entre 150 e 400°C). Os retardantes de chama mais amplamente utilizados são o hidróxido de alumínio ou magnésio e compostos contendo boro e fósforo, que não evaporam sob influência do calor e nem se decompõe como os compostos orgânicos, mas liberam gases não-inflamáveis como a água ou dióxido de carbono, que dilui a mistura de gases inflamáveis por meio de pirólise, no processo de combustão quando a temperatura atinge níveis entre 200 e 300°C, formando um mecanismo de proteção (blindagem) sobre o material, impedindo o contato do oxigênio com a superfície polimérica. A alumina é usada, na maioria das vezes, como carga em polímeros de temperaturas de fusão entre 190 e 220°C, pois a temperatura de degradação do ATH (alumina tri-hidratada) é de 220°C. Para temperaturas de fusão superiores a 200°C, o borato de zinco e hidróxido de magnésio são mais indicados, porém, com custos muito superiores ao ATH. A taxa de decomposição máxima do ATH ocorre entre 300°C e 350°C, que coincide com as temperaturas de pirólise de alguns polímeros (TAB. 2.16) (NUNES, 2010, p. 39 – 42).

Tabela 2.16 - Temperatura de decomposição de alguns polímeros

Polímero	Temperatura de decomposição (°C)
Poliétileno (PE)	340 - 440
Polipropileno (PP)	320 - 400
Poliestireno (PS)	300 - 400
Poli(cloreto de vinila) (PVC)	200 - 300
Poli(tetraflúoretileno) (PTFE)	500 - 550
Poli(metilmetacrilato) (PMMA)	180 - 280
Poli(acrilonitrila) (PAN)	250 - 300
Poliamida 6	300 - 350
Poliamida 66	320 - 400
Poliéster	Acima de 260
Poliuretano	Acima de 170
Celulose	280 - 380

Fonte: Gallo *et al.*, 2001 in Nunes, 2010, p. 42.

A alumina é utilizada em polímeros que apresentam temperaturas de fusão baixas, porém, para ter eficiência como antichamas se faz necessário grandes quantidades da mesma (CANAUD *et al.*, 2001). Na faixa de temperatura entre 250 - 300°C, o trihidróxido de alumínio (THA) se decompõe endotermicamente, segundo a equação:



Nesta decomposição é absorvido cerca de 1,17J/kg, contribuindo para a diminuição da temperatura do material e a água liberada (35%) dilui os gases combustíveis da chama. Também ocorre a formação de  $Al_2O_3$  que funciona como uma camada na superfície do produto, reduzindo a difusão do oxigênio para o meio reativo e dificultando a troca de calor. Como são utilizados em grandes quantidades também têm atuação como cargas, geralmente prejudicando o comportamento mecânico. Outra importância do hidróxido de alumínio é seu baixo custo e baixa toxidez (RIBEIRO *et al.*, 2013, p. 117). O efeito do retardante de chama age de três formas: através da própria endotermia da carga, por meio da capacidade calorífica dos resíduos de óxido formados e pela capacidade calorífica dos gases envolvidos na queima. O hidróxido de alumínio se caracteriza como retardante de chama agindo pelas três formas citadas: contribui em cerca de 51% pela própria endotermia, em torno de 19% através dos resíduos de óxidos e aproximadamente 30% na liberação gradativa de gases. Por exemplo, durante o processo de combustão, o ATH libera grande quantidade de água (aproximadamente 36% em massa ou 800 ml/g a 230°C), contribuindo significativamente para a absorção do calor de aquecimento, devido ao elevado calor específico da água que contribui para a redução da energia de queima (NUNES, 2010, p. 42-43).

Compósitos poliméricos reforçados com fibras inflamáveis podem queimar com vigor, e muitas vezes com a evolução de fumaça. A resistência geral ao fogo e a sua performance (incluindo a geração de fumaça) é determinada primariamente pela matriz orgânica, que apresenta baixa resistência ao fogo. Para o compósito tornar-se uma barreira para o calor e a chama, em um fogo em avanço, depende muito da característica combinatória da resina, das fibras e da utilização de retardantes de chama. O comportamento, perante o fogo, das diversas fibras têxteis, naturais e não naturais, é influenciado por muitos fatores entre os quais necessita mencionar o tipo e características da estrutura têxtil por elas constituídas. Assim as fibras celulósicas inflamam-se a temperaturas mais baixas e queimam rapidamente, (KANDOLA e HORROCKS, 2001, p. 182). As fibras proteicas inflamam-se em temperaturas mais elevadas e queimam mais lentamente, não mantendo a combustão. As fibras não naturais sintéticas, sendo termoplásticas, fundem a temperaturas relativamente baixas, pois tem temperatura de fusão abaixo da temperatura de ignição (HORROCKS e KANDOLA, 2005, p. 330).

A aplicação de painéis sanduíche em materiais poliméricos pode limitar a segurança em uma situação de incêndio, pois esses materiais utilizados nas faces e núcleo dos painéis são susceptíveis à ignição. Caso a função desses painéis seja estrutural, devem apresentar uma resistência ao fogo que evite o colapso da estrutura e apresentar um isolamento térmico adequado para não contribuir para o desenvolvimento

do incêndio. Paineis, que apresentem um bom isolamento térmico, retardam a propagação do incêndio e o atravessamento por chamas, calor, fumaça e gases tóxicos. As resinas mais indicadas, para as faces de um painel sanduiche, são as fenólicas (em substituição das mais usuais, epóxi ou poliéster). O material de núcleo mais adequado para situações de incêndio é a lã de rocha devido à sua baixa combustibilidade, porém as espumas, em geral, não possuem boa propriedade de reação ao fogo. O poliuretano, sendo um material termofixo, não derrete quando exposto ao fogo e forma uma espécie de camada carbonosa que lhe confere uma pequena proteção. Por outro lado, emite uma elevada quantidade de fumaça, liberando gases tóxicos (ALMEIDA, 2009, p. 19 e 36).

Os PU's queimam como todos os materiais orgânicos na presença de oxigênio e aplicação de calor e as espumas flexíveis de baixa densidade, com células abertas de área superficial maior e alta permeabilidade ao ar, queimam mais facilmente do que os PU's sólidos. Os produtos tóxicos gerados na queima dos PU's são o monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio e traços de cianeto de hidrogênio (HCN). Existem diversos retardantes de chama para os PU's já industrializados, porém, em algumas aplicações são utilizados cargas sólidas como carbonato de cálcio, sulfato de bário e alumina tri-hidratada. A alumina tri-hidratada reduz a inflamabilidade, minimiza a formação de fumaça na queima, resultante da adição do fosfato orgânico halogenado. O hidróxido de alumínio, em temperaturas acima de 200°C, perde água e forma óxido de alumínio (com ponto de fusão de 2.072°C). Sua efetividade é devida ao fato de que: a perda endotérmica de água retira calor do sistema; o vapor de água formado dilui o gás formado pela queima do polímero; e o óxido de alumínio forma uma camada protetora isolante protegendo o PU. Todavia, para se obter efeito antichama são necessários elevados teores, da ordem de 40%, o que pode comprometer as propriedades do produto (VILAR, 2001, cap. 2.6).

A necessidade de se realizar a **proteção sonora** dos edifícios surge das preocupações crescentes com a qualidade de vida principalmente nos grandes centros urbanos, com o problema da elevação dos níveis de ruídos, provocando a poluição sonora. O som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo. Já ruído seria um som indesejável, porém o que pode ser qualificado como ruído, pode vir a transmitir informações úteis, como por exemplo, alarmes, sirenes de ambulâncias e de veículos policiais, etc. Os ruídos podem gerar diversos efeitos indesejáveis como: perda auditiva, aumento da pressão arterial, perturbação do sono, tensão, improdutividade, irritação, interferência na comunicação oral, dentre outros. A eliminação completa do ruído não é o objetivo do estudo de acústica, porque além de ser uma solução cara, o excesso de silêncio evidenciaria o chamado "ruído de fundo", às vezes perturbador, como por exemplo, as batidas do coração, ruídos do aparelho digestivo, o tic-tac do relógio, etc. Logo, o objetivo do estudo de acústica não é eliminar completamente o ruído e, sim, controlá-lo (BISTAFA, 2011, p.17 e 18).

O nível de pressão sonora ( $L_p$ ) é a medida física preferencial para caracterizar a sensação subjetiva da intensidade dos sons, sendo sempre calculado com o valor eficaz da pressão sonora e expresso pela equação:

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p_{eficaz}}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

Onde:

$p_{eficaz}$  – valor eficaz da pressão sonora;

$p_0$  – uma pressão sonora de referência (normalmente tomada como a do limiar da audição, ou seja,  $p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$ ) ((BISTAFA, 2011, p. 30).

Na FIG. 2.24 é apresentada a zona de audição dos seres humanos delimitada pelo limiar da audição e pelo limiar de desconforto auditivo (de dor).

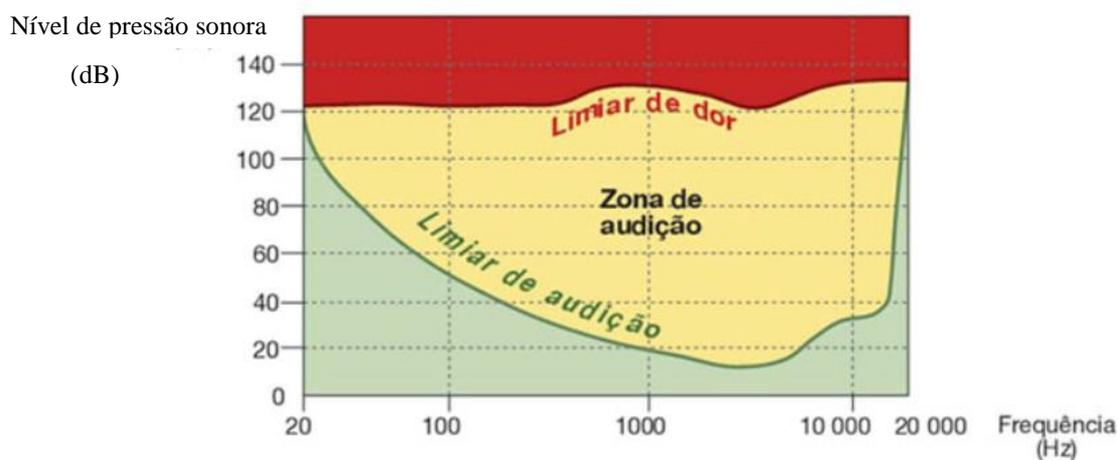


Figura 2.24 – Limiar da audição humana.

Fonte: <http://www.google.com.br/imagens/limiar-da-audicao-humana>.

A TAB. 2.17 apresenta pressões sonoras e níveis de pressão sonora para sons do cotidiano e as correspondentes sensações subjetivas de intensidade dos sons associados.

A perda de transmissão sonora ( $PT$ ) ou  $TL$  (*transmission loss*) é referida como a resposta dos corpos de prova quando expostos a um campo sonoro incidente difuso. A perda de transmissão é definida, operacionalmente, como a diferença, em decibéis, entre as médias dos níveis de pressão sonora na fonte de reverberação e os ambientes de recepção, mais dez vezes o logaritmo da razão da área da parte comum pela absorção sonora no ambiente de recepção. Essa definição pode ser expressa pela equação:

$$TL = L_S - L_R + 10 \log S/A_R \quad (5)$$

Onde:

$TL$  – é a perda de transmissão, dB;

$L_S$  – é a média do nível de pressão sonora no ambiente fonte, dB;

$L_R$  – é a média do nível de pressão sonora no ambiente receptivo, dB;

$S$  – é a área do corpo de prova em teste que é exposta no ambiente receptivo,  $\text{m}^2$

e  $A_R$  – é a absorção sonora no ambiente receptivo com o corpo de prova em teste no lugar,  $\text{m}^2$ .

Tabela 2.17 - Pressões sonoras e níveis de pressão sonora para sons do cotidiano e correspondentes sensações subjetivas de intensidade associadas

Sensação subjetiva de intensidade	Descrição	Pressão sonora (Pa)	Nível de pressão sonora (dB)
Estrondoso	Perigo de ruptura do tímpano:		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avião a jato a 1 m</li> <li>• Fogo de artilharia</li> </ul>	200	140
	Limiar da dor:		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tambor de graves a 1 m</li> <li>• Avião a jato a 5 m</li> </ul>	63	130
Muito ruído	Limiar do desconforto auditivo:		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avião a pistão a 3 m</li> <li>• Broca pneumática</li> </ul>	20	120
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metrô</li> <li>• Próximo a uma britadeira</li> </ul>	6,3	110
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indústria barulhenta</li> <li>• Dentro de um avião</li> </ul>	2	100
Ruído	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banda ou orquestra sinfônica</li> <li>• Rua ruidosa</li> </ul>	0,63	90
	Obs: Ambientes com níveis de pressão sonora superiores a 85 dB são considerados insalubres.		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dentro de um automóvel em alta velocidade</li> <li>• Escritório ruidoso</li> <li>• Aspirador de pó</li> </ul>	0,2	80
Moderado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rua de ruído médio</li> <li>• Pessoa falando a 1 m</li> </ul>	0,063	70
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escritório de ruído médio</li> <li>• Rádio com volume médio</li> </ul>	0,02	60
Tranquilo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Restaurante tranquilo</li> <li>• Escritório aberto (com tratamento acústico)</li> </ul>	0,006	50
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sala de aula (ideal)</li> <li>• Escritório privado (ideal)</li> </ul>	0,002	40
Silencioso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teatro vazio</li> <li>• Quarto de dormir</li> </ul>	0,0006	30
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimento de folhagem</li> <li>• Estúdio de rádio e TV</li> </ul>	0,0002	20
Muito silencioso	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deserto ou região polar (sem vento)</li> <li>• Respiração normal</li> </ul>	0,00006	10
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laboratório de acústica (câmara anecoica)</li> <li>• Limiar da audição</li> </ul>	0,00002	0

Fonte: Bistafa (2011), p. 33.

Para medir o desempenho acústico de um material ou estrutura deve-se verificar a capacidade dos mesmos em absorver e isolar o ruído, porém, frequentemente essas propriedades são confundidas. A absorção sonora é utilizada para controle do tempo de reverberação de determinado recinto e um material absorvente deve apresentar estrutura fibrosa ou porosa para que as ondas sonoras possam propagar e perder parte de sua energia. Já a isolamento sonora, medida através da perda de transmissão (TL), é utilizada para impedir que o ruído de um recinto se transmita para um recinto contíguo e o material plicado para este fim deve ser denso e reflexivo (BISTAFA, 2011, p. 313).

Na TAB. 2.18 são apresentados valores da perda de transmissão de diversos materiais para sons aéreos de partições diversas.

Tabela 2.18 - Valores da perda de transmissão para sons aéreos de partições diversas

Tipo de partição	Esp. (mm)	Dens. Sup. (kg/m <sup>2</sup> )	Frequência central da banda de oitava (Hz)					
			125	250	500	1000	2000	4000
Placa de lascas de madeira, em esquadria de madeira	19	11	17	18	25	30	26	32
Placa de fibras de madeira, em esquadria de madeira	12	4	12	16	20	24	30	31
Placa de gesso, em esquadria de madeira	9	7	15	20	24	29	32	35
Chapa compensada, em esquadria de madeira	12	7	10	15	17	19	20	26
Madeirame revestido com gesso em ambos os lados (12 mm em cada face)	50	75	23	27	30	32	36	39
Chapa compensada	18	10	24	22	27	28	25	27
Placa de amianto de 9 mm, entre duas chapas de aço de 1,2 mm	12	37	22	27	31	27	37	44
Tijolos revestidos com argamassa	125	240	36	37	40	46	54	57
Faces em dry-wall de 12 mm, fixadas em caibros de 50 x 100 mm	125	19	16	22	28	38	50	52
Faces em dry-wall de 9 mm, com revestimento de 12 mm em gesso, fixadas em caibros de 50 x 100 mm	142	60	25	28	34	47	39	50

Fonte: Valores extraídos de Bistafa, 2011, Tab. 10.11, pp. 294-296.

O espectro sonoro vai desde os infra-sons, sons audíveis até os ultra-sons (FIG. 2.25). Os tremores de terra, erupções vulcânicas são exemplos de infra-sons, de frequências abaixo de 20hz, que já não conseguimos ouvir. As ecografias utilizadas pela medicina, os sonares de embarcações são exemplos de ultra-sons, de frequências superiores à 20.000 Hz, que também não conseguimos ouvir. Animais, como o cachorro e o gato, conseguem ouvir até 50.000 Hz ou mais, os morcegos chegam a produzir e ouvir até 120.000 Hz e os golfinhos ouvem até 150.000 Hz.

Apesar da frequência audível do som estar no intervalo de 20 – 20.000 Hz, a frequência da voz humana varia, mais comumente, de 50 a 3.400 Hz. Segundo Kitchen & Bazin (1998) a frequência audível pode ser sub-dividida em: **baixas** (de 20 a 250 Hz), **médias-baixas** (acima de 250 a 640 Hz), **médias** (acima de 640 a 2.500 Hz), **médias-altas** (acima de 2.500 a 5.000 Hz) e **altas frequências** (acima de 5.000 até 20.000 Hz), que são os sons agudos. As baixas frequências ainda podem ser sub-divididas em sub grave (20 – 63 Hz) e grave (63 – 250 Hz) (FIG. 2.26).

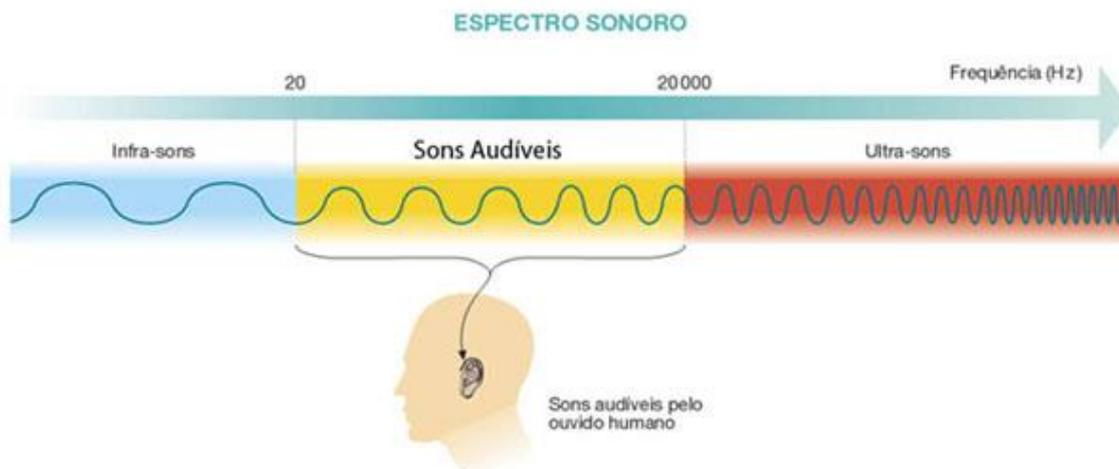


Figura 2.25 - Frequências audíveis e infra/ultra sons.

Fonte: [www.somsc.com.br/dicas\\_frequencias.php](http://www.somsc.com.br/dicas_frequencias.php).

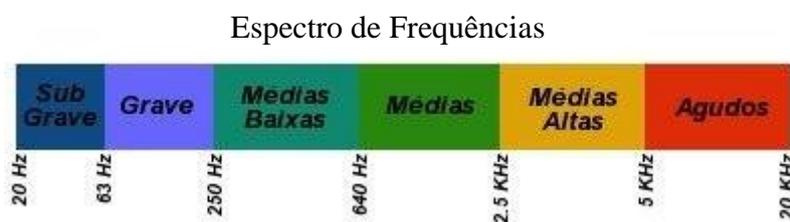


Figura 2.26 - Espectro de frequências da voz humana.

Fonte: [www.somsc.com.br/dicas\\_frequencias.php](http://www.somsc.com.br/dicas_frequencias.php).

Os painéis sanduíche podem ser aplicados em situações que requerem, frequentemente, adequados níveis de isolamento sonoro e térmico, juntamente com elevada resistência mecânica e peso reduzido. Os painéis sanduíche apresentam, em geral, baixo isolamento acústico. Para conseguir maximizar essa propriedade, vários fatores devem ser levados em consideração na elaboração de painéis sanduíche: considerar a fonte sonora, o meio de propagação do som, a sua frequência e as dimensões do painel. Os painéis comportam-se de forma diferente de acordo com as frequências a que estão sujeitos. Para frequências inferiores a 500 Hz, a ressonância nos painéis pode ser evitada empregando-se materiais suficientemente rígidos nas faces e materiais mais espessos e densos no núcleo. Para frequências superiores a 1000 Hz, é aconselhável adotar painéis menos rígidos de modo a que o som perca a sua energia ao percorrer o painel. Isto pode ser obtido com materiais de núcleo menos espessos e pouco densos ou através da aplicação de materiais visco-elásticos no painel (ALMEIDA, 2009, p. 33).

Na prática é utilizado um método que caracteriza a perda de transmissão de uma partição por meio de um número único, que é uma média ponderada, com o objetivo de facilitar a comparação de desempenho de diferentes partições, padronizado pela norma ASTM E413-04 *Classification for Rating Sound Insulation* denominado STC (*sound transmission class* – classe de transmissão sonora). O contorno STC que é atribuído à

partição é aquele que, quando comparado com os valores de PT (ou *TL*) em banda de 1/3 de oitava da partição, atenda simultaneamente a duas condições:

- A diferença entre o valor de PT do contorno e da partição (deficiência) não deve exceder 8 dB, em nenhuma banda de 1/3 de oitava;
- A soma das "deficiências" (valores de PT da partição abaixo dos valores de PT do contorno), nas dezesseis bandas de 1/3 de oitava entre 125 e 4.000 Hz, não deve exceder 32 dB.

A TAB. 2.19 apresenta valores de STC, com suas condições de privacidade e de classificação subjetivas associadas.

Tabela 2.19 - Classe de transmissão sonora (STC), condições de privacidade e classificações subjetivas associadas

STC	Privacidade	Classificação
25	Voz normal facilmente inteligível.	Precária
30	Voz elevada razoavelmente inteligível; Voz normal pouco inteligível.	Fraca
35	Voz elevada pouco inteligível; Voz normal não inteligível.	Razoável
40	Voz elevada não inteligível; Voz normal inaudível.	Boa
45	Voz elevada ouvida muito fracamente.	Muito boa
50	Voz elevada inaudível.	Excelente

Fonte: Bistafa, 2011, Tab. 10.9, p. 293.

A TAB. 2.20 apresenta a classe de transmissão sonora de partições feitas de materiais construtivos mais comuns, de uma forma generalizada.

Tabela 2.20 - Classe de transmissão sonora de partições feitas de materiais construtivos mais comuns\*

Partição	STC
Vidro de 6 mm de espessura	26
Chapa de madeira compensada de 18 mm de espessura	28
Parede dupla de chapas dry-wall de 12 mm de espessura, fixadas em caibros de 5 x 10cm	33
Chapa de aço de 6 mm de espessura	36
Parede de tijolos de 10 cm de espessura	41
Parede de blocos de cimento de 15 cm de espessura	42
Parede de concreto armado de 30 cm de espessura	56
Parede dupla: tijolo de 20 cm, cavidade de 5 cm, tijolos de 10 cm de espessura	65

\* Valores indicativos.

Fonte: Bistafa, 2011, Tab. 10.10, p. 294.

Na TAB 2.21 é apresentada uma classificação do isolamento acústico feito levando em consideração a perda de transmissão sonora da partição.

Tabela 2.21 - Classificação do isolamento acústico

Qualificação do isolamento	Perda de transmissão	Condição de audição
Pobre	< 30 dB	Compreende-se a conversa normal facilmente através da parede
Regular	30 a 35 dB	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não se entende bem a conversação normal
Bom	35 a 40 dB	Ouve-se a conversação em voz alta, mas não é facilmente inteligível
Muito Bom	40 a 45 dB	A conversa normal é inaudível e em voz alta é muito atenuada, sem compreensão
Excelente	> 50 dB	Ouve-se muito fracamente os sons muito altos

Fonte: Gomez, 1988.

## 2.7 – Pesquisas em compósitos similares

Para **Weili Wu (2013)** o caulim apresenta baixa viscosidade, boa fluidez, boa dispersão, boa plasticidade, bom isolamento elétrico e melhora a resistência ao fogo. No seu estudo de compósitos de borracha e caulim, ele concluiu que esses compósitos demonstraram resistência à tração superior e alongamento à ruptura mais fraco do que os compósitos de borracha e sílica e que o caulim, com sua estrutura em forma de placas, contribui para a dissipação de calor e melhora a estabilidade térmica de compósitos de borracha em substituição à sílica.

**Sari (2015)** em sua pesquisa com três tipos de compósitos de caulim com ácido cáprico (CA), caulim com PEG600 e caulim com heptadecano (HD) conseguiu inserir no máximo 17,5% em massa desses materiais, comprovando a boa compatibilidade entre os componentes. A análise termogravimétrica confirmou que esses compósitos apresentaram boa estabilidade térmica e alta resistência à degradação térmica, concluindo que todos os compósitos apresentaram bom armazenamento de energia térmica para funcionarem como revestimento em construções, devido às suas propriedades de armazenamento de calor latente.

**Soares (2007)** realizou ensaios comparativos de flexão com três pontos (ASTM – C393) em compósitos em estrutura sanduíche com lâminas em fibra de carbono/epóxi (laminado 0°/90° multiaxial Vicotex 6376/40%/G803) e o núcleo de aglomerados de cortiça, Rohacell® e Ninho de Abelha (aramida). As lâminas foram coladas ao núcleo com o adesivo FM300NK. O pesquisador verificou que o núcleo com aglomerado de cortiça apresentou densidade quase três vezes a densidade do núcleo com Rohacell® e quase cinco vezes a densidade do núcleo com Ninho de Abelha. A resistência à flexão foi maior para as estruturas com Rohacell® e Ninho de Abelha. O pesquisador observou que todos os corpos de prova com aglomerado de cortiça falharam por corte no núcleo, com o aparecimento de fendas no núcleo por volta do deslocamento correspondente à carga máxima localizada, por baixo do ponto de carregamento. Essas fendas progrediram em direção às extremidades dos corpos de prova e a quebra final ocorreu quando a fenda atingiu a extremidade do corpo de prova e a estrutura deixou de funcionar como estrutura sanduíche. Os corpos de prova com Ninho de Abelha sofreram falha por esmagamento e consequente ruptura das fibras que constituíam a lâmina à

compressão. E os corpos de prova com Rohacell® apresentaram dois tipos de falha: na interface lâmina-núcleo por descolagem do adesivo e o outro tipo de falha foi da lâmina superior por tensões normais de compressão. Quanto ao módulo de rigidez, não foi possível determinar os dos corpos de prova com Ninho de Abelha e com Rohacell® devido a falha ter sido nas lâminas e não no núcleo e quanto aos corpos de prova com aglomerados de cortiça, embora o valor final do módulo de rigidez do corpo de prova 2 seja menor que os dos corpos de prova 1 e 3, essa estrutura foi a melhor, já que não só suportou maiores valores de carga e de deformação, como o módulo de rigidez de corte foi maior em todo o espectro de carregamento.

**Ferreira (2013)** realizou estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais de rami e bucha vegetal para aplicação como forro em edificações. A resina utilizada foi o poliéster insaturado ortoftálico, também da Avipol, com catalisador Butanox, na proporção 3% em massa da resina. A pesquisadora, utilizando esta resina como matriz, elaborou lâminas de 3mm com tecido bidirecional (conhecido como telinha) com fios de rami (de diâmetro aproximado de 0,5mm) (com 30%, 40% e 50% em volume de fibra). A autora realizou ensaios de tração (ASTM D638:2010, para elaboração dos corpos de prova e ASTM D3039:2008, para realização do ensaio) determinou as massas específicas das lâminas. As massas específicas da matriz e das lâminas com tecido de rami estão na TAB. 2.22 e as resistências à tração, os módulos de elasticidade e as deformações máximas da matriz e das faces estão na TAB. 2.23.

Tabela 2.22- Massas específicas das lâminas da pesquisa de Ferreira

Tipo de material	Volume de fibra (%)	Massa específica da lâmina (g/cm <sup>3</sup> )
Poliéster	0	1,18
Tecido de rami/poliéster	30	1,14
	40	1,22
	50	1,42

Fonte: Ferreira, 2013, p. 80 e 81.

Tabela 2.23 – Resultados do ensaio de tração das faces da pesquisa de Ferreira

Tipo de face	Volume de fibra (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Poliéster	0	18,32	3,92	2,24
Tecido de rami/poliéster	30	46,53	12,05	1,19
	40	46,92	12,83	1,44
	50	61,88	14,61	1,84

Fonte: resumido de Ferreira, 2013, p. 85.

As massas específicas das placas foram aumentando com o incremento das fibras. Quanto à resistência à tração, o aumento do volume de fibra foi efetivo para o aumento da resistência à tração. Os módulos de elasticidade e a deformação foram aumentando com o aumento do volume de fibra. A pesquisadora concluiu que os reforços das lâminas com tecido bidirecional de fios mostrou-se adequados para emprego em estruturas de forros, devido à distribuição alinhada do reforço. Os compósitos com 50% de volume de fibra apresentaram melhores propriedades mecânicas, contribuindo assim, para a substituição de materiais não-biodegradáveis por outros ecologicamente corretos.

**Miranda (2007)** realizou ensaio de tração (ASTM D638 – 90), compressão (ASTM D695 – 90), flexão (ASTM D790M – 86), impacto por queda de dardo (ASTM D5628 – 96) e impacto Charpy (ASTM D5942 – 96) em um compósito laminado para aplicação como divisórias de ambientes, constituído por três camadas: as duas externas em poliéster insaturada AM-100 da Aerojet e tecido de juta a 45° com o urdume e a interna, em poliuretana a base de óleo de mamona Rescon 301-40, da Proquinor com tecido de juta a 90° com o urdume, colados com a própria resina de poliuretana. Quanto ao ensaio de tração, a matriz de poliéster apresentou resistência três vezes maior do que a do compósito. A orientação do reforço colocado nas duas lâminas externas do compósito a 45° com a direção de sollicitação dos esforços, não contribuiu para o aumento da resistência, influenciando negativamente no resultado. Quanto ao módulo de elasticidade, o do compósito foi quase a metade do da matriz de poliéster e a matriz de poliéster apresentou a deformação pouco maior do que a do compósito. Quanto ao ensaio de tração no reforço, os resultados demonstraram que o tecido de juta orientado a 90° com o urdume, apresentou um entrelaçamento orientado com a direção de sollicitação dos esforços, contribuindo para o aumento da resistência, apesar de apresentar sinuosidades (os fios não estarem estirados) e apresentar pontos de concentrações de tensão nos cruzamentos dos fios. O tecido com fios orientados a 45° apresentou o menor valor de resistência, havendo um aumento na resistência com a sobreposição das três camadas (na forma como eles estavam no compósito), demonstrando que a orientação dos fios do tecido de juta na camada interna influenciou para este aumento de resistência à tração. Quanto ao módulo de elasticidade, a sobreposição de tecidos foi efetiva para o aumento do mesmo, comparativamente ao tecido a 45° e a 90° com o urdume. Quanto à deformação, o tecido de juta a 45° apresentou o maior valor, seguido do tecido de juta a 90° e o arranjo semelhante ao do compósito apresentou uma deformação muito menor do que o tecido a 45° e a 90°. Quanto à resistência à compressão, a matriz de poliéster apresentou resistência onze vezes maior do que a do compósito, comprovando que a presença da fibra interferiu negativamente quanto a esta propriedade, funcionando mais como um defeito, do que como um reforço. Quanto ao módulo de elasticidade, a matriz de poliéster apresentou um valor pouca coisa maior do que a do compósito e tanto a matriz de poliéster quanto o compósito apresentaram grandes deformações (praticamente 60%). Quanto ao ensaio de flexão, a autora observou que o lado de aplicação da força ficou submetido ao esforço de compressão e o lado oposto, submetido ao esforço de tração e que a resistência e o módulo de elasticidade foram controlados pela resistência do material localizado na superfície do compósito. Observou, também, que a trinca sempre se iniciou na região tracionada do corpo de prova e se propagou para o lado comprimido, portanto, as fibras que efetivamente atuaram no reforço do compósito, quanto a esse tipo de sollicitação, foram as fibras localizadas do lado tracionado do corpo de prova e que, para serem efetivas deveriam estar orientadas na direção da tensão aplicada. Por esse motivo, a resistência à flexão do compósito foi dominada pela resistência à flexão da matriz. A matriz de poliéster apresentou resistência dez vezes maior do que a do compósito, comprovando a ineficiência do tipo de reforço e esta diferença na resistência ocorreu por dois motivos: um, pelo fato de que as lâminas de poliéster eram mais

espessas nesta matriz do que no compósito e o outro motivo, foi porque o tipo de reforço apresentava fios à 45° com a direção de solicitação dos esforços, acrescido de que os fios orientados na direção dos esforços não estavam retos e sim, sinuosos devido à trama do tecido, atuando mais como defeitos neste compósito. E que o próprio entrelaçamento constituiu pontos de concentração de tensão no reforço, o que contribuiu para a baixa resistência à flexão do compósito. E observou que ocorreu, primeiramente, o descolamento das lâminas, para depois haver danos nas mesmas, principalmente, nas lâminas da região tracionada dos corpos de prova. Quanto ao módulo de elasticidade em flexão, o da matriz de poliéster foi também dez vezes maior do que o do compósito, demonstrando novamente, através dessa propriedade, a ineficiência do tipo de reforço utilizado e quanto à deflexão, os valores foram bastante semelhantes, sob influência do poliéster, apresentando, conseqüentemente, deformações quase iguais. Quanto aos resultados do ensaio de impacto Charpy, a autora comprovou que a matriz de poliéster é um material frágil, com capacidade de pouca absorção de energia e, em conseqüência disso, apresentando menor resistência ao impacto, independente da direção do impacto, se normal ou paralelo ao plano do corpo de prova. No ensaio do compósito, os resultados do ensaio de impacto foram bem melhores devido aos mecanismos de absorção de energia que ocorreram, tais como a delaminação e o arrancamento das fibras, principalmente no ensaio paralelo ao plano do laminado e que, nas observações macroscópicas sobre os corpos de prova, a autora observou que a presença da fibra amenizou os danos sobre as lâminas externas constituídas de poliéster, concluindo que a existência do reforço foi imprescindível para garantir a melhor integridade do material, diminuindo bastante a área de dano sobre o mesmo e que, se a lâmina interna de poliuretano no compósito fosse mais espessa, poderia haver maior resistência ao impacto dos compósitos. A pesquisadora concluiu que os comportamentos mecânicos do compósito quanto à tração, compressão e flexão não apresentaram resistências elevadas, entretanto, quanto ao impacto, o resultado foi excelente, comparativamente a outras pesquisas, e afirma não ser possível elaborar um compósito que apresente excelentes comportamentos mecânicos quanto à tração, compressão, flexão e impacto, pois característica como fraca adesão fibra/matriz e a utilização de reforço em forma de tecido não são boas condições, por exemplo, para elevadas resistências à tração e à flexão, porém, são excelentes para elevadas resistências ao impacto.

**Gowda et al. (1999)** em sua pesquisa estudaram compósitos de tecido de juta não-tratada e poliéster e seus comportamentos mecânicos quanto à tração (ASTM 3039), compressão (ASTM 3410), flexão (ASTM 790) e impacto (ASTM 256). O peso por unidade de comprimento das fibras individualmente varia de 0,7 – 5,5 tex, com média entre 1,9 e 2,2 tex e a composição química aproximada dessa fibra (porcentagem em peso) é: 71,5 celulose, 13,4 hemicelulose, 0,2 pectina, 13,1 lignina, 1,2 compostos solúveis em água e 0,6 de graxa e ceras. Nesta pesquisa um tecido unidirecional de 20 x 12 (com fios de 245 – 302 tex) foi estudado, onde 20 é o número de fios largos na direção da urdidura e 12 fios menores na direção da trama por polegada. Os compósitos laminados foram fabricados pelo processo *hand lay-up*, com a proporção 1:0,02:0,026, respectivamente, de resina de poliéster, acelerador e catalizador, com cada camada pré-

impregnada sobrepostas, mantendo o alinhamento do tecido. A moldagem dos compósitos foi feita a baixa pressão por 30 minutos e depois eles foram desformados. A fração volumétrica foi de  $45 \pm 1\%$ . A densidade do laminado de juta ( $V_f = 45\%$ ) foi de  $1,18 \text{ g/cm}^3$  e a do poliéster de  $1,22 \text{ g/cm}^3$ . Quanto ao ensaio de tração no fio e no tecido de juta, o fio apresentou resistência 1,5 vezes maior do que o tecido e quanto ao módulo de elasticidade, o fio apresentou um valor quase quatro vezes maior do que o tecido. Quanto ao ensaio de tração, os compósitos com laminado de fios de juta apresentaram resistência e módulo de elasticidade cinco vezes maior do que os valores da matriz de poliéster. Quanto ao ensaio de compressão, a resistência foi praticamente igual e o módulo do laminado foi o dobro do módulo da matriz de poliéster. Quanto à resistência à flexão e ao módulo em flexão, o laminado apresentou valores duas vezes maiores do que os valores da matriz de poliéster e quanto à resistência ao impacto, o laminado de juta com 13 camadas apresentou valor quinze vezes maior do que o da matriz de poliéster. Os pesquisadores concluíram que as propriedades mecânicas desses compósitos de juta/poliéster não apresentam resistências nem módulos tão altos como os dos compósitos convencionais, porém, apresentam resistências melhores do que dos compósitos de madeira e alguns plásticos. Entretanto, esses compósitos podem ser bons substitutos para madeiras em aplicações interiores como prateleiras, divisórias, lavatórios, tampos de mesa e apropriados para aplicações externas também, como coberturas, tubos de drenagem, componentes automotivos, acessórios elétricos e barcos de pesca de estruturas leves, contanto que, ensaios complementares higrotérmicos (umidade e temperatura) e de intempéries sejam realizados nesses compósitos.

**Wen-Chao e Chung-Fai (1998)** realizaram pesquisa de perda de transmissão sonora em duas estruturas sanduíche com núcleo de folha de fibra de aramida em estrutura colméia Nomex, de 25mm de espessura, com dois tipos de lâminas de 2,5mm de espessura cada: uma em concreto reforçado com fibra de vidro e outra, de sílica-cálcio reforçado com fibra de vidro (QUADRO 2.3). Os autores afirmam ser muito difícil aumentar a perda de transmissão de ruído em painéis leves à baixa e média frequências devido ao seu baixo peso e pouco amortecimento e que alguns trabalhos foram feitos visando melhorar o comportamento acústico dessas estruturas aumentando a espessura e a rigidez desses painéis. Afirmam que o tratamento de absorção usando fibra de vidro é de pouca eficiência para baixas frequências. Eles justificaram que painéis em estrutura sanduíche com papel NOMEX são utilizados devido ao seu baixo peso, menor do que o alumínio, à alta resistência na proporção de sua massa e para melhorar o comportamento acústico na frequência de ressonância e abaixo dela. Um terceiro compósito foi feito para comparação com o segundo tipo com lâminas de sílica-cálcio, com duas camadas de 12,5 mm de folha NOMEX separadas por uma camada de amortecimento entre elas de resina epóxi de alta resistência (também no QUADRO 2.3). Esta solução reduziu os níveis de ruído na cabine da aeronave em 14dB com apenas 0,8% do peso bruto da aeronave. A possibilidade do emprego de um painel sanduíche básico como isolante acústico é muito limitado pela sua massa, devido às condições de ressonância em algumas frequências, problema esse que pode ser evitado por procedimentos de projeto adequado. A perda de transmissão acústica de um painel

depende de sua rigidez à flexão, densidade da superfície, fator de perda por amortecimento e da orientação da onda sonora incidente.

Quadro 2.3 - Tipos de estrutura sanduíche da pesquisa de Wen-Chao e Chung-Fai

Tipo de estrutura sanduíche	lâmina ( 2,5 mm)	Núcleo
1	Concreto reforçado com fibra de vidro (CRFV)	Uma camada de fibra de aramida em estrutura colmeia de 25 mm
2	Sílica-cálcio reforçado com fibra de vidro (SCRFV)	Uma camada de fibra de aramida em estrutura colmeia de 25 mm
3	Sílica-cálcio reforçado com fibra de vidro (SCRFV)	Duas camadas de fibra de aramida em estrutura colmeia de 12,5 mm cada uma, separadas por uma camada de amortecimento de resina epóxi

Fonte: Wen-Chao; Chung-Fai, 1998, p. 170.

Os resultados mostraram que os painéis apresentaram perda de transmissão maior em baixas frequências e que somente o painel com camada dupla apresentou valores maiores nas regiões de baixa e média frequência (125 – 500 Hz). O painel de face de concreto e fibra de vidro apresentou maior perda de transmissão acústica do que o painel de lâmina em sílica-cálcio na região de baixa frequência e o painel de camada dupla apresentou uma perda de transmissão muito maior do que o painel de camada simples na região de baixa frequência. Os autores concluíram que tratamentos de rigidez e amortecimento podem ser feitos para reduzir a transmissão de ruído através de painéis leves, tais como paredes de fuselagem de aeronaves, divisórias de ambientes nas ressonâncias e abaixo, que o acréscimo da camada interna de epóxi de alta resistência foi mais efetivo para a perda de transmissão em níveis de baixa frequência e, finalizam, afirmando que esses resultados podem ser utilizados em diversas aplicações.

**Duarte e Reis (2014)** realizaram uma investigação experimental sobre a condutividade térmica em compósitos de poliéster com incremento de 0 a 25% em peso de lama vermelha, com equipamento compatível com as normas ASTM C518-04 e E1530-06. A resina de poliéster insaturada foi a PolyLite 10316-10 da Reichhold, pré-acelerada e com peróxido de metil-etil-cetona como iniciador. Suas características estão na TAB. 2.24. A lama vermelha foi obtida da Alunorte S/A. Na análise da composição química da lama, foram identificados os seguintes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , com traços de óxidos de V, Ga, P, Mn, Zn, Th, Cr e Nb. A lama vermelha é um material de granulometria muito fina com formato esférico de diâmetro médio  $6\mu\text{m}$ , densidade de  $2,71\text{g/cm}^3$  e condutividade térmica igual a  $12\text{W/mK}$ . A FIG. 2.27 apresenta a análise de DRX desta lama. Os autores verificaram que a temperatura de transição vítrea foi na mesma amplitude para todos os compósitos, comprovando que a quantidade de lama vermelha não influenciou no comportamento térmico dos compósitos; sendo observado que para o aumento da quantidade de lama vermelha é necessário também um aumento no calor para promover uma mudança física estrutural. E os pesquisadores finalizam afirmando que compósitos com lama vermelha podem ter aplicações no mercado da engenharia devido ao seu baixo consumo de energia, custo no

processo de elaboração dos compósitos e para eliminar o armazenamento da lama vermelha.

Tabela 2.24 - Propriedades da resina de poliéster Polyte 10316-10

Propriedade	Resina de poliéster
Viscosidade a 250°C ( $\mu$ )	250 – 350 mPa.s
Densidade ( $\rho$ )	1,09 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura de distorção térmica (HDT)	85°C
Módulo de elasticidade (E)	3,3 GPa
Resistência à flexão	45 MPa
Resistência à tração	40 MPa
Alongamento máximo	1 %
Condutividade térmica	0,1574 W/mK

Fonte: Duarte; Reis, 2014, p. 1592.

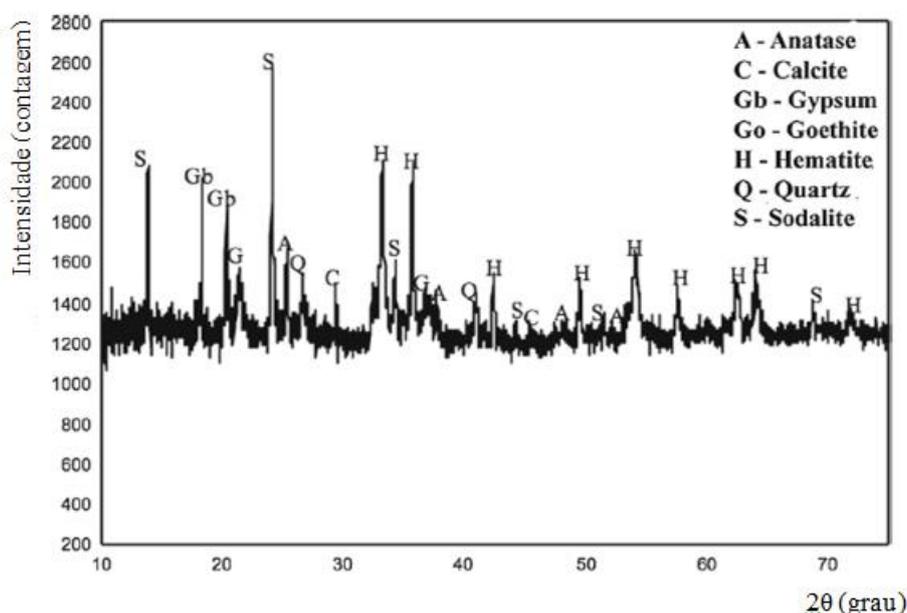


Figura 2.27 – Difração de raios X da lama vermelha.

Fonte: Duarte; Reis, 2014, p. 1592.

**Ribeiro *et al.* (2013)** pesquisou a flamabilidade e a retardância de chama de um compósito de poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF). As folhas de abacaxizeiro foram colhidas no município de Ielmo Marinho/RN, a resina é comercial, de densidade 1,2 g/cm<sup>3</sup> e como agente retardante de chama, alumina trihidratada Al(OH)<sub>3</sub> doada pela empresa Alcoa Alumínio S.A. As fibras foram tratadas em solução aquosa com 2% de hidróxido de sódio (NaOH) para a remoção das impurezas. As mantas de PALF foram impregnadas, por meio de borrfiação, com a solução aquosa de retardante de chama nas proporções de 20%, 40% e 60% do peso da manta seca e a resina de poliéster foi misturada com o retardante de chama, com o agitador elétrico, nas mesmas proporções mencionadas anteriormente do peso da resina a ser utilizada. Após a mistura homogênea da resina com o retardante de chama, acrescentou-se o catalisador peróxido de MEK. O compósito foi elaborado na proporção 10/90 (fibra/resina), nas dimensões

300x300x30mm. A norma utilizada foi a UL94 e os ensaios foram o vertical e o horizontal.

Os corpos de prova, no ensaio vertical, sofreram ignição seguida de uma queima autossustentada na primeira aplicação da chama ao corpo de prova, impedindo uma classificação do material segundo esta norma.

Os resultados do ensaio horizontal estão na FIG. 2.28, que apresenta o tempo médio de queima e a taxa média de queima dos compósitos.

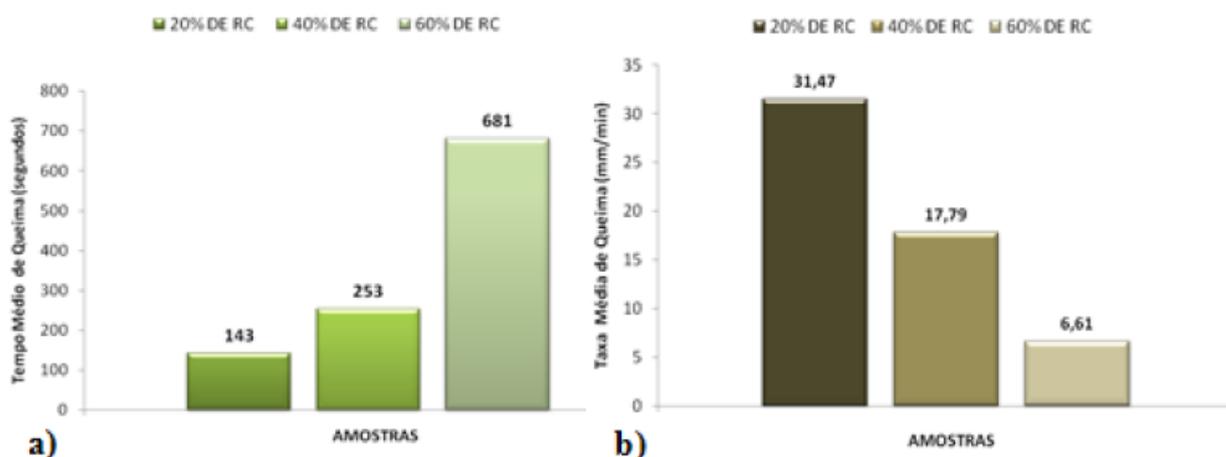


Figura 2.28 – Tempo médio de queima e taxa média de queima dos compósitos.

Fonte: Ribeiro *et al.*, 2013, p. 125.

Os autores observaram que o tempo médio de queima das amostras aumentou à medida que se adicionou mais retardante de chama ao compósito, demonstrando que o retardante foi efetivo, pois quanto maior for o tempo de queima do material, menor será a velocidade de queima, o que dificulta a propagação da chama e facilita a extinção da mesma e considerando que no Brasil a resolução CONTRAN nº 675, exige que os revestimentos internos da indústria automobilística tenham uma velocidade de propagação de chama de 250 mm/min e que nos países com pesquisa avançadas na área, esse valor é de 80 mm/min, logo, em comparação com esses dados, o compósito apresentou valores bem menores do que o exigido, confirmando a eficácia da alumina trihidratada como agente antichama.

**Almeida *et al.* (2011)** realizaram estudo de tração paralela à lâmina, compressão perpendicular à lâmina e flexão por três pontos numa estrutura sanduíche constituída de uma face laminada em resina de poliéster com três camadas de fibra de vidro: a mais externa com manta tipo “véu de noiva”, a intermediária com mantas de fibras aleatórias e a mais interna com fibra tecida e o núcleo constituído de espuma rígida de poliuretano, pelo processo *hand lay-up*. O ensaio de tração foi feito de acordo com a norma ISO 527-1,4 (1997), o de compressão pela ASTM C365 (2003) e o ensaio de flexão por três pontos através da norma ASTM C393 (2000). Para o ensaio de tração paralela à lâmina, os pesquisadores concluíram que o material apresentou um comportamento elástico linear até a ruptura, que ocorreu de forma frágil. Quanto ao ensaio de compressão

perpendicular à lâmina, os pesquisadores observaram que no gráfico de força x deslocamento houve um comportamento inicial não-linear devido aos ajustes do sistema de aplicação da carga (ajuste das chapas metálicas aos corpos de prova) e que ocorreram aumento dos deslocamentos para um valor de força aproximadamente constante para depois, a carga voltou a aumentar até a ruptura. Ruptura essa que ocorreu devido à instabilidade das lâminas por curvatura, seguida de delaminação. Outras vezes, a ruptura se deu por corte na espuma e/ou esmagamento das lâminas. Para o ensaio de flexão estática por 3 pontos foi utilizado uma célula de carga de 300 kN para um vão de 2,30 m, com os corpos de prova em escala real de 0,50 m de largura, 2,50 m de comprimento e 0,10 m de espessura e até ser atingido um deslocamento no meio do vão de 100 mm. O compósito apresentou um comportamento aproximadamente linear até a ruptura. Os pesquisadores observaram que a ruptura do painel se deu por corte na espuma de PU, a cerca de 20 cm de uma das extremidades, com a formação de uma superfície de ruptura com uma inclinação de aproximadamente 45°, com descolamento entre a lâmina e o núcleo ocorrendo desde a zona de ruptura até a extremidade da viga e, que, também, o comportamento à ruptura desse painel é condicionado pela resistência do material do núcleo.

**Vadakke e Carlsson (2004)** realizaram uma pesquisa do tipo de falha à flambagem, utilizando a norma ASTM C364, em três estruturas sanduíches assim constituídas: a primeira, consistindo de lâminas de viniléster e fibra de vidro E (espessura 3,6 mm) e núcleo de espuma H100 PVC (espessura 50 mm), a segunda, consistindo de lâminas de viniléster e fibra de vidro E (espessura 3,6 mm) e núcleo de espuma H200 PVC (espessura 50 mm) e a terceira, consistindo de lâminas de viniléster e fibra de vidro S (espessura 2 mm) e núcleo de espuma R75 PVC (12,5 mm). Os pesquisadores observaram que os corpos de prova apresentaram modos de falha que inicia com a compressão das lâminas até a deformação global dependendo da rigidez e da espessura do núcleo e do vão. Para pequenos vãos, o modo de falha acontece por enrugamento das lâminas e para vãos maiores, ocorre a deformação global dos corpos de prova. Eles verificaram que o enrugamento das lâminas é governado pela densidade e espessura do núcleo, isto é, uma estrutura com um núcleo de pouca espessura e baixa densidade está propenso a apresentar esse modo de falha. Observaram também que os corpos de prova de núcleo H200 apresentaram resistência à compressão 25% maior do que os corpos de prova com núcleo H100. Mesmo com a mesma espessura, essa diferença foi atribuída ao fato de o núcleo H200 ser mais rígido do que o núcleo H100.

**Di Bella et al. (2012)** pesquisaram uma estrutura sanduíche com duas matrizes (poliéster isoftálica e vinil-éster) e fibra de vidro para aplicações marinhas, constituída de laminados não simétricos como lâminas e um núcleo em espuma coremat de 4 mm, numa sequência de: tela 300 + tela 450 + combinado 800 (tecido) - 300 (tela) + tela 450 + coremat + combinado 800 (tecido) -300 (tela)+ combinado 800 (tecido) - 300 (tela) + tela 450. A resina poliéster foi utilizada no laminado da lâmina mais espessa e a vinil-éster no laminado da lâmina mais fina. Os ensaios realizados foram: flexão por 3 pontos (considerando, primeiramente, a lâmina mais espessa em cima e depois, considerando a

lâmina mais espessa em baixo) para três vãos diferentes (100, 150 e 300 mm) (ASTM D790-10), compressão paralela à lâmina (ASTM C364/C364M-07) e compressão perpendicular à lâmina (ASTM C365/C365M-11). A resistência foi maior para o vão menor e o módulo maior para o vão maior. O comportamento do compósito foi semelhante para os diferentes vãos: depois da estabilidade inicial do carregamento, iniciou-se uma fase elástica-linear até a carga máxima. Neste ponto, apareceram microfissuras na parte inferior do corpo de prova, na interface lâmina/núcleo, causando o colapso. Depois, ocorreram propagações de trincas a 45° no núcleo. Finalizando com outros colapsos estruturais devido ao cisalhamento do núcleo, fazendo com que a carga diminua lentamente de maneira quase constante, devido à resistência residual das fibras.

Para o ensaio de flexão com a lâmina espessa em baixo, os pesquisadores chegaram a conclusão que as curvas de tendências e os modos de falha foram os mesmos observados para os testes com a lâmina mais espessa em cima, para todos os vãos investigados. No ensaio de compressão paralela à lâmina, os pesquisadores observaram um comportamento elástico-linear até a ruptura e atribuíram a boa resistência da estrutura à qualidade de molhabilidade das fibras pela resina. Nesse ensaio, a trinca iniciou na interface lâmina/núcleo devido a defeito de fabricação pelo processo manual, apresentando vazios e as falhas ocorreram principalmente por enrugamento. No ensaio de compressão perpendicular à lâmina, os pesquisadores observaram que, após uma estabilização do ensaio, houve uma primeira tendência elástico-linear até um nível de deformação igual a 5%. Posterior a tensão de 20 MPa, o declive da curva mudou devido à densificação da espuma e, finalmente, após o ar ter sido totalmente removido e as lâminas se interagirem (a quase 40 MPa), o declive mudou novamente.

**Srivastava (2012)** pesquisou, quanto ao ensaio de impacto Charpy entalhado e não-entalhado, uma estrutura sanduíche com lâminas trançadas de fibra de vidro-E e resina epóxi. A fração em volume do laminado foi de 46%, com espessura de 3 mm. Essas lâminas foram coladas por uma espuma de poliuretano, com espessura de 12 mm, utilizando a resina epóxi como adesivo. O pesquisador chegou aos valores de 5 Joules para o ensaio de impacto com o corpo de prova entalhado e de 7 Joules para o ensaio com corpo de prova não-entalhado. Nesse ensaio, ambas as faces dos corpos de prova sofreram fraturas. O pesquisador afirma que o compósito apresentou boa resistência mecânica que preveniu a formação e migração de fraturas da face de impacto pra outra face devido à absorção máxima de energia pela espuma do núcleo.

**Gehlen (2014)** pesquisou compósitos utilizando fibras de açai e curauá em matriz de resina poliéster insaturada ortoftálica e determinou, dessa resina, a temperatura de degradação, a resistência à tração, a deformação na ruptura, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade, a absorção de água e a densidade. Os resultados estão na TAB. 2.25. E ele afirma que, a utilização dessas fibras vegetais como reforço é adequada para a confecção de compósitos mais leves dos que os que utilizam fibra de vidro. Entretanto, devido à não-homogeneidade fibra/matriz, as fibras se comportaram mais como carga do que como reforço nos compósitos, o que pode ser

confirmado pelos resultados de resistência à tração e de resistência à flexão inferiores ou equivalentes estatisticamente à resina.

Tabela 2.25 – Propriedades da resina de poliéster insaturado da pesquisa de Gehlen

Propriedade	Valores
Perda de massa	90,7 % à 410°C
Resistência à tração	24 ± 5 MPa
Deformação na ruptura	11 ± 1,5 %
Resistência à flexão	40 ± 6 MPa
Módulo de elasticidade	1.298 ± 103 MPa
Absorção de água	0,23 % ± 0,02
Densidade	1,14 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup> .

Fonte: Gehlen (2014), pp. 71, 74, 78, 86 e 89.

**Silva (2014)** em sua pesquisa de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta determinou a estabilidade térmica das fibras de juta através da perda de massa por TGA e verificou que 25 % da perda de massa da fibra ocorreu à 80°C, valor esse atribuído à liberação de água. Em seguida, ocorreu uma grande redução de massa acerca de 301,87°C. A maior perda ocorreu de 220 a 400°C (cerca de 69%). A autora, nessa pesquisa com resina de poliéster ortoftálica e fibra de juta (0, 10, 20 e 30 % em volume), também, realizou ensaios de tração, flexão e impacto Charpy e, concluiu que, para o ensaio de tração, o aumento de fibras contínuas e alinhadas aumentou significativamente a resistência à tração e rigidez dos compósitos de matriz polimérica. Para os ensaios de flexão, os compósitos apresentam uma diminuição na resistência e no módulo com o aumento da fração volumétrica de fibras e no ensaio de impacto, os compósitos apresentam aumento na tenacidade com o aumento da fração de fibra.

**Zhang et al. (2014)** realizaram uma pesquisa sobre o efeito do caulim na estabilidade térmica e na retardância de chamas em compósito de polipropileno (PP). Foi utilizado o polifosfato de amônio como retardante de chamas intumescente (RCI), na proporção de fase de 100:40 (polipropileno:polifosfato de amônio). A parte do polifosfato de amônio foi sendo substituído por caulim, segundo a TAB. 2.26.

Tabela 2.26 – Formulação dos compósitos de polipropileno (PP), polifosfato de amônio (RCI) e caulim em proporção de fase

Código	PP	RCI	caulim
0	100	0	0
1	100	40	0
2	100	38	2
3	100	36	4
4	100	34	6
5	100	32	8

Fonte: Zhang et al. (2014), p. 913.

A retardância de chamas e a supressão de fumaça foram avaliadas pelo índice limite de oxigênio (ILO) e pela UL-94, no ensaio de queima vertical. Eles afirmam que,

vários tipos de cargas inorgânicas tem sido utilizadas na última década, em matrizes poliméricas como retardantes de chama e que a adição de argila pode reduzir bastante a produção de calor, porém, existe uma limitação nessa adição devido à pobre compatibilidade entre argilas minerais e polímeros. A curva termogravimétrica do caulim mostrou que sua decomposição térmica foi de 8% até 800°C. O índice limite de oxigênio aumentou com a introdução do caulim, porém, com o aumento da quantidade de caulim, esse valor foi reduzindo e o valor do ensaio de queima vertical foi aumentando e passou de V0 (51 – 55 seg de tempo de queima) para V1 (251 - 255 seg de tempo de queima). Os pesquisadores afirmam que a diminuição do retardante de chama intumescente (RCI) foi a principal razão da redução do índice limite de oxigênio e que o caulim teve duas funções opostas nos compósitos: serviu de barreira, que melhorou a estabilidade térmica dos mesmos e teve um efeito catalítico (aumento na velocidade de uma reação) na degradação dos compósitos, que diminuiu a estabilidade térmica. Esse resultado mostrou que a substituição do RCI por caulim, numa determinada quantidade, pode aumentar a retardância de chama da matriz de PP. Através das curvas da razão de liberação de calor (RLC) da matriz de PP, do PP/40RCI e do PP/38RCI/2caulim, os pesquisadores mostram que a presença do RCI reduziu bastante a liberação de calor e que a introdução do caulim diminuiu ainda mais a velocidade de propagação de chama, o mesmo acontecendo com a produção de fumaça. Os pesquisadores também mostraram, através das curvas de degradação térmica dos compósitos, que, a temperatura de degradação inicial foi aumentada com a presença do RCI e que, a adição de caulim pouco modificou a curva do PP/40 RCI. Entretanto, a parte residual foi sendo aumentada, com o aumento da quantidade de caulim no compósito, devido à propriedade de isolamento térmico e boa estabilidade térmica do caulim. Além disso, o próprio caulim catalisa a degradação das matrizes poliméricas. Os pesquisadores concluíram que uma quantidade moderada de caulim pode melhorar significativamente o comportamento do compósito de PP/RCI, pois a incorporação do caulim no sistema, leva à formação de camadas carbonizadas mais compactas, através de uma nova ligação química  $Si - O - P$  que pode aumentar a retardância de chama e reduzir a liberação de fumaça.

**Escusa et al. (2014)**, em sua pesquisa para caracterizar mecanicamente um painel sanduíche com lâminas de GFRP e núcleo de poliuretano, realizou o ensaio de compressão em uma espuma de poliuretano com corpos de prova de 70 x 70 x 50 mm<sup>3</sup>, em conformidade com a norma ASTM 365-03. No gráfico tensão x deformação, os pesquisadores verificaram que o PU apresenta um comportamento linear até uma extensão próxima dos 3% com o módulo de elasticidade igual a 9,26 MPa e a tensão de ruptura de 0,30 MPa.

**Caldas (2014)** em sua pesquisa de uma estrutura sanduíche com as lâminas em poliéster e tecido duplo de feixes de fibras de sisal (de 3 mm de espessura e gramatura total de 324 g/cm<sup>2</sup>) e núcleo de espuma de PET, totalizando uma estrutura de 15 mm de espessura e 23%  $V_f$ , realizou ensaios de compressão transversal (ASTM C365 – 11), compressão longitudinal (ASTM C364 – 07) e flexão por 3 pontos (ASTM C393 – 11) e chegou aos resultados mostrados na TAB. 2.27. No ensaio de compressão transversal, todos os corpos de prova romperam no núcleo e, no gráfico força x deslocamento, após

o início com deslocamento quase sem aplicação de força, ocorreu uma linearidade até atingir o carregamento máximo, seguido de uma deformação plástica e a diminuição da carga. Nesse ensaio o pesquisador não observou qualquer tipo de trinca sobre as superfícies das lâminas. No ensaio de compressão longitudinal, o gráfico força x deslocamento apresentou um comportamento similar ao do ensaio de compressão transversal e foi observada uma deformação por flambagem das lâminas do sanduíche, porém, sem a ruptura do núcleo. E, no ensaio de flexão, a curva força x deslocamento apresentou duas etapas: a primeira, até uma deformação de 2,5 mm correspondendo a um comportamento elástico, e a segunda etapa apresentando um comportamento plástico, com um grande deslocamento. Os corpos de prova apresentaram um afundamento da face superior e houve aparecimento de trincas. O pesquisador observou que a superfície do material deforma bastante antes da flexão, com uma absorção de energia grande por parte da face superior que não era transmitida para a face inferior, onde não foi detectado qualquer defeito. O pesquisador concluiu que os ensaios mecânicos mostraram que o tecido de sisal é uma alternativa viável na substituição da fibra de vidro no reforço de estruturas sanduíches para aplicações específicas, com baixo impacto ambiental, baixo custo e segurança do trabalhador no manuseio, dentre outras vantagens.

Tabela 2.27 – Resultados da pesquisa de Caldas

Ensaio	Propriedades
Compressão transversal	Resistência: 3,40 MPa
	Rigidez: 424,30 N/mm
Compressão longitudinal	Resistência: 47,30 MPa
Flexão por 3 pontos	Força máxima: 641 N
	Módulo de elasticidade: 1,80 GPa
	Rigidez: 177,60 N/mm

Fonte: Caldas (2014).

**Serra (2013)** em sua pesquisa sobre a resposta ao impacto de painéis sanduíche (EN ISO 6603 – 2), fez um estudo comparativo entre um laminado de 8 camadas de fibra de vidro e resina epóxi SR 1500 com endurecedor SD 2503 (fornecidos por Sicomin) e um painel sanduíche com as lâminas constituídas de 4 camadas da mesma resina e tecido de vidro 3366-685 e núcleo de placa de cortiça com 2 mm de espessura. E concluiu que a resistência ao impacto foi maior para os painéis sanduíche do que para os laminados e que esse efeito foi mais significativo à medida que a energia de impacto diminuiu.

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 – A metodologia da pesquisa

A metodologia dessa pesquisa segue o fluxograma da FIG. 3.1.

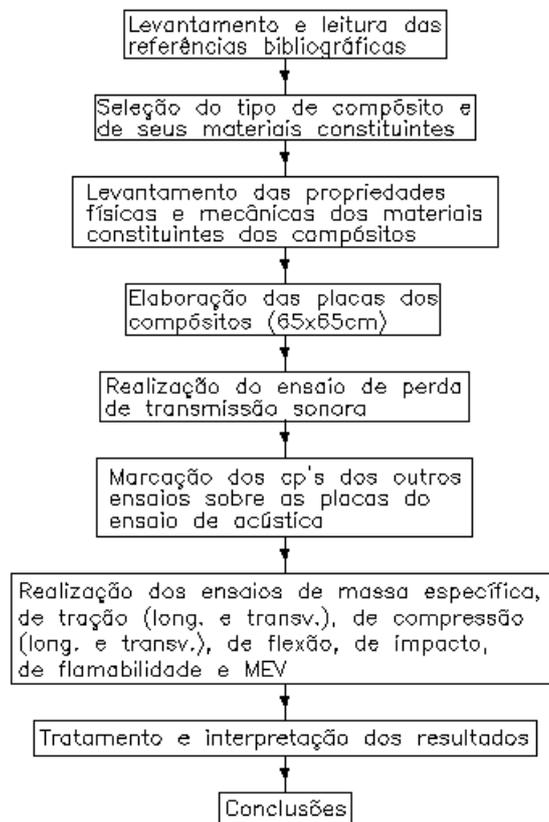


Figura 3.1 – Fluxograma da pesquisa.  
Fonte: Própria.

A metodologia proposta neste trabalho se constituiu no desenvolvimento de um painel do tipo sanduíche para aplicação como divisória interna de ambientes. Essa estrutura sanduíche foi elaborada com as lâminas em resina termofixa de poliéster como matriz, com tela de juta como reforço fibroso e o caulim como carga. O núcleo foi elaborado tendo a resina termofixa de poliuretana como matriz e a lama vermelha como carga. O levantamento bibliográfico foi realizado em artigos, livros, dissertações, teses e normas afins com o tema da pesquisa.

Os ensaios físicos, mecânicos e térmico nos compósitos foram realizados segundo padronizações das normas ISO e ASTM. Os ensaios físicos foram de massa específica da lâmina, de massa específica aparente e porosidade aparente da estrutura sanduíche (ASTM C271/271M – 11). Os ensaios mecânicos foram de tração na lâmina da estrutura sanduíche (ASTM D5083-10) de tração transversal na estrutura sanduíche (ASTM C297/C297M - 04), de compressão longitudinal na estrutura sanduíche (ASTM C364/C364M–07), de compressão transversal na estrutura sanduíche (ASTM C365/C365M – 11a), de flexão por três pontos na estrutura sanduíche (ASTM

D7250/D7250M – 06), de impacto Charpy na estrutura sanduíche (ASTM D6110 – 10), de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche (ISO 140-3:1995 - E) e o ensaio térmico de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche (UL 94 - 96). Foram também realizadas análises fratógráficas dos corpos de prova ensaiados (MEV). Após a realização dos ensaios, foram feitos tratamentos, análises e interpretações dos resultados, com discussões embasadas nas referências bibliográficas, comparando os resultados obtidos com resultados de outros pesquisadores, possibilitando obter conclusões sobre os compósitos da pesquisa considerando a sua aplicabilidade.

### 3.2 - A constituição da estrutura sanduíche da pesquisa

Conforme se observa na FIG 3.2, a estrutura sanduíche foi constituída de lâminas elaboradas com uma matriz em resina termofixa de poliéster insaturado, com reforço em camada dupla de tela de juta, equivalendo a 17,5% em massa da lâmina, cortada e orientadas com o urdume a 0°, para evitar desperdícios e carga de caulim (20% em massa da resina de poliéster). O núcleo foi constituído de uma matriz em resina também termofixa de poliuretano e de uma carga de lama vermelha, variando de 0 até 50% em massa da resina de poliuretano, com incremento de 10 em 10%, totalizando 6 tratamentos (0, 10, 20, 30, 40 e 50% em massa do PU).

### 3.3 - Os materiais utilizados para a elaboração da estrutura sanduíche

Os materiais utilizados para a elaboração da estrutura sanduíche foram:

- **O reforço:** tecido ou tela de fibra de juta natural C9, da Companhia Têxtil de Castanhal;
- **As resinas:** de poliuretano comercial com catalizador da Amino Química Ltda e poliéster cristal com catalizador a 2%, da Avipol Comercial Ltda;
- **As cargas:** resíduo do processamento do caulim, proveniente do processo de beneficiamento do caulim produzido pela Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC, localizada no município de Barcarena, no estado do Pará e resíduo do processamento da alumina (lama vermelha cedida pela ALUNORTE, localizada no município de Barcarena, no estado do Pará);
- **Materiais de apoio:** 4 placas de vidro temperado, de 70x70cm, de espessura 6mm cada, como molde; balança de precisão  $10^{-4}$ g; cera desmoldante de silicone da Aerojet; peneira; 2 níveis de bolha, para garantir a distribuição uniforme da resina; 8 tacos de madeira, como espaçadores; 8 grampos, para garantir a uniformidade na espessura; estopa, para aplicação de cera e para limpeza dos vidros; 1 espátula, para espalhar as resinas e desmoldar as lâminas; misturadores plásticos para as resinas; bacias plásticas pequenas, para mistura das resinas; 1 tesoura; acetona para limpeza das placas dos vidros; folhas de EVA, para servir de borda, para evitar que a resina derrame; duas fitas adesivas: uma estreita, pra borda e outra larga, dupla face, para afixar as lâminas da estrutura; 1 rolo anti-bolhas; lona plástica, para proteção do piso e 1 estilete, para cortar as sobras do núcleo.

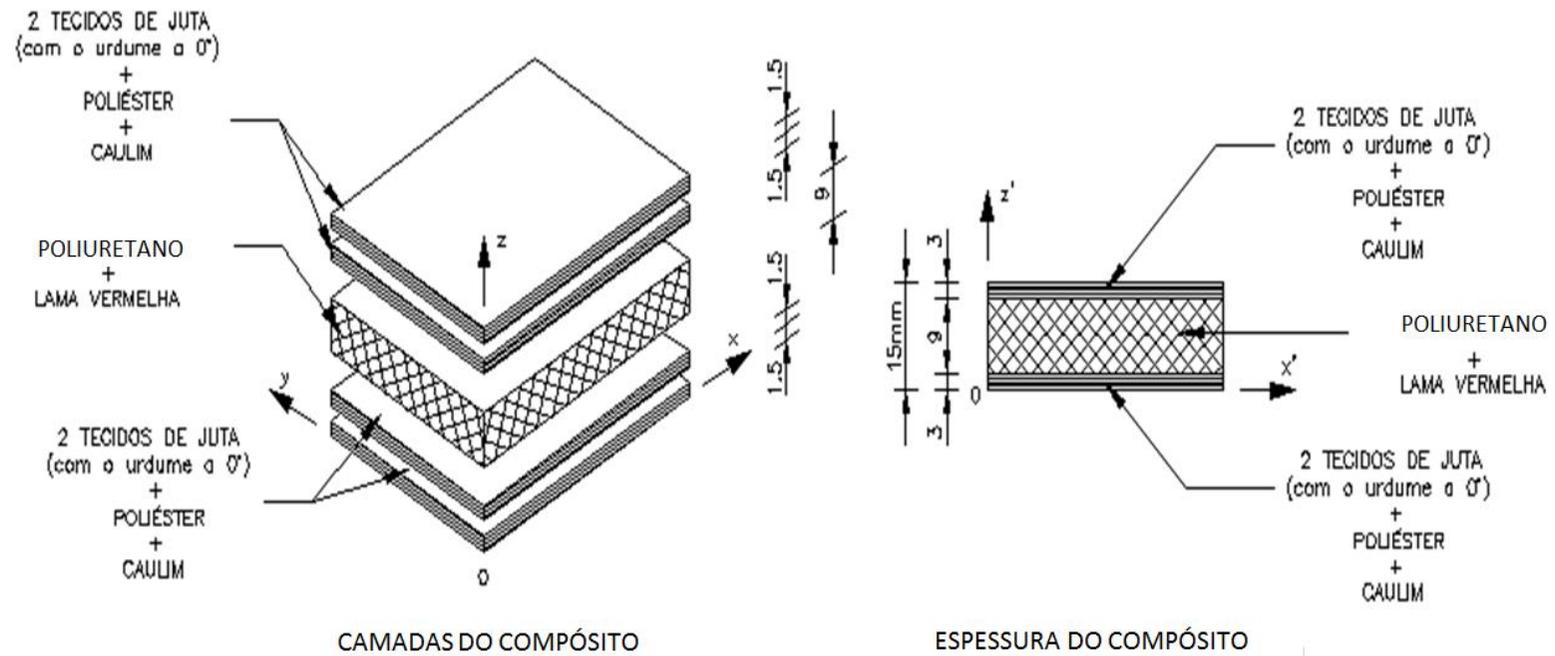


Figura 3.2 – Constituição da estrutura sanduíche da pesquisa.  
Fonte: Própria.

- **Equipamentos de proteção:** luvas descartáveis, máscara antigases, óculos de proteção e jaleco.

A FIG. 3.3 ilustra alguns dos materiais utilizados na elaboração dos compósitos.

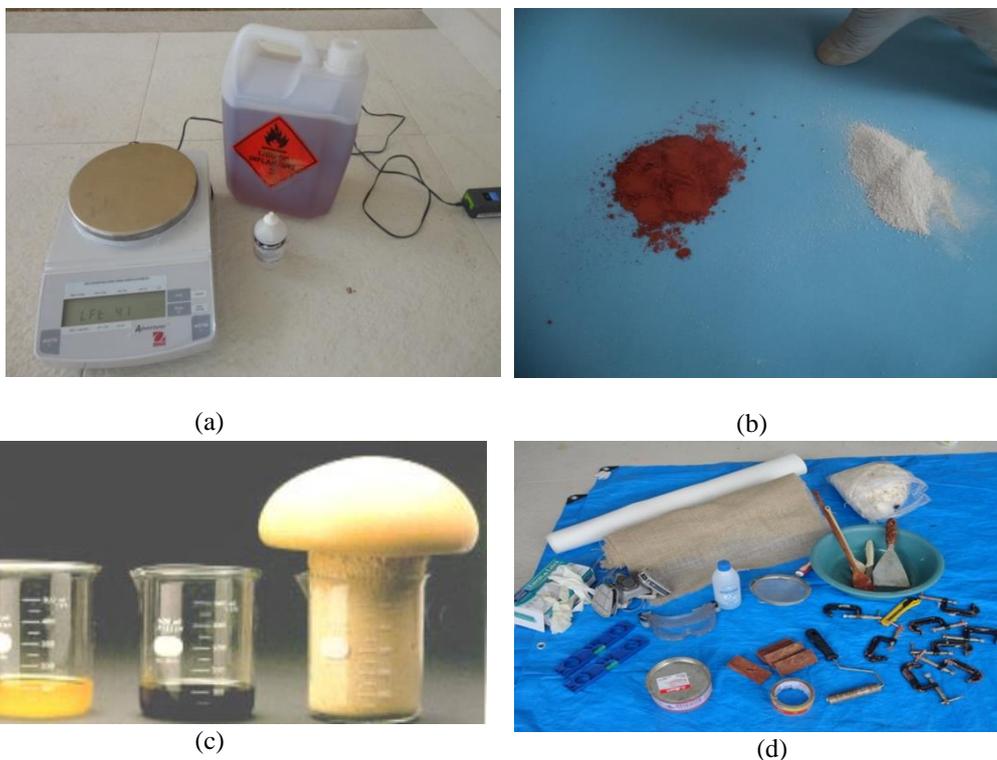


Figura 3.3 – Alguns materiais utilizados: (a) resina de poliéster, catalizador e balança de precisão, (b) as cargas: lama vermelha e caulim, (c) resina de poliuretano: componente A (o amarelo), componente B (o escuro) e o PU expandido e (d) tecido de juta, EVA, rolo com ranhuras, misturador plástico, espátula, máscara antigases, óculos de proteção, luvas, níveis, grampos, estilete, cera desmoldante, acetona, peneira, tacos de madeira, bacias plásticas, estopa e fita adesiva.

Fontes: Própria e a imagem (c) é do site: [www.proquinor.com.br/resinarespan.htm](http://www.proquinor.com.br/resinarespan.htm).

### 3.3.1 - O tecido ou tela de juta

As características da tela de juta utilizada na estrutura sanduíche estão no CAP. 2 (Revisão Bibliográfica), TAB. 2.7, na p. 49.

### 3.3.2- A Resina de poliuretano

A Resina de poliuretano utilizada é uma resina expansiva, bi-componente (resina + isocianato), sendo um produto comercializado pela Amino Química Ltda. As especificações da resina cedida pela empresa fabricante estão na TAB. 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações da resina de poliuretano

Características	Especificação
Densidade livre	30 -32 kg/m <sup>3</sup>
Proporção Polioliol : Prepolímero	1 : 1
Tempo de creme	20 -25 seg
Tempo de gelificação	85 - 105 seg
Tempo de pega-livre	120 - 140 seg

Fonte: www.amino.com.br.

### 3.3.3- A Resina poliéster

Essa resina, denominada poliéster cristal (devido ser transparente e incolor), é um polímero de poliéster insaturado ortoftálico, adquirido da Avipol Comercial Ltda, com catalizador Butanox (metil-etil-cetona) adicionado na proporção de 2 % em massa do poliéster. Nas TAB. 3.2 e 3.3 estão, respectivamente, as características dessa resina e de seu catalizador.

Tabela 3.2 - Características da resina poliéster cristal

Cor	Cristal
Aspecto	Líquido viscoso
Viscosidade (25°C)	1600 cPs
Pico exotérmico	150 °C
Peso específico	1,20 g/cm <sup>3</sup> ± 0,05 g/cm <sup>3</sup>
Tempo de gel (com 1% de catalizador Butanox)	10 a 15 minutos
Tempo de cura (com 1% de catalizador Butanox)	10 a 12 horas

Características gerais:

Cura rápida após adição do catalizador;

Cor clara produzindo peças cristalinas;

Estabilidade de cor mantendo-se cristalina por longo tempo;

Dureza balanceada, permitindo torneamento, lixamento e polimento com facilidade;

Após polimento, apresenta brilho permanente.

Fonte: www.avipol.com.br.

Tabela 3.3 - Características do catalizador Butanox

Tipo	Peróxido orgânico
Cor	Incolor
Peso específico (25°C)	1,14 g/cm <sup>3</sup> ± 0,05 g/cm <sup>3</sup>
Oxigênio ativo total	8,8 a 9,2 %

Fonte: www.avipol.com.br.

### 3.3.4 - O Caulim

O material utilizado no presente trabalho foi o produto denominado caulim de enchimento, proveniente do processo de beneficiamento do caulim produzido pela Imerys Rio Capim Caulim S/A – IRCC, localizada no município de Barcarena, no estado do Pará. As características desse caulim utilizado na lâmina da estrutura sanduíche estão no CAP. 2 (Revisão Bibliográfica), TAB. 2.10, na p. 52 e nas FIGs. 2.12, 2.13 e 2.14, nas páginas 53 e 54. O caulim foi inserido em 20% em massa da resina de poliéster considerando resultado da pesquisa de Sari (2015) que conseguiu inserir no máximo 17,5 % de caulim em massa das resinas utilizadas em sua pesquisa.

### 3.3.5 – A lama vermelha

A lama vermelha foi cedida pela ALUNORTE localizada no município de Barcarena, no estado do Pará. As características desse lama utilizada no núcleo da estrutura sanduíche estão no CAP. 2 (Revisão Bibliográfica), TAB. 2.13, na p. 57 e nas FIGs. 2.16 e 2.17, nas páginas 57 e 58, respectivamente.

### 3.4 - Laboratórios e equipamentos

Os laboratórios e equipamentos utilizados variaram conforme os locais aonde os ensaios foram realizados:

- O ensaio de massa específica aparente e porosidade aparente na lâmina e na estrutura sanduíche (ASTM C271/271M – 11) foram realizados no Laboratório de Engenharia Química da UFPA (LEQ);
- Os ensaios de tração na lâmina (ASTM D5083-10), de tração transversal na estrutura sanduíche (ASTM C297/C297M - 04) e de compressão longitudinal na estrutura sanduíche (ASTM C364/C364M–07) foram realizados no Laboratório de Construção Civil, da Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista – UNESP/FEB, na máquina universal EMIC, modelo DL 30.000, com célula de carga de 2.000 kgf;
- O ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche (ASTM C365/C365M – 11a) foi realizado no Laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) - Campus Abaetetuba, na máquina universal EMIC, com célula de carga de 30kN;
- O ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche (ASTM D7250/D7250M – 06 e ASTM C393/C393M – 11) foi realizado no Laboratório de Eco-compósitos, no prédio do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA (LABEM), numa máquina de ensaio universal EMIC, com célula de carga de 5kN;
- O ensaio de impacto na estrutura sanduíche (ASTM D6110 – 10) foi realizado no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), no equipamento para ensaio de impacto Charpy, JB-300 B, Time Group Inc, 150J;
- O ensaio de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche (UL 94 – 96) foi realizado na usina do Laboratório de Engenharia Química da UFPA (LEQ);
- O ensaio de perda de transmissão acústica na estrutura sanduíche (ISO 140-3:1995 – E) foi realizado no Laboratório de Acústica e Vibrações, da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM-UFPA);
- As imagens de microscopia foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) Hitachy TM 3000 tabletop SEM com EDS acoplado, da Faculdade de Engenharia Química da UFPA (LEQ);
- Os equipamentos utilizados foram: balança digital (de precisão  $10^{-4}$  g), serra elétrica, lixadeira elétrica e paquímetro digital.

### 3.5 – Etapas da confecção dos painéis sanduíche

Os painéis foram elaborados nas dimensões de 65x65cm, tamanho este necessário para os ensaios de acústica, segundo os seguintes passos:

#### 3.5.1 – Preparação das lâminas dos painéis sanduíche:

- a) Os moldes foram placas de vidro temperado (70x70cm), cujas superfícies foram limpas com estopa e acetona (a) e nelas foram aplicadas tiras de EVA nas bordas, na espessura de 20 mm (b) e (c), afixadas com fita adesiva para a resina não escorrer (d) (FIG. 3.4);

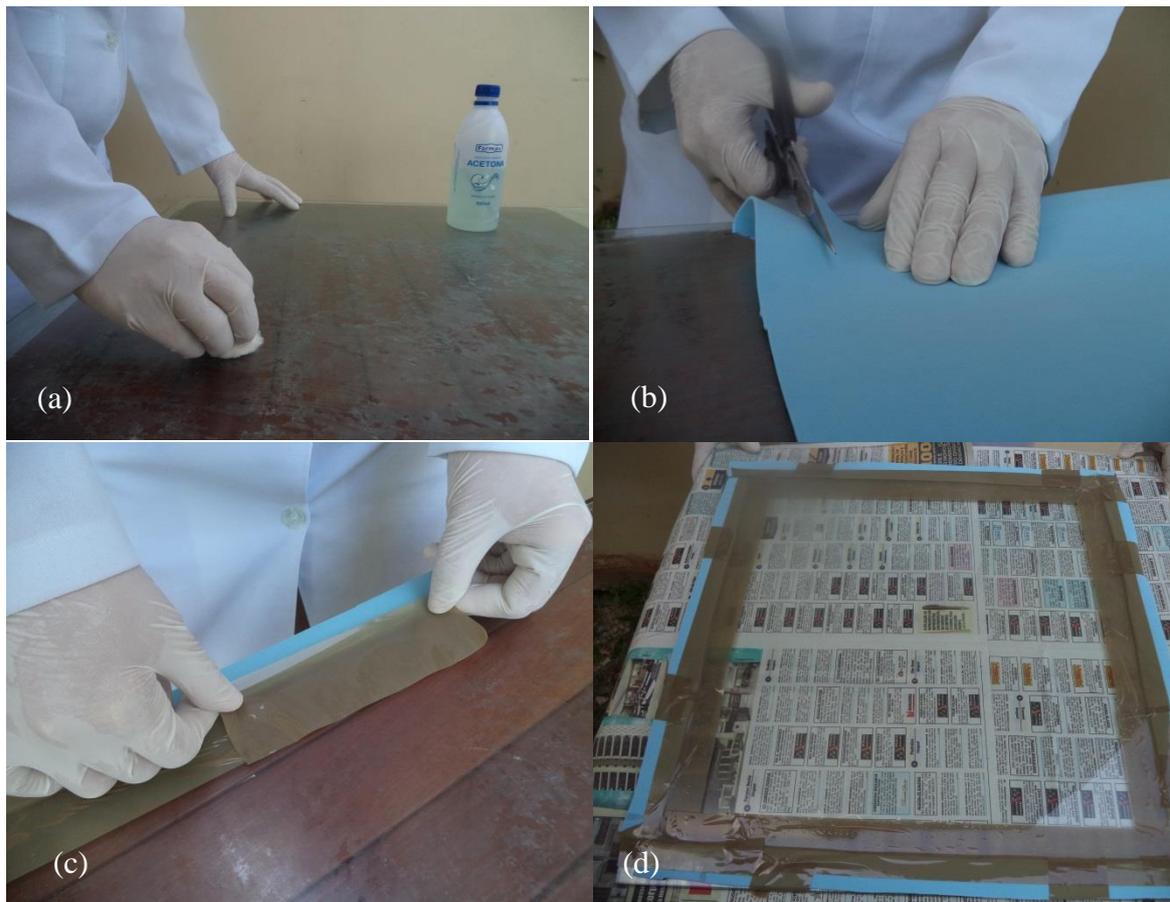


Figura 3.4 – (a) Limpeza dos vidros, (b) e (c) colocação de bordas e (d) vedação para colocação da resina.  
Fonte: Própria.

- b) Neste espaço interno foi aplicada cera desmoldante com estopa e esperado a mesma secar (FIG. 3.5);



Figura 3.5 – Aplicação da cera desmoldante.  
Fonte: Própria.

- c) Foram recortados pedaços de 65x65cm da tela de juta, nas direções 0° e 90° com o urdume, para melhor aproveitamento do tecido (FIG. 3.6). As lâminas foram constituídas por um laminado de camada dupla de tela de juta, porque, nos pré-testes com camada única de tela/poliéster/caulim, a lâmina deformou com o calor desprendido na expansão do PU;

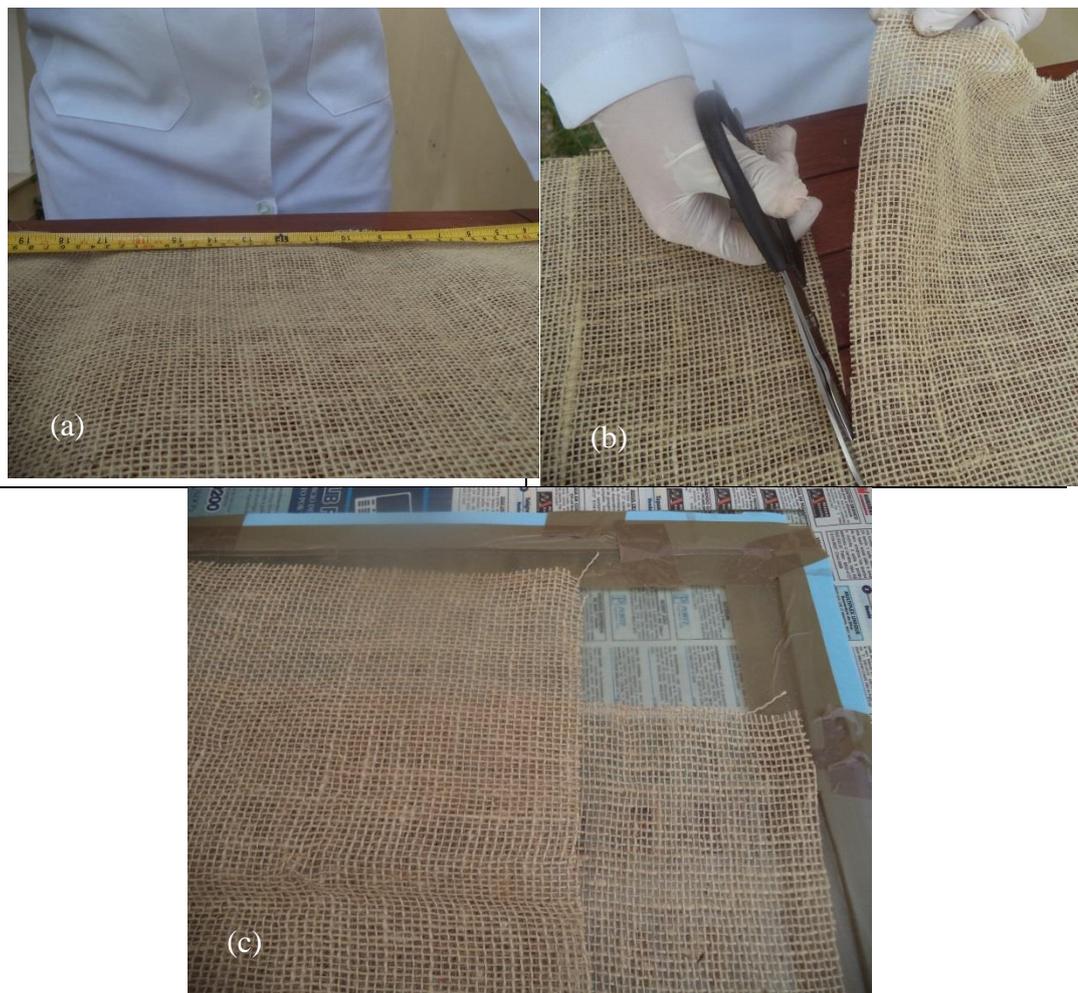


Figura 3.6 – (a) Dimensionamento, (b) corte dos pedaços da tela de juta e (c) ajuste nas bordas.  
Fonte: Própria.

- d) Foram dispostos dois níveis de bolha, ortogonalmente entre eles, para verificação se as placas estavam niveladas horizontalmente para receber a resina (FIG. 3.7);



Figura 3.7 – Nivelamento horizontal das placas de vidro.  
Fonte: Própria.

- e) 300g de caulim em pó seco (20% da resina) foi peneirado, na peneira n°200#, para desmanchar torrões e reservado;
- f) Foi despejada 1500g de resina poliéster, em uma bacia plástica pequena, sobreposta à balança (devidamente zerada) e acrescentado os 20 % de caulim, misturando bem para homogeneização da mistura. Foi acrescentado 30g de catalizador (2% em massa da resina), segundo indicação do fabricante. Essa homogeneização ocorreu até formar um gel, por menos de 1 minuto (FIG. 3.8);

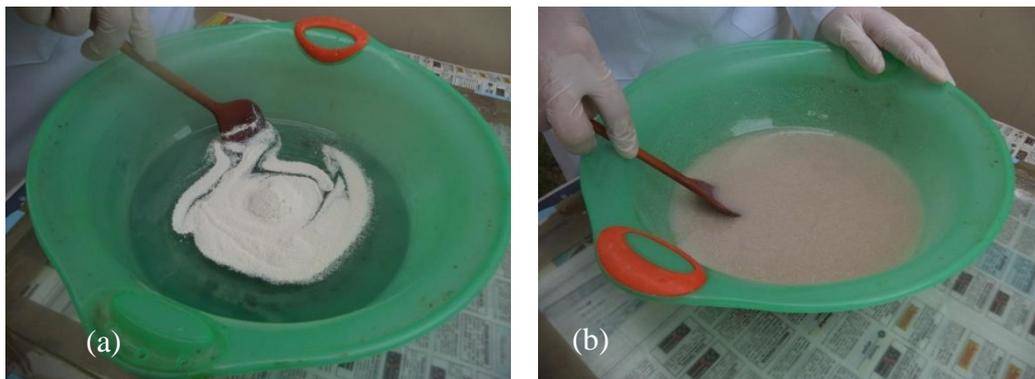


Figura 3.8 – Homogeneização da resina poliéster e caulim: (a) colocação do caulim peneirado na resina e (b) misturados até a homogeneização e por último, o acréscimo do catalizador.  
Fonte: Própria.

- g) Em seguida, parte dessa mistura foi despejada sobre a placa de vidro com desmoldante e espalhada com espátula (FIG. 3.9);

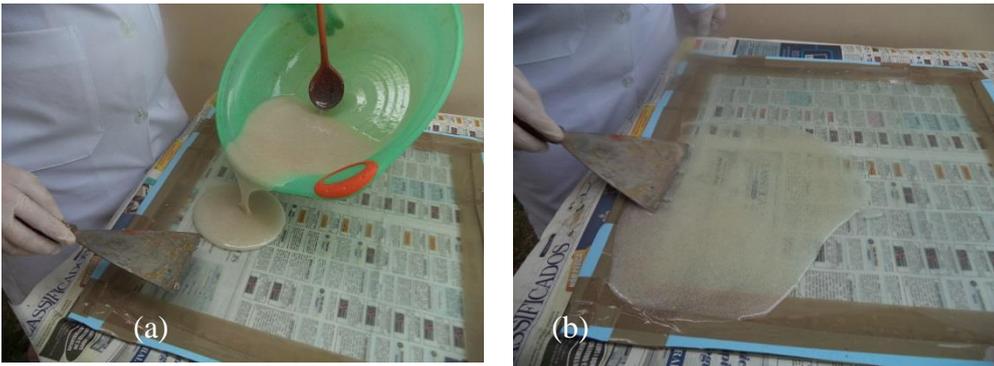


Figura 3.9 – Aplicação da resina de poliéster com 20% de caulim sobre o molde: (a) despejo e (b) espalhamento.

Fonte: Própria.

- h) Após o espalhamento desta mistura, 1 minuto depois, foi sobreposto um pedaço de tela de juta e passado o rolo sobre o mesmo (FIG. 3.10). Esse tempo de espera se fez necessário para formar uma camada de resina uniforme sob a tela, evitando assim, vazios na superfície da casca;



Figura 3.10 – Aplicação da tela de juta sobre a resina poliéster com 20% de caulim: (a) disposição da tela e (b) estiramento da tela para impregnação da resina com o rolo estriado.

Fonte: Própria.

- i) Foi despejado sobre esta tela, o restante da resina e espalhada com espátula, para aplicação do segundo pedaço de tela de juta. Tela esta, que foi pressionada sobre a anterior com o rolo para evitar bolhas de ar entre as mesmas, uniformizando a colagem de uma tela sobre a outra (FIG. 3.11). Nas tentativas de elaboração do compósito, foi verificada a necessidade de uma segunda camada de tela para dar estabilidade estrutural às lâminas;



Figura 3.11 – Conclusão da elaboração da lâmina do painel: (a) aplicação do restante da resina poliéster com 20% de caulim, (b) espalhamento da resina, (c) sobreposição da segunda tela e (d) fixação da mesma sobre a anterior.

Fonte: Própria.

- j) Para finalizar a elaboração da lâmina do painel sanduíche, foi sobreposto uma segunda placa de vidro com desmoldante para pressionar uma tela sobre a outra, colando-as (FIG. 3.12).

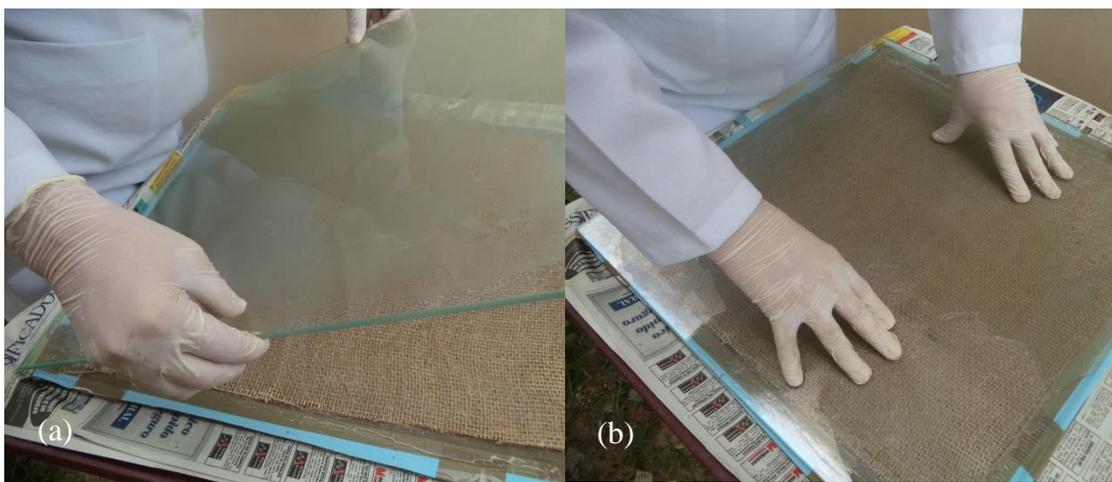


Figura 3.12 – Finalização da lâmina do painel: (a) colocação da segunda placa de vidro, pressionando-o sobre a face para (b) retirada do excesso de resina.

Fonte: Própria.

k) Após 24 horas, a lâmina foi desformada (FIG. 3.13);

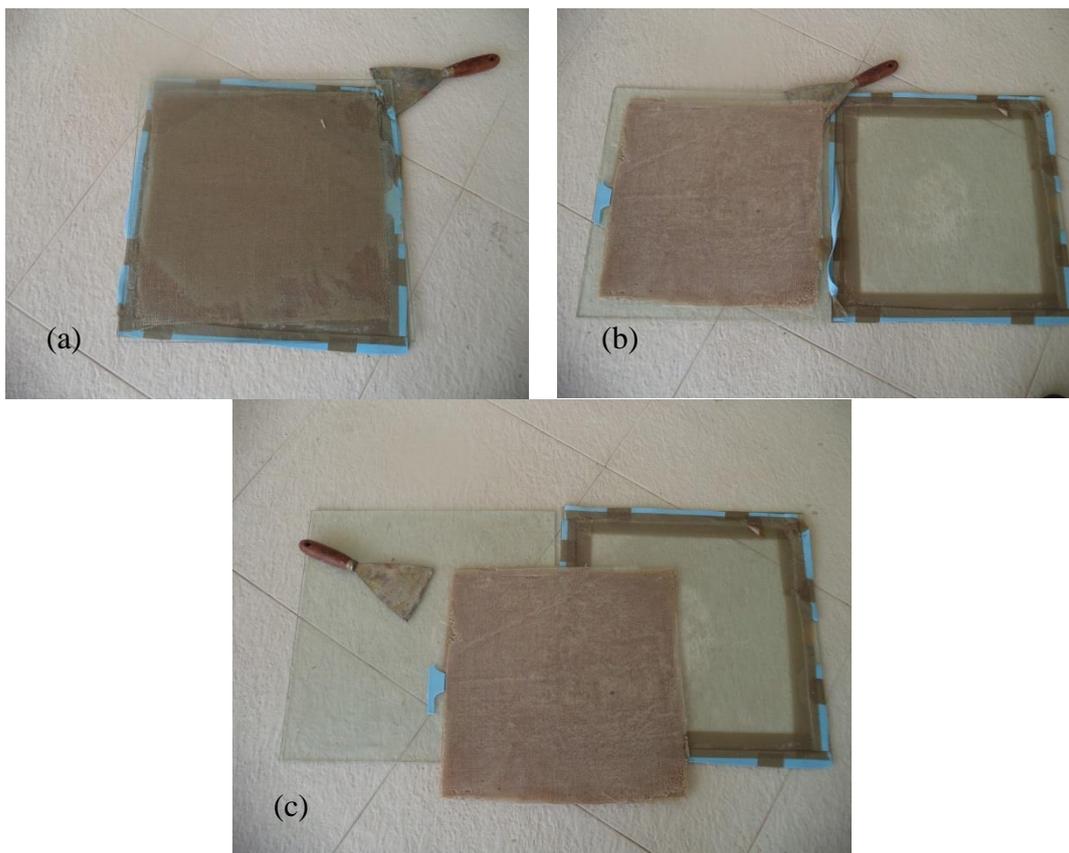


Figura 3.13 – Desforme da lâmina do painel: (a) utilização da espátula para separação dos vidros, (b) descolagem da face e finalmente, (c) a face pronta.

Fonte: Própria.

l) O processo foi repetido para a confecção da segunda lâmina do painel.

### 3.5.2 – Montagem do painel sanduíche

Para elaboração do painel sanduíche, os passos foram os seguintes:

- a) Primeiramente, as lâminas foram afixadas novamente nas placas de vidro (devidamente alinhadas) com pedaços de fita adesiva larga (dupla face);
- b) Foram colocados 8 (oito) espaçadores de madeira, de 15mm de espessura, colados com fita adesiva nas bordas, para garantir a espessura desejada do compósito, que foi estabelecida nesse valor;
- c) Cada painel foi constituído externamente da mesma lâmina (poliéster + 20% em massa de caulim), porém, o núcleo variou conforme a porcentagem de lama vermelha: poliuretano puro (com 0% em peso de lama vermelha) e poliuretano + lama vermelha, nas proporções 10 até 50% em massa do poliuretano, variando de 10 em 10%, conforme o QUADRO 3.1;

Quadro 3.1 – Tratamentos no painel sanduíche

Tratamento	Lâmina*	Núcleo**
1	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla+ 20% caulim	100% PU + 0% lama vermelha
2	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla + 20% caulim	90% PU + 10% lama vermelha
3	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla + 20% caulim	80% PU + 20% lama vermelha
4	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla + 20% caulim	70% PU + 30% lama vermelha
5	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla + 20% caulim	60% PU + 40% lama vermelha
6	60,64% POL + 19,36% tela de juta dupla + 20% caulim	50% PU + 50% lama vermelha

\* Porcentagem em massa da lâmina.

\*\* Porcentagem em massa do núcleo.

- d) A lama vermelha, para cada painel, foi devidamente peneirada, na peneira #200, para evitar qualquer torrão;
- e) Para fazer o painel sem lama vermelha (tratamento nº1), foi despejada em uma bacia pequena, 800g do polioliol. Nesse compósito foi acrescentado 400g do pré-polímero (isocianato) e misturado para homogeneização. Após vários testes, foi utilizada a proporção 1:0,5 (polioliol : pré-polímero) para maior controle da expansão da resina. Imediatamente, essa mistura foi despejada sobre uma das lâminas e espalhada e, em seguida, a outra lâmina foi colocada sobre essa massa. Foram colocados 8 (oito) grampos nas extremidades sobre os espaçadores de madeira, para manter a espessura de 15mm, após a expansão da resina de PU;
- f) Para a preparação dos painéis com a lama vermelha (do tratamento 2 ao 6), foram utilizados 1.200g de polioliol e 600g de pré-polímero. A lama vermelha foi acrescida ao polioliol, misturada até a homogeneização e depois, foi feito a adição do pré-polímero (FIG. 3.14). Após uniformizar a mistura e ao perceber que ela começava a expandir, ela era despejada sobre uma das lâminas, espalhada e prensada pela outra lâmina entre as placas de vidro com os grampos (FIG. 3.15). O excesso da mistura saía pelas aberturas entre os espaçadores (FIG. 3.16). Foram colocados 8 (oito) grampos nas extremidades sobre os espaçadores de madeira, para manter a espessura de 15mm, igualmente ao item (e).



Figura 3.14 – Homogeneização da lama vermelha no poliuretano para depois, acrescentar o isocianato.

Fonte: Própria.



Figura 3.15 – Despejo da mistura sobre uma das lâminas do painel.

Fonte: Própria.



Figura 3.16 – Saída do excesso da mistura ao expandir entre as lâminas do painel.

Fonte: Própria.

- g) A cura dos painéis ocorreu à temperatura ambiente e após 24h, eles foram desformados (FIG. 3.17). Na FIG. 3.18 podem ser vistas alguns painéis sanduíche prontos.



Figura 3.17 – Compósito na prensa para uniformização da espessura.

Fonte: Própria.

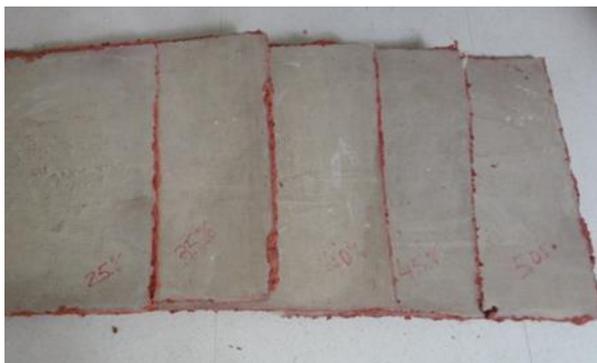


Figura 3.18 – Painéis sanduíche prontos.  
Fonte: Própria.

### 3.6 – Os ensaios realizados para caracterização de propriedades físicas e mecânicas dos painéis sanduíche

Os ensaios realizados foram: de massa específica na lâmina, de massa específica aparente e de porosidade aparente na estrutura sanduíche; de resistência à tração na lâmina da estrutura sanduíche; de resistência à tração transversal na estrutura sanduíche; de resistência à compressão longitudinal na estrutura sanduíche; de resistência à compressão transversal na estrutura sanduíche; de resistência à flexão por três pontos na estrutura sanduíche; de resistência ao impacto Charpy na estrutura sanduíche; de flamabilidade horizontal na lâmina e na estrutura sanduíche e de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche.

#### 3.6.1 – O ensaio de massa específica da lâmina, de massa específica aparente e de porosidade aparente da estrutura sanduíche

O ensaio de massa específica foi realizado segundo a norma ASTM C271/271M - 11 *Standard Test Method for Density of Sandwich Core Materials*. Essa norma permite a determinação da densidade de estruturas sanduíche tanto com núcleo contínuo (como espumas) quanto com núcleo descontínuo (como colmeia).

##### 3.6.1.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- Câmara de secagem com temperatura uniforme de  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- Dessecador para trazê-lo pra temperatura ambiente do laboratório;
- um paquímetro digital;
- uma balança analítica;
- luvas.

A FIG. 3.19 ilustra o aparato que foi utilizado para a realização do ensaio para a determinação da massa específica da lâmina, massa específica aparente e porosidade aparentes da estrutura sanduíche.



Figura 3.19 – Aparato para a determinação da massa específica aparente: (a) Obtenção da massa seca e da massa úmida do corpo de prova e (b) obtenção da massa imersa do corpo de prova.

Fonte: Kamila Nunes.

### 3.6.1.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova apresentaram sua conformidade de acordo com o item 8.2 da norma, na forma quadrada de 300 mm (comprimento e largura) e de espessura igual a da estrutura sanduíche (15 mm). Foram testados 5 corpos de prova de cada composição, num total de 30 corpos de prova.

### 3.6.1.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram acondicionados segundo a norma ASTM D5229/D5229 M *Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*. E os ensaios foram realizados em condições atmosféricas de  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de umidade relativa.

### 3.6.1.4 – Procedimento

Com os corpos de prova acondicionados segundo o item anterior, foram medidas e registradas as dimensões de largura, profundidade e espessura de cada um deles.

### 3.6.1.5 – O cálculo

a) Foram determinadas a massa específica aparente (MEA) e a porosidade aparente (PA) da lâmina sem o caulim e da lâmina com o caulim para verificar o efeito dessa adição sobre essas propriedades e, também a MEA e a PA da estrutura sanduíche, para verificar o efeito do incremento de lama vermelha sobre essas propriedades.

A massa específica aparente foi determinada através da seguinte formulação:

$$MEA = \frac{m_s}{m_u - m_1} \times \rho_{mi} \quad (6)$$

Onde:

MEA – é expressa em g/cm<sup>3</sup>,

$m_s$  - é a massa seca do material, em g;

$m_u$  - é a massa úmida do material, em g;

$m_i$  - é a massa imersa do material, em g e

$\rho_{mi}$  - é a densidade do meio em que o material foi imerso, em g/cm<sup>3</sup>.

E para o cálculo da porosidade aparente (PA) foi utilizada a seguinte formulação:

$$PA = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_i} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

PA – é expressa em %,

$m_u$  - é a massa úmida do material, em g;

$m_s$  - é a massa seca do material, em g;

$m_i$  - é a massa imersa do material, em g e

$\rho_{mi}$  - é a densidade do meio em que o material foi imerso, em g/cm<sup>3</sup>.

O meio líquido utilizado foi o álcool 99% de densidade igual a 0,76 g/cm<sup>3</sup> para que os corpos de prova pudessem imergir;

b) Para cada série de teste, foi calculada a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.2 – O ensaio de tração na lâmina

Esse ensaio foi realizado na lâmina sem caulim e com caulim da estrutura sanduíche, com o objetivo de verificar a influência dessa carga na lâmina. O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM D5083-10 *Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens*. Esse ensaio é empregado para a determinação das propriedades de tração de plásticos reforçados, em corpos de prova com espessura nominal uniforme, sob condições definidas de pré-tratamento, temperatura, umidade e velocidade de teste.

#### 3.6.2.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 30.000, com célula de carga de 2.000 kgf;
- computador com *software tesc* e
- paquímetro digital.

#### 3.6.2.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova apresentaram sua conformidade de acordo com o item 6.1.2 da norma (p. 3), na forma de um prisma retangular de 250 (comprimento) x 25 mm (largura) e de espessura igual ao da estrutura sanduíche, de 15 mm. Foram testados 5

(cinco) corpos de prova de cada composição, totalizando 10 (dez) corpos de prova (item 7.2 da norma, p. 4).

### 3.6.2.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram acondicionados segundo a norma ASTM D618 *Practice for Conditioning Plastics for Testing*.

A FIG. 3.20 ilustra os corpos de prova antes e durante ensaio na máquina universal.

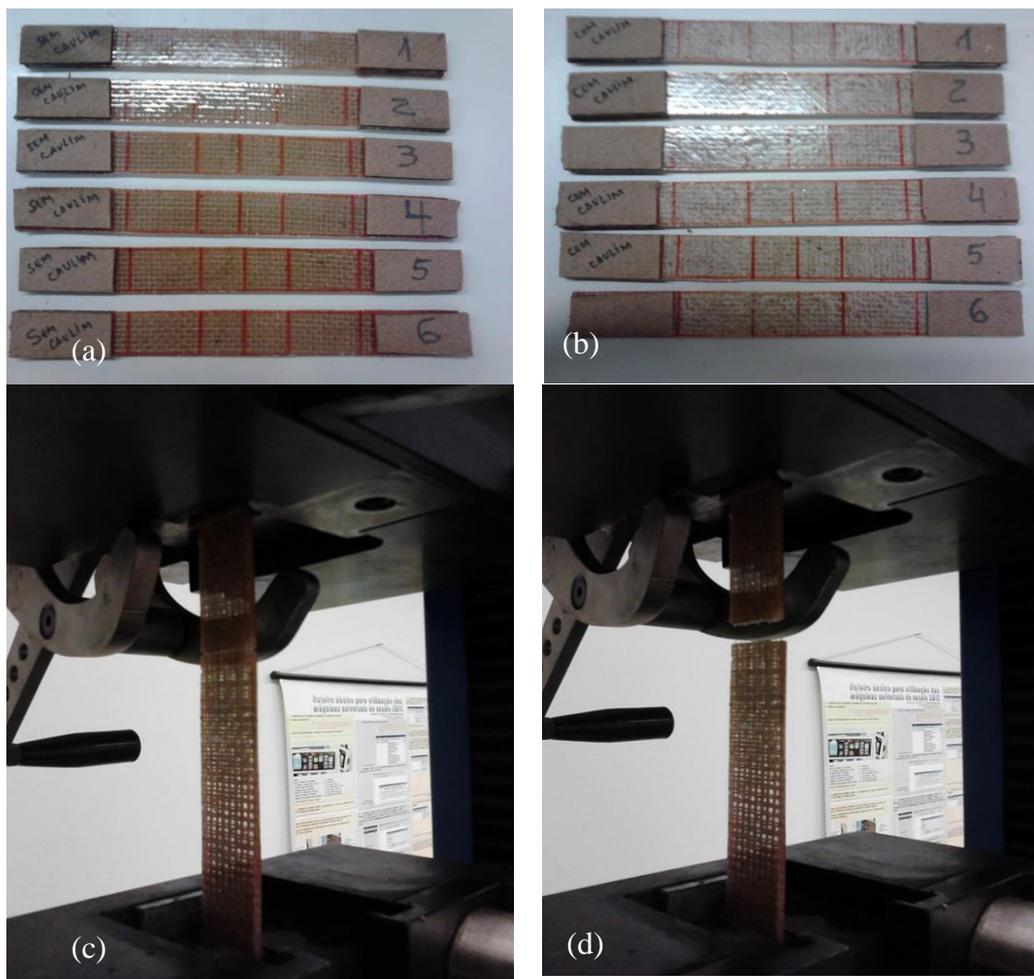


Figura 3.20 – Corpos de prova a serem ensaiados: (a) cp's sem caulim e (b) cp's com caulim; (c) início do ensaio e (d) final do ensaio.

Fontes: (a) e (b) Própria e (c) e (d) Maximiliano Azambuja.

### 3.6.2.4 – Procedimento

- 1) Velocidade de teste: foi feita segundo o item 8.2 da norma. A velocidade de teste indicada foi de 5mm/min.
- 2) Foram medidas a largura e a espessura de cada corpo de prova (essas medições foram realizadas no meio de cada corpo de prova);
- 3) Os corpos de prova foram colocados de forma alinhada entre as garras da máquina de teste;
- 4) Foi aplicada a velocidade de teste;

5) Foram gravados as curvas de carga-extensão de cada corpo de prova;

### 3.6.2.5 – O cálculo

Os cálculos da resistência à tração, deformação e módulo de elasticidade foram realizados segundo as equações:

- a) A tensão corresponde à força dividida pela área da seção sobre a qual a força é aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Onde:

$F$  : é a força aplicada sobre o material, medida em Newton;

$A$ : é a área da seção transversal do material, medida em  $m^2$  e

$\sigma$  – é a tensão, medida em Pa ( $N/m^2$ ).

- b) A deformação específica  $\varepsilon$ , ou apenas deformação (é adimensional) e expressa como a relação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (9)$$

Onde:

$\Delta l$  - é o alongamento, em m;

$l_0$  - é o comprimento inicial, em m e

$l_f$  - é o comprimento final, em m.

- c) O módulo de elasticidade  $E$  é expresso pela equação:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (10)$$

Onde:

$E$  - é a constante de proporcionalidade, módulo de elasticidade ou Módulo de Young, expressa em Pa =  $N/m^2$ , megapascal (MPa ou  $N/mm^2$ ) ou gigapascal (GPa ou  $kN/mm^2$ );

$\varepsilon$  - é a deformação específica (adimensional).

Também foram calculados a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.3 – O ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche

Esse ensaio foi realizado segundo a norma ASTM C297/C297M - 04 (Reapproved 2010) *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*. Esse ensaio determina a resistência à tração do núcleo, da adesão lâmina-núcleo ou da lâmina de um painel sanduíche e seu modo de falha, podendo ser empregada para painéis com núcleos contínuos (tipo espuma) e para painéis com núcleos descontínuos (como as estruturas em colmeias). Esse método consiste em submeter uma estrutura sanduíche a uma força de tração uniaxial perpendicular ao

plano do sanduíche, com a força sendo transmitida à estrutura através de garras presas às lâminas ou presas diretamente ao núcleo. Essa norma é utilizada como um método qualitativo de controle desse tipo de painel, mas também fornece dados importantes das propriedades estruturais para projeto.

### 3.6.3.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 30.000, com célula de carga de 2.000 kgf;
- computador com *software tesc* e
- paquímetro digital.

### 3.6.3.2 – Os corpos de prova

O dimensionamento do corpo de prova escolhido foi o de seção quadrada, de área de lâmina de 625 mm<sup>2</sup> (25 x 25 mm), segundo o item 8.2.1 da norma (p. 3), para estruturas com superfícies de adesão contínua (como no caso, em espuma) e com espessura igual ao do painel sanduíche (15 mm). Foram testados 5 corpos de prova para cada composição (de 0% até 50% de lama vermelha) (item 8.1 da norma, p. 3), totalizando 30 corpos de prova.

### 3.6.3.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram acondicionados segundo o procedimento C da norma ASTM D5229/D5229M *Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*, armazenados e testados a  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  de umidade relativa.

A FIG. 3.21 ilustra a máquina de ensaio, o posicionamento do cp e o cp sendo ensaiado.

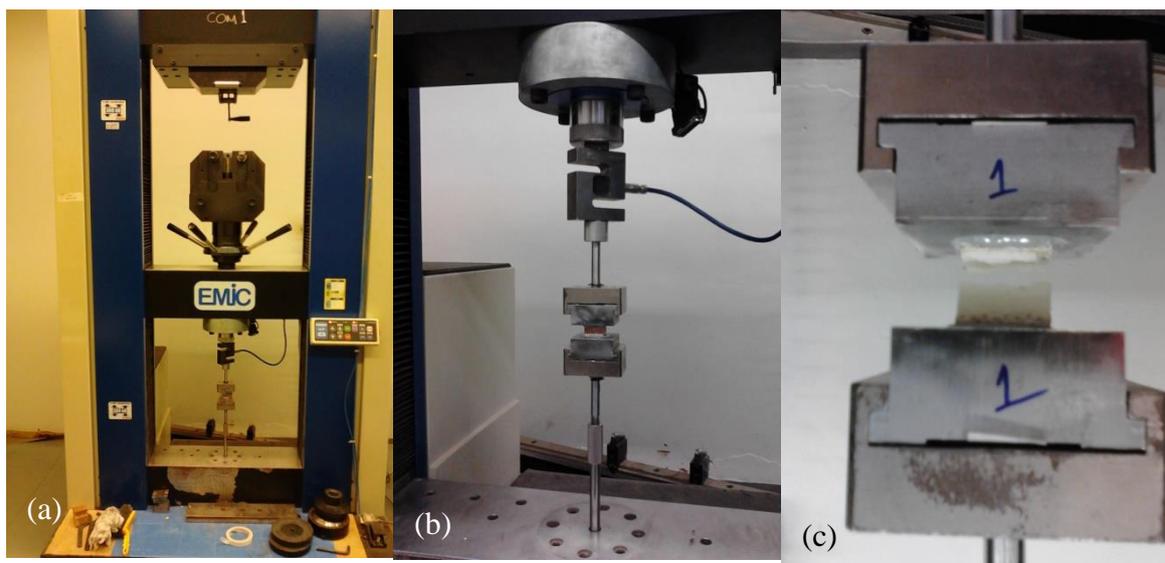


Figura 3.21 – Ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche: (a) máquina de ensaio, (b) aparato do ensaio e (c) cp sem LV sendo ensaiado.

Fonte: Maximiliano Azambuja.

### 3.6.3.4 – Procedimento

- 1) Mediu-se a largura e o comprimento dos corpos de prova (considerando a variação máxima permitida de 0,5%) e a espessura (com variação de  $\pm 2,5$  mm). As dimensões foram registradas devidamente expressas em mm;
- 2) A velocidade de teste foi de 0,50 mm/min, de tal forma a produzir a falha de 3 a 6 minutos, segundo o item 11.6 da norma (p. 4);
- 3) O corpo de prova foi afixado nas garras e aplicado a força de tração;
- 4) Foram registrados os dados de força e deslocamento, a força máxima e a tensão de ruptura;
- 5) Foram registrados os modos de falha, que segundo o item 11.11 da norma (p. 5) só serão considerados aceitáveis se forem um dos quatro tipos seguintes:
  - Falha no núcleo, com pedaços do núcleo podendo permanecer no adesivo que cola o núcleo à lâmina;
  - Falha de coesão no adesivo da lâmina com o núcleo, com o adesivo permanecendo geralmente em ambas as superfícies da lâmina e do núcleo;
  - Falha de adesão no adesivo da lâmina com o núcleo, no qual o adesivo geralmente permanece em uma das superfícies, ou na lâmina ou no núcleo, mas não em ambos ou
  - Falha à tração da lâmina, que ocorre comumente pela delaminação das camadas no caso de lâminas em compósitos reforçados por fibras.

### 3.6.3.5 – O cálculo

Os cálculos da resistência à tração e módulo de elasticidade foram realizados segundo as equações (8), (9) e (10), do item 3.6.2.5, na p.110. Também foram calculados a média aritmética, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.4 – O ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche

O ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche foi realizado segundo a norma ASTM C364/C364M – 07 (*Reapproved 2012*) *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*. Essa norma é utilizada para a determinação da resistência à compressão na direção paralela ao plano das lâminas da estrutura sanduíche entre as quais o miolo é inserido com superfícies de contato contínuas (tipo espuma) ou descontínuas (tipo colméia).

#### 3.6.4.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- máquina de ensaio universal EMIC modelo DL 30.000, com célula de carga de 2.000 kgf;
- computador com *software tesc* e
- paquímetro digital.

### 3.6.4.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova foram elaborados segundo o *item 8.2* e a *Fig. 3* da norma (pp. 4 e 5), para estruturas com superfícies de contato contínuas, com as seguintes dimensões: 60 (largura) x 120 mm (altura) e espessura igual ao do painel sanduíche (15 mm). Foram testados um total de 5 (cinco) corpos de prova para cada composição, totalizando 30 corpos de prova.

### 3.6.4.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram testados nas condições de 23°C de temperatura e 50% de umidade relativa no laboratório, sem prévios condicionamentos.

A FIG. 3.22 ilustra o cp e o ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.

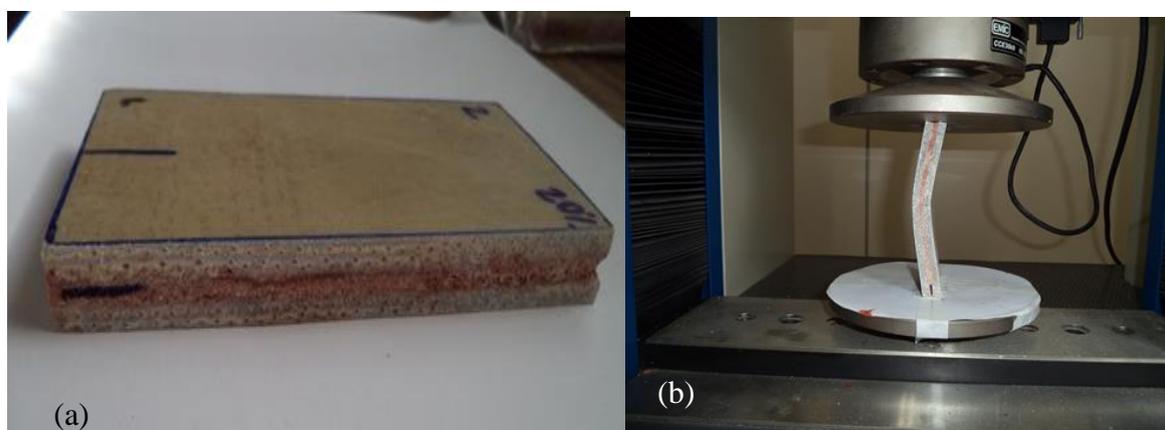


Figura 3.22 – O ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche: (a) corpo de prova com marcação para centralização entre os pratos e (b) o ensaio sendo realizado.

Fonte: Própria.

### 3.6.4.4 – Procedimento

- 1) Foram medidas as dimensões de largura, altura e espessura dos corpos de prova;
- 2) Foi feita uma marca centralizada sobre o prato inferior da máquina de ensaio para garantir a localização correta dos corpos de prova, garantindo que houvesse a distribuição uniforme da carga sobre os mesmos;
- 3) Após encostar o prato superior no corpo de prova, foi aplicada uma carga inicial de 45N, segundo o item 11.8 da norma;
- 4) A velocidade de teste foi de 0.50mm/min, segundo o item 11.5 da norma, de maneira a produzir a ruptura do corpo de prova entre 3 a 6 minutos.
- 5) Foram registrados a força máxima, a força de ruptura e o deslocamento no momento de ruptura.

### 3.6.4.5 – O cálculo

a) A resistência máxima à compressão paralela ao corpo de prova foi calculada através da seguinte equação:

$$\sigma = F_{max}/l(2e_f) \quad (11)$$

Onde:

$\sigma$  – é a resistência de ruptura à flambagem, em MPa;

$F_{max}$  – é a força máxima antes da falha, em N;

$l$  – é a largura do corpo de prova, em mm e

$e_f$  – é a espessura de uma única lâmina, em mm.

b) Para cada série de teste foram calculadas as médias aritméticas, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.5- Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche

O ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche foi realizado segundo a norma ASTM C365/365M – 11a *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*. Essa norma é utilizada para a determinação da resistência à compressão e módulo dos miolos da estrutura sanduíche. Essas propriedades são obtidas na direção normal ao plano das lâminas da estrutura sanduíche entre as quais o miolo é inserido com superfícies de contato contínuas (tipo espuma) ou descontínuas (tipo colméia). Este ensaio consiste em submeter o miolo a uma força uniaxial de compressão normal ao plano das lâminas da estrutura sanduíche.

#### 3.6.5.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- máquina de ensaio universal EMIC, com célula de carga de 30kN;
- computador com *software tesc* e
- paquímetro digital.

#### 3.6.5.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova foram em formato quadrado, com as espessuras iguais às espessuras da estrutura sanduíche (15 mm), com a área de lâmina de 625mm<sup>2</sup> (25x25mm), segundo o item 8.2.1 (para estruturas com superfícies de contato contínuas), p. 3. Foram testados 5 (cinco) corpos de prova para cada composição, totalizando 30 corpos de prova.

#### 3.6.5.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram testados nas condições de 23°C de temperatura e 50% de umidade relativa no laboratório, sem prévios condicionamentos.

A FIG. 3.22 ilustra o corpo de prova e o ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.

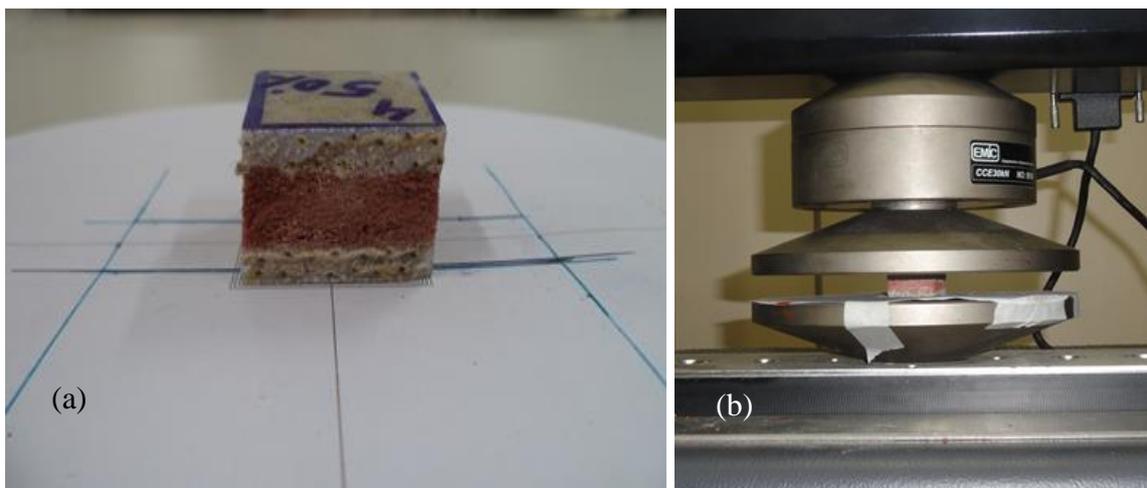


Figura 3.23 – Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche: (a) cp antes do ensaio, com a marcação para centralização entre os pratos e (b) a realização do ensaio.

Fonte: Mauro Veloso.

#### 3.6.5.4 – Procedimento

- 1) Foram medidas as dimensões de largura, comprimento e espessura dos corpos de prova;
- 2) Foi feita uma marca centralizada sobre o prato inferior da máquina de ensaio para garantir a localização correta dos corpos de prova, para que houvesse a distribuição uniforme da carga sobre os mesmos;
- 3) Após encostar o prato superior no corpo de prova, foi aplicada uma carga inicial de 45N, segundo o item 11.8 da norma;
- 4) A velocidade de teste foi de 0.50mm/min, segundo o item 11.5 da norma, de maneira a produzir a ruptura do corpo de prova entre 3 a 6 minutos;
- 5) Foram registrados a força máxima, o deslocamento e a deflexão no momento de ruptura.

#### 3.6.5.5 – O cálculo

O ensaio de compressão é conduzido de maneira semelhante ao ensaio de tração, exceto pelo fato de que a força é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão. No ensaio de compressão, os corpos de prova são submetidos a uma força axial para dentro, distribuída de modo uniforme em toda seção transversal do corpo de prova. Um corpo submetido à compressão sofre, inicialmente, uma deformação elástica e a seguir, uma deformação plástica.

a) A resistência máxima e o módulo à compressão normal ao corpo de prova foram calculados através das equações (8) e (9), item 3.6.2.5 da p. 121.

Para o cálculo da deformação ( $\varepsilon$ ) a equação é:

$$\varepsilon = \frac{L_0 - L_f}{L_0} \quad (12)$$

Onde:

$L_0$  – é o comprimento inicial do corpo de prova, em m;

$L_f$  – é o comprimento final do corpo de prova, em m;

$L_0 - L_f$  – é a variação do comprimento do corpo de prova, em m.

b) Para cada série de teste foram calculadas as médias aritméticas, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.6 – O Ensaio de Flexão por três pontos na estrutura sanduíche

O ensaio de flexão foi realizado segundo a norma ASTM D7250/D7250M – 06 (*Reapproved 2012*) *Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness*.

#### 3.6.6.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- máquina de ensaio universal EMIC, com célula de carga de 5kN;
- computador com *software tesc* e
- paquímetro digital.

#### 3.6.6.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova apresentaram sua conformidade de acordo com o item 7.2 da norma (*specimen geometry*), p. 2: 200 mm de comprimento, 30 mm de largura e espessura igual ao da estrutura sanduíche (15 mm). Esse comprimento deveria ser igual ao comprimento do vão mais 50 mm ou maior do que a metade da espessura (o valor que for maior) e o vão recomendado foi de 150 mm, conforme a *Fig. 1 Loading Configurations*, do item 7.2.1 da norma ASTM C393/C393M - 11 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*. E a largura obedeceu aos critérios de não ser menor que duas vezes a espessura, não ser menor do que três vezes a dimensão do miolo e nem maior que a metade do comprimento do vão. Foram testados 5 (cinco) corpos de prova de cada composição, totalizando 30 corpos de prova.

#### 3.6.6.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram testados nas condições de 23°C de temperatura e 50% de umidade relativa no laboratório, sem prévios condicionamentos.

#### 3.6.6.4 – Procedimento

A condução desse ensaio foi realizada com o emprego da norma ASTM C393/C393M – 11. Essa recomendação é feita para testes quando o módulo da face é desconhecido, segundo o item 8.1 da norma ASTM D7250/D7250M – 06.

A realização dos ensaios foi feita segundo o item 10.1.2 da norma ASTM D7250/D7250M – 06, utilizando duas configurações de carga sobre o mesmo corpo de prova, conforme as FIGS. 3.24 e 3.25. A velocidade de ensaio foi de 6mm/min.

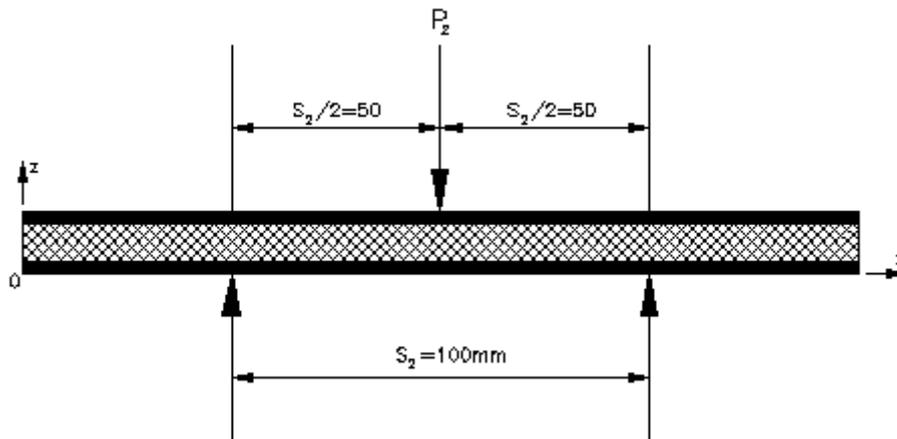


Figura 3.24 – Configuração do carregamento para o ensaio de flexão por 3 pontos (Vão de 100 mm).

Fonte: Própria.

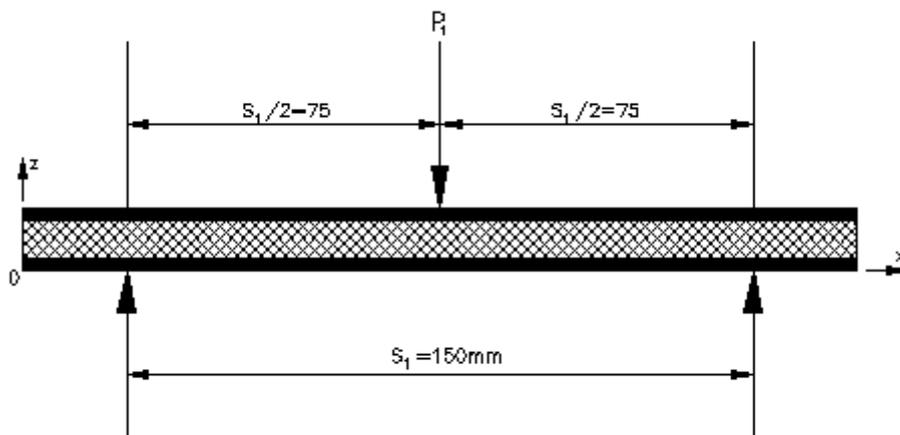


Figura 3.25 – Configuração do carregamento para o ensaio de flexão por 3 pontos (Vão de 150 mm).

Fonte: Própria.

A FIG. 3.26 ilustra o ensaio de flexão na estrutura sanduíche.

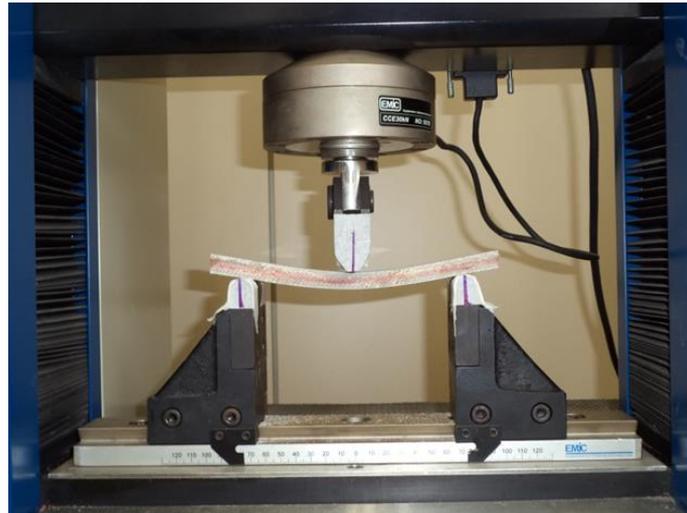


Figura 3.26 – Ensaio de flexão por 3 pontos na estrutura sanduíche.

Fonte: Própria.

### 3.6.6.5 – O cálculo

a) A tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) é calcula através da equação:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_r} \quad (13)$$

Onde:

$M_f$  – é o momento fletor da viga, em N.m;

$W_r$  – é o módulo de resistência da seção transversal, em m<sup>3</sup> e

$\sigma_f$  – é a tensão de flexão, em Pa (N/m<sup>2</sup>).

b) Cálculo do momento fletor:

Momento é o produto da força pela distância do ponto de aplicação da força ao ponto de apoio e no caso da flexão é denominado de *momento fletor* ( $M_f$ ). Nos ensaios de flexão por três pontos, a força é sempre aplicada na região média do corpo de prova e se distribui uniformemente no resto do corpo. Devido a isso se considera para calcular o momento fletor a metade da força (F) e do comprimento útil (L). E o momento fletor fica expresso pela equação:

$$M_f = \frac{F}{2} \times \frac{L}{2} \Rightarrow M_f = \frac{FL}{4} \quad (14)$$

Com:

F – em N e

L – em m.

c) Cálculo da resistência da seção transversal ( $W_r$ ):

O módulo de resistência da seção transversal ( $W_r$ ) é a medida de resistência em relação a um momento:

$$W_r = \frac{J}{c} \quad (15)$$

Onde:

$J$  – é o momento de inércia, em  $m^4$  e

$c$  – é a distância da linha neutra à superfície do corpo de prova, em m.

d) Cálculo do momento de inércia:

O momento de inércia para corpos de prova de seção retangular é calculado pela equação:

$$J = \frac{bxh^3}{12} \quad (16)$$

Onde:

$b$  – é a base da viga, em m e

$h$  – é a altura da viga, em m.

Para o cálculo da tensão de flexão ( $\sigma_f$ ), o valor da carga obtido varia conforme o material seja dúctil ou frágil. No caso de materiais dúcteis considera-se a força obtida no limite de elasticidade. Quando se trata de materiais frágeis, considera-se a força registrada no limite de ruptura.

Outras propriedades que podem ser avaliadas no ensaio são a flecha máxima e o módulo de elasticidade.

e) Cálculo da flecha máxima:

A equação para o cálculo da flecha máxima é:

$$f = \frac{1}{48} x \frac{FL^3}{EJ} \quad (17)$$

Sendo  $f$  expressa em m.

f) Cálculo do módulo de elasticidade:

E o módulo de elasticidade é calculado pela equação:

$$E = \frac{1}{48} x \frac{FL^3}{fxJ} \quad (18)$$

Com  $E$  expresso em MPa ou GPa.

g) Para cada série de teste foram calculadas as médias aritméticas, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

### 3.6.7 – O Ensaio de Impacto Charpy na estrutura sanduíche

O ensaio de impacto Charpy foi realizado segundo a norma ASTM D6110-10 *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*. Esse ensaio é utilizado para determinar a resistência de plásticos à fratura por um choque flexural indicado pela energia absorvida pelo corpo de prova após ser atingido por um martelo tipo pêndulo de uma máquina padronizada. Este método de teste requer um entalhe. Esse entalhe produz uma concentração de energia que produz uma fratura frágil, preferível a uma fratura dúctil. Porém, devido à espessura

da lâmina esse entalhe não foi feito. Os resultados desse método são apresentados em termos de energia absorvida por unidade de largura do corpo de prova.

#### 3.6.7.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- Equipamento para ensaio de impacto Charpy, marca JB-300 B, Time Group Inc, 150J;
- Um paquímetro.

#### 3.6.7.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova apresentaram sua conformidade de acordo com o item 7 da norma (*Test Specimen*), na p.5, onde o comprimento foi de 127 mm, a altura igual a 12,7 mm e espessura igual ao da estrutura sanduíche (15 mm). Foram testados 5 (cinco) corpos de prova de cada composição, totalizando 30 corpos de prova.

#### 3.6.7.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram acondicionados a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\pm 10\%$  de umidade relativa e os ensaios foram conduzidos, no laboratório, a uma atmosfera de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $50\pm 10\%$  de umidade relativa.

A FIG. 3.27 ilustra o ensaio de impacto Charpy na estrutura sanduíche.

#### 3.6.7.4 – Procedimento

- a) Depois de instalado o pêndulo, a máquina foi checada em conformidade com as exigências da seção 6 da norma;
- b) Foram medidas e anotadas as espessuras de cada corpo de prova;
- c) Os corpos de prova foram posicionados horizontalmente entre os suportes e encostados nas bigornas, devidamente centralizados;
- d) O pêndulo foi elevado e preso na máquina e a mesma foi devidamente resetada;
- e) O pêndulo foi solto, permitindo que o mesmo atinja o corpo de prova. Foi anotada a energia de ruptura de cada corpo de prova;

#### 3.6.7.5 – O cálculo

- a) A energia de ruptura total foi lida diretamente no equipamento;
- b) A resistência ao impacto foi obtida ao dividir a energia de ruptura total pela área de impacto (altura x espessura) de cada corpo de prova.
- c) Para cada série de teste foram calculadas as médias aritméticas, o desvio padrão e o intervalo de confiança de 95% para validação dos resultados para cada série de teste. Os valores fora do intervalo de confiança foram descartados.

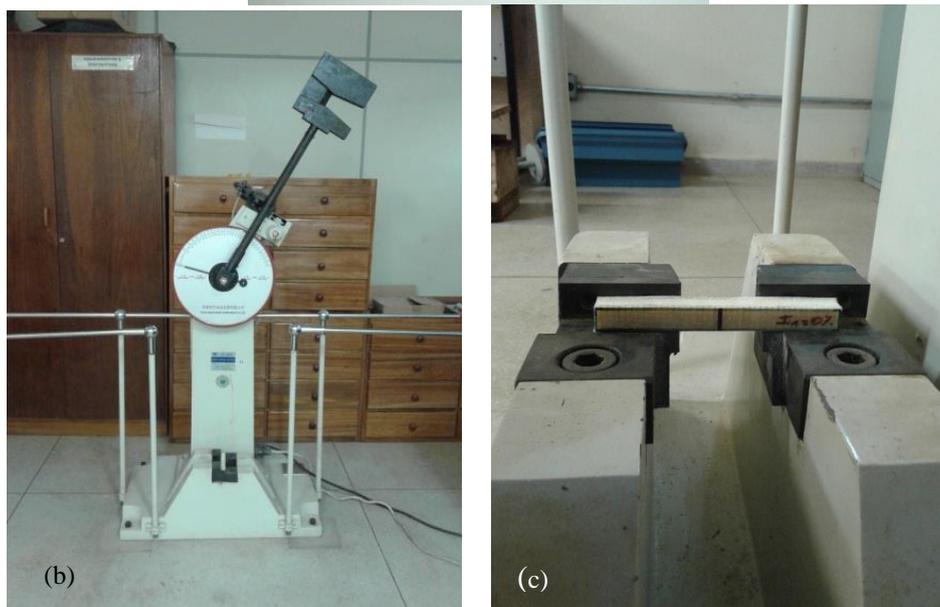
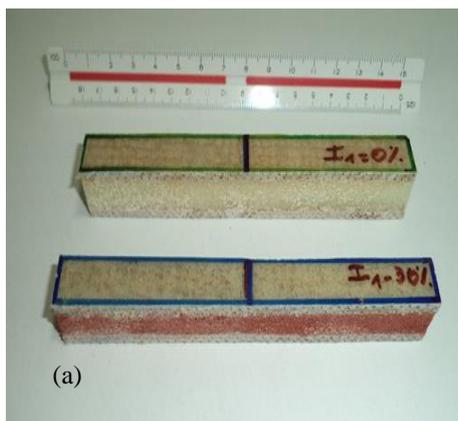


Figura 3.27 – O ensaio de impacto Charpy: (a) os corpos de prova com suas marcações, (b) o equipamento de ensaio e (c) o posicionamento do cp no equipamento.

Fontes: (a) Própria e (b) e (c) Sílvio Alex da Mota.

### 3.6.8 – O Ensaio de Flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche

O ensaio de flamabilidade foi realizado segundo a norma UL 94-96 *Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*. Esta norma serve de indicador preliminar em teste de flamabilidade de materiais plásticos utilizados como partes de dispositivos e aparelhos, através da medição e descrição da sua resposta ao calor e ao fogo sob condições controladas em laboratório. Foi realizado o ensaio de queima horizontal (*horizontal Burning Test*, HB) (item 7 da norma, p. 10). Esse ensaio foi realizado na lâmina sem caulim, na lâmina com caulim e na estrutura sanduíche. Foram elaboradas lâminas sem caulim para a observação da contribuição, quanto ao comportamento à flamabilidade, da inserção dessa carga na lâmina.

#### 3.6.8.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- uma coifa com volume interno mínimo de 0,50 m<sup>3</sup>;

- haste e suporte para os corpos de prova;
- dessecador contendo cloreto de cálcio anidro ou outro agente de secagem, que mantenha uma umidade relativa sem exceder 20% de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ;
- forno condicionado com circulação completa de ar, com um mínimo de 5 trocas de ar por hora e capaz de ser mantido a  $70 \pm 1^\circ\text{C}$ ;

### 3.6.8.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova foram elaborados segundo o item 7.3.2 da norma, p. 10 com as seguintes dimensões: 125 mm de comprimento, 13 mm de largura e espessura igual ao da estrutura sanduíche (15 mm). Foram ensaiados 5 (cinco) corpos de prova de cada composição, totalizando 30 corpos de prova.

### 3.6.8.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram pré-condicionado de acordo com a norma ASTM D618 a  $23^\circ\text{C}$  e 50 % de umidade relativa por 48 horas.

A FIG. 3.28 ilustra os corpos de prova e o ensaio de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche.



Figura 3.28 – Ensaio de flamabilidade: (a) cp's antes do ensaio: lâmina com caulim, lâmina sem caulim e a estrutura sanduíche (de cima para baixo, resp.) e (b) aparato de ensaio.

Fontes: (a) Própria e (b) Osvaldo Pires.

### 3.6.8.4 – Procedimento

- Foram testados três corpos de prova de cada composição, totalizando 18 corpos de prova. Cada corpo de prova foi marcado com duas linhas perpendiculares ao eixo longitudinal da barra com  $25 \pm 1\text{mm}$  e  $100 \pm 1\text{mm}$  da extremidade que foi queimada;
- Os corpos de prova foram afixados pela extremidade mais distante da marca de 25 mm, com o eixo longitudinal horizontal e o eixo transversal inclinado a  $45 \pm 2$  graus FIG. 3.29);
- o gás metano foi ajustado para produzir um fluxo de 105 ml/min e para produzir uma chama azul de  $20 \pm 1\text{mm}$  de altura;

- d) A chama foi posicionada na extremidade livre do corpo de prova e na parte inferior, numa profundidade de  $6 \pm 1$  mm e foi aplicada por  $30 \pm 1$  segundos sem alterar a sua posição;
- e) depois desse tempo, a chama foi removida ou quando a combustão alcançou a marca de 25 mm (em tempo menor que 30 segundos) e começava a contagem do tempo;
- f) caso o corpo de prova continuasse a queimar depois da remoção da chama, foi anotado o tempo em segundos para que a frente de combustão se propagasse da marca de 25 mm até ultrapassar a marca de 100 mm e anotado a extensão dos danos  $L$  e se a combustão passar da marca dos 25 mm e não ultrapassar a marca de 100 mm, o comprimento da parte danificada, foi anotado o tempo decorrido em segundos e o comprimento do dano em milímetro entre a marca de 25 mm e onde a frente de combustão parou.

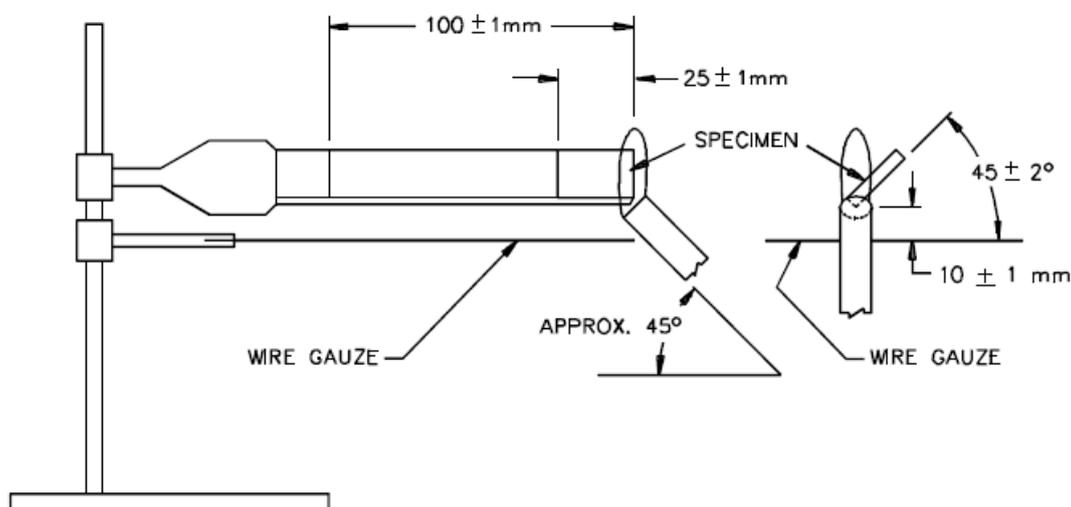


Figura 3.29 – Aparelhagem de teste de queima horizontal.  
Fonte: Norma UL-94-96, p. 13.

### 3.6.8.5 – O cálculo

Foi calculada a taxa de queima linear  $V$ , em milímetros/min, para cada corpo de prova utilizando a equação:

$$V_q = 60 L_d/t \quad (19)$$

Onde:

$V_q$  – é a taxa de queima linear, em mm/min;

$L_d$  – é o comprimento do dano, em milímetro e

$t$  – é o tempo, em segundos.

Observando que quando a frente de chama ultrapassou a marca de 100 mm, foi considerado  $L_d = 75$  mm.

### 3.6.9 – O Ensaio de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche

O ensaio de perda de transmissão acústica foi realizado segundo a norma ISO 140-3:1995(E) *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of*

*building elements – Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*. Esse ensaio aborda medições em laboratório de perda de transmissão acústica pelo ar de partes de uma edificação tais como paredes de qualquer tipo, pisos, forros, portas, janelas, telhados, painéis e outros elementos divisórios de espaços.

#### 3.6.9.1 – Equipamentos e material para o ensaio

- 2 Câmaras reverberantes em escala reduzida (minicâmara);
- computador;
- Amplificador: *Power Amplificator B&K 2716*;
- Medidor de nível de pressão sonora tipo 1, de dois canais, *Investigator*, modelo 2260 da marca B&K, n° de série 2572851 com calibração válido até 2014.
- Fonte omnidirecional (auto-falante);
- cabos;
- 2 Microfones;
- 2 Tripés;
- *Softwares: Pulse Labshop View e Planilha de dados.*

#### 3.6.9.2 – Os corpos de prova

Os corpos de prova foram cortados em placas quadradas, de lado igual a 650 mm, com a espessura da estrutura sanduíche (15 mm). Foram testados 1 (um) corpo de prova de cada composição.

#### 3.6.9.3 – Condicionamento dos corpos de prova

Os corpos de prova foram acondicionados em ambientes com a temperatura variando de 18 a 24°C e com umidade relativa de 40 a 70%.

#### 3.6.9.4 – Procedimento

A FIG. 3.30 apresenta o desenho esquemático da instalação dos equipamentos para o ensaio de acústica.

O ensaio foi realizado dispondo dois ambientes de reverberação de forma adjacente com uma abertura entre eles na qual a placa do compósito foi instalada (FIG 3.31). Um campo sonoro difuso foi produzido em um dos ambientes, o ambiente de som incidente. Esse som incidente provocou vibração e criou um campo sonoro no outro ambiente, o ambiente receptivo. O espaço e o tempo dos níveis de pressão sonora entre os dois ambientes foram determinados. Em adição, com o corpo de prova na câmara, a absorção sonora no ambiente receptivo foi determinada. Os níveis de pressão sonora nos dois ambientes, a absorção sonora no ambiente receptivo e a área do corpo de prova foram usados para calcular a perda de transmissão sonora. Devido à perda de transmissão sonora ser função da frequência, as medições foram realizadas em uma

série de bandas de frequência. O nível de pressão sonora foi medido usando filtros de banda 1/3 de oitava tendo, pelo menos, as seguintes frequências, em hertz: 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500 e 3150.

Na FIG. 3.32 estão os principais equipamentos utilizados no ensaio.

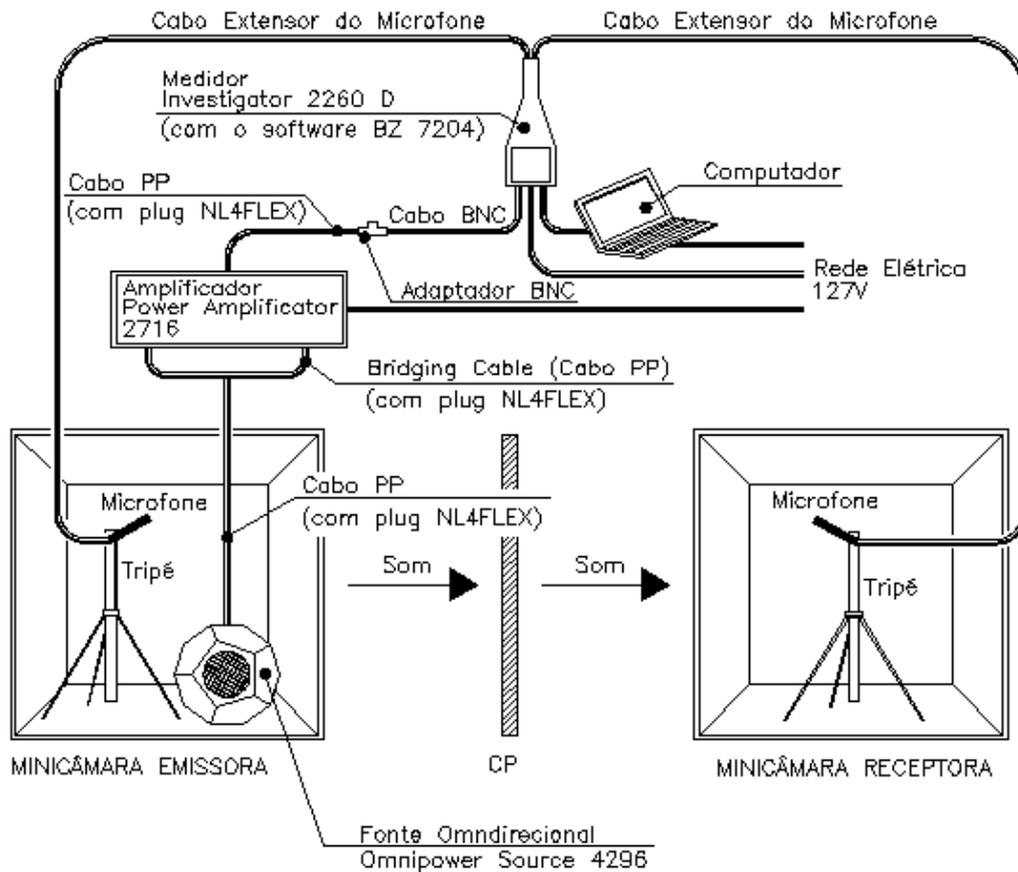


Figura 3.30 – Esquema da instalação dos equipamentos para o ensaio de acústica.  
Fonte: Própria.

### 3.6.9.5 – O cálculo

Primeiramente, foram levantados dados preliminares conhecidos:

- o volume da câmara receptiva (V):

$$V = 0,50 \times 0,50 \times 0,80 = 0,20 m^3$$

- a área útil da amostra (A):

$$A = 0,50 \times 0,50 = 0,25 m^2$$



Figura 3.31 – (a) As duas minicâmaras abertas, (b) colocação do corpo de prova para o ensaio, (c) fechamento das minicâmaras com o corpo de prova entre elas e (d) detalhe do corpo de prova entre as minicâmaras aparafusadas. O cabo é o da fonte.

Fonte: Própria.

Na medição do laboratório, foi realizado o ensaio do nível de pressão sonora da sala emissora (L1) e da sala receptora (L2), nas bandas de frequência de 1/3 de oitava, conforme a ISO 140-3 a medição foi realizada três vezes para cada frequência, sendo necessária uma média logarítmica para L1 e L2, assim como dos valores do *background* (ruído de fundo do ambiente).

Para as direções de teste escolhidas, o cálculo da perda de transmissão sonora em cada frequência  $f$  é feito através da equação (5), da página 74.

A área de absorção sonora equivalente ( $A$ ) foi calculada pela seguinte fórmula:

$$A_R = \frac{0,16V}{T} \quad (20)$$

Onde:

$V$  = é o volume da câmara receptiva, em  $m^3$  e

$T$  = é tempo de reverberação na sala receptiva, em segundos.

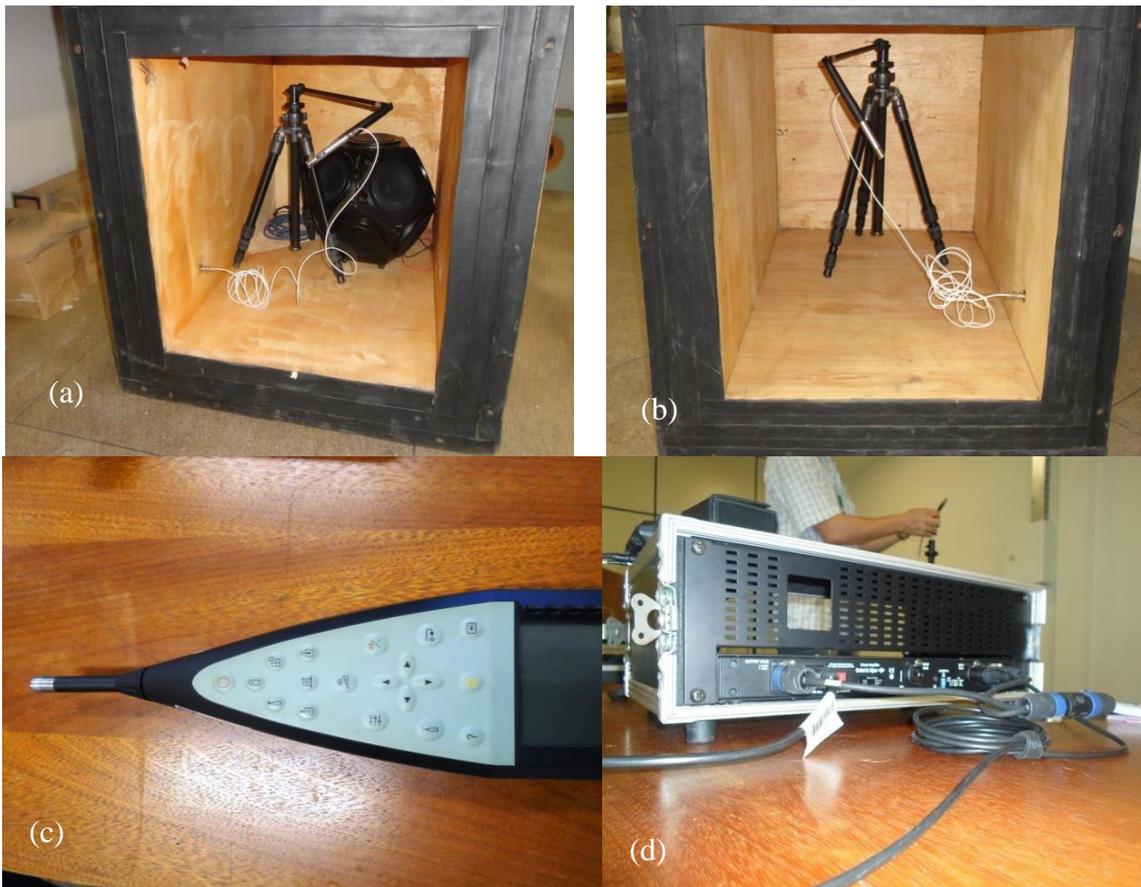


Figura 3.32 – (a) ambiente emissor (microfone e fonte), (b) ambiente receptivo (microfone), (c) medidor de pressão sonora e (d) amplificador.  
Fonte: Própria.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS, ANÁLISES E DISCUSSÕES

4.1 – Resultados dos ensaios de massa específica na lâmina, de massa específica aparente (MEA) e de porosidade aparente (PA) na estrutura sanduíche

Foram realizados ensaios de massa específica nas lâminas sem caulim e com 20% de caulim para verificação do aumento da massa da lâmina com o incremento dessa carga. Os resultados médios com seus respectivos desvios padrões estão na TAB. 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados das massas específicas das lâminas

Lâmina	V (cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Sem caulim	25,20 ± 0,02	1,12 ± 0,02
Com 20% de caulim	25,10 ± 0,01	1,18 ± 0,01

A massa da tela de juta dupla equivale a 19,36% da massa da lâmina sem caulim e 17,65% da massa da lâmina com caulim.

No GRAF. 4.1 estão as massas específicas médias das lâminas e a variação dentre os valores válidos no intervalo de confiança de 95%.

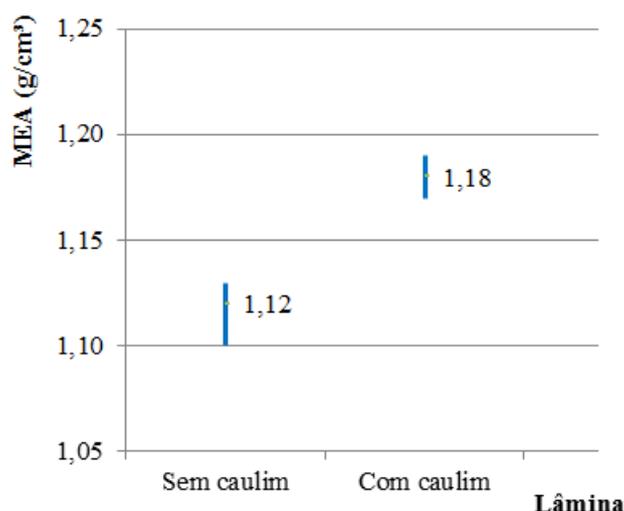


Gráfico 4.1 – Massas específicas das lâminas.

Os resultados médios e respectivos desvios padrões quanto à massa específica aparente (MEA) e à porosidade aparente (PA) da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos estão na TAB. 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados das massas específicas aparentes e porosidades aparentes médias da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos

% de LV	V (cm <sup>3</sup> )	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	PA (%)
0	24,80 ± 0,95	0,69 ± 0,02	27,13 ± 0,76
10	25,69 ± 1,79	0,71 ± 0,01	24,54 ± 0,74
20	20,13 ± 0,36	0,70 ± 0,02	24,21 ± 1,40
30	20,99 ± 0,82	0,72 ± 0,01	23,82 ± 1,57
40	21,83 ± 0,92	0,71 ± 0,02	21,06 ± 1,66
50	21,40 ± 0,48	0,74 ± 0,04	19,04 ± 1,82

O GRAF. 4.2 ilustra a comparação entre essas massas específicas.

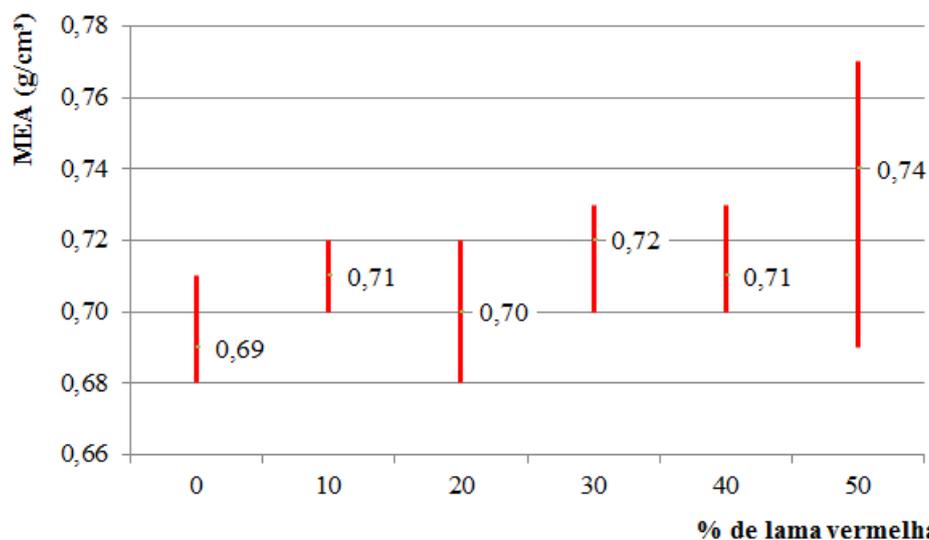


Gráfico 4.2 – Massa específica aparente da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

E o GRAF. 4.3 ilustra a comparação entre as porosidades aparentes.

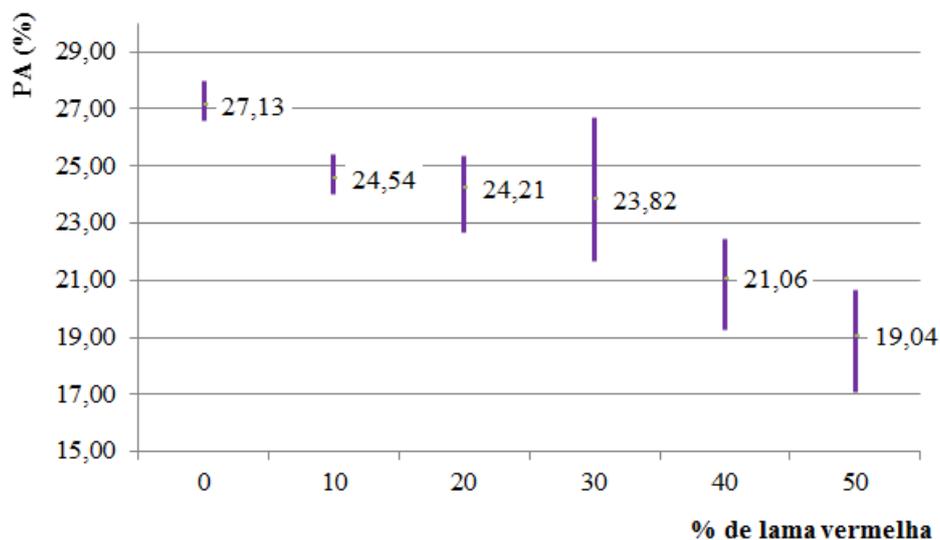


Gráfico 4.3 – Porosidades aparentes da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

A massa específica da lâmina sem o caulim, de valor médio igual a  $1,12 \text{ g/cm}^3$ , foi menor do que da matriz de poliéster ( $1,20 \text{ g/cm}^3$ , no Cap. 3, TAB. 3.2, na p. 96) devido à presença do reforço de tela de juta (gramatura da tela:  $0,03 \text{ g/cm}^2$ , no Cap. 2, TAB. 2.7, na p. 49) e aumentou um pouco com o acréscimo de 20% de caulim para  $1,18 \text{ g/cm}^3$ , chegando bem próximo ao valor da massa específica da própria matriz de poliéster. Desta forma, pode-se afirmar que a presença da tela de juta contribuiu para a redução de massa da lâmina, porém com o incremento de 20% de caulim (de massa específica  $2,6 \text{ g/cm}^3$ , no Cap. 2, TAB. 2.9, na p. 52), a lâmina voltou a apresentar massa

específica praticamente igual a da matriz de poliéster. Todavia, essa massa específica da lâmina ainda se mostrou um pouco menor do que a massa específica do poliéster, demonstrando que a presença da tela de juta e de 20% de caulim, contribuiu para a redução de peso da estrutura sanduíche. Esse resultado é condizente com os resultados obtidos por Ferreira (2013) em sua pesquisa (no Cap. 2, TAB. 2.22, na p. 80).

As massas específicas aparentes da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos foram muito menores do que, por exemplo, de compósitos de poliéster reforçado com fibras de vidro-E ( $1,85 \text{ g/cm}^3$ ) e de compósitos de epóxi e fibra de carbono ( $1,58 \text{ g/cm}^3$ ) (BARBERO, 1999 *in* FERREIRA, 2013, p. 80) e até abaixo da matriz de poliéster ( $1,20 \text{ g/cm}^3$ ) (no Cap. 3, TAB. 3.2, na p. 96). Nesse resultado, houve uma grande influência do núcleo de PU expandido (de massa específica  $0,03 \text{ g/cm}^3$ ) (no Cap. 3, TAB. 3.1, na p. 96), que por ser esponjoso, apresenta muitos vazios, preenchidos por ar e lama vermelha, mesmo com a lama vermelha presente massa específica de  $2,13 \text{ g/cm}^3$  (SOUZA, 2010, p.73). Os diferentes tratamentos influenciaram pouco na massa específica da estrutura sanduíche, motivado, talvez, pelo tamanho das partículas muito finas, cerca de  $95 \% < 44 \mu\text{m}$ , i.e. *325 mesh* (SILVA FILHO *et al.*, 2007, p. 325) e pelo incremento de lama vermelha em massa de uma resina expansiva de pouca massa específica, embora, seja possível observar uma tendência no aumento da massa específica aparente com o incremento de lama vermelha, já que a estrutura com 0% de LV apresentou massa específica aparente de  $0,69 \text{ g/cm}^3$  e a estrutura com 50% de LV apresentou massa específica aparente de  $0,74 \text{ g/cm}^3$ .

Quanto à porosidade aparente, foi observado que o material apresentou quase 30% de vazios (27,13% na estrutura com 0% de lama vermelha), que com o aumento da concentração de lama vermelha, os vazios da espuma foram sendo preenchidos por lama, chegando a 19,04% de porosidade na estrutura com 50% de lama vermelha. Foi observado também que, com o aumento na quantidade de lama vermelha, o poliuretano reduzia sua expansão, diminuindo a formação de bolhas de ar, contribuindo para a tendência de redução da porosidade da estrutura sanduíche com o incremento de lama vermelha.

#### 4.2 – Resultados do ensaio de tração na lâmina

O ensaio de tração na lâmina foi realizado sem o caulim (somente poliéster + tela de juta) e com caulim (poliéster + tela de juta + 20% em massa de caulim) para verificação da influência dessa carga nos resultados.

Na TAB. 4.3 estão os resultados deste ensaio em valores médios e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de tração na lâmina

Tipo de Amostra	A (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\delta_{max}$ (mm)	$\varepsilon$ (%)	E (GPa)
Sem caulim	$66,95 \pm 1,07$	$1,60 \pm 0,02$	$23,96 \pm 0,18$	$1,77 \pm 0,06$	$0,40 \pm 0,00$	$0,79 \pm 0,03$
Com caulim	$66,74 \pm 1,11$	$1,71 \pm 0,06$	$25,60 \pm 0,76$	$2,07 \pm 0,15$	$0,30 \pm 0,10$	$0,92 \pm 0,21$

O GRAF. 4.4 representa a relação força x deslocamento deste ensaio, demonstrando o comportamento de cada composição.

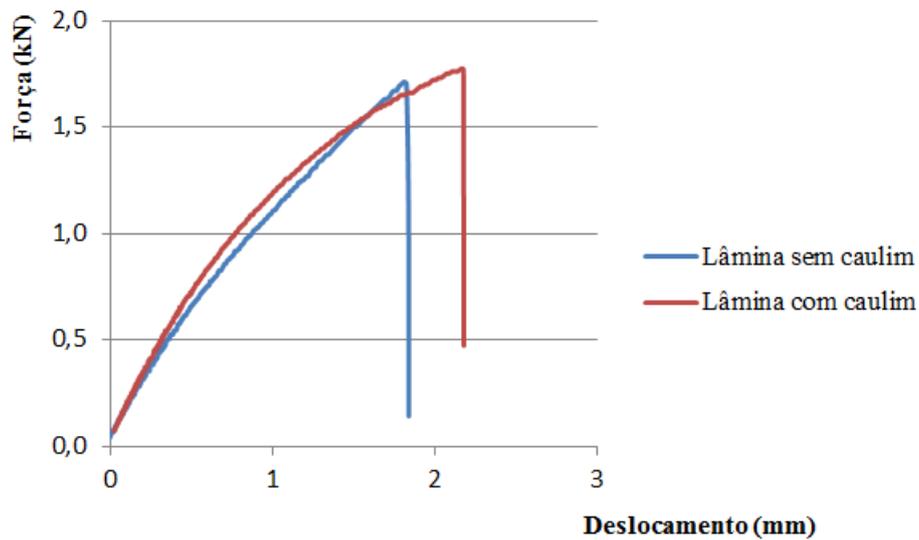


Gráfico 4.4 – Força x deslocamento em tração na lâmina.

Pelo GRAF. 4.4 é possível observar que as lâminas apresentaram comportamento praticamente elástico-linear até a ruptura. Esse comportamento foi o mesmo para todos os corpos de prova ensaiados.

O GRAF. 4.5 apresenta a resistência à tração e o GRAF. 4.6 apresenta o módulo de elasticidade à tração das lâminas sem caulim e com caulim.

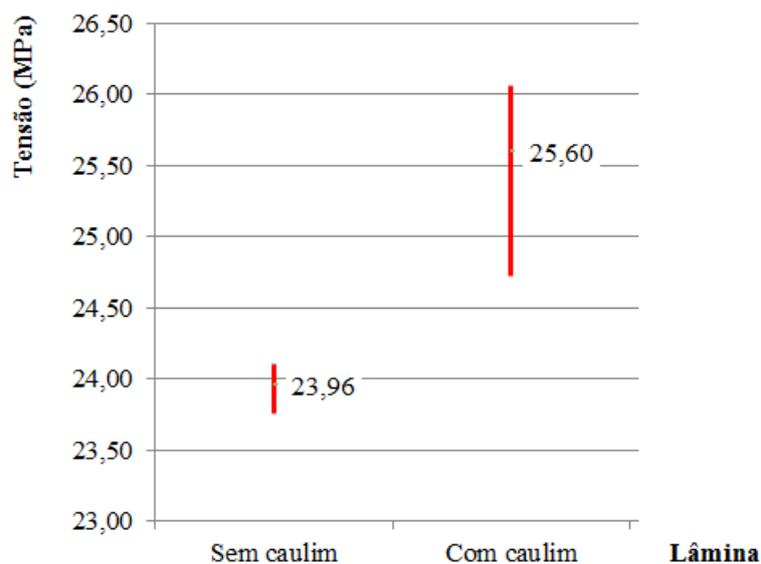


Gráfico 4.5 - Resistência à tração das lâminas.

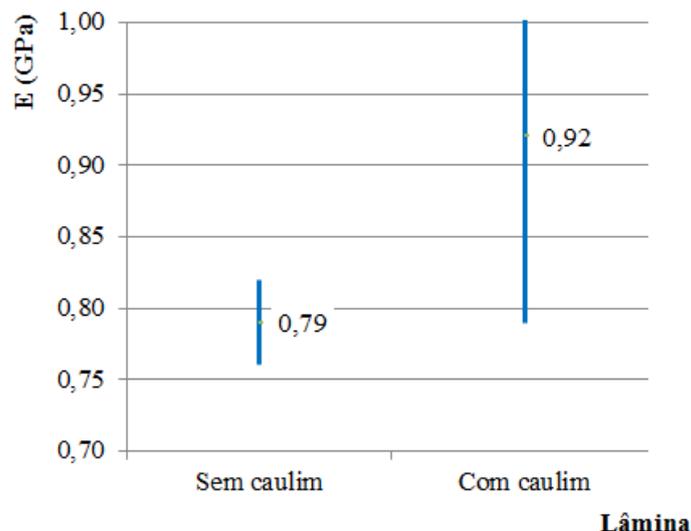


Gráfico 4.6 - Módulo de elasticidade à tração das lâminas.

Nos resultados mostrados na TAB. 4.3 e nos GRAFS. 4.4, 4.5 e 4.6 pôde ser observado que a lâmina sem caulim apresentou resistência e módulo de elasticidade menor (23,96 MPa e 0,79 GPa, respectivamente) que os resultados da lâmina com caulim (25,60 MPa, para a resistência e 0,92 GPa, de módulo), comprovando que a inclusão de 20% em massa da resina de poliéster dessa carga na lâmina melhorou o comportamento da estrutura quanto à essas propriedades.

A FIG. 4.1 apresenta os corpos de prova pós-ensaio.

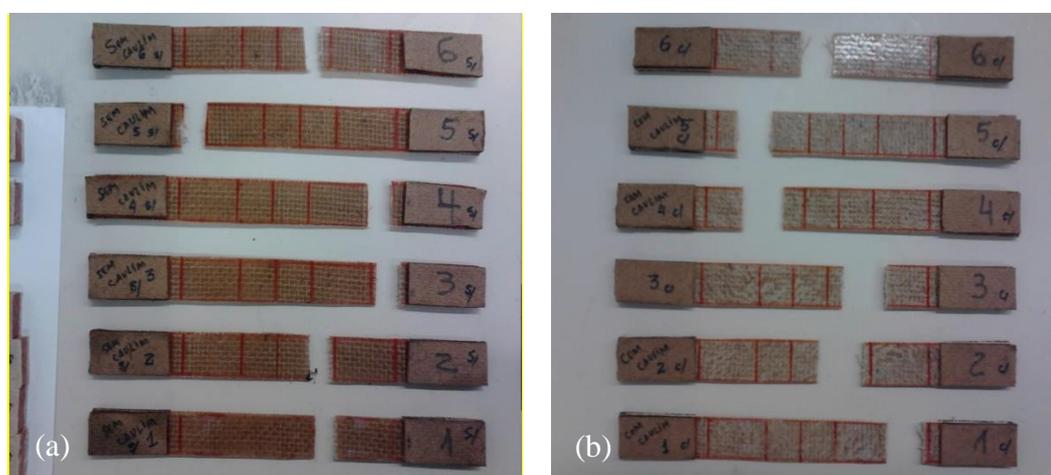


Figura 4.1 – Corpos de prova pós-ensaio: (a) cp's sem caulim e (b) cp's com caulim.  
Fonte: Própria.

No Quadro 4.1 está apresentado o comportamento dos corpos de prova após os ensaios.

Quadro 4.1 – Comportamento dos corpos de prova após o ensaio de tração nas lâminas

Lâmina	Comportamento dos cp's pós-ensaios		Total de cp's
	Rompimento quase no meio do vão	Rompimento próximo à extremidade	
Sem carga	3	3	6
Com carga	3	3	6

Na FIG. 4.2 estão as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da área rompida de um corpo de prova sem caulim ensaiado à tração. Essas imagens confirmam a ruptura frágil da matriz de poliéster e a boa adesão fibra/matriz existente nas lâminas, já que as fibras foram seccionadas quando os corpos de prova foram submetidos ao esforço de tração e não arrancadas, deixando vazios na matriz, conhecidos como *pull-out*. O fato das fibras receberem pré-tratamento com NaOH antes de serem transformadas em fios, segundo informação da empresa fabricante das telas de juta, contribuiu para retirar muitas impurezas presentes nas fibras *in natura*, retirando também as gorduras, que interferem negativamente na resistência da celulose, que é a parte estrutural das fibras vegetais. Entretanto, a tela não apresentou excelente molhabilidade pela dificuldade de penetração da resina devido à sua viscosidade.

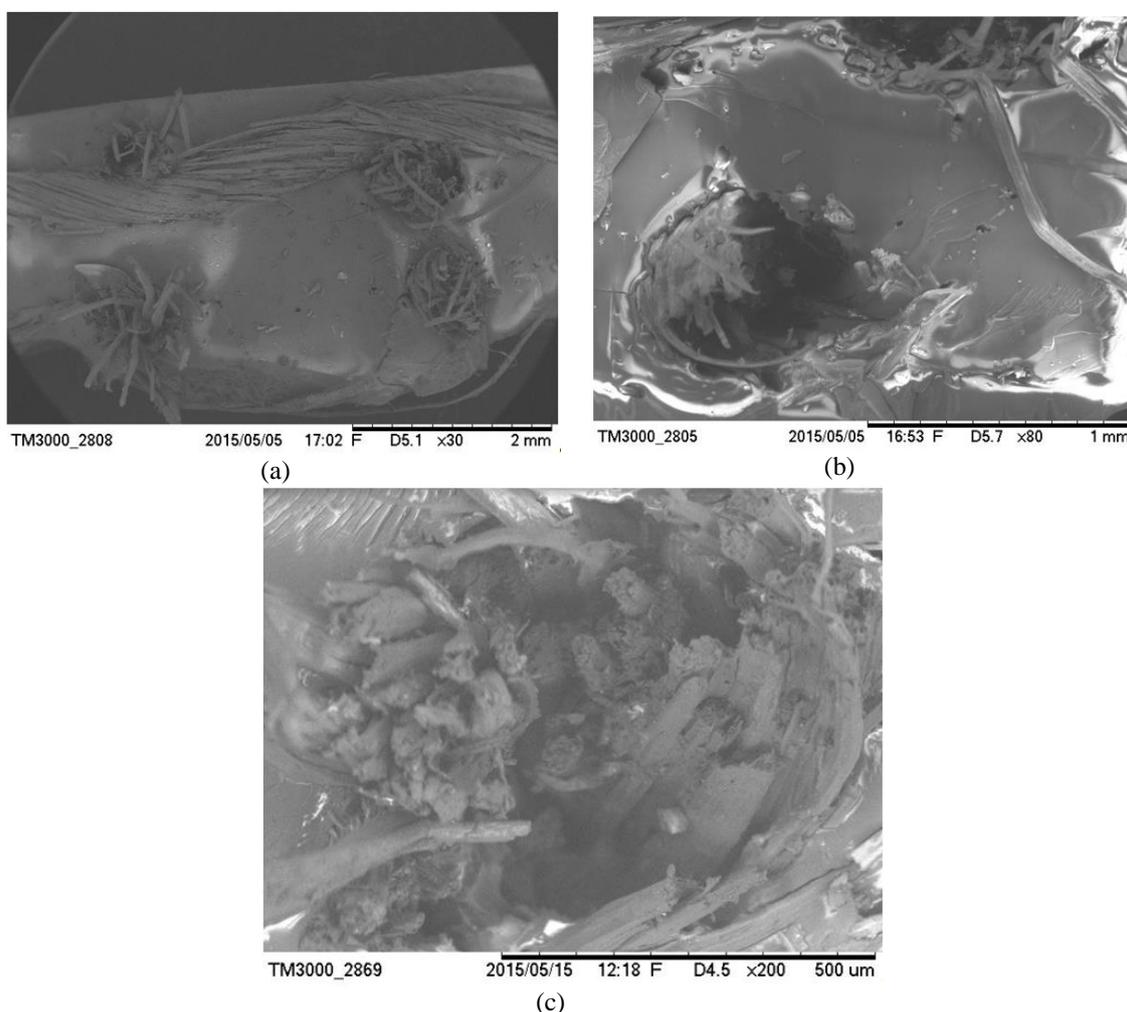


Figura 4.2 - MEV da lâmina sem caulim: (a) as fibras foram seccionadas, indicando boa adesão fibra/matriz; (b) detalhe da fibra seccionada e (c) fibras do fio do tecido: sem molhabilidade pela matriz.

Na FIG. 4.3 estão as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da área rompida de um corpo de prova com caulim ensaiado à tração.

As lâminas foram elaboradas e curadas entre placas de vidro dispostas horizontalmente, com a mistura realizada manualmente. Pela imagem (a) da FIG. 4.3 pode ser observado que, no processo de cura, o caulim sedimentou e ficou mais concentrado na parte de baixo da lâmina, parte essa que, no compósito, constituiu a parte externa da lâmina. Ou seja, o caulim não está uniformemente distribuído na matriz de poliéster, e essa concentração de carga enfraquece a matriz quanto à resistência mecânica, porém, essa concentração na face externa do compósito é desejável para funcionar como anti-chama, pois constitui uma capa protetora sobre o compósito. Entretanto, na mesma figura, (b) e (c), é possível observar que também o poliéster com caulim envolveu a tela de juta, protegendo-a. Nas três imagens dessa figura pode-se observar a boa aderência fibra/matriz.

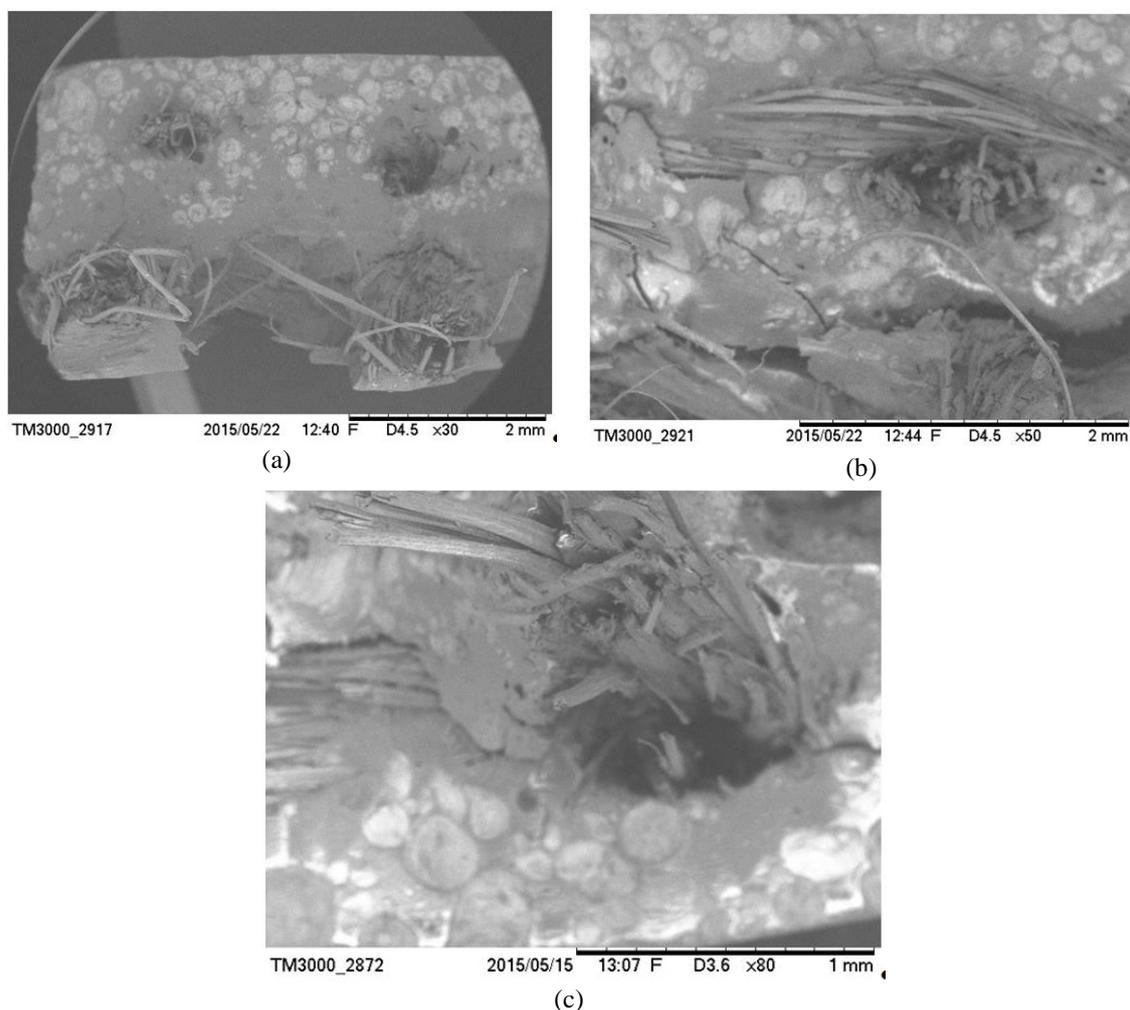


Figura 4.3 - MEV da lâmina com caulim: (a) o caulim sedimentou no processo de cura, indo mais para a parte mais externa da lâmina; (b) o caulim penetrou juntamente com a matriz nos vazios do tecido e (c) boa aderência da fibra na matriz com carga.

Comparando os resultados de tração nas lâminas com tecido de juta ao resultado de resistência à tração na mesma matriz de poliéster, de 18,34 MPa da pesquisa de Ferreira (2013) (no Cap. 2, TAB. 2.23, na p. 80), ficou evidente que a presença da tela de juta na lâmina aumentou a resistência à tração, comprovando sua atuação como

reforço, mesmo sendo constituída de uma trama com fios entrelaçados (e não esticados) com fios, por sua vez, obtidos de torções feitos nas fibras. E com a inserção de 20% em massa de caulim, a resistência à tração e o módulo de elasticidade das lâminas aumentaram mais em comparação aos resultados das lâminas sem caulim.

#### 4.3 – Resultados do ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche

Na TAB. 4.4 estão os resultados médios e seus respectivos desvios padrões do ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche

% de LV	Área de face (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\delta_{max}$ (mm)	$\varepsilon$ (%)	E (MPa)
0	648,19 ± 18,98	57,62 ± 23,00	0,09 ± 0,04	1,20 ± 0,45	7,14 ± 2,30	1,01 ± 0,31
10	643,16 ± 30,44	52,00 ± 24,86	0,08 ± 0,03	1,57 ± 1,53	2,70 ± 0,63	1,03 ± 0,02
20	655,39 ± 21,75	42,63 ± 21,18	0,06 ± 0,03	3,68 ± 0,53	2,85 ± 1,00	0,95 ± 0,34
30	661,31 ± 21,70	48,48 ± 9,50	0,07 ± 0,01	4,62 ± 0,37	2,88 ± 0,65	0,92 ± 0,10
40	650,24 ± 17,39	23,89 ± 3,49	0,05 ± 0,01	1,41 ± 0,61	2,46 ± 0,65	0,90 ± 0,17
50	675,97 ± 8,83	24,59 ± 7,10	0,04 ± 0,01	1,88 ± 1,25	2,19 ± 1,04	0,91 ± 0,21

Através da TAB. 4.4 pode ser observado que o aumento na quantidade de lama vermelha diminuiu a resistência à tração transversal da estrutura (de 0,09 MPa com 0% de lama vermelha para 0,04 MPa na estrutura com 50% de lama vermelha), o mesmo acontecendo com o módulo de elasticidade (de 1,01 MPa com 0% de lama vermelha para 0,91 MPa na estrutura com 50% de lama vermelha). O comportamento do painel é instável com relação aos valores de deslocamento, em função da composição entre o PU e a lama vermelha.

O GRAF. 4.7 apresenta a resistência à tração transversal da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

O GRAF. 4.8 apresenta o módulo de elasticidade à tração da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos, demonstrando que, praticamente, o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da quantidade de lama vermelha e, quanto à deformação (TAB. 4.4), ela também foi diminuindo com o aumento da quantidade de lama vermelha.

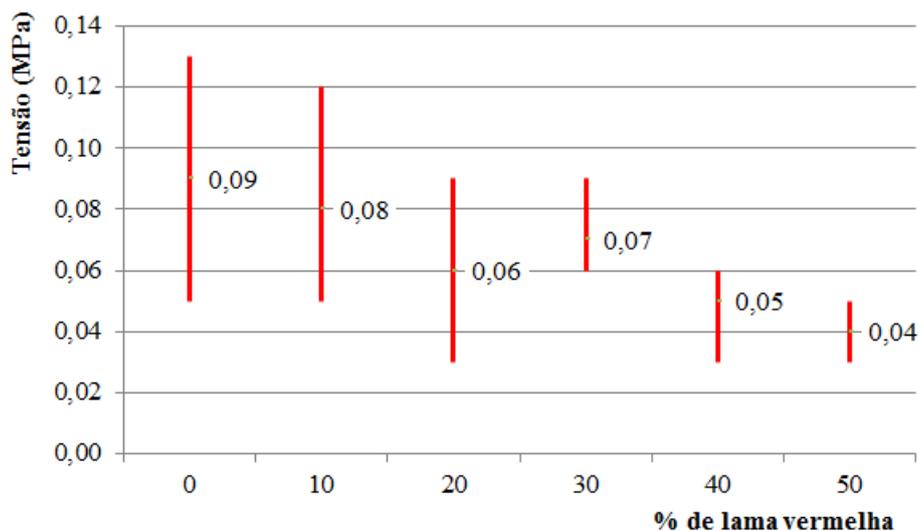


Gráfico 4.7 – Resistência à tração transversal da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

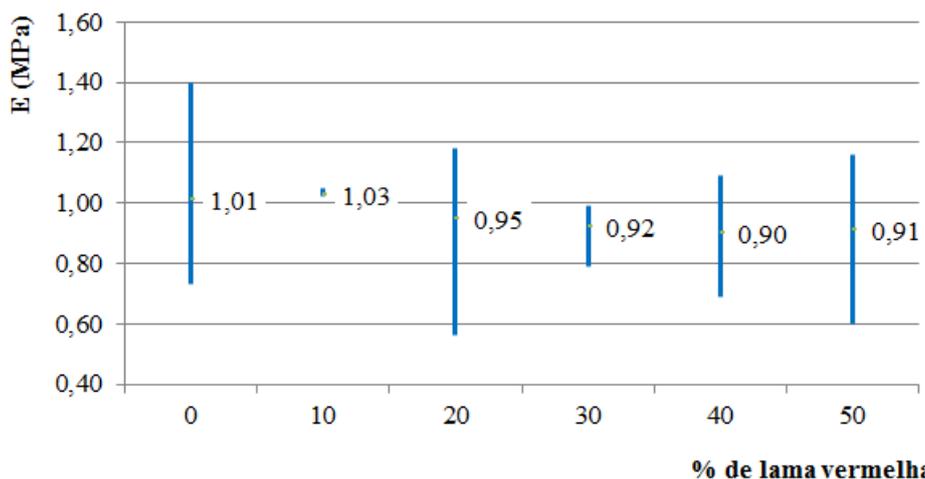


Gráfico 4.8 – Módulo de elasticidade à tração transversal da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

A FIG. 4.4 apresenta as imagens dos corpos de prova após o ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche. Nesse ensaio, os corpos de prova foram colados às plaquinhas de metal para verificação se o descolamento ocorreria nas lâminas, na interface lâmina/núcleo ou no núcleo da estrutura sanduíche e que, não foi utilizado nenhum adesivo extra, já que o PU foi expandido entre as lâminas, funcionando também como adesivo.



Figura 4.4 – Ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche: (a) cp's sem LV e (b) cp's com LV pós-ensaios.

Fonte: Maximiliano Azambuja.

No Quadro 4.2 é apresentado o comportamento dos corpos de prova durante e após os ensaios.

Quadro 4.2 – Comportamento dos corpos de prova após ensaio de tração transversal na estrutura sanduíche

Comportamento dos cp's pós-ensaios					
% de LV	Rompimento no laminado da lâmina	Rompimento na interface lâmina/núcleo	Rompimento no núcleo	Houve descolamento total	Total de cp's
0	-	4	-	1	5
10	-	2	1	2	5
20	-	1	4	-	5
30	-	-	5	-	5
40	-	-	4	1	5
50	-	-	5	-	5

Não houve rompimento no laminado que constitui a lâmina da estrutura sanduíche, comprovando a boa aderência entre as duas camadas que a constitui. A maioria das ocorrências de rompimento ocorreu no núcleo de PU (num total de 19) e alguns casos ocorreram na interface face/núcleo (num total de 6), ou seja, na adesão lâmina/núcleo. Esse resultado comprova a boa aderência da lâmina com o núcleo, que poderia ser melhorada com a utilização de um adesivo posterior à cura das duas resinas e não despejando a resina de PU entre as lâminas da estrutura, utilizando, como foi feito, a própria expansão do PU como adesivo. Inclusive, caso fosse feito a colagem das resinas posteriormente à cura do núcleo, talvez as lâminas não precisasse ser um laminado de duas camadas. Pois, essa solução foi devido ao fato de que, no processo de expansão do PU, o calor desprendido empenou a lâmina quando constituída de uma só camada. Porém, o aumento da concentração de lama vermelha na estrutura fragilizou cada vez mais o núcleo de espuma de PU, pois na estrutura com 0% de lama vermelha, o núcleo de espuma de PU se manteve mais íntegro, com o rompimento dos corpos de prova ocorrendo totalmente na interface lâmina/núcleo. Portanto, o aumento da lama vermelha na estrutura, alterou o modo de falha da mesma: as estruturas sem lama e com 10% de LV apresentaram falhas na interface lâmina/núcleo e a partir de 20% de LV na

estrutura, as falhas predominaram no núcleo, mostrando que a espuma foi sendo fragilizada pelo incremento de lama.

#### 4.4 – Resultados do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche

Esse ensaio foi realizado com o intuito de verificar o comportamento da estrutura sanduíche quanto à instabilidade provocada pela aplicação de esforços paralelos à lâmina que podem levar a estrutura à ruptura.

Na TAB. 4.5 estão os resultados médios e respectivos desvios padrões do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche

% de LV	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (N)	$\delta_{max}$ (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)
0	360,58 ± 1,67	4.337,00 ± 651,82	1,63 ± 0,26	12,03 ± 1,85
10	360,00 ± 0,71	3.393,70 ± 151,71	1,55 ± 0,13	9,43 ± 0,44
20	358,10 ± 4,32	3.496,87 ± 431,90	1,23 ± 0,10	9,77 ± 1,25
30	358,88 ± 0,60	3.262,81 ± 253,90	1,35 ± 0,22	9,09 ± 0,70
40	359,45 ± 4,82	3.215,62 ± 178,20	1,26 ± 0,24	8,95 ± 0,48
50	361,68 ± 0,14	3.497,61 ± 130,04	1,50 ± 0,33	9,67 ± 0,36

O GRAF. 4.9 representa a relação força x deslocamento dos corpos de prova para cada tratamento e o GRAF. 4.10 apresenta uma comparação entre as tensões máximas da estrutura.

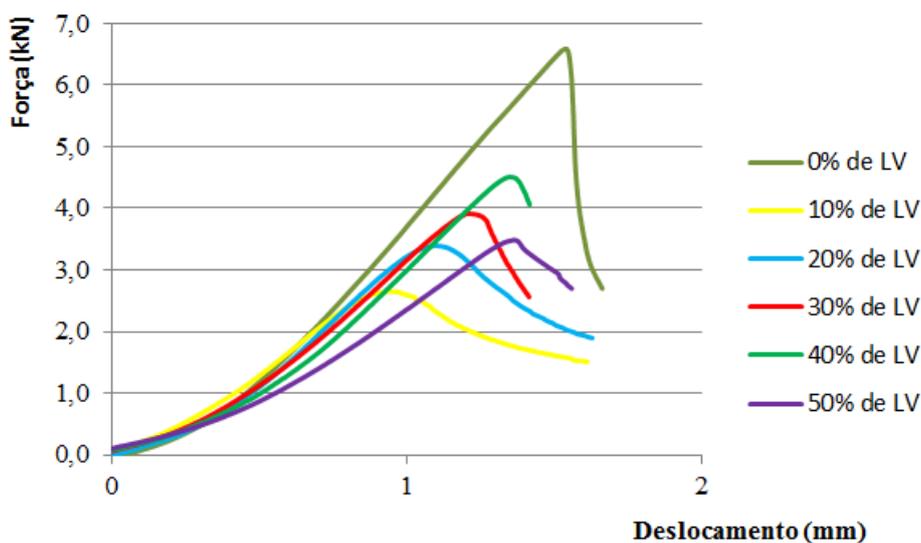


Gráfico 4.9 – Força x deslocamento no ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.

Através do GRAF. 4.9 pode ser observado que a estrutura sem lama vermelha apresentou o melhor resultado quanto ao ensaio de compressão longitudinal e as estruturas com lama apresentaram comportamentos sem grande variação entre eles, fato esse que pode ser visualizado no GRAF. 4.10. Entretanto, mesmo concluindo que, quanto a esse ensaio, as lâminas foram preponderantes na resistência a esse esforço, o resultado da estrutura sanduíche sem lama foi melhor que os das estruturas com lama

vermelha, indicando que a presença de lama vermelha enfraqueceu a ligação lâmina/núcleo, contribuindo para a instabilidade que levou os corpos de prova à ruptura.

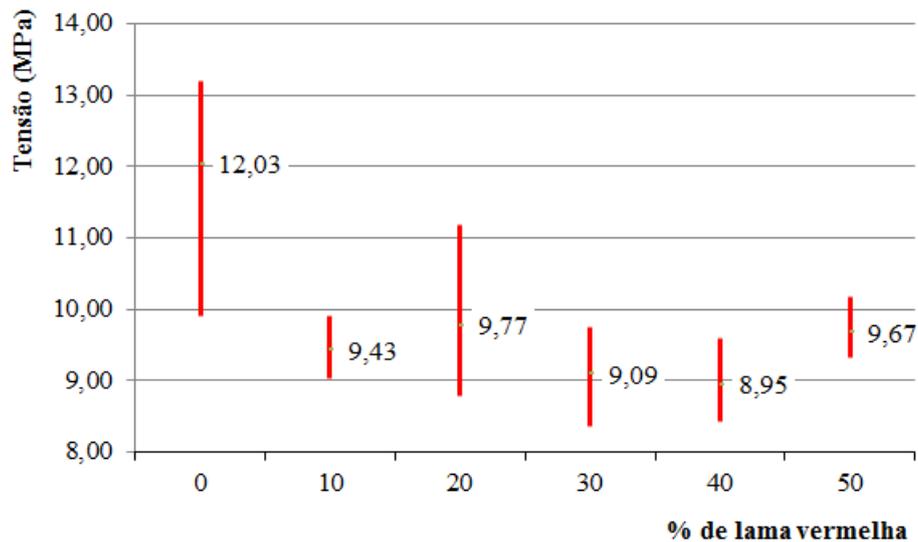


Gráfico 4.10 – Comparação entre as tensões máximas à compressão longitudinal na estrutura sanduíche.

O resultado indica que o comportamento dessa estrutura quanto a esse ensaio foi dominado pela resistência das lâminas, pois o núcleo não apresentou qualquer resistência a esse esforço. Pode-se observar que não houve influência da variação na quantidade da lama vermelha nessa estrutura quanto à resistência, entretanto, ocorreu um decréscimo na tensão máxima somente pelo fato da presença de lama na estrutura.

A FIG. 4.5 mostra as imagens do ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche.

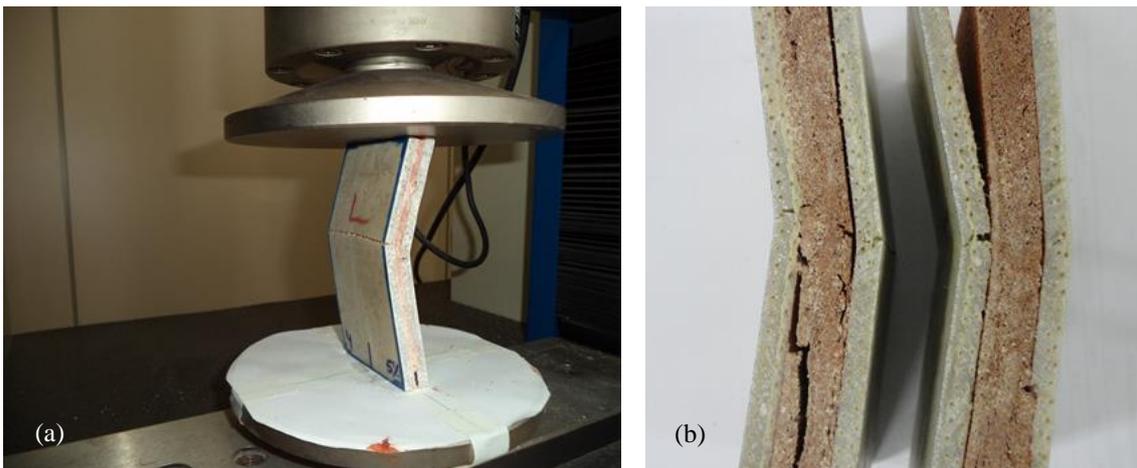


Figura 4.5 – Ensaio de compressão longitudinal na estrutura sanduíche: (a) rompimento do corpo de prova e (b) detalhe dos corpos de prova rompidos.

Fonte: Própria.

O QUADRO 4.3 e a FIG. 4.6 mostram o que ocorreu com os corpos de prova após serem ensaiados.

Quadro 4.3 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de compressão longitudinal na estrutura sanduíche

% de LV	Nº de cp's com trinca somente na lâmina	Nº de cp's com trincas internas	Local de ocorrência das trincas internas	Total de CP's ensaiados
0	5	-	-	5
10	4	1	- na interface lâmina/núcleo	5
20	1	4	- na interface lâmina/núcleo	5
30	-	5	- 4 na interface lâmina/núcleo e 1, no meio do núcleo	5
40	1	4	- na interface lâmina/núcleo, sendo que 1 delaminou completamente	5
50	-	5	- 3 na interface lâmina/núcleo e 2 no meio do núcleo	5

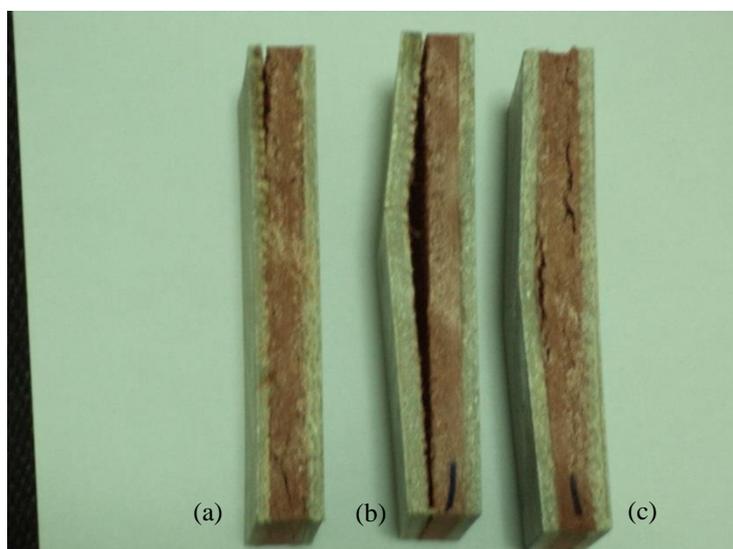


Figura 4.6 – Trincas nos cp's no ensaio de compressão longitudinal: (a) entre lâmina/núcleo na extremidade, (b) delaminação total e (c) no núcleo, próximas à ruptura da lâmina.

Fonte: Própria.

Inicialmente as trincas aparecem nas lâminas da estrutura devido à flambagem das mesmas e, depois elas provocaram as delaminações e/ou as trincas no núcleo. Pode-se perceber que as trincas internas aparecem mais com o aumento da quantidade de lama vermelha, demonstrando que o incremento de lama vermelha fragilizou a estrutura tanto na interface lâmina/núcleo como no núcleo, porém, influenciando muito mais no descolamento da lâmina do núcleo. Portanto, o modo de falha, quanto a esse ensaio, dependeu da quantidade de lama vermelha na estrutura: nas estruturas sem lama e com 10% de LV, as falhas ocorreram nas lâminas somente. A partir de 20% de LV, as trincas das lâminas foram atingir a interface lâmina/núcleo, provocando o descolamento da estrutura e na estrutura com 50% de LV, a falha começou a aparecer no núcleo, demonstrando a fragilização da espuma com o aumento da LV.

#### 4.5 - Resultados do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche

Os valores médios e respectivos desvios padrões para os resultados do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche estão na TAB. 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche

% de LV	Área (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\delta_{max}$ (mm)	$\varepsilon$ (%)	$E$ (GPa)
0	633,03 ± 15,09	25,00 ± 0,10	39,51 ± 0,99	1,65 ± 0,42	9 ± 3	0,24 ± 0,07
10	559,52 ± 11,92	25,03 ± 0,06	44,75 ± 0,91	1,55 ± 0,38	8 ± 0	0,23 ± 0,01
20	589,44 ± 15,88	25,03 ± 0,06	42,49 ± 1,04	1,68 ± 0,18	6 ± 2	0,25 ± 0,01
30	547,62 ± 6,82	25,03 ± 0,06	45,72 ± 0,56	2,08 ± 0,06	9 ± 2	0,21 ± 0,05
40	561,45 ± 4,55	25,07 ± 0,06	44,65 ± 0,46	2,00 ± 0,24	11 ± 1	0,20 ± 0,02
50	553,93 ± 9,28	25,07 ± 0,06	45,26 ± 0,77	2,00 ± 0,29	9 ± 1	0,21 ± 0,04

Os resultados da TAB 4.6 indicam que a presença da lama vermelha fez com que a resistência à compressão aumentasse na estrutura sanduíche praticamente independente da concentração de lama. A deformação foi semelhante para todas as concentrações de lama e o módulo se apresentou estável, com poucas variações de valores, demonstrando que a estabilidade do painel, com relação à compressão, foi predominantemente determinada pelas lâminas.

O GRAF. 4.11 mostra a relação força x deslocamento no ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.

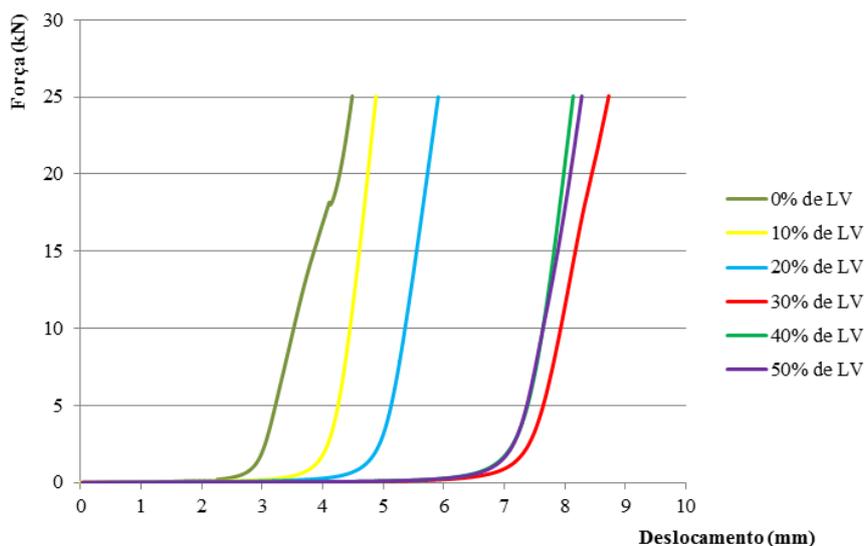


Gráfico 4.11 – Força x deslocamento no ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche.

Nesse gráfico pode ser observado que no processo de compressão da espuma de PU, aconteceram grandes deslocamentos sem carga alguma. Os deslocamentos computados na TAB. 4.6 foram deslocamentos ocorridos com aplicação de força. No ensaio foi verificado, de uma maneira geral, que inicialmente a espuma de PU era comprimida até o encontro das faces e, a partir daí, começava o aumento da força aplicada até uma das faces trincar. As trincas nas lâminas aconteceram nas estruturas com uma força aproximada de 25kN, independente da composição de cada um. Nesse ensaio ficou evidenciado que o núcleo não apresentou quase nenhuma resistência e que as lâminas é que apresentaram resistências efetivas a esse tipo de esforço.

Os GRAFs. 4.12 e 4.13 apresentam, comparativamente, a tensão máxima e o módulo de elasticidade à compressão transversal da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos. Através deles podem ser observados que a inserção da lama vermelha aumentou a resistência à compressão e reduziu o módulo de elasticidade da estrutura, porém, independente da quantidade de lama. Pode ser observado também, que com o incremento da lama vermelha, o PU foi se tornando mais quebradiço.

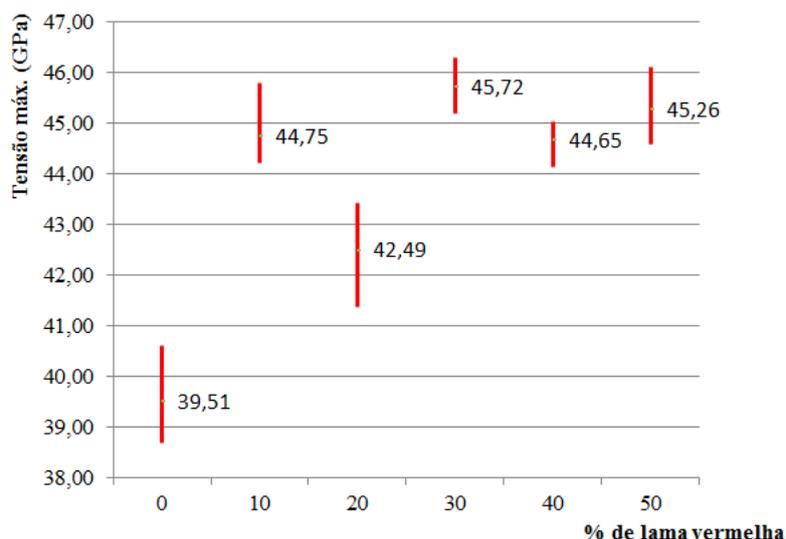


Gráfico 4.12– Tensão máxima à compressão transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

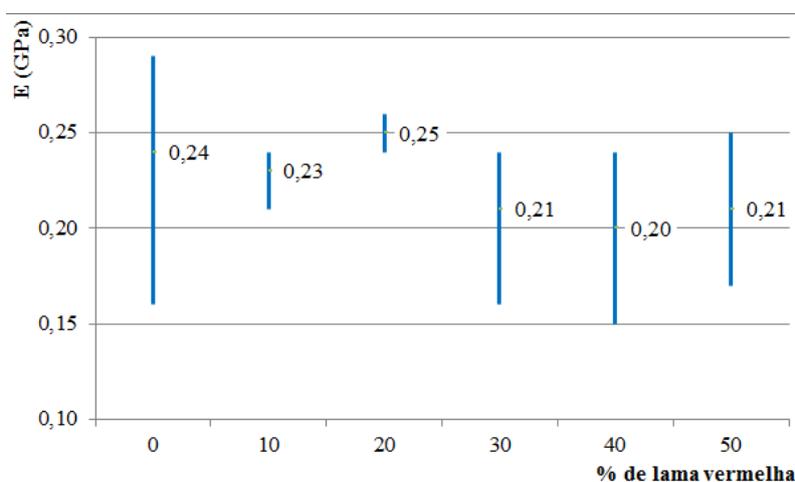


Gráfico 4.13 – Módulo de elasticidade à compressão transversal na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

A FIG. 4.7 ilustra alguns aspectos de um corpo de prova com 30% de LV quanto ao ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche. Através dela, pode ser observado que a espuma do núcleo sofreu uma deformação permanente, sendo totalmente esmagada. Isso ocorreu em todas as estruturas, com ou sem lama vermelha, porém, quanto maior a quantidade de lama na estrutura, maior foi o esmagamento e a deformação permanente, demonstrando que a espuma de PU foi se fragilizando com o incremento de lama.

O QUADRO 4.4 está o que ocorreu com os corpos de prova após serem ensaiados. Todos os corpos de prova tiveram seus núcleos esmagados, as trincas nas lâminas apareceram sempre na lâmina inferior dos corpos de prova e somente um corpo de prova apresentou, após o ensaio, delaminação de apenas uma lâmina.

Quadro 4.4 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de compressão transversal na estrutura sanduíche

% de LV	Nº de cp's com esmagamento do núcleo	Nº de cp's com trincas na lâmina inferior*	Nº de cp's com delaminação	Total de CP's ensaiados
0	4	3	-	4
10	4	2	-	4
20	4	3	-	4
30	4	2	-	4
40	4	3	-	4
50	4	3	1	4

\* Trincas de fácil visualização.

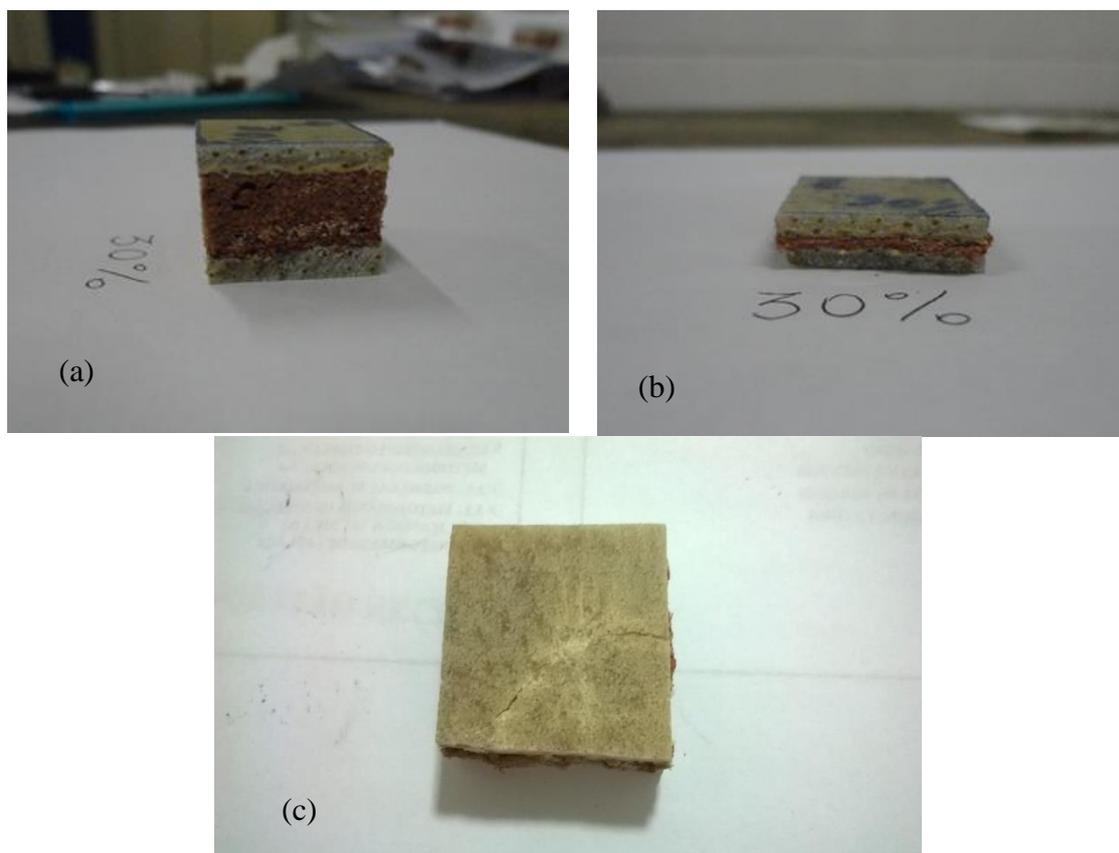


Figura 4.7 – Ensaio de compressão transversal na estrutura sanduíche: (a) cp antes do ensaio, (b) cp com esmagamento do núcleo após ensaio e (c) trincas na lâmina inferior após o ensaio.

Fonte: Própria.

Nesses ensaios, as deformações foram entre 6 a 11% (TAB 4.8) e, considerando que a deformação na estrutura com 0% de LV, verifica-se que o PU bem como a LV não contribuíram para melhorar a resistência à compressão dos painéis. Após o esmagamento do núcleo, começava o aumento da força aplicada até uma das faces trincar, com resultados que independeram da composição de cada estrutura, ressaltando que a resistência a esse esforço foi realizada predominantemente pelas lâminas. A falha por esmagamento foi o modo de falha predominante em todas as estruturas, independente do tratamento.

#### 4.6 – Resultados do ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche

O ensaio de flexão por três pontos foi aplicado na estrutura sanduíche para dois vãos diferentes para efeito de comparação por recomendação da norma. Os vãos escolhidos foram de 100 e 150 mm. Para o vão menor (de 100 mm), os valores da força máxima deve ser maiores do que os valores da força máxima pra o vão maior (de 150 mm) e quanto ao módulo de elasticidade, os valores do módulo para o vão de 100 mm devem ser menores do que os valores do módulo do vão maior (de 150 mm).

Na TAB. 4.7 estão os resultados obtidos no ensaio de flexão para o vão de 100 mm (valores médios).

Tabela 4.7 - Resultados do ensaio de flexão por três pontos na estrutura sanduíche – Vão de 100 mm

% de LV	Área (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Flecha máxima (mm)	E (GPa)
0	473,08 ± 17,70	209,94 ± 12,92	4,19 ± 0,06	10,79 ± 0,31	0,10 ± 0,08
10	476,47 ± 7,43	194,96 ± 21,20	3,93 ± 0,28	8,75 ± 0,41	0,10 ± 0,08
20	485,46 ± 9,33	191,82 ± 8,32	3,62 ± 0,20	8,66 ± 1,02	0,11 ± 0,02
30	449,03 ± 15,93	155,24 ± 5,74	3,41 ± 0,14	13,69 ± 1,36	0,14 ± 0,04
40	442,74 ± 28,08	132,67 ± 6,81	3,02 ± 0,38	6,33 ± 3,14	0,14 ± 0,03
50	450,79 ± 6,08	131,71 ± 4,76	2,91 ± 0,12	10,09 ± 1,42	0,10 ± 0,03

No ensaio para o vão de 100 mm, a força máxima foi diminuindo com o incremento da lama vermelha na estrutura, ocorrência essa que pode ser observada através do GRAF. 4.14. A tensão máxima que é diretamente proporcional à força, também foi influenciada, diminuindo com o aumento da quantidade de lama vermelha (GRAF. 4.15). O módulo de elasticidade foi aumentando nos compósitos até aos que continham 30% de lama vermelha. A partir daí, o módulo começou a diminuir (GRAF. 4.16).

No GRAF. 4.14 está a relação força x deslocamento em flexão para o vão de 100 mm.

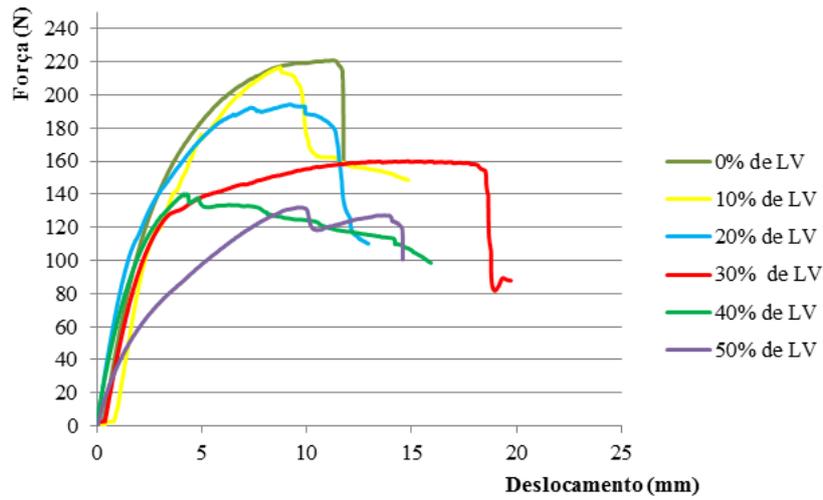


Gráfico 4.14 – Relação força x deslocamento à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100 mm.

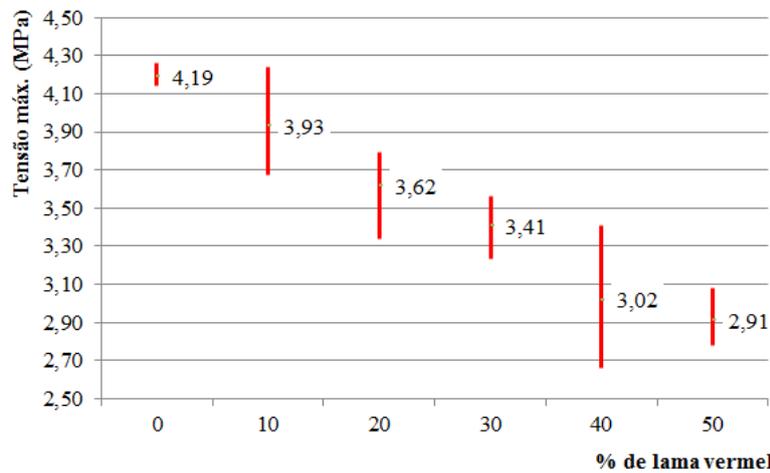


Gráfico 4.15 – Tensões máximas à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100 mm.

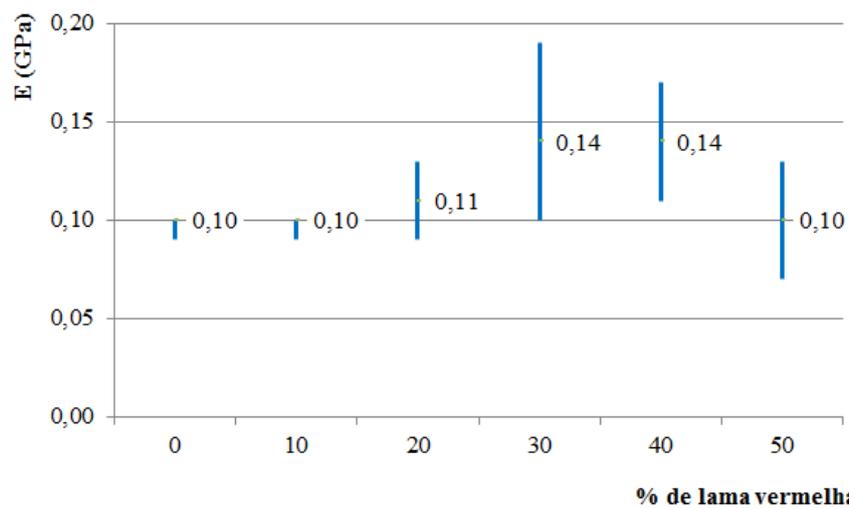


Gráfico 4.16 – Módulos de elasticidade à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 100 mm.

Na TAB. 4.8 estão os resultados obtidos no ensaio de flexão para o vão de 150 mm.

Tabela 4.8 - Resultados do ensaio de Flexão na estrutura sanduíche – Vão de 150 mm

% de LV	Área (mm <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (N)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Flecha máxima (mm)	E (GPa)
0	484,12 ± 8,90	155,81 ± 2,39	4,48 ± 0,13	15,85 ± 2,26	0,18 ± 0,04
10	464,49 ± 14,53	131,80 ± 2,77	4,06 ± 0,16	8,99 ± 2,90	0,26 ± 0,03
20	435,39 ± 13,15	98,28 ± 2,47	3,51 ± 0,12	5,38 ± 0,47	0,29 ± 0,02
30	422,25 ± 14,45	89,95 ± 8,19	3,36 ± 0,34	4,29 ± 1,72	0,42 ± 0,02
40	434,31 ± 8,81	75,69 ± 3,93	2,68 ± 0,13	4,64 ± 0,39	0,26 ± 0,01
50	441,21 ± 2,28	54,02 ± 2,95	1,84 ± 0,10	7,80 ± 5,05	0,16 ± 0,02

Para o vão de 150 mm, o comportamento dos corpos de prova foram semelhantes ao do vão de 100 mm: a força máxima foi diminuindo com o incremento da lama vermelha na estrutura (GRAF. 4.17), a tensão máxima diminuiu com o aumento da quantidade de lama vermelha (GRAF. 4.18) e o módulo de elasticidade foi aumentando nos compósitos até aos que continham 30% de lama vermelha. A partir daí, o módulo começou a diminuir (GRAF. 4.19).

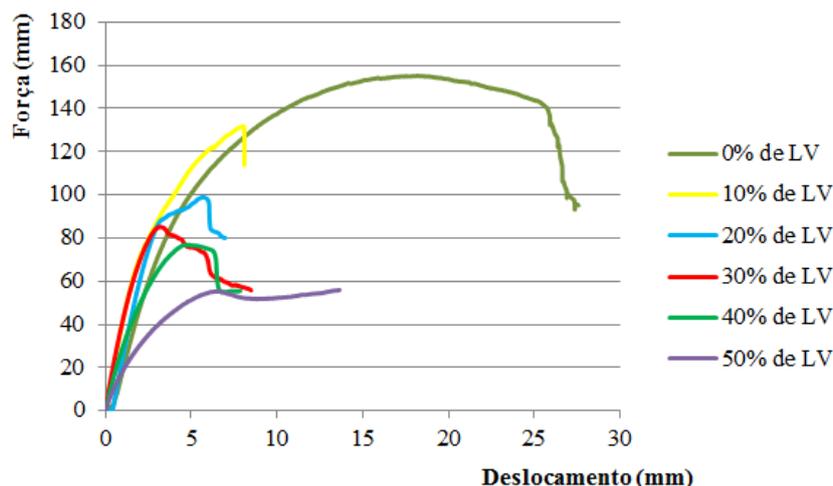


Gráfico 4.17 – Relação força x deslocamento à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 150 mm.

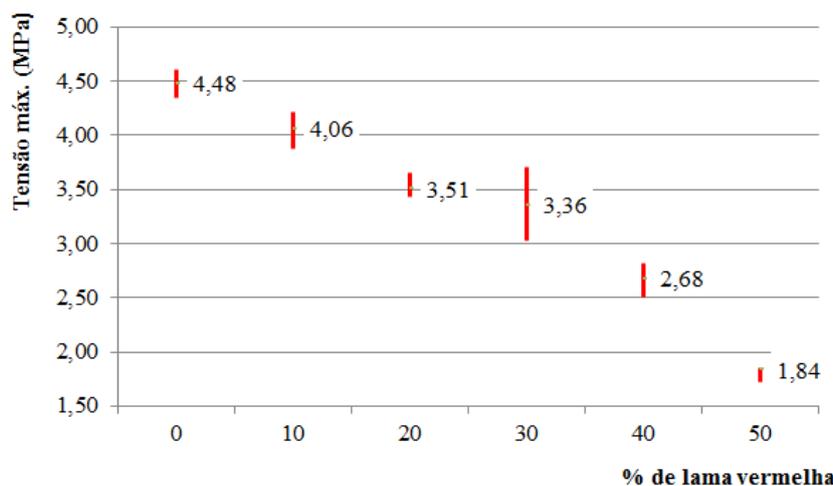


Gráfico 4.18 – Tensões máximas à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 150 mm.

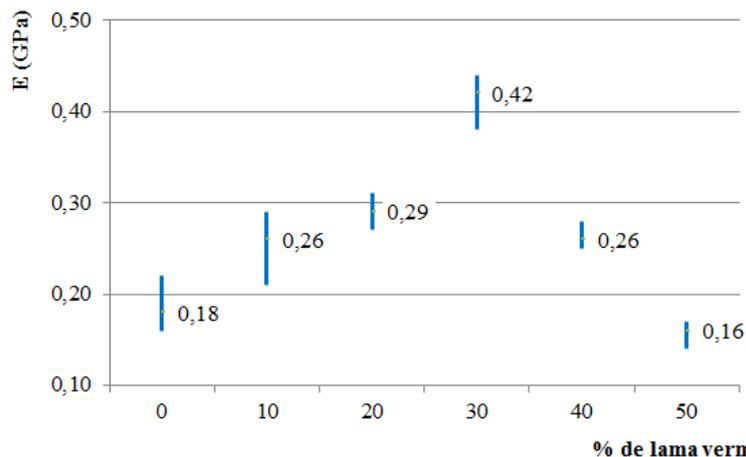


Gráfico 4.19 – Módulos de elasticidade à flexão da estrutura sanduíche para o vão de 150 mm.

A FIG. 4.8 ilustra os corpos de prova após o ensaio de flexão na estrutura sanduíche. Através dela, pode ser observado que, nos corpos de prova com lama vermelha, as trincas iniciaram pelas extremidades dos corpos de prova, na interface lâmina/núcleo provocando as delaminações e, em alguns, foram sendo transferidas para o núcleo de PU, comprovando a resistência insuficiente da espuma de PU com lama ao esforço cisalhante. A exceção foi feita para as estruturas com 0% de lama vermelha, que trincaram nas lâminas sem aparentemente apresentarem trincas no núcleo.

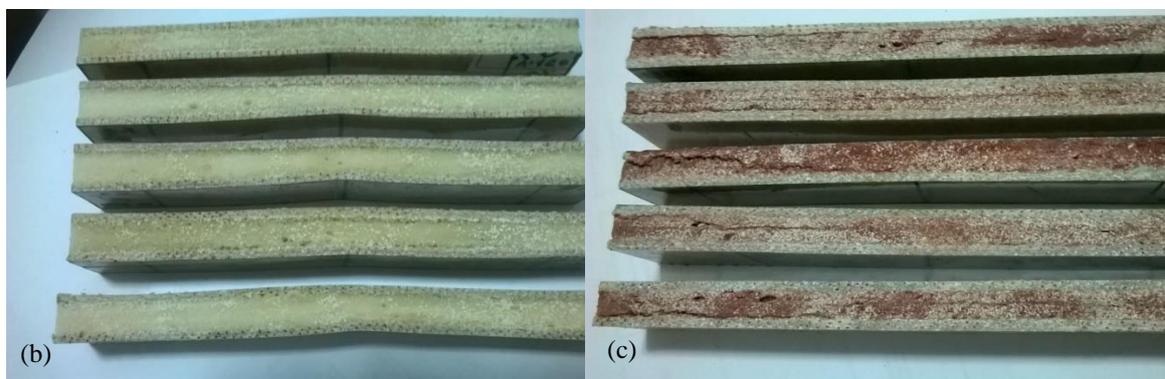


Figura 4.8 – Ensaio de flexão na estrutura sanduíche: (a) cp sofrendo ruptura nas lâminas, (b) cps com 0% de LV aparentemente sem trincas no núcleo e sem delaminações e (c) cps com 40% de LV rompidos, com trincas nos núcleos e delaminações parciais.

Fonte: Própria.

No QUADRO 4.5 verifica-se o comportamento dos corpos de prova pós-ensaio de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 100 mm.

Quadro 4.5 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 100 mm

% de LV	Nº de cp's sem trincas	Nº de cp's com trincas	Local de ocorrência	Total de cp's
0	-	5	- Somente nas lâminas	5
10	-	5	- 4 somente nas lâminas - 1 na interface lâmina/núcleo	5
20	-	5	- 5 nas lâminas, com 3 na interface lâmina/núcleo	5
30	4	1	- na interface lâmina/núcleo	5
40	-	5	- no meio do núcleo	5
50	1	4	- no meio do núcleo	5

Para o vão de 100 mm, pode ser observado que o aumento da quantidade de lama vermelha foi interferindo negativamente na união do núcleo com as lâminas, enfraquecendo essa ligação e também fragilizando a espuma de PU, tornando o núcleo mais quebradiço, com exceção da estrutura com 0% de lama vermelha, que apresentaram trincas somente nas lâminas, sem delaminações na interface lâmina/núcleo e trincas visíveis no núcleo, comprovando a boa aderência lâmina/núcleo quando da ausência de lama vermelha.

No QUADRO 4.6 verifica-se o comportamento dos corpos de prova pós-ensaio de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 150 mm.

Para o vão de 150 mm, o comportamento dos corpos de prova foi bastante semelhante aos resultados do ensaio de flexão para o vão de 100 mm.

Quadro 4.6 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de flexão na estrutura sanduíche para o vão de 150 mm

% de LV	Nº de cp's sem trincas	Nº de cp's com trincas	Local de ocorrência da trinca	Total de cp's
0	-	5	- Somente nas lâminas	5
10	1	4	- na interface lâmina/núcleo	5
20	-	5	- 3 na interface lâmina/núcleo, 1 no meio do núcleo e 1 trincou de uma borda à outra	5
30	-	5	- na interface lâmina/núcleo	5
40	-	5	- no meio do núcleo	5
50	-	5	- no meio do núcleo	5

Conforme previsto por norma, os valores de força máxima ( $F_{max}$ ) para os ensaios de 100 mm foram maiores em comparação aos ensaios em vão de 150 mm. Da

mesma forma que, para (E) em ensaios em vão de 100 mm, os valores foram inferiores com relação aos ensaios em vão de 150 mm.

Quanto ao modo de falha, foi semelhante para o vão de 100 e de 150 mm, com as estruturas sem lama e com 10% de LV apresentando falhas nas lâminas (de compressão nas lâminas superiores e de tração nas lâminas inferiores), as estruturas com 20 e 30% de LV apresentando, além das falhas nas lâminas, falhas na interface lâmina/núcleo por tensões cisalhantes e as estruturas com 40 e 50% de LV apresentaram, também além das falhas nas lâminas, falhas no núcleo, demonstrando a fragilização do núcleo com o incremento de lama vermelha.

#### 4.7 – Resultados do ensaio de impacto Charpy na estrutura sanduíche

Os resultados do ensaio de impacto Charpy estão na TAB. 4.9 (valores médios).

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio de impacto Charpy

Compósitos	Área de impacto (mm <sup>2</sup> )	Energia absorvida (J)	Resistência ao impacto (kJ/m <sup>2</sup> )
Com 0 % de LV	199,48 ± 7,17	3,00 ± 0,35	15,05 ± 1,82
Com 10 % de LV	194,44 ± 9,98	2,86 ± 0,22	14,74 ± 1,42
Com 20 % de LV	198,38 ± 10,85	2,64 ± 0,22	13,33 ± 1,14
Com 30 % de LV	198,18 ± 9,27	2,28 ± 0,22	11,52 ± 1,18
Com 40 % de LV	189,67 ± 8,58	2,18 ± 0,20	11,48 ± 0,72
Com 50 % de LV	181,54 ± 0,95	2,08 ± 0,11	11,46 ± 0,60

A estrutura que absorveu maior quantidade de energia foi a sem lama vermelha (0% de LV). Com o aumento da quantidade de lama vermelha nas estruturas, as energias absorvidas por elas foram sendo reduzidas. Esse fato contribui para afirmar que, quanto maior o incremento de lama vermelha na estrutura sanduíche, mais as espumas de PU, que constituem os núcleos das estruturas, foram ficando fragilizadas. No GRAF. 4.20 pode ser visualizado que a energia absorvida no impacto foi sendo reduzida quase inversamente proporcional ao incremento de lama vermelha, (o incremento de 10 em 10% de lama vermelha influenciando quase que de 10 em 10% na redução da energia absorvida). Conseqüentemente, a resistência ao impacto foi maior na estrutura sem lama vermelha e foi diminuindo com o aumento na quantidade de lama vermelha nessa estrutura (GRAF. 4.21).

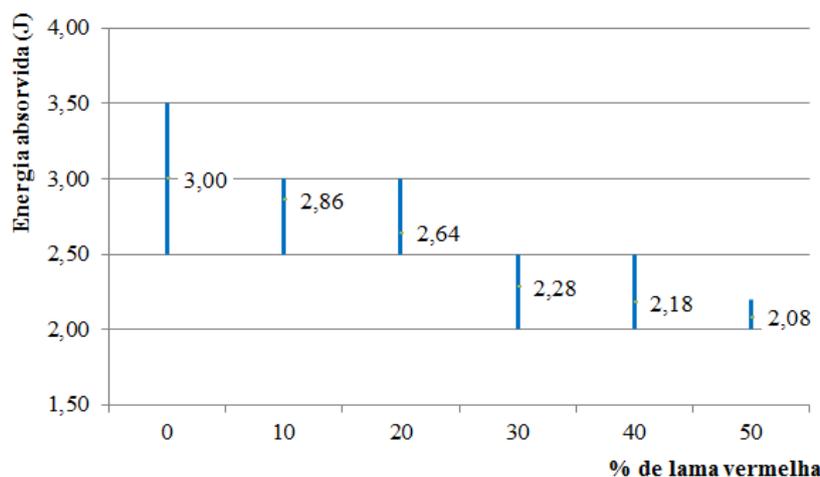


Gráfico 4.20 – Energia absorvida no ensaio de impacto na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

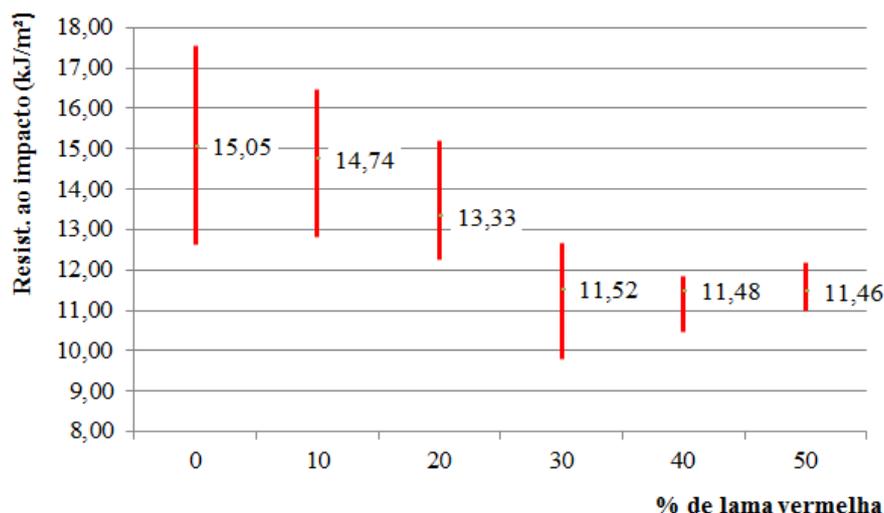


Gráfico 4.21 - Resistência ao impacto na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

Na FIG. 4.9 estão todos os corpos de prova ensaiados quanto ao impacto Charpy conforme o tratamento recebido e o QUADRO 4.7 resume o que ocorreu com cada um deles.

Quadro 4.7 – Comportamento dos corpos de prova pós-ensaios de impacto Charpy

% de LV	Ocorrências
0	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sendo que 3 apresentaram trincas extras verticais na lâmina de impacto.
10	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sem trincas adicionais.
20	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sem trincas adicionais, porém, ocorreu 1 delaminação da lâmina de impacto da metade do cp ensaiado.
30	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sem trincas adicionais.
40	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sem trincas adicionais.
50	- Todos os 5 cp's romperam totalmente, expondo os fios da tela de juta, sem trincas adicionais.

Pode ser observado que todos os corpos de prova romperam exatamente no ponto de aplicação do impacto e que, para todas as estruturas com lama vermelha, os cp's não apresentaram nenhuma outra trinca sobre as faces dos mesmos. Já na estrutura sem lama vermelha (0% de LV), apareceram trincas adicionais sobre as lâminas de impacto de três corpos de prova, demonstrando que a energia absorvida não ficou concentrada no ponto de impacto do pêndulo e que foi sendo distribuída sobre as lâminas, pois as trincas estão bem próximas do ponto de impacto sobre os corpos de prova. Quanto à delaminação de uma lâmina da metade de um corpo de prova com 20% de LV, pode ser consequência de um defeito de fabricação, pois todos os outros corpos de prova de diferentes tratamentos, inclusive os sem lama vermelha, não apresentaram delaminações, indicando que houve uma boa ligação lâmina/núcleo nas estruturas sanduíche.



Figura 4.9 – Corpos de prova pós-ensaio de impacto Charpy.  
Fonte: Própria.

Quanto aos modos de falha ocorridos nesse ensaio, houve falha à compressão da lâmina que recebeu o impacto, falha por corte do núcleo e falha da lâmina posterior ao impacto devido às cargas de tração, independente do tratamento das estruturas, comprovando que o núcleo, com essa espuma de PU, não apresentou resistência ao esmagamento.

#### 4.8 - Resultados do ensaio de flamabilidade na lâmina e na estrutura sanduíche

Na TAB. 4.10 estão os valores médios e seus desvios quanto ao comportamento dos corpos de prova submetidos ao ensaio de flamabilidade horizontal, quanto ao tempo de queima, extinção da chama e vazão ou taxa de queima ( $V_q$ ). Inicialmente, foi ensaiada somente a lâmina da estrutura, primeiramente elaborada sem caulim e depois, com caulim (20% em massa da resina de poliéster) para verificação da influência do

caulim como retardante de chama. Na mesma tabela estão os resultados do comportamento quanto à flamabilidade da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

Tabela 4.10 – Resultados do ensaio de flamabilidade horizontal na lâmina e na estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos (valores médios)

Material	Seção (mm <sup>2</sup> )	Tempo de queima (min)	Extinção da chama		V <sub>q</sub> (mm/min)	
			Sim	Não		
Lâmina	Lâmina (sem caulim)	37,92 ± 2,33	5:59,8 ± 0:09,4		X	12,51 ± 0,32
	Lâmina (com caulim)	35,83 ± 2,37	6:54,9 ± 0:11,1		X	10,85 ± 0,29
Estrutura sanduíche	Com 0% de LV	231,76 ± 2,96	7:24,4 ± 0:12,4		X	10,13 ± 0,29
	Com 10% de LV	195,33 ± 4,04	7:27,5 ± 0:23,0		X	10,07 ± 0,51
	Com 20% de LV	167,40 ± 2,06	5:02,0 ± 0:08,2		X	14,91 ± 0,40
	Com 30% de LV	184,45 ± 13,38	5:59,8 ± 0:02,5		X	12,51 ± 0,09
	Com 40% de LV	175,25 ± 3,39	6:51,0 ± 0:11,0		X	10,96 ± 0,29
	Com 50% de LV	174,87 ± 5,56	6:12,0 ± 0:10,3		X	12,10 ± 0,33

Obs: Todos os corpos de prova queimaram até a marca de 100 mm, portanto, segundo a norma, deve ser considerado L = 75 mm.

O caulim é um material não inflamável e não explosivo, com ponto de fusão a 1.750°C<sup>7</sup> e pelo resultado da TAB 4.10, pôde ser observado que a adição de 20% em massa da resina de poliéster na lâmina da estrutura aumentou em quase 1 minuto o tempo de queima dessa lâmina, mesmo que não tenha ocorrido a extinção da chama, com os corpos de prova queimando até a marca de 100 mm. Podendo ser concluído que a presença de caulim na lâmina da estrutura foi efetiva no retardo de chama quando submetido à queima, aumentando em 15,28% o tempo de queima da lâmina da estrutura, o que pode ser melhor visualizado no GRAF. 4.22. O maior problema está no ponto de flamabilidade do poliéster insaturado, presente na face dos compósitos, que é de 31°C e que apresenta uma temperatura de auto-ignição de 285°C<sup>8</sup>. Já na fibra de juta, a decomposição completa da hemicelulose ocorre até 310°C, a da celulose ocorre entre 310-350°C e o da lignina ocorre entre 350-550°C, que é o componente de maior estabilidade térmica, ou seja, a pirólise total ocorre até cerca de 550°C, segundo Medeiros *et al.*, 2003, p. 720. Com isso pode ser afirmado que também a presença da tela de juta contribuiu para que a lâmina da estrutura sanduíche resistisse mais do que se fosse constituída somente de poliéster.

<sup>7</sup>www.basilequimica.com.br

<sup>8</sup>www.embrapol.com.br

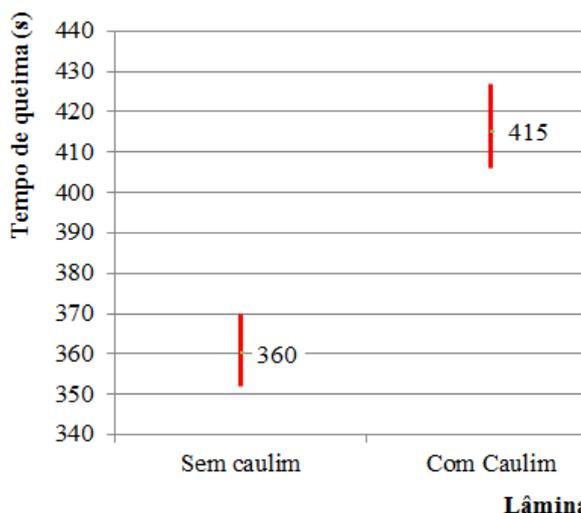


Gráfico 4.22 – Tempo de queima da lâmina da estrutura sanduíche.

No ensaio de flamabilidade horizontal das estruturas, pôde ser verificado que todos os corpos de prova tiveram os núcleos sendo rapidamente consumidos pelas chamas, comprovando que o poliuretano é altamente inflamável (o poliuretano sem tratamento adicional apresenta ponto de combustão de mais ou menos 140°C) e que o aumento da quantidade de lama vermelha nas estruturas diminuiu o tempo de queima dos mesmos, talvez pela presença do óxido de ferro que contribuiu para a retenção do calor (GRAF. 4.23). As discrepâncias podem estar relacionadas com a falta de uniformidade na distribuição da carga na matriz de PU.

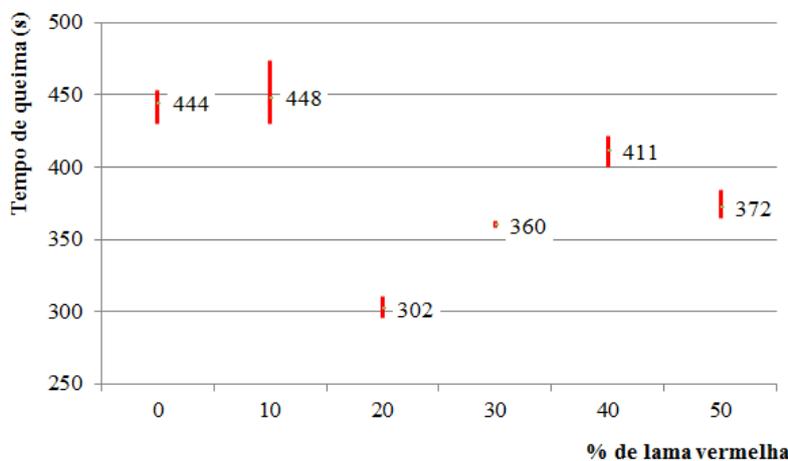


Gráfico 4.23 – Tempo de queima da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

Nos GRAFs. 4.24 e 4.25 verificam-se as taxas de queima linear médias da lâmina e das estruturas sanduíche, respectivamente. A taxa de queima é o inverso do tempo de queima do material, ou seja, quanto menor o tempo de queima, o corpo de prova será consumido mais rapidamente, e, portanto, sua taxa de queima será maior. E foi isso que aconteceu com a lâmina sem caulim, que apresentou um tempo médio de queima de 360 s (6 min) e, uma taxa de queima linear média de 12,51 mm/min, em comparação à lâmina com caulim, com um tempo médio de queima de 415 s (6 min e 55 s) e uma taxa de queima linear de 10,85 mm/min. Essa diferença foi pequena, porém, o suficiente para mostrar que a presença do caulim foi efetiva para reduzir a

flamabilidade da lâmina da estrutura sanduíche. A taxa de queima nos compósitos aumentou com o aumento da quantidade de lama vermelha talvez, também semelhante aos resultados do tempo de queima, pela presença do óxido de ferro. As discrepâncias podem ter a ver com a falta de uniformidade na distribuição da carga na matriz de PU.

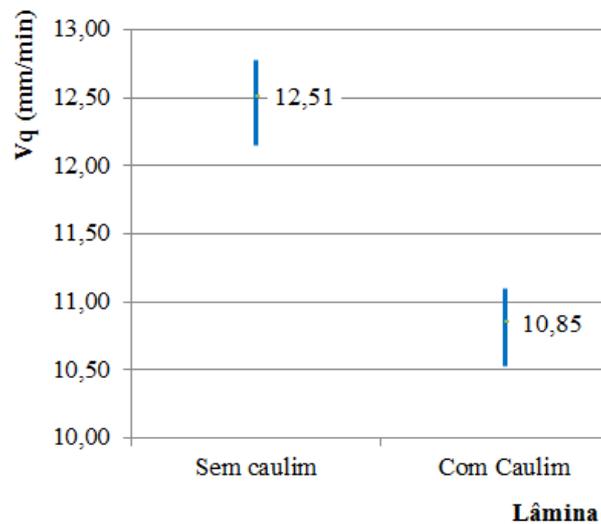


Gráfico 4.24 – Taxa de queima linear da lâmina da estrutura sanduíche.

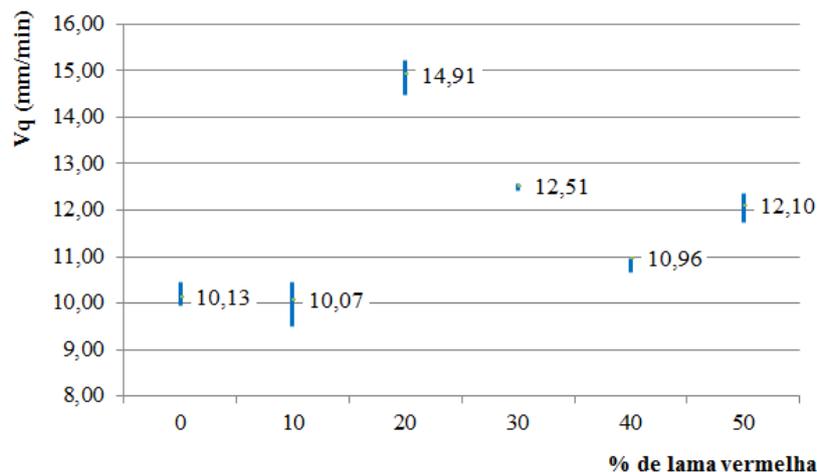


Gráfico 4.25 – Taxa de queima linear da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

A FIG. 4.10 ilustra o ensaio de flamabilidade horizontal da lâmina e da estrutura sanduíche, demonstrando que quanto aos corpos de prova somente da lâmina, não sobrou quase nada da lâmina sem caulim e, quanto aos corpos de prova da estrutura sanduíche, seus núcleos foram consumidos mais rapidamente pela chama do que as lâminas.

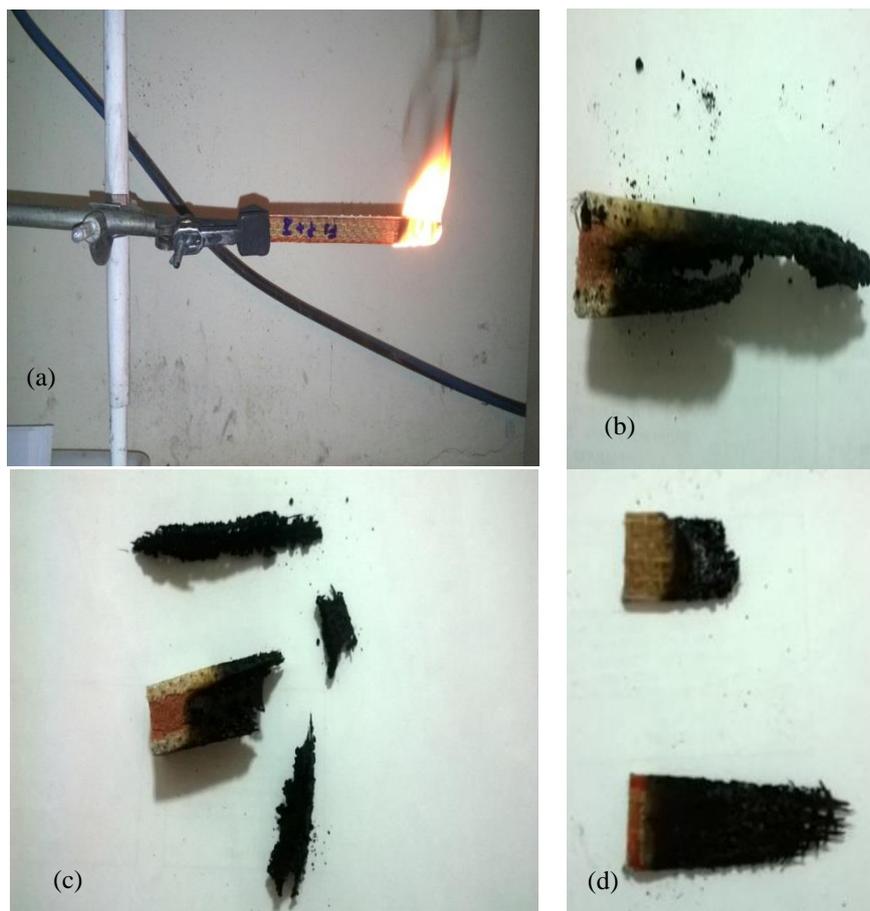


Figura 4.10 – Ensaio de flamabilidade: (a) evolução da queima do cp, (b) o núcleo foi consumido mais rapidamente pela chama, (c) cp da estrutura sanduíche após ensaio e (d) lâmina sem caulim e lâmina com caulim (de cima para baixo, resp.).

Fontes: (a) Osvaldo Pires e (b), (c) e (d) própria.

No QUADRO 4.8 é apresentado o comportamento de todos os corpos de prova de estrutura sanduíche ensaiados e, pôde ser observado que dos corpos de prova com alguma porcentagem de LV, 10 cp's queimaram totalmente e de 15 cp's houve sobra de uma pequena quantidade de material. Dos 5 cp's com 0% de LV, todos tiveram o núcleo consumido, restando uma boa quantidade de material da face. Esse resultado indica que a constituição do núcleo em poliuretano foi predominante para o baixo desempenho do compósito quanto à flamabilidade. E que, a rapidez com que foi consumido o poliuretano do núcleo não permitiu a ação de qualquer material retardante de chama presente na lama vermelha, pois é sabido que a quantidade de óxido de alumínio presente na lama vermelha gerada no Brasil não chega a 18% de sua composição segundo Silva Filho *et al.* (2007), Cap. 2, TAB. 2.12, na página 56, chegando a no máximo 22,6% na lama vermelha gerada no Pará, segundo a pesquisa de Souza (2010), no Cap. 2, TAB. 2.13, na p. 57 e Velasco *et al.* (2002) afirma que alguns pesquisadores usam grandes cargas de alumina, em torno de 40% sobre o peso da matriz polimérica, para alcançar o efeito anti-chama desejado, o que acaba interferindo nas propriedades mecânicas do compósito, reduzindo também a homogeneidade da mistura.

Quadro 4.8 – Comportamento dos corpos de prova de estrutura sanduíche pós-ensaio de flamabilidade

% de LV	Nº de cp's que queimou totalmente	Nº de cp's que queimou sobrando um pouco de material da face	Nº de cp's que queimou sobrando bastante material da face	Total de cp's ensaiados
0	-	-	5	5
10	3	2	-	5
20	1	4	-	5
30	1	4	-	5
40	5	-	-	5
50	-	5	-	5

Nesse ensaio, todos os corpos de prova tiveram seus núcleos consumidos rapidamente pelo fogo, devido a sua constituição em poliuretano, não permitindo a avaliação da ação da lama vermelha no retardo de chamas; inclusive, o incremento de lama vermelha dificultou a expansão do poliuretano, diminuindo a espessura do núcleo, contribuindo para que a consumação do mesmo fosse mais rápida. Quanto à lâmina, foi possível observar que a presença do caulim foi efetiva para reduzir a flamabilidade da mesma, com tempo de queima maior e, conseqüentemente, taxa de queima menor do que da lâmina sem caulim, de acordo com as pesquisas de Weili Wo (2013) e Sari (2015), que concluíram que o caulim apresenta boa estabilidade térmica e alta resistência à degradação térmica, podendo funcionar como revestimento em construções devido às suas propriedades de armazenamento de calor latente.

#### 4.9 – Resultados do ensaio de perda de transmissão sonora na estrutura sanduíche

Embora o estudo de sons para equipamentos eletrônicos subdivida muito mais as frequências desde sub-graves até agudos, segundo a FIG. 2.26, na p. 77, no estudo de acústica essa divisão pode ser considerada dentro de três grandes grupos (TAB. 4.11).

Tabela 4.11 – Grupos de frequências no estudo de acústica

Frequências	Intervalos (Hz)
Baixas	100 - 630
Médias	630 – 2.500
Altas	2.500 – 20.000

Os ensaios de perda de transmissão sonora foram realizados segundo a norma ISO 140-3:1995 (E) para 1/3 de oitava, numa gama de frequência de 100 a 3.150 Hz, no total de 16 valores (100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500 e 3.150 Hz). A TAB. 4.12 indica as frequências de ensaio recomendadas pela norma segundo o grupo ao qual pertencem.

Tabela 4.12 – Frequências de ensaio recomendadas pela norma de acústica

Grupo de frequências	Frequências (Hz)
Baixas	100, 125, 160, 200, 250, 315, 400 e 500
Médias	630, 800, 1.000, 1.250, 1.600 e 2.000
Altas	2.500 e 3.150

No GRAF. 4.26 verificam-se os resultados de perda de transmissão sonora da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos para as frequências analisadas segundo a norma. Pelo gráfico, pôde ser observado que o comportamento de cada uma delas foi bastante semelhante, demonstrando que a contribuição dos outros materiais que constituem a estrutura (caulim, poliéster, tecido de juta e poliuretano) foi mais efetiva nos resultados das perdas de transmissão acústica do que os diferentes tratamentos com a lama vermelha. Entretanto, é possível perceber que a presença e o incremento de lama vermelha alterou o comportamento da estrutura sanduíche para cada frequência, aumentando ou diminuindo a perda de transmissão sonora em relação à estrutura sem lama vermelha.

A seguir, através de gráficos, podem ser verificadas as perdas de transmissão sonora da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos, obtidas para cada uma das frequências analisadas e suas respectivas Classes de Transmissão Sonora (STC).

No GRAF. 4.27 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 0% de lama vermelha e sua respectiva STC. A denominação da STC é lida na frequência de 500 Hz, portanto, a STC para esta estrutura foi a 20 (STC 20).

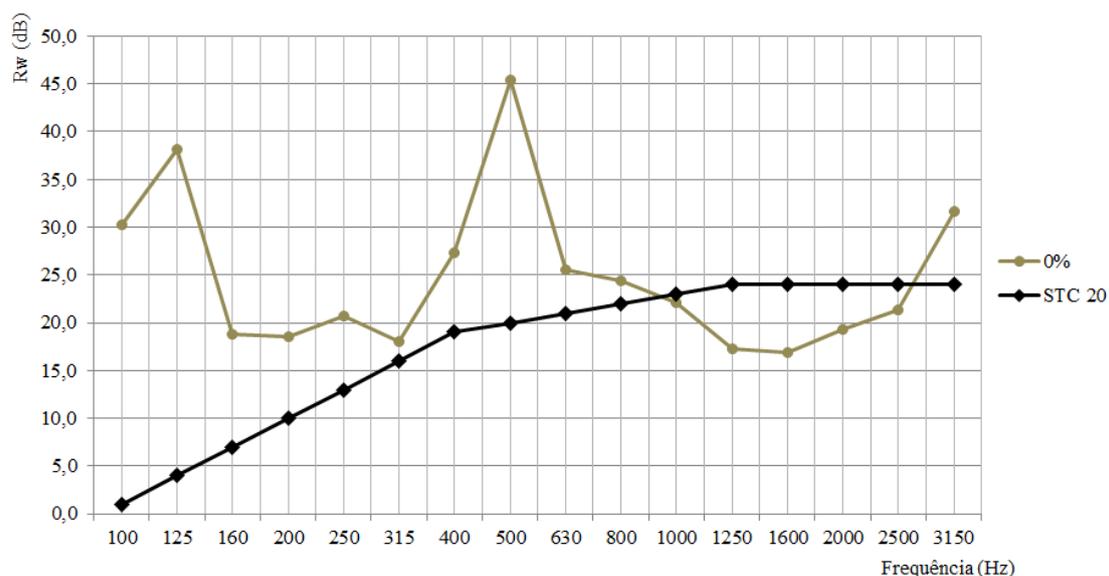


Gráfico 4.27 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 0% de lama vermelha e sua respectiva STC.

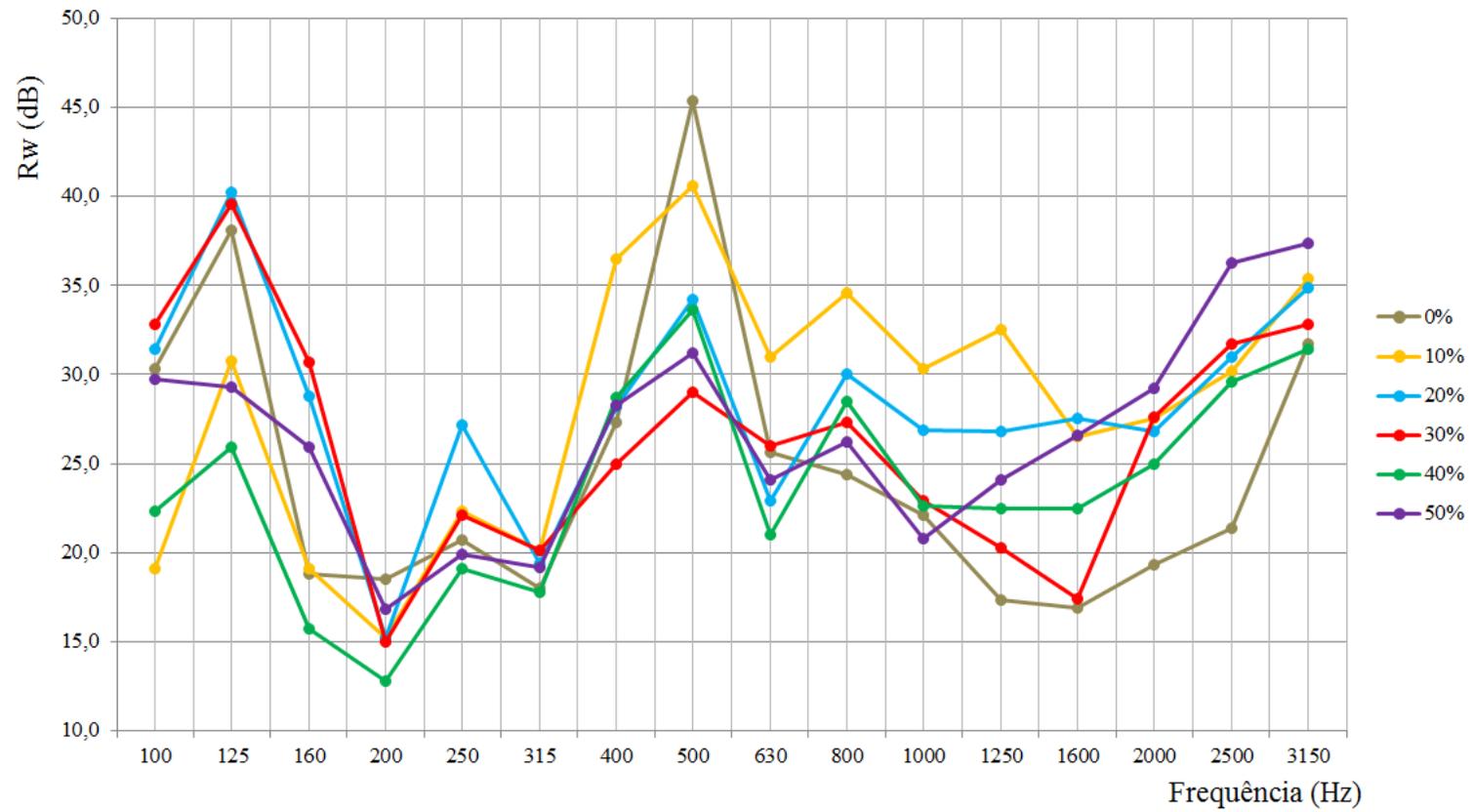


Gráfico 4.26 – Perda de transmissão sonora da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

No GRAF. 4.28 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 10% de lama vermelha e sua respectiva STC igual a 29.

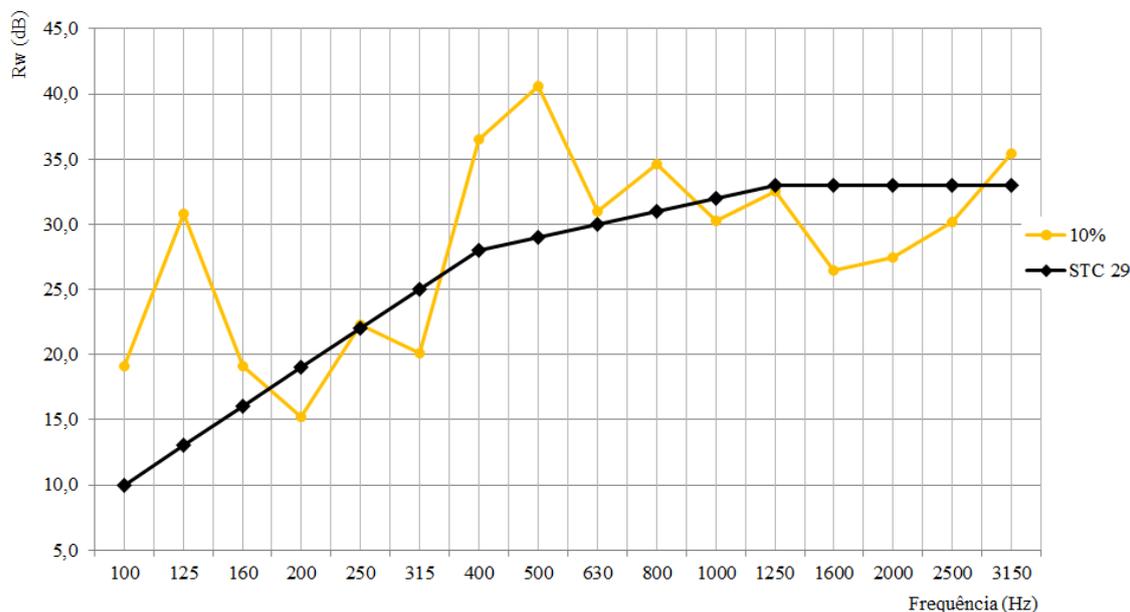


Gráfico 4.28 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 10% de lama vermelha e sua respectiva STC.

No GRAF. 4.29 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 20% de lama vermelha e sua respectiva STC igual a 27.

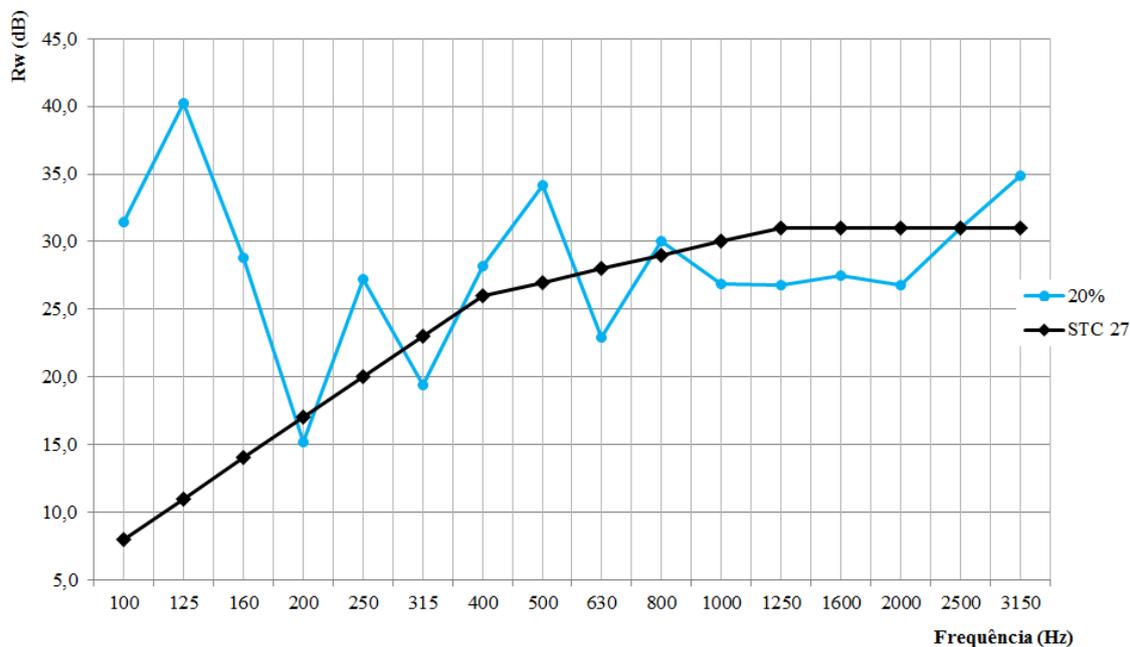


Gráfico 4.29 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 20% de lama vermelha e sua respectiva STC.

No GRAF. 4.30 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 30% de lama vermelha e sua respectiva STC igual a 25.

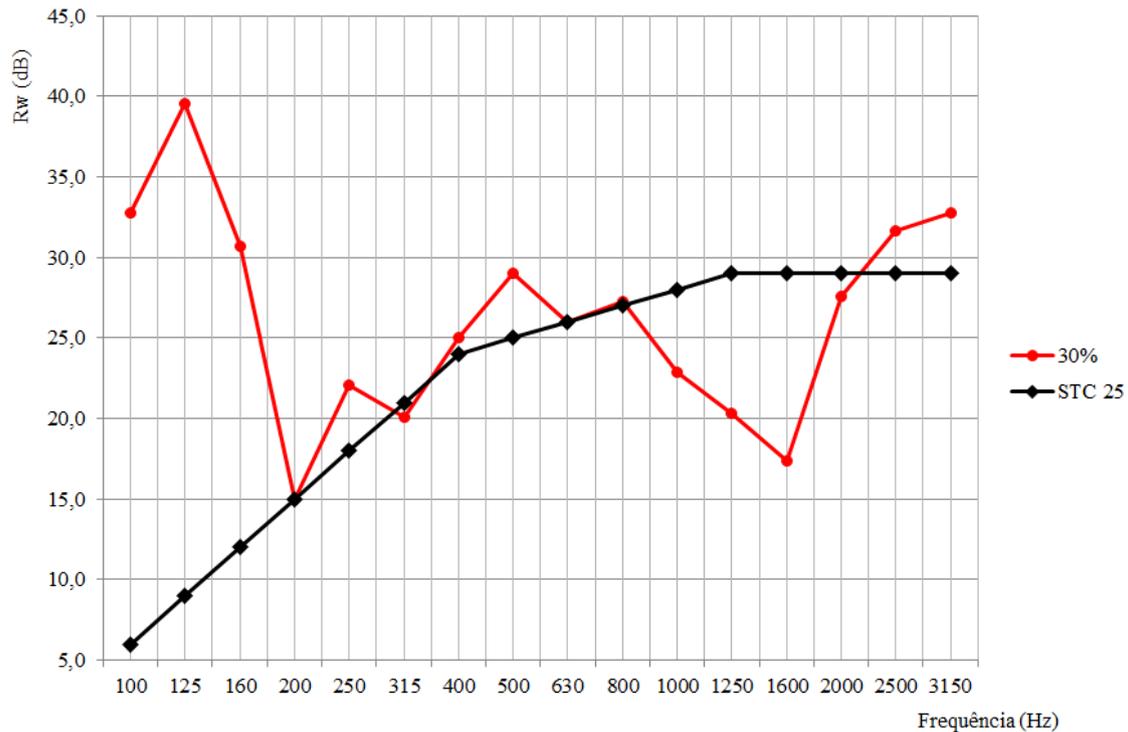


Gráfico 4.30 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 30% de lama vermelha e sua respectiva STC.

No GRAF. 4.31 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 40% de lama vermelha e sua respectiva STC igual a 24.

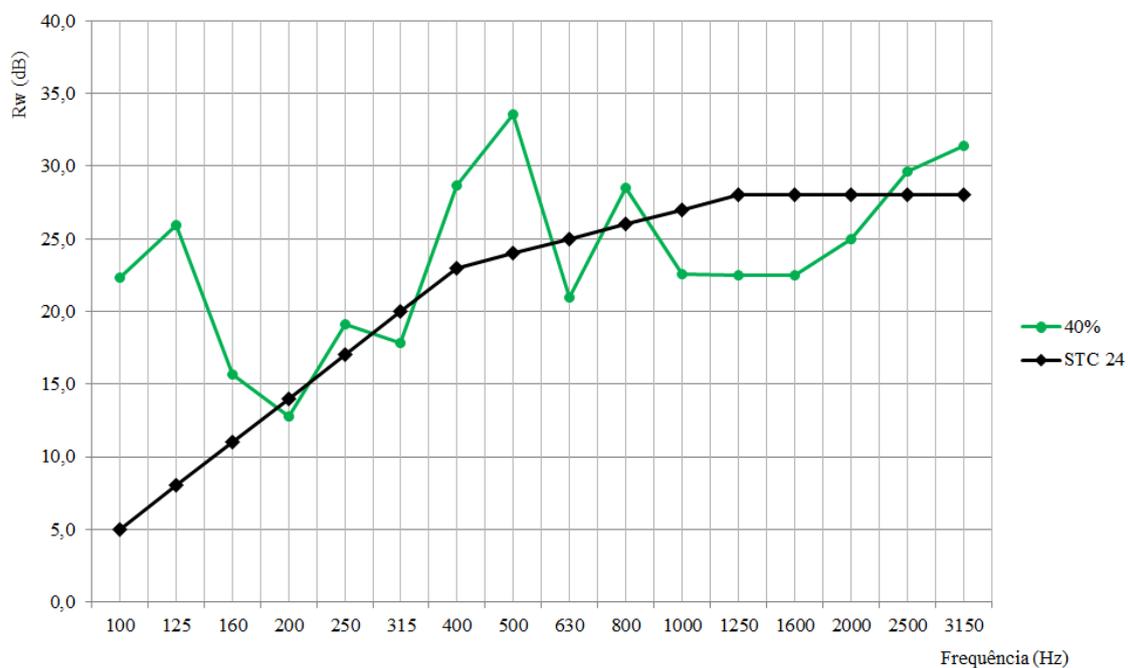


Gráfico 4.31 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 40% de lama vermelha e sua respectiva STC.

No GRAF. 4.32 verifica-se a perda de transmissão sonora da estrutura com 50% de lama vermelha e sua respectiva STC igual a 25.

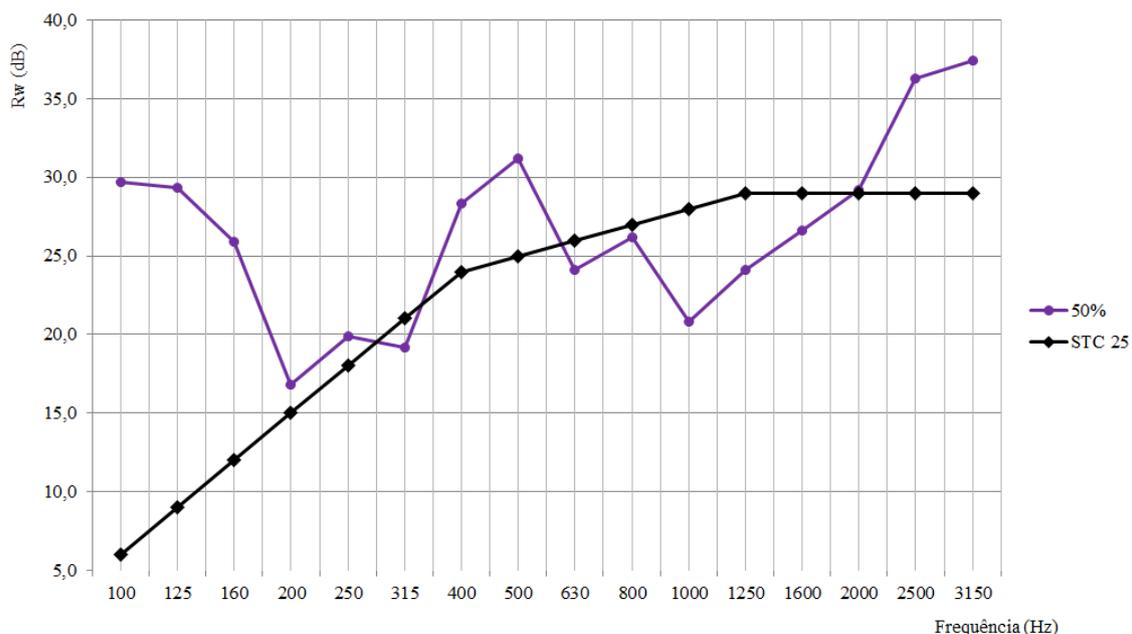


Gráfico 4.32 – Perda de transmissão sonora da estrutura com 50% de lama vermelha e sua respectiva STC.

No GRAF. 4.33 verificam-se, comparativamente, as classes de transmissão sonora da estrutura sanduíche como os diferentes tratamentos.

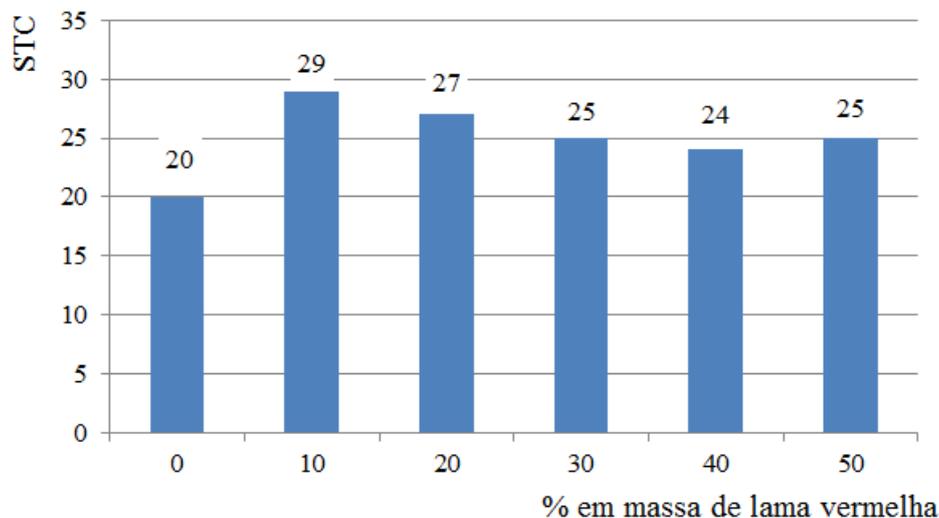


Gráfico 4.33 – Comparação entre as classes de transmissão sonora (STC) da estrutura sanduíche com os diferentes tratamentos.

As classes de transmissão sonora (STC) da estrutura sanduíche com os tratamentos com 0, 10, 20, 30, 40 e 50% de lama vermelha foram, respectivamente, 20, 29, 27, 25, 24 e 25. Segundo a TAB. 2.19 (Cap. 2, na p. 78), os níveis de privacidade dessas estruturas apresentaram uma classificação de precária (STC 25) à fraca (STC 30), equivalendo a um vidro de 6 mm de espessura (STC 26) ou a uma chapa de madeira compensada de 18 mm de espessura (STC 28), porém, o comportamento acústico da estrutura com 10% de lama vermelha se aproxima bastante do de uma parede dupla de chapas de *dry-wall* de 12 mm de espessura, fixadas em caibros de 5 x 10 cm (STC 33) (materiais comparativos na TAB. 2.20, no Cap. 2, p. 78). Foi

observado que o incremento de 10% de lama vermelha na estrutura, elevou bastante o STC de 20 para 29, devido à presença da lama vermelha no núcleo, preenchendo os poros do PU expandido. Mas, quanto mais se aumentou a quantidade de lama vermelha, o STC foi diminuindo. Este comportamento foi devido ao maior enrijecimento da estrutura, provocando maior ressonância da mesma.

Os painéis comportam-se de formas diferentes de acordo com as frequências a que estão sujeitos, as classes de transmissão sonora são uma generalização, através de um único indicador do comportamento do material, para facilitar a comparação de desempenho entre diferentes partições. Considerando a TAB. 2.17, Cap. 2, na p. 75, o intervalo de nível de pressão sonora entre 40 - 70 dB para sons do cotidiano, com a sensação subjetiva de intensidade **tranquilo** a **moderado** e a classificação do isolamento segundo Gomez (1988), na TAB. 2.21, Cap. 2, na p. 79, são apresentados os estudos dos comportamentos de cada compósito para cada frequência individualmente, pois seu emprego depende, especificamente, da frequência para o qual servirá de isolante sonoro.

Para a frequência de **100 Hz** (GRAF. 4.34), as estruturas com 10, 40 e 50% de LV apresentaram uma perda de transmissão pobre e as estruturas com 0, 20 e 30% de LV apresentaram uma perda de transmissão regular. Esse resultado mostrou que a estrutura sem LV apresentou um comportamento superior as com 10, 40 e 50% de LV, porém, as estruturas com 20 e 30% de LV alcançaram perda de transmissão superior à estrutura sem lama. Isso demonstrou que, para essa frequência, as estruturas com 20 e 30% de LV foram mais efetivas na perda de transmissão sonora.

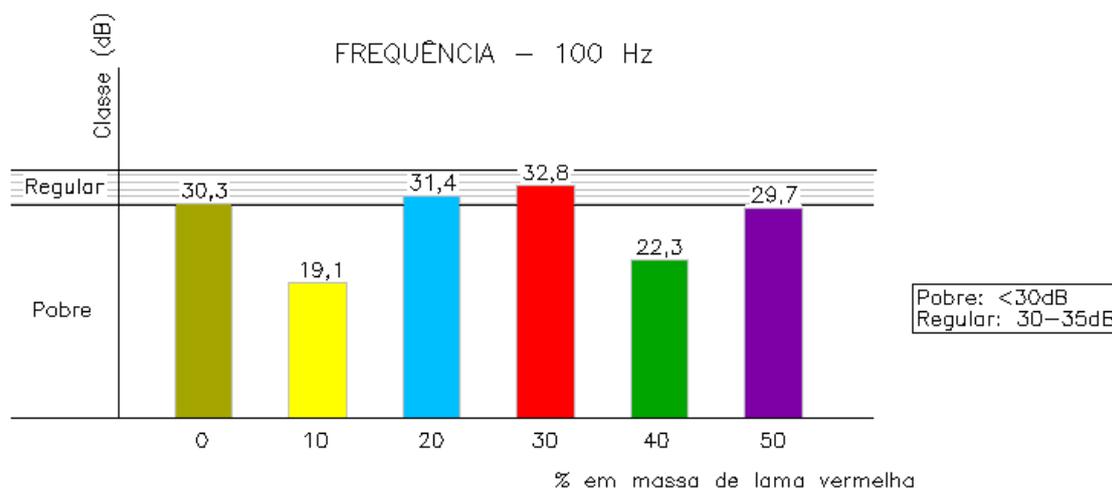


Gráfico 4.34 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 100 Hz.

Para a frequência de **125 Hz** (GRAF. 4.35), as estruturas com 40 e 50% de LV apresentaram uma perda de transmissão pobre, a estrutura com 10% de LV apresentou uma perda de transmissão regular, as estruturas com 0 e 30% de LV apresentaram uma boa perda de transmissão e a estrutura com 20% de LV apresentou uma perda de transmissão muito boa, demonstrando que, para essa frequência, as estruturas com 20 e 30% de LV foram mais efetivas na perda de transmissão sonora.

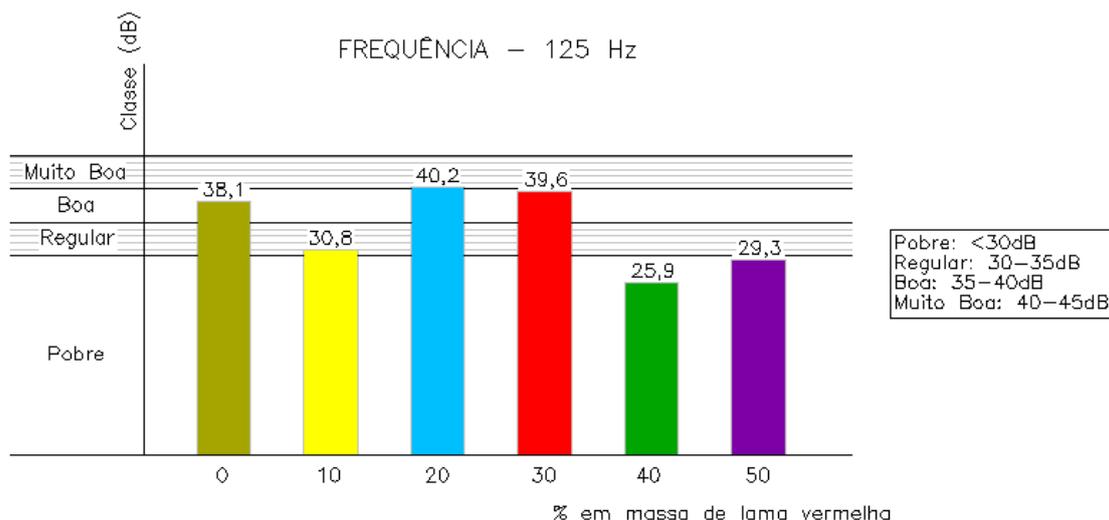


Gráfico 4.35 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 125 Hz.

Para a frequência de **160 Hz** (GRAF. 4.36), excetuando a estrutura com 30% de LV que apresentou uma perda de transmissão regular, todas as outras estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, demonstrando também que, para essa frequência, as estruturas com 20 e 30% de LV foram mais efetivas na perda de transmissão sonora.

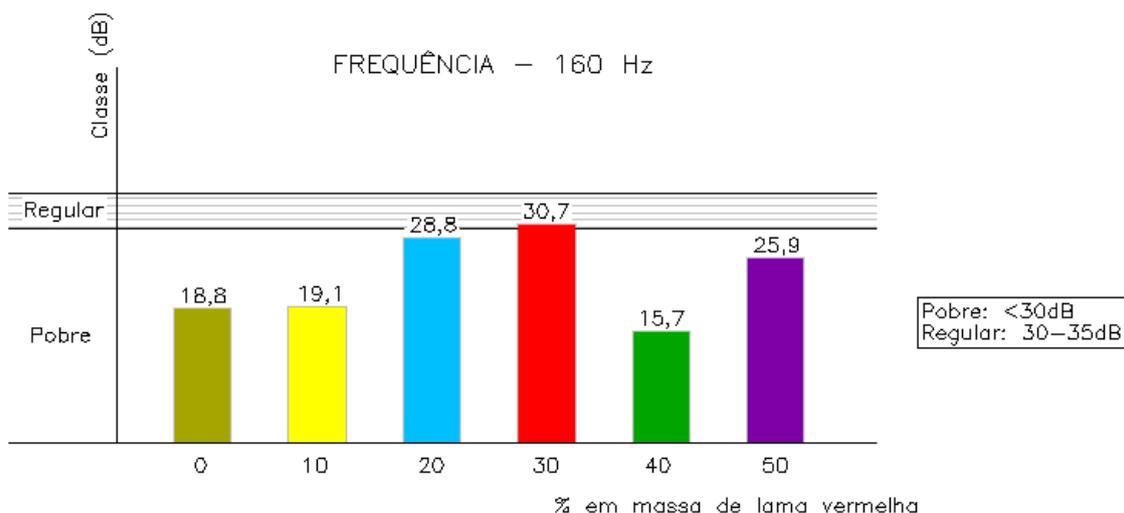


Gráfico 4.36 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 160 Hz.

Para a frequência de **200 Hz** (GRAF. 4.37), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, excetuando a com 30% de LV, que foi regular. É demonstrado novamente que, para essa frequência, as estruturas com 20 e 30% de LV foram mais efetivas na perda de transmissão sonora, pois o resultado da estrutura com 20% de LV se aproxima muito do resultado da estrutura com 30% de LV.

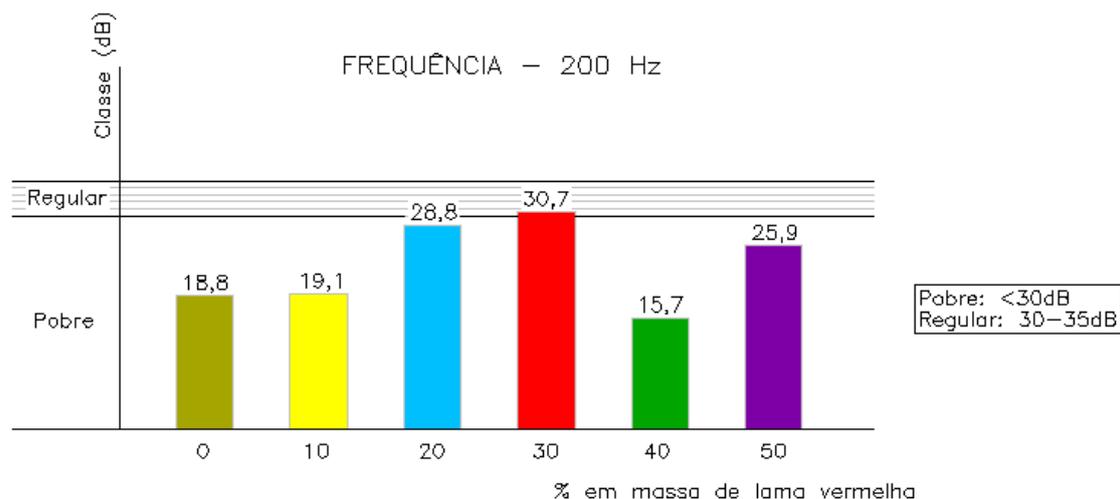


Gráfico 4.37 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 200 Hz.

Para a frequência de **250 Hz** (GRAF. 4.38), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, demonstrando que, para essa frequência, elas não foram efetivas na perda de transmissão sonora. Porém, a estrutura com 20% apresentou um resultado um pouco melhor do que os das outras estruturas.

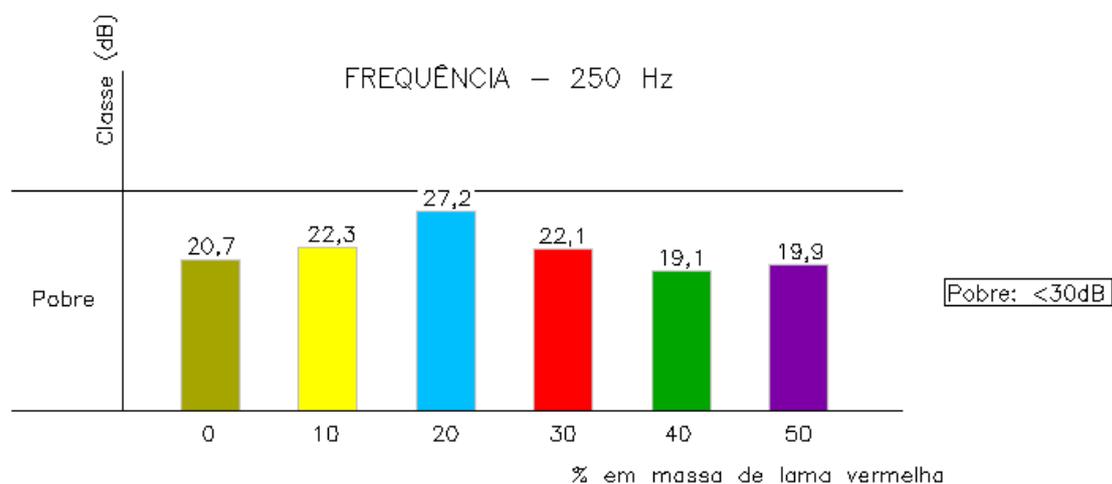


Gráfico 4.38 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 250 Hz.

Para a frequência de **315 Hz** (GRAF. 4.39), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão sonora pobre, demonstrando que, para essa frequência, todas as estruturas não foram efetivas na perda de transmissão sonora, com resultados muito próximos entre elas.

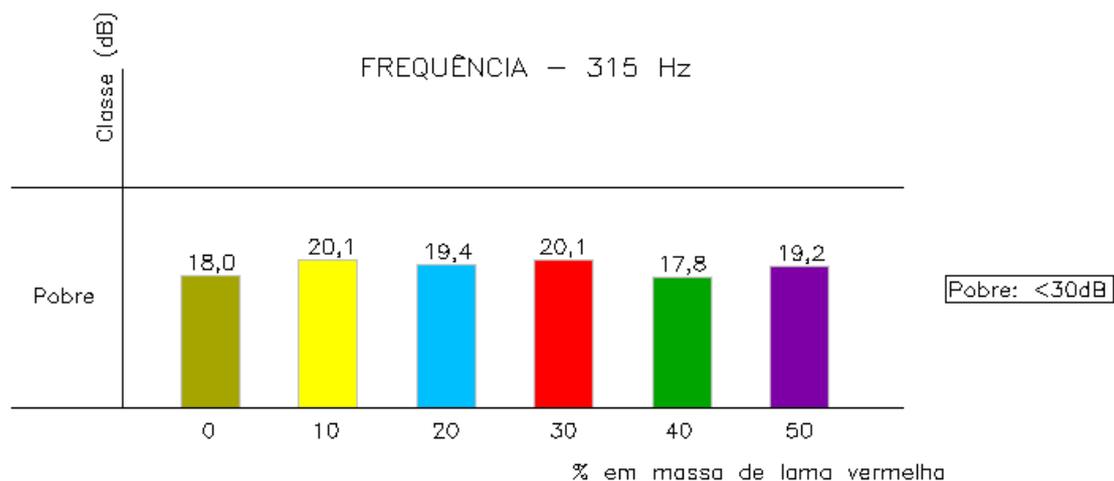


Gráfico 4.39 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 315 Hz.

Para a frequência de **400 Hz** (GRAF. 4.40), excetuando a estrutura com 10% de LV que apresentou uma boa perda de transmissão, todas as outras estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, demonstrando que, para essa frequência, a estrutura com 10% de LV foi a única que se evidenciou quanto à perda de transmissão sonora.

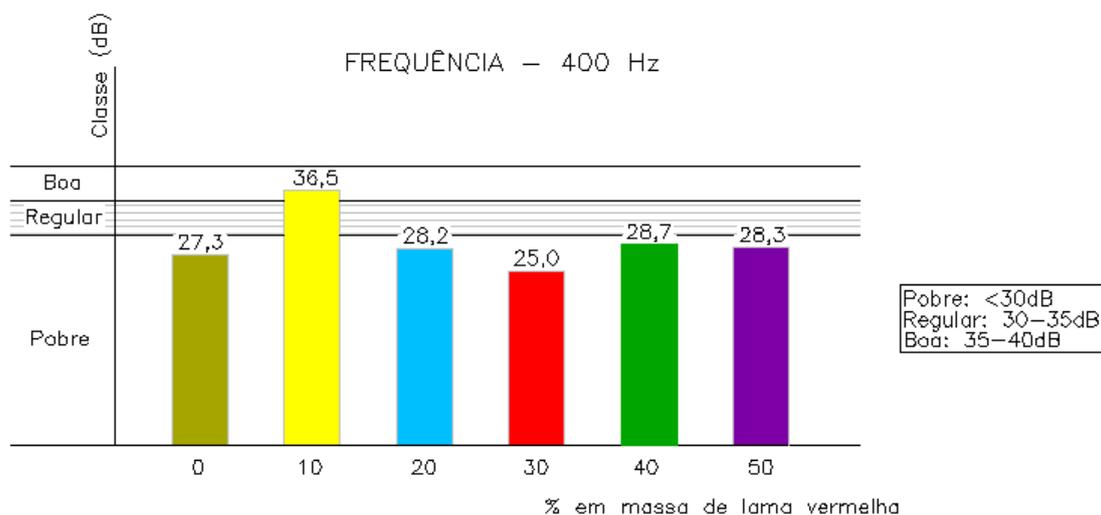


Gráfico 4.40 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 400 Hz.

Para a frequência de **500 Hz** (GRAF. 4.41), a estrutura sem LV apresentou uma excelente perda de transmissão sonora e a com 10% de LV apresentou uma perda de transmissão muito boa. As estruturas com 20, 40 e 50% de LV apresentaram uma perda de transmissão regular e a estrutura com 30% de LV apresentou uma perda de transmissão pobre, demonstrando que, para essa frequência, a estrutura com 30% de LV foi a que apresentou a menor perda de transmissão sonora.

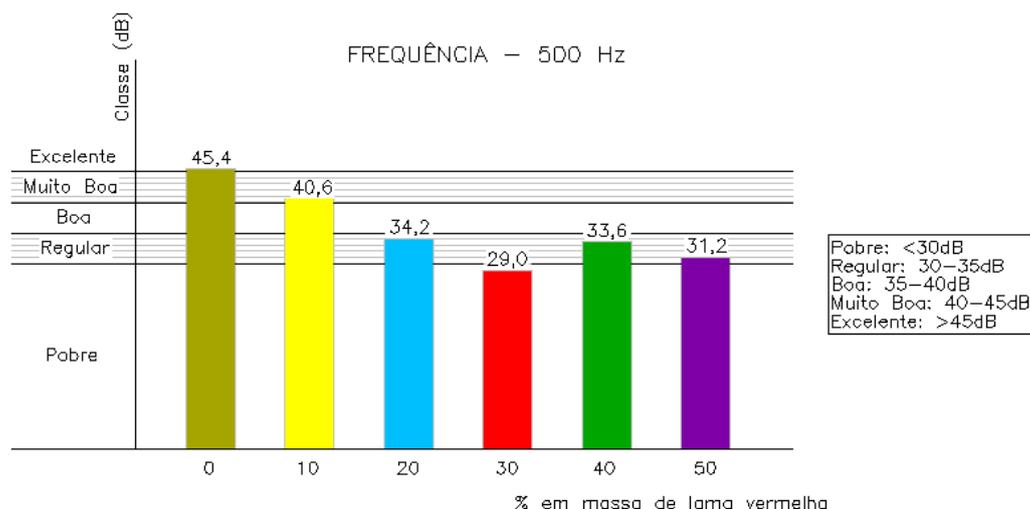


Gráfico 4.41 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 500 Hz.

Finalizando a análise para as **baixas frequências**, conclui-se que até a frequência de 200 Hz, as estruturas com 20 e 30% de LV apresentaram as maiores perdas de transmissão sonora. Para a frequência de 250 Hz, a estrutura com 20% de LV apresentou a maior perda de transmissão. Para a frequência de 315 Hz, todas as estruturas apresentaram resultados de perda de transmissão insuficientes. Para a frequência de 400 Hz, a estrutura com 10% de LV apresentou a maior perda de transmissão, seguida das estruturas com 20, 40 e 50% de LV. Para esta frequência, a estrutura com 30% de LV apresentou a menor perda de transmissão, menor até do que o resultado da estrutura sem LV e para a frequência de 500 Hz, os resultados foram similares aos da frequência de 400 Hz, porém, um pouco maiores, excetuando a estrutura sem LV que apresentou excelente resultado de perda de transmissão sonora para a frequência de 500 Hz.

Para a frequência de **630 Hz** (GRAF. 4.42), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com exceção da estrutura com 10% de LV que apresentou uma perda de transmissão regular, demonstrando continuidade do comportamento das estruturas com 10% de LV para as frequências de 400 e 500 Hz, que também apresentaram maiores perdas de transmissão com essa porcentagem de lama.

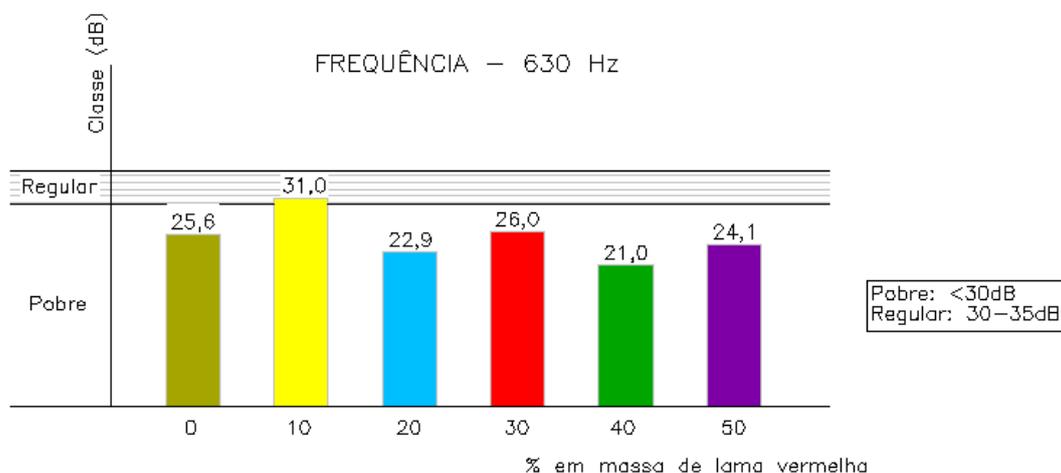


Gráfico 4.42 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 630 Hz.

Para a frequência de **800 Hz** (GRAF. 4.43), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com exceção das estruturas com 10 e 20% de LV que apresentaram um isolamento regular. A estrutura com 10% de LV foi a que apresentou a maior perda de transmissão sonora.

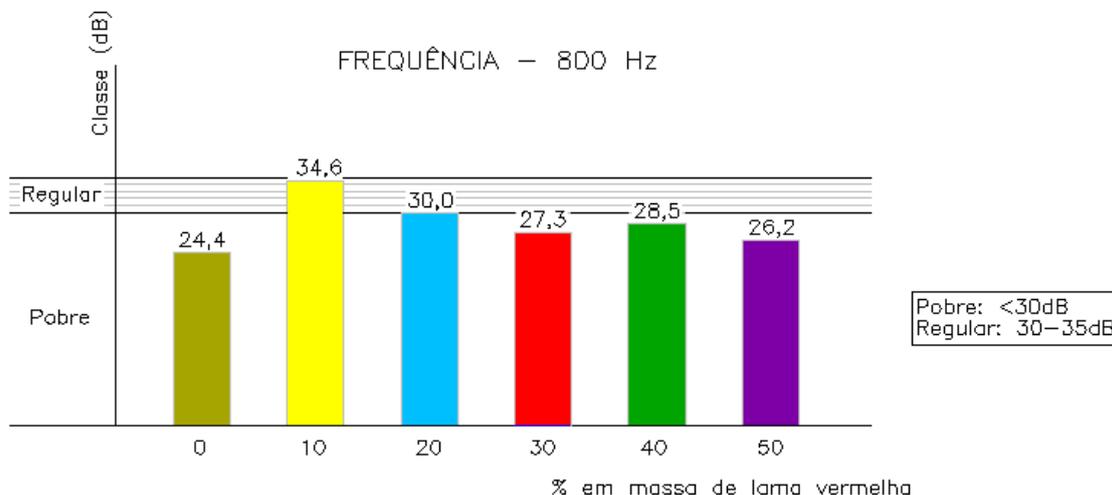


Gráfico 4.43 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 800 Hz.

Para a frequência de **1.000 Hz** (GRAF. 4.44), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com exceção da estrutura com 10% de LV que apresentou uma perda de transmissão regular. As estruturas com 10 e 20% de LV foram as que apresentaram as maiores perdas de transmissão para essa frequência. O comportamento das estruturas para essa frequência foi semelhante ao comportamento para a frequência de 800 Hz, porém, com resultados menores.

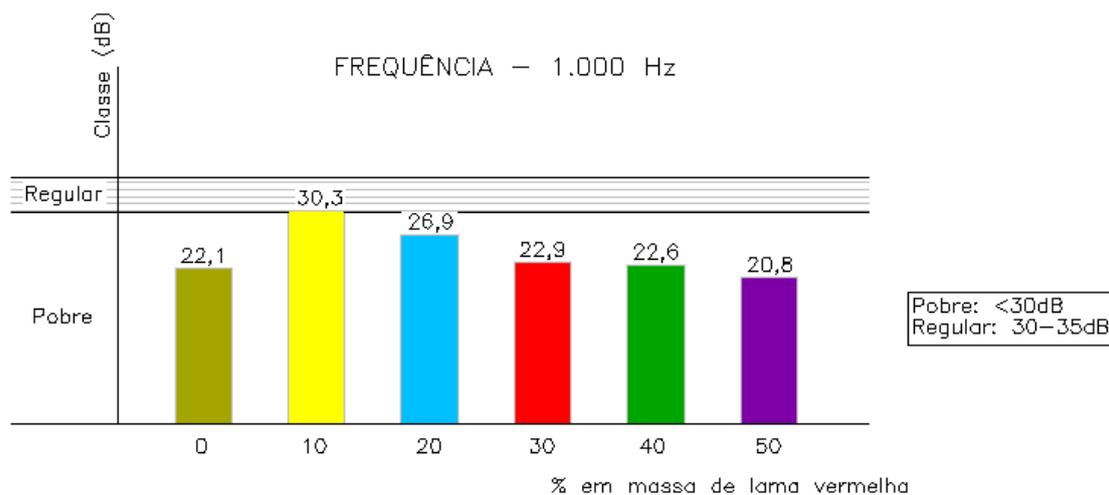


Gráfico 4.44 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 1.000 Hz.

Para a frequência de **1.250 Hz** (GRAF. 4.45), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com exceção da estrutura com 10% de LV que apresentou uma perda de transmissão regular. As estruturas com 10 e 20% de LV foram as que apresentaram as maiores perdas de transmissão para essa frequência.

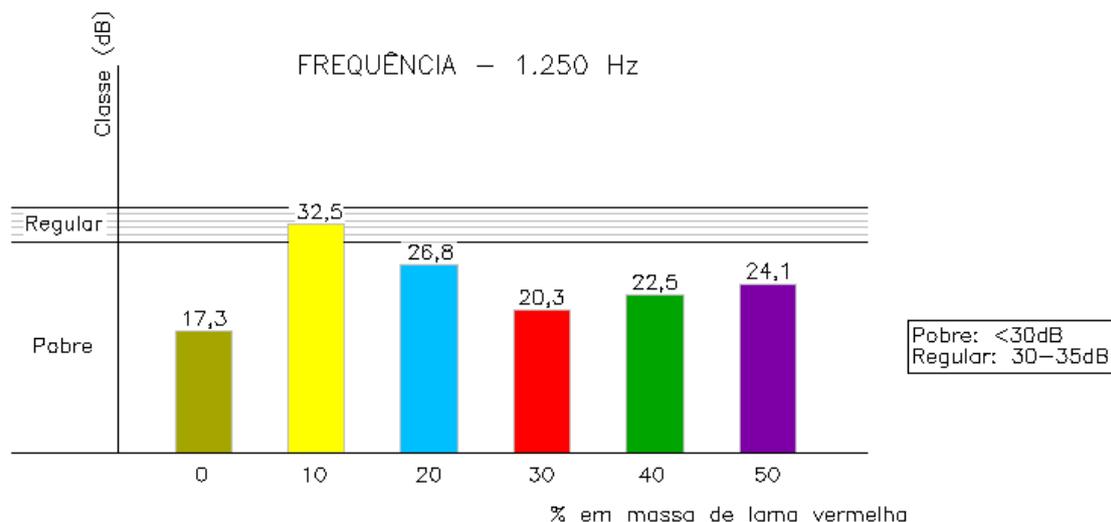


Gráfico 4.45 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 1.250 Hz.

Para a frequência de **1.600 Hz** (GRAF. 4.46), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com maiores perdas para as estruturas com 10, 20 e 50% de LV.

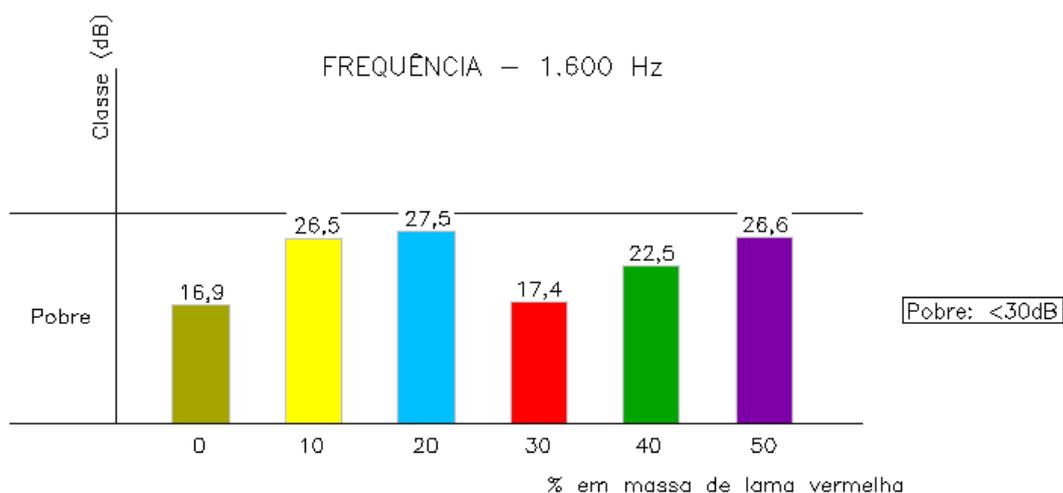


Gráfico 4.46– Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 1.600 Hz.

Para a frequência de **2.000 Hz** (GRAF. 4.47), todas as estruturas apresentaram uma perda de transmissão pobre, com resultados semelhantes aos da frequência de 1.600 Hz, excetuando a estrutura com 20% de LV, que para essa frequência, apresentou uma maior perda de transmissão sonora em relação ao da frequência de 1.600 Hz. A

estrutura com 50% de LV apresentou o maior valor de perda de transmissão sonora e a estrutura sem LV apresentou o pior desempenho de todas as estruturas.

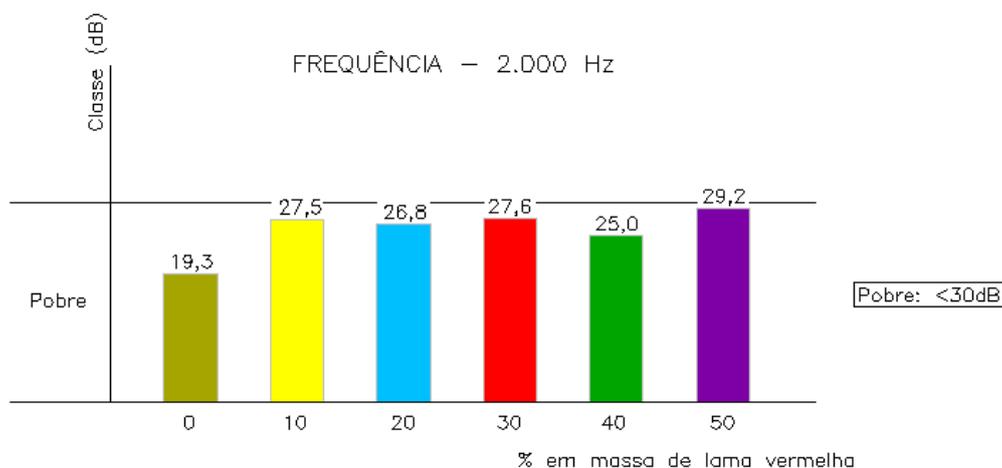


Gráfico 4.47 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 2.000 Hz.

Finalizando a análise para as **médias frequências**, conclui-se que, no geral, as estruturas apresentaram perda de transmissão predominantemente pobre. As estruturas com 10% de LV foram as que apresentaram os maiores valores para a perda de transmissão, seguido das estruturas com 20% de LV. Porém, foi observado que as estruturas com 50% de LV foram apresentando aumento na perda de transmissão com o aumento da frequência.

Para a frequência de **2.500 Hz** (GRAF. 4.48), as estruturas com 0 e 40% de LV apresentaram uma perda de transmissão pobre, as estruturas com 10, 20 e 30% de LV apresentaram uma perda de transmissão regular e a estrutura com 50% de LV apresentou uma boa perda de transmissão, com o maior valor, dentre as estruturas, de perda de transmissão para essa frequência. Entretanto, foi verificado que as perdas de transmissão sonora de todas as estruturas, para essa frequência, aumentaram, em relação à frequência de 2.000 Hz.

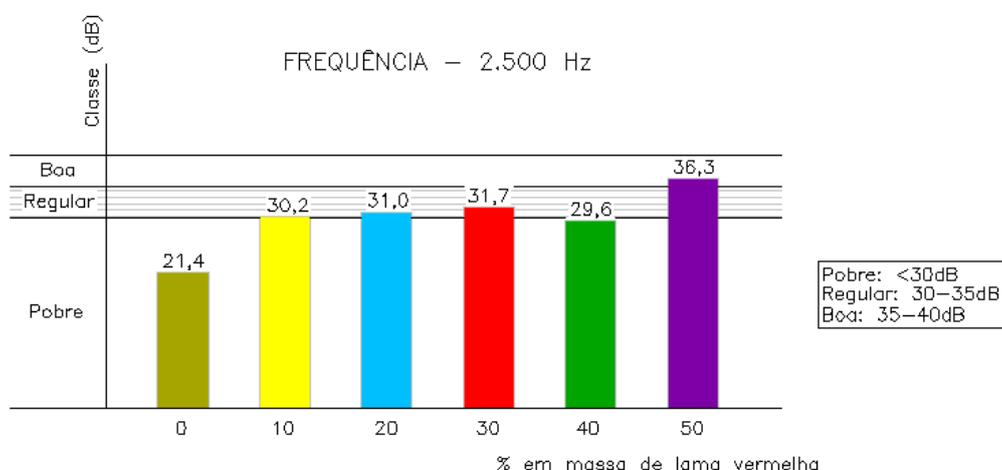


Gráfico 4.48 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 2.500 Hz.

Para a frequência de **3.150 Hz** (GRAF. 4.49), as estruturas com 0, 20, 30 e 40% de LV apresentaram uma perda de transmissão regular e as estruturas com 10 e 50% de LV apresentaram uma boa perda de transmissão sonora, com valor maior para a estrutura com 50% de LV, comprovando que, para frequências maiores, a estrutura com maior porcentagem de LV foi mais efetiva na perda de transmissão sonora.

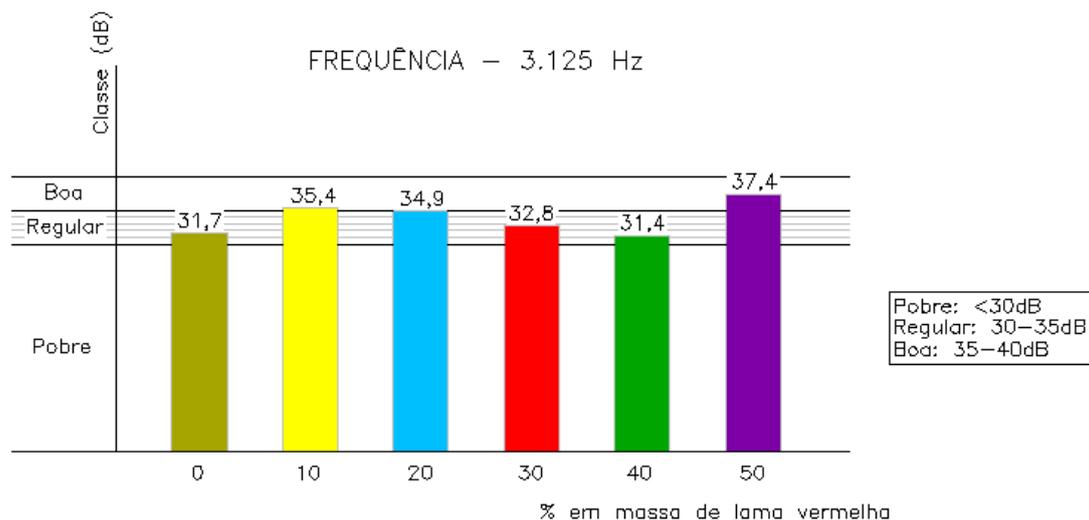


Gráfico 4.49 – Perda de transmissão sonora das estruturas sanduíche na frequência de 3.125 Hz.

Finalizando a análise para as **altas frequências**, conclui-se que o incremento de lama vermelha nas estruturas aumentou a perda de transmissão sonora para esse intervalo, pois a maioria das estruturas apresentou uma perda de transmissão de regular à boa. No geral, essas estruturas sinalizaram que, para altas frequências, o incremento de lama vermelha influenciou positivamente na perda de transmissão sonora.

Fazendo uma equivalência entre as estruturas estudadas nessa pesquisa com algumas partições da TAB 2.20, Cap. 2, na p. 78, pode-se concluir que:

- Para a frequência de 125 Hz, a estrutura com 20% de LV (com perda de transmissão sonora de 40,2 dB) apresenta comportamento superior a uma parede de tijolo revestida com argamassa, de 125 mm de espessura (com perda de transmissão de 36 dB);

- Para a frequência de 250 Hz, a estrutura com 20% de LV (com perda de transmissão sonora de 27,2 dB) equivale a uma placa de amianto de 9 mm, entre duas chapas de aço de 1,2 mm, com 12 mm de espessura (com perda de transmissão de 27 dB);

- Para a frequência de 500 Hz, a estrutura com 10% de LV (com perda de transmissão sonora de 40,6 dB) equivale também a uma parede de tijolo revestida com argamassa, de 125 mm de espessura (com perda de transmissão de 40 dB);

- Para a frequência de 1.000 Hz, a estrutura com 10% de LV (com perda de transmissão sonora de 30,3 dB) equivale a uma divisória em placa de lascas de madeira, em esquadria de madeira, de 19 mm de espessura (com perda de transmissão de 30 dB);

- Para a frequência de 2.000 Hz, a estrutura com 50% de LV (com perda de transmissão sonora de 29,2 dB) é superior a uma chapa compensada, de 18 mm de espessura (com perda de transmissão de 25 Hz) e, também, superior a uma divisória em placa de lascas de madeira, em esquadria de madeira, de 19 mm de espessura (com perda de transmissão de 26 Hz).

As estruturas com os diferentes tratamentos da pesquisa apresentaram perda de transmissão sonora, em média, de 25 dB, generalizando pelas classes de transmissão sonora (STC) dos mesmos, devido ao núcleo constituído de material de baixa densidade e pouco espesso (9 mm), devido à pequena espessura das estruturas (15 mm) e, também, pelo enrijecimento do PU com o incremento de lama vermelha para aplicação como divisórias de ambientes. Para ambientes arquitetônicos, esse valor de STC classifica essas estruturas com condições de privacidade considerada precária, com a voz normal facilmente inteligível. Entretanto, pode ser observado que as estruturas apresentaram perdas de transmissão sonora diferentes para as diversas frequências à que foram submetidas, algumas vezes maiores outras, menores do que os resultados da estrutura sem lama vermelha. Portanto, o emprego dessas estruturas com diferentes tratamentos como painéis divisórios internos dependerá especificamente da frequência a qual serão submetidas para aplicação como isolante sonoro.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 - Conclusões

O estudo revelou que a utilização do resíduo de caulim melhorou a resistência à **tração nas lâminas**, porém, o incremento de lama vermelha foi diminuindo as **resistências à tração transversal**, à **flexão** e ao **impacto na estrutura sanduíche**. Quanto ao ensaio de **compressão longitudinal**, o acréscimo da lama vermelha diminuiu a resistência das estruturas, porém, independente da concentração de lama, com o inverso acontecendo com o ensaio de **compressão transversal**, com a resistência das estruturas aumentando com a inclusão da lama vermelha, mas, também, sem influência da concentração da mesma. A alta **flamabilidade** do PU foi retardada por ter sido utilizada no núcleo da estrutura, enclausurado pelas lâminas de poliéster com resíduo de caulim, comprovando que esse resíduo apresenta propriedade de retardante de chama e quanto ao ensaio de **perda de transmissão sonora das estruturas**, o incremento de lama vermelha aumentou a perda até a concentração de 20% (27 dB), depois, ficou estabilizada em 25 dB (STC) até à estrutura com 50% de lama.

Quanto aos modos de falha nas estruturas, eles dependeram das solicitações aos esforços em cada ensaio. **No ensaio de tração transversal**, as estruturas sem lama e as com 10% de LV falharam na interface lâmina/núcleo e nas estruturas com 20 a 50% de LV, as falhas ocorreram no núcleo, com sua fragilização devido ao incremento de lama. **No ensaio de compressão longitudinal**, as estruturas sem lama e as com 10% de LV falharam por flambagem das lâminas, com trincas somente sobre as lâminas e nas estruturas com 20 a 50% de LV, após a falha por flambagem das lâminas, com as trincas iniciando sobre as mesmas, as falhas ocorreram no núcleo, com a fragilização da espuma pelo incremento de lama. **No ensaio de compressão transversal**, todas as estruturas (de 0 a 50% de LV) falharam por esmagamento do núcleo, motivado por falta de resistência da espuma de PU. **No ensaio de flexão**, tanto para o vão de 100 mm quanto para o vão de 150 mm, as estruturas sem lama e com 10% de LV apresentaram falhas por ruptura nas lâminas, as estruturas com 20 e 30% de LV apresentaram falhas na interface lâmina/núcleo por tensões cisalhantes e as estruturas com 40 e 50% de LV apresentaram falhas no meio do núcleo, pela fragilização do núcleo com o incremento de lama. E **no ensaio de impacto**, todas as estruturas (de 0 a 50% de LV) foram completamente rompidas, com falha à compressão nas lâminas que receberam os impactos, com falhas por corte nos núcleos e falhas nas lâminas posteriores aos impactos devido às cargas de tração sobre as mesmas.

A estrutura sanduíche, como um todo, apresentou comportamento compatível aos resultados de pesquisas similares relatadas, com um núcleo de baixa massa específica, contribuindo para a redução de peso da estrutura e de lâminas de maiores resistências, que proporcionaram ao compósito a funcionalidade desejada para emprego como painel divisório internos de ambientes.

## 5.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, podem ser realizados estudos complementares, tais como:

- o incremento do caulim nas lâminas, para promover a diminuição da taxa de queima sem diminuir as propriedades de resistência à tração das mesmas;
- o fechamento das extremidades dos painéis com o material das lâminas, para dificultar e retardar o acesso do fogo ao núcleo;
- a substituição da matriz do núcleo por outra também de baixa densidade, porém mais resistente ao fogo e menos tóxica do que a matriz de poliuretano;
- utilização de tela de fibras em substituição às telas de fios de juta como reforço das lâminas para eliminar os problemas de torção dos fios e da sinuosidade da trama da pesquisa, contribuindo para o aumento da resistência à tração e à flexão das lâminas e melhora da molhabilidade das fibras;
- fazer o núcleo isoladamente e depois utilizar um adesivo, que pode ser o próprio poliéster, para a montagem da estrutura sanduíche, melhorando a adesão lâmina/núcleo;
- a realização de outros ensaios para contribuir para a caracterização da estrutura sanduíche, como por exemplo, ensaios de condutividade térmica, de dureza, da ação da radiação ultravioleta, dentre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. I. A. de. *Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção*. Dissertação (mestre) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 161p. 2009. Disponível em: <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139413029/Tese%20de%20Mestrado%20\(vers%C3%A3o%20definitiva\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139413029/Tese%20de%20Mestrado%20(vers%C3%A3o%20definitiva).pdf)>. Acesso: 15 nov. 2014.
- ALMEIDA; I. A.; CORREIA, J. R.; BRANCO, F. A.; GONILHA, J. A. 2011, “Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção”. In: *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, v. 19, pp. 79-90. ISSN: 1646-7078. Disponível em: <[www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev\\_19\\_A8.pdf](http://www-ext.lnec.pt/APAET/pdf/Rev_19_A8.pdf)>. Acesso: 20 jan.2015.
- ALVES, W. F.; ITO, E. N.; MALMONGE, J. A.; MAGALHÃES, W. L. E.; MATTOSO, L. H. C. 2007, “Caracterização do compósito de poliuretano derivado do óleo de mamona (PUR) com sílica obtida da planta cavalinha. In: *9º Congresso Brasileiro de Polímeros*. Disponível em: <[www.google.com.br/?gws\\_rd=ssl#q=9o+congresso+brasileiro+de+polimeros](http://www.google.com.br/?gws_rd=ssl#q=9o+congresso+brasileiro+de+polimeros)>. Acesso: 12 nov.2015.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C271/271M - 11 *Standard Test Method for Density of Sandwich Core Materials*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C297/C297M - 04 (Reapproved 2010) *Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C364/C364M-07 (Reapproved 2012) *Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C365/C365M-11a *Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM C393/C393M - 11 *Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM D5083-10 *Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM D5229/D5229M *Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM D618-13 *Practice for Conditioning Plastics for Testing*.

- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM D6110 - 10 *Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM D7250/D7250M – 06 (Reapproved 2012) *Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness*.
- AMERICAN STANDARD TEST METHOD. ASTM E413-04 *Classification for Rating Sound Insulation*.
- ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. *Engenharia de Materiais*. Vol. II, 2007. Rio de Janeiro, RJ, Elsevier Editora Ltda.
- ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. 2011. *Materiais e Design. Arte e ciência da seleção de materiais no design de produto*. Rio de Janeiro, RJ, Elsevier Editora Ltda. ISBN: 978-85-352-3842-6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MATERIAIS PLÁSTICOS COMPOSTOS (ASPLAR). *Resinas, iniciadores de reação e gelcoats*. São Paulo, 2005.
- BISTAFA, S. R. 2011. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. São Paulo, SP, Edgard Blücher Ltda. ISBN: 9788521205814.
- CALDAS, B. G. S. *Estrutura Sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo*. Dissertação (Mestrado) apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia. 121p. 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufba.br/.../Dissertação%20MEAU\\_Bruno%20Gomes%20Silveira%20...>](https://repositorio.ufba.br/.../Dissertação%20MEAU_Bruno%20Gomes%20Silveira%20...). Acesso: 20 jan.2016.
- CALLISTER JR, W. D. 2003. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. New York, USA, John Willey & Sons, Inc. ISBN: 0471172715.
- CANAUD, C.; VISCONTE, L. L. Y.; NUNES, R. C. R. 2001, “Mechanical and Flammability Properties of ATH-Filled EPDM Compositions”, In: *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 286, Issue 7, pp. 377-381. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com>. Acesso: 12 ago.2015.
- CHILDE, G. 1978. *A evolução cultural do homem*. Rio de Janeiro, Zahar. ISBN: 9788524500213.
- CORRADINI, E.; AGNELLI, J. A. M.; MORAIS, L. C. DE; MATTOSO, L. H. C. 2008, “Estudo das Propriedades de Compósitos Biodegradáveis de Amido/Glúten de Milho/Glicerol Reforçados com Fibras de Sisal” In: *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 18, nº 4, p. 353-358. Disponível em: [www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282008000400016&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282008000400016&script=sci_arttext). Acesso: 10 nov.2015.

- CUPERTINO, L. F. Modelagem do módulo de Young em nanocompósitos através de inteligência computacional. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Disponível em: <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15391/15391\\_1.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/15391/15391_1.PDF)>. Acesso: 23 mar.2015.
- DI BELLA, G.; CALABRESE, L.; BORSELLINO, C. 2012, “Mechanical characterization of a glass/polyester sandwich structure for marine applications”, In: *Materials and Design*, v. 42, pp. 486-494. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 set.2015.
- DUARTE, T. M.; REIS, J. M. L. 2014, “Experimental Investigation of Heat Conduction in Red Mud/Epoxi and Red Mud/Polyester Composites”, In: *International Journal of Thermophysic*, vol. 35, pp. 1590-1600. DOI: 10.1007/s10765-014-1684-3. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 16 jan.2015.
- DWEIB, M. A.; HU, B.; O’DONNELL, A. *et al.* 2004, “All natural composite sandwich beams for structural applications”. In: *Composite Structures*, v. 63, pp. 147 – 157. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00143-0. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 16 nov.2014.
- ESCUSA, G. *et al.* Caracterização experimental do comportamento mecânico de painéis sandwich com lâminas de GFRP e núcleo de poliuretano. *JPEE 2014 (5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas)*. Vêrsila biblioteca digital. 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/32418>>. Acesso: 28 jan. 2016.
- FARIAS, J. O. G. de (Consultor). *Relatório Técnico 39 – Perfil do Caulim*. MME – Ministério de Minas e Energia, 2009. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM). Site institucional. Produto 28 – Outras Rochas e Minerais Industriais. Contrato N° 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Disponível em [http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/...../P28\\_RT39\\_Perfil\\_do\\_caulim.pfd](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/...../P28_RT39_Perfil_do_caulim.pfd). Acesso: 19 set.2014.
- FERREIRA, M. R. da S. *Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro*. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 119 p. 2013. Disponível em:<<http://www.ppgec.feciv.ufu.br/node/358>> . Acesso: 20 nov.2014.
- GAGLIARDO, D. P. *Análises de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto*. Dissertação (Mestrado) para o Programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 174 p. 2008.
- .GAGLIARDO, D. P.; MASCIA, N. T. *Análises de estruturas sanduíche: parâmetros de projeto*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 247-258, out./dez.

2010. ISSN 1678-8621. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ac/v10n4/a17v10n4.pdf>. Acesso: 10 mai.2016.
- GASSAN, J.; BLEDZKI, A. K. 1999, “Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxi composites by alkali treatment of fibres”. In: ***Composites Science and Tecnology***, v. 59, pp. 1303 – 1309. PII: S0266-3538(98)00169-9. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jun.2014.
- GDOUTOS, E. E.; DANIEL, I. M. 2008, “Failure mechanisms of composite sandwich structures”. Disponível em: <[www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/cigf/igf17/paper/.../300](http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/cigf/igf17/paper/.../300)>. Acesso: 10.dez.2015.
- GEHLEN, L. R. *Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado*. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais – PIPE. Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Paraná, Brasil, 104 p., 2014. Disponível em: [www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/273.pdf](http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/273.pdf). Acesso: 10 out. 2015.
- GOMES, L. S. M. 2010. O Quadril, Biomateriais em Artroplastia de Quadril: Propriedades, Estrutura e Composição, 1ª edição. São Paulo: Editora Atheneu.
- GOMEZ, G. O. *Acústica aplicada a la construcción. El ruido*. Santiago de Cuba: Ediciones ISPJAM, 1988.
- GOWDA, T. M.; NAIDU, A. C. B.; CHHAYA, R. 1999, “Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites”. In: ***Composites: Part A: Applied Science and manufacturing***, 30, pp. 277 – 284. PII: S1359-835X(98)00157-2. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 6 mar.2015.
- HORROCKS, A.R.; KANDOLA, B.K. 2005. Inflamabilidade e Resistência ao Fogo de Compósitos em *Projeto e Fabricação de Compósitos Têxteis*. Ed. Woodhead Ltd., Cambridge, capítulo 9, p 330.
- INTERNATIONAL STANDARD. ISO 140-3:1995 (E) *Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*.
- KANDOLA, B. K.; HORROCKS, A.R. 2001. *Compósitos em materiais à prova de fogo*, Ed. Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, capítulo 6, p 182.
- KENGKHETKIT, N.; AMORNSAKCHAI, T. 2012, “Utilization of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1 A novel extraction method for short pineapple leaf fiber”. In: ***Industrial Crops and Products***, v. 40, pp. 55-61. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.02.037. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jun.2014.

- KITCHEN, S.; BAZIN, S. (org.). 1998, **Eletroterapia de Cleyton**. São Paulo, Manole Ltda, 10ª edição.
- LIMA, A. B.T. *Aplicações de cargas minerais em polímeros*. Dissertação (Mestrado) para a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2007. Disponível em: < <http://coopmaco.com.br/wp-content/uploads/2014/03/APLICA%C3%87%C3%83O-DE-CARGAS-MINERAIS-EM-POLIMEROS.pdf>>. Acesso: 01 mai.2016.
- MANFROI, E. P. 2009. 152p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/92863/271247.pdf?sequence...>>. Acesso: 20 jan. 2016.
- MEDEIROS, E. S. DE *et al.* 2003, “Comportamento térmico de compósitos de resina fenólica reforçados por tecidos híbridos de juta e algodão”. In: **Anais do 7º Congresso Brasileiro de Polímeros**. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2003/Document/344.pdf>>. Acesso: 24 set.2015.
- MENDONÇA, P. T. 2005, **Materiais compostos e estrutura-sanduíche: projeto e análise**. Barueri, SP, Manole. ISBN: 8520418821.
- MIRANDA, R. M. *Estudo do Comportamento Mecânico de um Eco-Compósito para Aplicação como Paineis Divisórios de Ambientes*. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2007. Disponível em: <<http://bc.ufpa.br/site/>>. Acesso: 20 jan. 2014.
- MOHANTY, A. K.; KHAN, M. A.; HINRICHSEN, G. 2000, “Surface modification of jute and its influence on performance of biodegradable jute-fabric/Biopol composites”. In: **Composites Science and Technology**, v. 60, pp. 1115-1124. PII: S0266-3538(00)00012-9. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jul.2014.
- MOSTAFA, A.; SHANKAR, K.; MOROZOV, E. V. 2015, “Behaviour of PU-foam/glass-fibre composite sandwich panels under flexural static load”. In: **Materials and Structures**, v. 48, pp.1545–1559. DOI 10.1617/s11527-014-0253-3. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 20 jul.2015.
- MUELLER, D. H.; KROBJILOWSKI, A. Outubro de 2003, “New discovery in the properties of composites reinforced with natural fibers”. In: **Journal of Industrial textiles**, v. 33, nº2, pp. 111-130. DOI: 10.1177/152808303039248. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jun.2014.

- NUNES, S. A. Influência do uso de retardantes de chama halogenados e não halogenados em poliolefinas. 2010. 112p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://bc.ufsc.br/site/>>. Acesso: 20 jan. 2015.
- O'DONNELL, A.; DWEIB, M. A.; WOOL, R. P. December 2003. "Natural fiber composites with plant oil-based resin". In: **Composites Science and Technology**, v. 64, p. 1135–1145. DOI:10.1016/j.compscitech.2003.09.024. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 10 jun.2014.
- OLIVEIRA, M. J. A. Efeito da adição de lama vermelha como carga nas propriedades mecânicas de compósitos de poliéster insaturado reforçado com fibra natural de curauá (*Ananas erectifolius*). 2013. 67p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. Disponível em: <<http://bc.ufpa.br/site/>>. Acesso: 20 jun. 2015.
- QUARESMA, L. F. (Consultor). *Relatório Técnico 22 – Perfil da Mineração de Bauxita*. MME - Ministério de Minas e Energia, 2009. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM). Site institucional. Produto 11 – Minério de Alumínio. Contrato N° 48000.003155/2007-17: Desenvolvimento de Estudos para Elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Disponível em [http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_mineracao\\_br\\_asileira/P11\\_RT22\\_Perfil\\_da\\_Minerao\\_de\\_Bauxita.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_br_asileira/P11_RT22_Perfil_da_Minerao_de_Bauxita.pdf). Acesso: 19 set.2014.
- RESENDE, E. C. 2013. 146 p. Aplicação da lama vermelha como catalisador em processos oxidativos/reduativos. Tese (Doutorado) para o Programa de Pós-Graduação em Agroquímica da Universidade Federal de Lavras (MG). Disponível em: <[repositorio.ufla.br/.../TESE\\_Aplicação%20da%20lama%20vermelha%20como%20catali...](http://repositorio.ufla.br/.../TESE_Aplicação%20da%20lama%20vermelha%20como%20catali...)>. Acesso: 20 jun. 2016.
- RIBEIRO, L. M.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; GALVÃO, A. O.; BELARMINO, D. D. 2013, "Flamabilidade e retardância de chama do compósito: poliéster insaturado reforçado com fibra de abacaxi (PALF)". In: **Holos**, ano 29, vol. 1, pp. 115-126. ISSN 1807-1600. Disponível em: < <http://www2.ifrn.edu.br>>. Acesso: 28 abr.2015.
- RODRIGUES, E. C. *Estudo da influência do tempo de reação e do teor de "Na" na síntese de zeólitas*. 2013. 90p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. Disponível em: <<http://bc.ufpa.br/site/>>. Acesso: 20 jun. 2014.
- SARI, A. 2015, "Fabrication and thermal characterization of kaolin-based composite phase change materials for latent heat storage in buildings". In: **Energy and Buildings**, vol. 96, p. 193–200. DOI:10.1016/j.enbuild.2015.03.022. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 2 ago.2015.

- SERAFIM, F. M. F. *Desenvolvimento de um painel sanduíche com carga à base de resíduos lignocelulósicos para aplicação em produtos na área de equipamentos de proteção*. 2015. 85p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação da em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <<http://www.posgraduacao.ufrn.br/ppgem>>. Acesso: 06 mai. 2016.
- SERRA, G. C. G. *Resposta ao Impacto de Paineis Sanduíche*. 2013. 51p. Dissertação (Mestrado) para o Programa de Pós-Graduação da em Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior. Disponível em: <[https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.../Resposta\\_Impacto\\_Painéis\\_Sanduíche.pdf](https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.../Resposta_Impacto_Painéis_Sanduíche.pdf)>. Acesso: 18 jan.2016.
- SILVA, I. L. A. da. *Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta*. 110p., 2014. Tese (Doutorado) – Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ. Disponível em: <[http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado\\_Isabela-Leao.pdf](http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado_Isabela-Leao.pdf)>. Acesso: 22 out. 2015.
- SILVA, M. C.; OLIVEIRA, S. V. DE; ARAÚJO, E. M. 2014, “Propriedades mecânicas e térmicas de sistemas de PLA e PBAT/PLA”. In: **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 9, n. 2, p. 112–117. ISSN 1809-8797. Disponível em: <[www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/430/316](http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/430/316)>. Acesso: 10 nov. 2015.
- SILVA, R. V. da. *Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais*. 139p. 2003. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../teseRosanaVilarimdaSilva.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/.../teseRosanaVilarimdaSilva.pdf)>. Acesso: 12 jan. 2014.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M.C.M.; DA MOTTA, M. 2007, “Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas”. In: **Revista Matéria**, v. 12, nº2, pp. 322-338, artigo 10888. ISSN 1517-7076. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10888>>. Acesso: 20 set.2014.
- SILVESTRE FILHO, G. D. *Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibra de carbono: contribuição para o projeto de implante de quadril*. 156p. 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <[www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/.../tde.../dissertacao\\_gdsfilho.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/.../tde.../dissertacao_gdsfilho.pdf)>. Acesso: 10 jan. 2014.
- SOARES, B. A. R. S. *Estruturas sandwich com utilização de núcleos de cortiça*. Dissertação (mestre) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 72p. 2007. Disponível

em:<<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137468031/Tese%20de%20mestrado%20Bruno%20Soares.pdf>>. Acesso: 15 mai. 2014.

SOUZA, J. A. da S. *Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil*. Tese (doutorado). Universidade Federal do Pará. Instituto de tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, 2010. Disponível em: <<http://bc.ufpa.br/site/>>. Acesso: 25 jul. 2014.

SRIVASTAVA, V. K. 2012, "Impact Behaviour of Sandwich GFRP-Foam-GFRP Composites". In: *International Journal of Composite Materials*, 2(4), pp. 63-66. DOI: 10.5923/j.comaterials.20120204.04. Disponível em: <<http://article.sapub.org/pdf/10.5923.j.comaterials.20120204.04.pdf>>. Acesso 16 set.2015.

STEWART, J. K.; MAHFUZ, H.; CARLSSON, L. A. 2010, "Enhancing mechanical and fracture properties of sandwich composites using nanoparticle reinforcement". In: *Journal of Material Science*, v. 45, pp. 3490–3496. DOI 10.1007/s10853-010-4380-0. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 10.jul.2015.

STUART, B. 2002, *Polymer Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-81363-7.

VADAKKE, V.; CARLSSON, L. A. 2004, "Experimental Investigation of Compression Failure Mechanisms of Composite Faced Foam Core Sandwich Specimens". In: *Journal of Sandwich Structures and Materials*, v. 6, p. 327-342. DOI: 10.1177/1099636204036041. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 10.jun.2015.

VARMA, I. K.; KRISHNAN, S. R. A.; KRISHNAMOORTHY, S. 1989, "Composites of glass/modified jute fabric and unsaturated polyester resin". In: *Composites*. v. 20, nº 4, pp. 383-388. DOI: 0010-4361/89/040383-06. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jan.2015.

VELASCO, R. V. *Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisal submetido a altas temperaturas*. 200 p., 2002. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ – COPPE), Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/2014207-Concreto-de-alto-desempenho-reforcado-com-fibras-de-polipropileno-e-sisal-submetido-a-altas-temperaturas-reila-vargas-velasco.html>> . Acesso: 12 dez.2015.

VENTURA, A. M. F. M. 2009, "Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas", In: *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, v. 21, nº 3/4, p. 10-19. ISSN: 0870-8312. Disponível em: <[www.periodicos.capes.gov.br](http://www.periodicos.capes.gov.br)>. Acesso: 12 jun.2014.

- VILAR, W. D. 2001, *Química e tecnologia dos Poliuretanos*. Rio de Janeiro, RJ, Vilar Consultoria. ISBN: 8590523411.
- UNDERWRITERS LABORATORIES INC. UL 94 - 96 *Test for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances*.
- WEILI WU, L. T. 2013, “Formulation and morphology of kaolin-filled rubber composites”, In: *Applied Clay Science*, 80–81, p. 93–97. DOI: 10.1016/j.clay.2013.06.025. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso: 1 ago.2015.
- WEN-CHAO, H; CHUNG-FAI, N. 1998, “Sound Insulation Improvement using Honeycomb Sandwich Panels”, In: *Applied Acoustics*, vol. 53, nº 1-3, pp. 163-177. PII: S0003-682X(97)00033-9. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso: 12 jan.2015.
- ZHANG, S.; JIANG, P.; LIU, X.; GU, X.; ZHAO, Q.; HU, Z.; TANG, W. 2014, “Effects of kaolin on the thermal stability and flame retardancy of polypropylene composite”, In: *Polymers Advanced Technologies*, vol. 25, pp. 912-919. DOI: 10.1002/pat.3325. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso: 04 nov.2015.

## GLOSSÁRIO

- Alongamento** – é o aumento no comprimento produzido no comprimento original no corpo de prova por uma carga de tração ( $\Delta L$  ou  $\delta$ ). É expresso em unidade de comprimento, comumente em mm.
- Alongamento percentual** – é o alongamento do corpo de prova expresso em porcentagem do comprimento inicial.
- Calcinação** – é a reação química de decomposição térmica, usada para transformar o calcário em cal virgem, liberando gás carbônico.
- Comprimento de onda (l)** – é distância, a partir de qualquer valor de pressão sonora, para que um ciclo se complete na curva de pressão sonora *versus* distância ( $l = c/f$ ), onde  $c$  é a velocidade do som, em metros e  $f$  é a frequência em Hz.
- Comprimento inicial** – é o comprimento original da porção do corpo de prova sobre o qual a deformação no comprimento é determinada.
- Curva tensão-deformação à tração** – é um diagrama no qual as tensões à tração são plotadas como ordenadas com correspondentes valores de deformação à tração como abscissas.
- Deformação específica** – é a deformação por unidade de comprimento ( $\epsilon = \Delta L/L$ ). É adimensional.
- Ductibilidade** - É a capacidade que um material tem em deforma-se plasticamente até sua ruptura. Um material que se rompe sem sofrer uma quantidade significativa de carga no regime plástico é denominado de *frágil*.
- Elasticidade/comportamento elástico** - o comportamento elástico de um material é a capacidade que o mesmo tem em retornar sua forma e dimensões originais quando retirado os esforços externos sobre ele.
- Floculação** – é a aglutinação em flocos, das partículas de um precipitado ou de um sistema coloidal; frequentemente ocasionada pela alteração do pH do sistema.
- Flotação** – é um processo de separação de sólido-líquido, que anexa o sólido à superfície de bolhas de gás fazendo com que ele se separe do líquido.
- Frequência (f)** – é o inverso do período (T) ( $f = 1/T$ ). Sua unidade é ciclos/segundo ou hertz (Hz).
- Inflamabilidade** – é a facilidade com que algo queima ou entra em ignição, causando fogo ou combustão.
- Limite elástico** – é a maior tensão que um material é capaz de suportar sem qualquer deformação permanente após a retirada da tensão. É expressa em força por unidade de área.
- Lixiviação** – é o processo de extração de uma substância sólida através da sua dissolução num líquido.
- Material elástico linear** – é aquele que obedece a Lei de Hooke.
- Material elastoplástico** – é um material com comportamento elástico, que após certo valor de tensão, apresenta deformações residuais.
- Material híbrido** – resultante da combinação de materiais diferentes.
- Material não-elástico** – é aquele que não obedece a Lei de Hooke.
- Material plástico** – é um material não-elástico com deformação residual.
- Módulo de elasticidade (módulo elástico ou Módulo de Young)** – é a razão da tensão (nominal) pela correspondente deformação abaixo do limite de proporcionalidade do material. É expressa por força por área, usualmente megapascals.
- Monômeros** – são substâncias constituídas por pequenas moléculas cujas ligações são covalentes. Um monômero deve ter pelo menos 2 pontos reativos em cada

molécula. Esses pontos reativos correspondem às ligações insaturadas entre átomos de carbono e grupos funcionais oxigenados ou nitrogenados.

**Período (T)** – é o intervalo de tempo decorrido para que um ciclo se complete na curva de variação da pressão ambiente com o tempo.

**Polímero** - A palavra polímero deriva do grego poli (muitas) + mero (partes), ou seja, é a repetição de muitas unidades (poli) de um tipo de composto químico (mero).

**Plasticidade/comportamento plástico** - O material já não consegue recuperar sua forma e dimensões originais quando o mesmo é submetido a tensões que ultrapassam certo limite (chamada de limite elástico) no qual o material sofre um deformação permanente.

**Poliestireno expandido** - é uma espuma de plástico feito de contas interligadas minúsculos. Durante o processo de fabrico, pentano gás é soprado para dentro da espuma para obter o produto acabado.

**Poliestireno extrudido** - este tipo de poliestireno é fabricado sob temperaturas e pressão extremamente quentes. Depois de esfria-la, ela é cortada na forma e tamanho desejados. Poliestireno extrudido é utilizado para o isolamento comercial e residencial, e também para fazer itens como copos de espuma de plástico e placas. Ambas as variações de poliestireno de espuma são os produtos termoplásticos rígidos. No entanto, devido às diferentes formas de serem fabricados, de poliestireno extrudido é melhor isolante e não absorve tanta humidade como poliestireno expandido. É um material de isolamento acústico ideal e uma boa escolha para os construtores ambientalmente conscientes.

**Ponto de escoamento** – é o primeiro ponto da curva tensão-deformação no qual um aumento na deformação ocorre sem um aumento na tensão.

**Ponto de fulgor** – é a menor temperatura na qual um combustível liberta vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável por uma fonte externa de calor.

**Propriedades físicas** - as propriedades físicas são características dos materiais. Apercebemo-nos delas pela análise do comportamento dos materiais na presença de determinados fenômenos físicos. As propriedades físicas podem ser determinadas, sem que existam alterações na constituição dos materiais analisados.

**Propriedades químicas** - as propriedades químicas são comportamentos característicos de uma substância quando esta se encontra na presença de uma outra substância. Para investigar as propriedades químicas teremos que proceder a transformações químicas (realizando ensaios químicos) e geralmente não é possível recuperar a amostra utilizada (porque ela sofre transformações dando origem a outras substâncias). Os ensaios químicos geralmente são úteis para identificar algumas substâncias.

**Propriedades mecânicas** - as propriedades mecânicas compreendem a resposta dos materiais às influências mecânicas externas, manifestadas pela capacidade de desenvolverem deformações reversíveis e irreversíveis, e resistirem à fratura. Essas características dos materiais são geralmente avaliadas por meio de ensaios, que indicam dependências tensão-deformação.

**Razão de aspecto de uma fibra** – é a relação entre o comprimento (L) e o diâmetro (D) de uma fibra, ou seja: L/D.

**Resistência à tração (Nominal)** – é a máxima tensão à tração (nominal) suportada pelo corpo de prova durante um ensaio. Quando a tensão máxima ocorre no ponto de escoamento, é designada resistência à tração de escoamento. Quando a tensão máxima ocorre na ruptura, ela é designada resistência à tração de ruptura.

**Resiliência** - É a capacidade que o material tem em absorver energia no regime elástico (quando é deformado elasticamente).

**Resistência ao escoamento** – é a tensão na qual o material exhibe um desvio limitado específico da proporcionalidade da tensão para a deformação. Exceto alguma especificação, essa tensão será a tensão no ponto de escoamento e quando expressa como resistência à tração, deve ser designada por resistência à tração no escoamento ou tensão à tração no escoamento.

**Tenacidade** - É a capacidade que um material tem em absorver energia até a sua ruptura. Também pode ser definida como a energia mecânica necessária para levar um material à ruptura.

**Tensão à tração (Nominal)** – é a carga à tração por unidade de área da seção mínima original, dentro do limite do extensômetro, a qual o corpo de prova é submetido num dado momento. É expresso em força por unidade de área, normalmente em Megapascals.