



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Ana Carolina Viana Passos

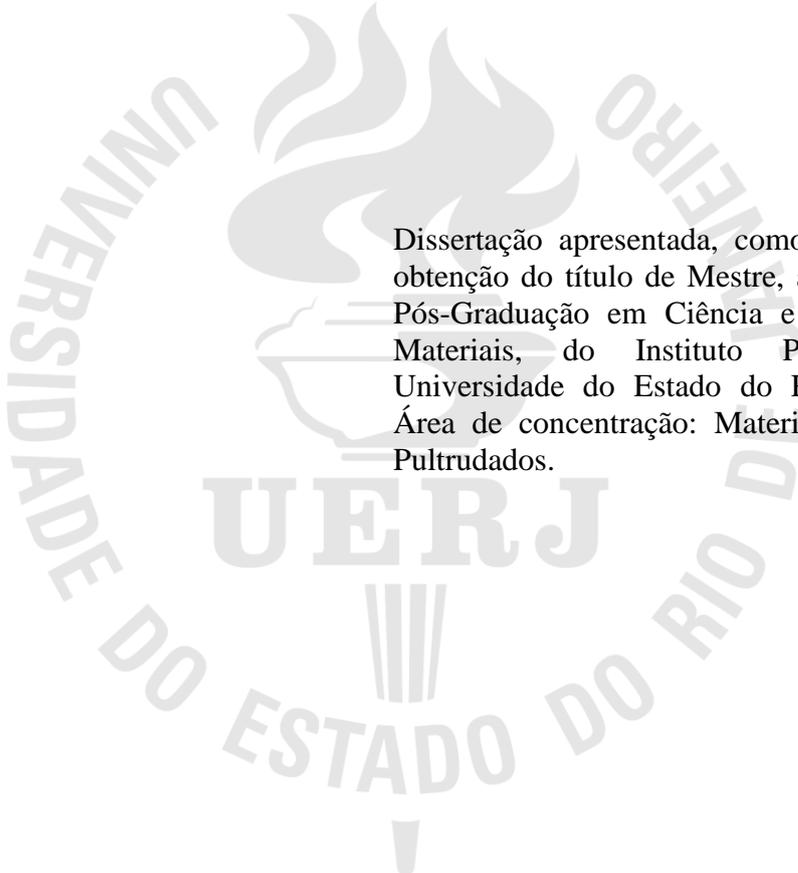
**Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material
pultrudado**

Nova Friburgo

2016

Ana Carolina Viana Passos

Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Compósitos Pultrudados.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

P289 Passos, Ana Carolina Viana.
Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado / Ana Carolina Viana Passos. - 2016.
154 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Pultrusão – Teses. 2. Polimeros - Misturas - Propriedades mecânicas – Teses. 3. Juntas (Engenharia) - Ensaio mecânicos – Teses. 4. Adesão – Teses. 5. Cisalhamento – Teses. 6. Gomas e resinas sintéticas – Teses. 6. Termoplasticos – Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 678.7-19

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Ana Carolina Viana Passos

Data

Ana Carolina Viana Passos

Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais Compósitos Pultrudados.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ

Prof. Dr. João Marciano Laredo dos Reis
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis
Instituto Politécnico - UERJ

Nova Friburgo

2016

DEDICATÓRIA

À minha família, grande motivação deste trabalho e de toda luta. Aos poucos, porém grandiosos amigos que encontrei nesta caminhada os quais, ainda que sem saberem, foram grandes incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador que, depois de muita insistência da minha parte e dentre muitas atividades, aceitou me orientar e durante todo período sempre encontrou uma maneira de me ajudar, incentivar e, é claro, dividir seu conhecimento.

Aos técnicos do Laboratório de Adesão e Aderência, Anselmo Duarte, Jane Luci Amaral, Marcelo Correa e Ricardo Hudson pelo auxílio, aprendizado e dedicação ao desenvolvimento deste trabalho. Estes, dentre muitas outras atividades, foram responsáveis pela elaboração de corpos de prova, colagens, tratamento superficial, análise de superfície e rugosidade e execução de ensaios mecânicos.

Aos companheiros de laboratório, Ney Rohem e Wagner Bretas pela maneira como me receberam na equipe, por todo apoio e ajuda ao longo deste período.

Ao Prof. Dr. Antônio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé da Silva pela disponibilidade em realizar a análise estatística.

Aos Professores do IPRJ pelo conhecimento compartilhado, dedicação de horas aulas e toda atenção dispensada no esclarecimento de dúvidas.

A todos os profissionais do IPRJ, de modo geral, os quais me auxiliaram em questões burocráticas e proporcionaram um ambiente favorável de trabalho.

Ao Sr. Edmar, motorista do IPRJ, este sempre muito solícito e disposto.

A Rogério Menegaz e toda equipe da empresa Pultrusão do Brasil pelo apoio e confiança ao abrir as portas de empresa para execução de testes fundamentais, bem como a total disponibilidade em esclarecer dúvidas e fornecer material de teste durante toda pesquisa.

A abrasivos Amarante pela disponibilidade e fornecimento de material para pesquisa.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

Descobri que a persistência, quando isenta de ansiedade, que a empolgação serena, que o sempre tentar mais uma vez, que o evitar a tensão e impaciência, que o ter certeza na conquista da meta e a concentração inteligente sobre aquilo que se faz são “condições” indispensáveis ao candidato à saúde, à paz e a felicidade.

Hermógenes

RESUMO

PASSOS, Ana Carolina Viana. *Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas de material pultrudado*. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2016.

Para melhor adesão entre superfícies de perfis pultrudados em geral opta-se por um tratamento pré-colagem. Atualmente o tratamento superficial mais utilizado em campo é o lixamento, o qual tende a produzir resíduo (pó) e, eventualmente, superfícies heterogêneas. Neste trabalho investigou-se o comportamento mecânico de juntas coladas de cisalhamento submetidas a tratamentos superficiais alternativos ao lixamento, os quais consistiram em dois *primers* aplicados por simples borrifação com secagem ao ar. Como material de união um único adesivo foi utilizado para os tratamentos propostos nesta pesquisa, bem como para as juntas coladas que tiveram a superfície lixada ou foram coladas sem tratamento prévio. Em alternativa ao adesivo, juntas coladas com fitas adesivas aplicadas em superfície tratada com *primer* de silano também foram avaliadas. Chapas pultrudadas de 3 mm produzidas com resina poliéster aditivada foram selecionadas para confecção dos substratos. Comparando com as juntas que não receberam tratamento, o *primer* de silano hidrolizado promoveu um incremento de aproximadamente 1.45% na resistência mecânica, este superior ao lixamento com 1.14% de acréscimo na força máxima média suportada em cisalhamento. O segundo *primer* estudado teve desempenho inferior aos demais, com diminuição de 40% da resistência mecânica das juntas. De acordo com análise estatística, tanto o lixamento como o *primer* de silano hidrolizado não influenciaram na resistência mecânica das juntas coladas, equiparando-se estatisticamente com as juntas que não receberam tratamento. As fitas adesivas apresentaram alta deformação e desempenho mecânico inferior aos demais, diferenciando também estatisticamente. Independente do tratamento superficial, lixamento ou *primer* de silano hidrolizado, nenhum corpo de prova apresentou resistência à fluência.

Palavras-chave: Pultrusão. Juntas coladas. Colagem. Comportamento mecânico. Materiais compósitos. Aderência.

ABSTRACT

PASSOS, Ana Carolina Viana. *Study of the mechanical behavior of bonded joints of pultruded material*. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2016.

For better adhesion between surfaces of pultruded profiles is generally opts for a pre-bonding treatment. Currently the most used in the surface treatment field is sanding, which tends to produce a residue (powder) and eventually heterogenias surfaces. This work investigated the mechanical behavior of bonded joints subjected to shear alternative surface treatments to sanding, which consisted of two primers applied by simply spraying with air drying. As union a single adhesive material was used for the proposed treatments in this research, as well as the bonded joints that had the sanded surface or were bonded without pretreatment. As an alternative to adhesive bonded joints with adhesive tape applied to surface treated with silane primer were also evaluated. 3 mm pultruded plates produced with polyester resin additives were selected for preparation of substrates. Compared to the joints that received no treatment, the primer hydrolyzed silane promoted an increase of approximately 1:45% in strength, the higher the sanding with 14.01% increase in the average maximum force supported shear. The second primer studied had underperformed the other, a reduction of 40% of the mechanical strength of the joints. According to statistical analysis, so as sanding the primer hydrolyzed silane did not influence the mechanical strength of the glued joints, which can be compared statistically with joints that received no treatment. The tapes showed high deformation and mechanical performance inferior to the others, differentiating statistically too. Regardless of surface treatment, sanding or primer hydrolyzed silane, no sample showed creep resistance.

Keywords: *Pultrusion. Bonded joints. Bonding. Mechanical behavior. Composite materials.*

Adherence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Piso e passarela fabricados em material pultrudado.....	16
Figura 2 – Leito pultrudado para cabos e escadas	17
Figura 3 – Perfil “I” pultrudado: Fibras contínuas e alinhadas longitudinalmente	28
Figura 4 – Tipos de fratura em juntas coladas	32
Figura 5 – Esquema: Cisalhamento do adesivo em junta de colada	34
Figura 6 – Esquema: Junta colada submetida a tensões de descascamento.....	35
Figura 7 – Tensões em juntas de cisalhamento	36
Figura 8 – Parâmetros das juntas de cisalhamento sob ação da força axial (F).....	37
Figura 9 – Junta colada submetida a esforço de cisalhamento	38
Figura 10 – Molhamento da superfície	41
Figura 11 – Perfis pultrudados com diversas seções transversais	43
Figura 12 – Esquema simplificado do processo de pultrusão	44
Figura 13 – Curva exotérmica típica do ensaio SPI	47
Figura 14 - Curva temperatura <i>versus</i> posição no molde	48
Figura 15 – Alinhamento das pontas e da manta na placa de introdução	49
Figura 16 – Passagem do reforço pela banheira de impregnação.....	49
Figura 17 – Vista superior da banheira aberta: Fibras tracionadas e espaçadas	50
Figura 18 – Placas de introdução: Pultrusão de perfil do tipo cantoneira	50
Figura 19 – Molde aquecido: Vista panorâmica	51
Figura 20 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida	52
Figura 21 – Localização do pico exotérmico para diferentes velocidades de puxamento	53
Figura 22 – Tracionador e serra circular	54
Figura 23 – Perfil fenólico exposto ao tempo sem proteção superficial	56
Figura 24 – Medidores de temperatura.....	60
Figura 25 – Perfil “I” 38 mm pultrudado	60
Figura 26 – Grades de piso: Exemplo de viga portante e viga suporte	61
Figura 27 – Esquema: Dimensões dos corpos de prova para juntas pultrudadas	62
Figura 28 – Molde de colagem LAA	64
Figura 29 – Molde de colagem LAA e regulador de espessura	64
Figura 30 – Adaptação do molde de colagem para substrato pultrudado.....	65
Figura 31 – Máquina de fluência	68

Figura 32 – Rugosímetro tridimensional	69
Figura 33 – Material de reforço: Manta de vidro contínua e <i>rovings</i>	71
Figura 34 - Perfil fenólico: Segundo ensaio SPI	76
Figura 35 – Perfil fenólico (teste 1) com 100 pontas e 78,9% de reforço	77
Figura 36 – Perfil acrílico: Segundo ensaio SPI	80
Figura 37 – Perfil poliéster com 75 pontas (56,7% de reforço)	82
Figura 38 – Perfil poliéster: Primeiro ensaio SPI	82
Figura 39 – Perfil fenólico (teste 1): Final da pultrusão	83
Figura 40 – Perfil acrílico: Final da pultrusão	84
Figura 41 – Perfil poliéster: Final da pultrusão	84
Figura 42 – Gráfico: Força máxima média para os Lotes do Grupo 1 e Grupo 2	88
Figura 43 – Gráfico: Energia absorvida para os Lotes do Grupo 1 e Grupo 2	89
Figura 44 – Equipamento de fluência LAA	91
Figura 45 – Ensaio de fluência (Lote 19): Curva força <i>versus</i> tempo	93
Figura 46 – Ensaio de fluência (Lote 20): Curva força <i>versus</i> tempo	93
Figura 47 – Rugosidade total: Superfície pultrudada isenta de tratamento	96
Figura 48 – Rugosidade total: Superfície pultrudada lixada (grão 100)	97
Figura 49 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com <i>primer</i> de silano 3M	97
Figura 50 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com <i>primer</i> ALMASUPER	98
Figura 51 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com silano hidrolisado	98
Figura 52 – Superfície de fratura: CP 13.4	100
Figura 53 – Superfície de fratura: CP 13.1	100
Figura 54 – Superfície de fratura: CP 13.2	101
Figura 55 – Superfície de fratura: CP's 14.1	102
Figura 56 – Superfície de fratura: CP's 14.8.....	102
Figura 57 – Superfície de fratura: CP's 15.4	103
Figura 58– Superfície de fratura: CP's 15.10.....	104
Figura 59 – Superfície de fratura: CP's 15.8	104
Figura 60 – Superfície de fratura: CP 16.3	105
Figura 61 – Superfície de fratura: CP 16.1	106
Figura 62 – Superfície de fratura: CP 16.6	106
Figura 63 – Resultado da análise estatística: Resíduos <i>versus</i> valores preditos.....	108
Figura 64 – Resultado da análise estatística: Histograma dos resíduos	109
Figura 65 – Lote 13: 1º ensaio de cisalhamento - curva força <i>versus</i> deslocamento	118

Figura 66 – Lote 13: 2º ensaio de cisalhamento - curva força <i>versus</i> deslocamento.....	118
Figura 67 – Ensaio de cisalhamento Lote 15: Curvas força <i>versus</i> deslocamento	119
Figura 68 – Ensaio de cisalhamento Lote 14: Curvas força <i>versus</i> deslocamento	120
Figura 69 – Ensaio de cisalhamento Lote 16: Curvas força <i>versus</i> deslocamento	121
Figura 70 – Ensaio de cisalhamento Lote 17: Curvas força <i>versus</i> deslocamento	122
Figura 71 – Ensaio de cisalhamento Lote 18: Curvas força <i>versus</i> deslocamento	123
Figura 72 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 01)	128
Figura 73 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 02)	131
Figura 74 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 04)	129
Figura 75 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 04)	130
Figura 76 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 05)	130
Figura 77 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 06)	131
Figura 78 – Aspecto da rugosidade: Lixada (CP 07)	132
Figura 79 – Aspecto da rugosidade: Lixada (CP 08)	132
Figura 80 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 09)	133
Figura 81 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 10)	133
Figura 82 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 11)	134
Figura 83 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 13)	135
Figura 84 - Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 14)	135
Figura 85 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 15)	136
Figura 86 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 17)	137
Figura 87 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 18)	137
Figura 88 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 19)	138
Figura 89 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 20)	138
Figura 90 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 21)	139
Figura 91 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 22)	140
Figura 92 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 23)	140
Figura 93– Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 24)	141
Figura 94 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 26)	142
Figura 95 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 28)	142
Figura 96 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 29)	143
Figura 97 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 30)	143
Figura 98 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 31)	144
Figura 99 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 33)	145

Figura 100 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 34)	145
Figura 101 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 35)	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais aditivos e suas respectivas finalidades no compósito	21
Tabela 2 – Composição de fibras de vidro de reforço	27
Tabela 3 – Molhabilidade de uma superfície: Classificação de acordo com o ângulo Θ	41
Tabela 4 – Principais propriedades e características dos materiais pultrudados	58
Tabela 5 – Propriedades físicas e químicas: Perfis pultrudados x aço inoxidável	58
Tabela 6 – Distribuição dos lotes ensaiados em cisalhamento.....	67
Tabela 7 – Resinas empregadas na pultrusão dos perfis: Principais propriedades	70
Tabela 8 – Materiais selecionados para reforço dos perfis pultrudados	71
Tabela 9 – Compostos resinados empregados na pultrusão dos perfis	72
Tabela 10 – Materiais selecionados para colagem das juntas pultrudadas	73
Tabela 11 – Materiais de união e respectivos tratamentos superficiais (pré-colagem)	73
Tabela 12 – Condições de partida (teste 1): Perfil “I 38” composto fenólico	74
Tabela 13 – Perfil “I 38” fenólico (teste 1): Parâmetros do ensaio SPI	77
Tabela 14 – Condições de partida (teste 2): Perfil “I 38” composto fenólico	78
Tabela 15 - Perfil “I 38” fenólico (teste 2): Parâmetros do ensaio SPI	79
Tabela 16 – Condições de partida: Perfil “I 38” composto acrílico	79
Tabela 17 – Perfil “I 38” acrílico: Parâmetros do ensaio SPI	81
Tabela 18 – Condições de partida: Perfil “I 38” composto poliéster	81
Tabela 19 – Resultados dos ensaios de cisalhamento: Força máxima Grupos 1 e 2	85
Tabela 20 – Espessura média na região colada e força máxima em cisalhamento	87
Tabela 21 – Resultados dos ensaios de cisalhamento: Energia média Grupos 1 e 2	88
Tabela 22 – Parâmetros do ensaio de fluência	90
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de fluência	92
Tabela 24 – Rugosidade total em superfície pultrudada com e sem véu	94
Tabela 25 – Rugosidade total em superfície pultrudada sem véu submetida a diferentes tratamentos	95
Tabela 26 – Análise do tipo de fratura e resistência ao cisalhamento	107
Tabela 27 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 13.....	117
Tabela 28 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 14	119
Tabela 29 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 15	120

Tabela 30 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 16	121
Tabela 31 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 17	122
Tabela 32 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 18	123
Tabela 33 – Espessura e área total média Grupo 1	124
Tabela 34 – Lote 13: Espessura e área total colada	124
Tabela 35 – Lote 14: Espessura e área total colada	125
Tabela 36 – Lote 15: Espessura e área total colada	126
Tabela 37 – Lote16: Espessura e área total colada	127
Tabela 38 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada com véu sem tratamento	128
Tabela 39 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada com véu lixada (grão100) ...	131
Tabela 40 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu sem tratamento.....	134
Tabela 41 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu lixada (grão 100) ...	136
Tabela 42 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com silano hidrolisado	139
Tabela 43 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com ALMASUPER	141
Tabela 44 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com silano 3M	144
Tabela 45 – Espessura e área média na região colada: Lote 13	147
Tabela 46 – Espessura e área média na região colada: Lote 14	148
Tabela 47 – Espessura e área média na região colada: Lote 15 (continua)	148
Tabela 48 – Espessura e área média na região colada: Lote 16	149
Tabela 49 – Locais de aplicação de grades de piso pultrudadas conforme nível de resistência ao fogo	150

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	16
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
1.1	Materiais compósitos	19
1.1.1	<u>Fase matriz</u>	20
1.1.1.1	Resinas termofixas	20
1.1.1.1.1	Resina poliéster	22
1.1.1.1.2	Resina acrílica	23
1.1.1.1.3	Resina fenólica	24
1.1.2	<u>Fase reforço</u>	25
1.1.2.1	Fibra de vidro	26
1.1.2.2	Tipos de fibra de vidro.....	27
1.1.3	<u>Polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV)</u>	27
1.1.4	<u>Pultrudado resistente à chama e com baixa liberação de fumaça</u>	29
1.1.4.1	Alumina trihidratada (ATH)	30
1.2	Juntas coladas	31
1.2.1	<u>Tipos de fratura</u>	31
1.2.2	<u>Esforços em juntas de cisalhamento</u>	33
1.2.3	<u>Resistência das juntas coladas: Principais fatores de influência</u>	36
1.3	Adesão e molhabilidade	39
1.4	Adesivos estruturais uretânicos	42
1.5	O processo de pultrusão	43
1.5.1	<u>Histórico</u>	43
1.5.2	<u>O processo de pultrusão: Uma visão geral</u>	44
1.5.3	<u>Principais variáveis de controle</u>	45
1.5.3.1	Banheira de impregnação: Viscosidade da resina e molhabilidade das fibras	45
1.5.3.2	Molde aquecido: Cura da resina	46
1.5.3.3	Ensaio SPI	46
1.5.4	<u>Etapas do processo</u>	48
1.5.4.1	Alinhamento do reforço nas placas de introdução	48
1.5.4.2	Impregnação das fibras	49

1.5.4.3	Passagem pelas placas pré-forma	50
1.5.4.4	O molde aquecido	51
1.5.4.5	Interação molde x resina: Forças internas	51
1.5.4.6	Corte do perfil	54
1.5.5	<u>Pultrusão com resina fenólica: Algumas particularidades</u>	55
1.5.6	<u>Materiais pultrudados</u>	56
1.5.6.1	Propriedades gerais	56
1.5.6.2	Vantagens e desvantagens	57
2	Metodologia	59
2.1	Pultrusão dos perfis	59
2.1.1	<u>Configuração dos perfis</u>	60
2.2	Juntas de cisalhamento	61
2.2.1	<u>Confecção dos corpos de prova</u>	61
2.2.2	<u>Tratamento da superfície de colagem</u>	62
2.2.2.1	Lixamento manual	62
2.2.2.2	<i>Primer</i> ALMASUPER	63
2.2.2.3	<i>Primer</i> de silano 3M	63
2.2.2.4	2.2.2.4 <i>Primer</i> de silano hidrolisado	63
2.2.3	<u>Colagem dos corpos de prova</u>	63
2.2.3.1	Adesivo MasterPur	65
2.2.3.2	Fitas adesivas 3M	66
2.3	Ensaio mecânicos	66
2.3.1	<u>Ensaio de cisalhamento</u>	66
2.3.2	<u>Ensaio de fluência</u>	67
2.4	Análise da superfície	68
2.4.1	<u>Nível de rugosidade</u>	68
2.4.2	<u>Tipos de falha</u>	69
2.5	Análise estatística	69
3	MATERIAIS	70
3.1	Perfis pultrudados	70
3.2	Juntas coladas de pultrudado de matriz poliéster	72
4	RESULTADOS	74
4.1	Pultrusão dos perfis	74
4.1.1	<u>Composto fenólico</u>	74

4.1.1.1	Teste 1	74
4.1.1.2	Teste 2	78
4.1.2	<u>Composto acrílico</u>	79
4.1.3	<u>Composto poliéster</u>	81
4.2	Ensaio de cisalhamento	85
4.3	Ensaio de fluência	90
4.4	Análise da rugosidade	94
4.4.1	<u>Rugosidade total: Superfície pultrudada (com e sem véu) submetida à abrasão manual com lixa grão 100</u>	94
4.4.2	<u>Rugosidade total: Superfície pultrudada (sem véu) submetida à diferentes tratamentos superficiais</u>	95
4.5	Análise da superfície de fratura	99
4.5.1	<u>Superfície lixada</u>	99
4.5.2	<u>Superfície sem tratamento</u>	101
4.5.3	<u>Superfície tratada com <i>primer</i> de silano hidrolisado</u>	103
4.5.4	<u>Superfície tratada com <i>primer</i> ALMASUPER</u>	105
4.6	Análise estatística	108
	CONCLUSÕES	110
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
	REFERÊNCIAS	112
	APÊNDICE A - Resultados dos ensaios de cisalhamento	117
	APÊNDICE B - Espessura da área colada (Grupo 1)	124
	APÊNDICE C - Análise da rugosidade – Tabelas e imagens	128
	APÊNDICE D - Análise da rugosidade – Tabelas e imagens	147
	APÊNDICE E – Conferência Luso Brasileira de Adesão e Adesivos (CLBA) ...	151
	ANEXO A - Classificação de grade de piso quanto à resistência ao fogo	152
	ANEXO B – Análise estatística: Normalidade e homoscedasticidade	154

INTRODUÇÃO

Materiais compósitos pultrudados estão presentes no mercado nacional há pouco mais de 20 anos e, apesar de ser uma técnica de fabricação ainda pouco difundida no Brasil, atualmente vem ganhando destaque em diversos setores da indústria, em especial a do petróleo e gás natural.

Se comparado a materiais tradicionais como aço, alumínio e a madeira, estruturas e componentes pultrudados apresentam algumas vantagens relevantes. Por serem mais leves, a logística, o manuseio e a instalação tornam-se etapas muito mais simples e rápidas. E ainda, selecionada adequadamente a matéria prima e respeitadas as limitações do material, em especial a baixa resistência ao fogo, o pultrudado é capaz de resistir a ambientes altamente agressivos por um longo período sem que seja necessária qualquer manutenção.

Com o intuito de prolongar a vida útil e eliminar a manutenção, plataformas e instalações *offshore* tem substituído gradativamente diversos componentes e estruturas, estes anteriormente produzidos em material metálico, pelos pultrudados. Como exemplo pode-se citar grades de piso (Figura 1), guarda-corpos (Figura 1), escadas de marinho (Figura 2) e sistemas de bandejamento (Figura 2). Relatos de profissionais do setor afirmam que grades de piso, sem qualquer manutenção, estão instaladas há cerca 17 anos em plataformas em plena operação.

Figura 1 - Piso e passarela fabricados em material pultrudado



Legenda: À esquerda grade de piso e à direita guarda corpo componentes de uma passarela, ambos produzidos em material pultrudados e instalados em ambientes agressivos.

Fonte: PULTRUSAO DO BRASIL, [s.d.].

Figura 2 – Leito pultrudado para cabos e escadas



Legenda: À esquerda, leito pultrudado para cabos leves e pesados e à direita escada de marinheiro toda em material pultrudado com patamar intermediário.

Fonte: PULTRUSAO DO BRASIL, [s.d.].

Em fevereiro de 2014 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a norma ABNT NBR 15708 “*Indústrias do petróleo e gás natural – Perfis pultrudados*”, esta dividida em parte como segue:

Parte 1: Materiais, métodos de ensaio e tolerâncias dimensionais

Parte 2: Guarda-corpo

Parte 3: Grade de piso

Parte 4: Sistema de bandejamento

Parte 5: Perfis estruturais

Baseada em normas internacionais o documento supracitado estabelece diversos critérios para certificação dos componentes, os quais compreendem desde a manufatura a ensaios de caracterização. Com respeito às grades de piso (parte 3), não há especificação para o tipo de resina empregado na pultrusão dos perfis bem como o material e tratamento superficial utilizado na colagem dos mesmos. Em geral, opta-se pela matriz fenólica em função da sua resistência à chama e a altas temperaturas. No entanto, existe alternativas a resina fenólica, tais como as resinas poliéster e acrílica, ambas aditivadas. Para colagem, adesivos bicomponentes são utilizados há algum tempo pela indústria, este precedido de tratamento superficial (lixamento).

Cientes do exposto anteriormente e após dois estágios na empresa Pultrusão do Brasil, a qual possui um convênio Universidade-Empresa obtido através do Laboratório de Adesão e Aderência (LAA), relatos de operadores, técnicos e engenheiros mostraram quão inconveniente e não eficaz é o atual método utilizado para tratamento das superfícies pultrudadas destinadas à colagem. Além de dispendioso, o lixamento gera uma quantidade de

resíduo considerável, exige limpeza minuciosa para retirada do pó remanescente e ainda produz superfícies passíveis da existência de defeitos (regiões não lixadas).

De acordo com o supracitado, este trabalho, o primeiro desenvolvido no LAA com juntas de cisalhamento pultrudada, teve como principal objetivo desenvolver um tratamento superficial que seja mais prático, não gere resíduo e apresente boa relação custo/benefício. Em paralelo, acompanhou-se a pultrusão de perfis fenólicos, acrílicos e poliésteres de modo a acrescentar conhecimento prático, porém breve e preliminar, das principais etapas do processo de produção. Mantendo o mesmo padrão de pesquisas anteriores do LAA, esta foi desenvolvida de maneira a gerar resultados e soluções passíveis de serem aplicados em campo, facilitando operações e ainda produzindo conhecimento científico. Para tal, mantemos o mesmo adesivo já utilizado na empresa e propomos dois novos tratamentos: *Primers* aplicados por simples borrifação sem necessidade de limpeza posterior para aplicação do adesivo.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Materiais compósitos

Os materiais compósitos, ou apenas compósitos, estão presentes na humanidade há muitos anos, sejam na forma de compósitos naturais (os ossos e a madeira), ou ainda os que foram construídos intuitivamente pelo homem, como o tijolo de palha e a argila. No entanto, apenas por volta dos anos 50 do século XX os compósitos foram reconhecidos e devidamente distinguidos das demais classes de materiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Segundo Callister e Rethwisch:

De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida melhor combinação das propriedades. (CALLISTER; RETHWISCH, 2013, p.535).

Entende-se que, os compósitos nada mais são do que a união de dois, ou mais, materiais diferentes em um novo material mais eficiente e com características devidamente apropriadas a determinadas aplicações.

Para o projeto e fabricação de um material compósito é necessário um conhecimento prévio das propriedades de cada constituinte, e ainda, a definição do que se deseja alcançar, em termos de características e aplicação. Conforme James F. Shackelford, “Uma filosofia chave na seleção de materiais compósitos é de que eles devem fornecer o ‘melhor dos dois mundos’ (ou seja, as propriedades atraentes de cada componente)”. (SHACKELFORD, 2008, p.)

Constituído de duas fases distintas, matriz e reforço, as propriedades mecânicas finais do material dependem não somente das características de cada fase presente, mas também da fração volumétrica ocupada por cada uma delas e ainda, da forma com que estão dispostas (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

1.1.1 Fase matriz

A fase matriz envolve o reforço e também desenvolve duas outras importantes funções no material compósito, proteção e transmissão de carga às fibras. Esta pode ser constituída de um material metálico, cerâmico ou polimérico, dependendo da aplicação. Para componentes e estruturas que operem em temperatura ambiente, ou moderadamente elevada, onde a ductilidade é uma propriedade relevante, matrizes poliméricas e metálicas são mais indicadas. Aplicações nas quais a temperatura de serviço é elevada, compósitos de matriz cerâmica tendem a ser opção mais coerente por resistirem a temperaturas de até 1000°C, porém, com ductilidade quase nula (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Atualmente a grande maioria dos compósitos utilizam materiais poliméricos como fase matriz em função do custo inferior e a relativa facilidade no processo fabricação. Além disso, também apresentam boas propriedades mecânicas, adesivas e boa resistência a ambientes agressivos (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Uma das limitações das matrizes poliméricas, ou mais comumente denominadas *resinas*, são as baixas temperaturas de serviço e a flamabilidade do material, o que limita sua aplicação a ambientes onde a temperatura de serviço não é elevada e o risco de incêndio é baixo. Entretanto, esses inconvenientes podem ser contornados, ou ao menos amenizados, durante a fabricação do compósito com a adição de aditivos e cargas adequadas à resina e assim, ampliar o campo de aplicação do material.

1.1.1.1 Resinas termofixas

As resinas termofixas, ou termorrígidas, são materiais poliméricos que, diferente dos termoplásticos, uma vez concluído o processo de cura não podem ser fundidos e moldados novamente. Para compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de vidro (PRFV), segundo Borges (2004), em geral o reprocessamento torna-se inviável devido à alta abrasão e, conseqüentemente, aos danos causados ao equipamento destinado a transformar o material. Em função dessa limitação, a reciclagem de PRFV torna-se um processo não usual e pouco prático para indústria (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; BORGES, 2004).

Em busca de uma solução para a grande quantidade de material descartado, pesquisas foram desenvolvidas e os resultados mostram a viabilidade e o caráter promissor da

reciclagem de resíduos pultrudados, estes provenientes diretamente da indústria ou de componentes com vida útil avançada. Conforme Castro et al. (2014), dentre as técnicas disponíveis, a reciclagem mecânica se mostrou a mais viável e possibilitou a inserção do material reciclado como carga em cimento polimérico. No entanto, por se tratar de algo ainda pouco explorado, a implementação de um sistema integrado de reciclagem ainda requer mais estudos e ajustes (CASTRO et al., 2014; ASOKAN, 2009, 2010).

Um aspecto relevante dos compósitos produzidos com resinas termofixas é a longa vida útil, boas propriedades mecânicas e as inúmeras possibilidades de aplicação. Na indústria de petróleo e gás natural do Brasil, bem como em outras instalações onde a segurança contra o fogo, bom desempenho mecânico e a resistência a diversas intempéries são primordiais, Polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), produzidos a partir de resinas termofixas específicas para dada aplicação, tem apresentado comportamento satisfatório em campo. Para tal, destacam-se as resinas acrílica, fenólica e poliéster. Dificilmente as resinas são utilizadas na sua forma pura, em geral durante a produção é adiciona-se outros componentes, estes denominados *aditivos*, de modo a acrescentar propriedades e características relevantes ao material. A Tabela 1 apresenta os aditivos mais comuns empregados pela indústria.

Tabela 1 – Principais aditivos e suas respectivas finalidades no compósito (continua)

Aditivo	Finalidade
Peróxidos Orgânicos*	Iniciar a ligação das cadeias poliméricas.
Catalisadores	Acelera ou diminui o tempo das reações químicas.
Cargas	Alteração das propriedades e diminuição dos custos de produção.
Corantes e pigmentos	Conferir cor ao compósito. Corantes são capazes de se dissolver na resina, diferente dos pigmentos que permanecem dispersos.
Estabilizantes	Protege contra intempéries e evita degradação em função da exposição à radiação UV.
Retardantes de chama	Resistência a flamabilidade. O mecanismo se dá de duas formas: Interferência direta no processo de combustão na fase gasosa ou por meio de reações químicas capazes de resfriar e extinguir a chama.

Tabela 1 – Principais aditivos e suas respectivas finalidades no compósito (conclusão)

Aditivo	Finalidade
Inibidores	Interrompem o mecanismo de cura, aumentam o tempo de armazenamento do produto e diminuem o pico exotérmico durante a cura.
Desmoldantes	Auxiliam no desprendimento do perfil. Para componentes pultrudados que serão unidos por colagem ou pintados, a concentração deve ser mantida em valores mínimos.

Legenda: (*) - Usualmente denominados iniciadores ou agentes de cura.

Fonte: MEYER, 1985; MENDONÇA, 2005; FINK, 2013.

1.1.1.1.1 Resina Poliéster

Inventada por Carleton Ellis no início do século XX, a resina poliéster insaturada, ou apenas resina poliéster, teve sua primeira patente divulgada em torno de 1930. No ano de 1941 surgiu no mercado o primeiro componente compósito fabricado em matriz poliéster e reforço de fibra de vidro (FINK, 2013; PHS). Formada basicamente por dois polímeros (poliéster e monômero vinil), a resina poliéster consiste em um líquido incolor e viscoso à temperatura ambiente. Devido ao seu aspecto incolor, é comum a adição pigmento para melhores resultados estéticos do produto final (MURPHY, 1998; FINK, 2013).

O mecanismo de cura ocorre tanto em temperatura ambiente ou elevada. No entanto, em função do longo período necessário à cura em temperatura ambiente, é usual o emprego de aditivos e calor para que o mecanismo se de em tempo hábil. Em função da diversidade de monômeros para cada um dos polímeros, as propriedades finais da resina podem variar consideravelmente. Dentre as resinas disponíveis no mercado, destacam-se a resina poliéster ortoftálica, opção mais econômica, e a resina poliéster isoftálica. A variedade isoftálica, resistente à água e a umidade, atualmente é a mais utilizada na produção de compósitos pultrudados no Brasil (MURPHY, 1998; FINK, 2013).

O estireno é o monômero vinil mais comumente empregado. Ele atua como um solvente para o poliéster e diminuiu a viscosidade da resina. Além disso, cessa, ou reduz significativamente, a presença de poros resultantes da liberação de produtos voláteis durante a cura. Outra função do monômero é o ajuste da viscosidade. Neste caso, a proporção deve ser adequada para que não haja estireno residual no compósito curado. Para o processo de pultrusão, a baixa viscosidade da resina e a não liberação de produtos voláteis possibilitam

alcançar condições estáveis de produção e perfis de excelente qualidade. Entretanto, apesar de ser largamente utilizado, o estireno tende a ser substituído em função do seu caráter cancerígeno (MURPHY, 1998; FINK, 2013)

De maneira geral, compósitos produzidos a partir da resina poliéster apresentam boas propriedades químicas e elétricas, baixo custo e flexibilidade de produção. A resistência ao calor do material também é fator positivo a ser considerado, uma vez que a resina mantém suas propriedades praticamente inalteradas, em especial a capacidade de isolamento elétrico, ainda que exposta continuamente a temperaturas de até 200°C (ALMEIDA 2004; MURPHY 1998; *Pultrusion Of Composite*). Uma das desvantagens do material, e muitas vezes limitação, é a inflamabilidade e a retração durante o processo de cura, a qual pode atingir um grau de até 7%. Com medida de ajuste, é usual a utilização resinas aditivadas com antichamas e componentes que minimizem a retração durante a cura. Com respeito à vulnerabilidade as condições ambientais, apesar da superfície dos perfis produzidos apresentarem bom acabamento, existem boas alternativas de proteção adicional como aditivos protetores da radiação ultravioleta (anti UV), véu de superfície e pintura (ALMEIDA 2004; MURPHY 1998; *Pultrusion Of Composite*).

1.1.1.1.2 Resina acrílica

A primeira resina líquida termofixa modificada surgiu em 1985 denominada comercialmente como MODAR®. Oito anos depois a patente foi comprada por outra empresa e a nova formulação possibilitou a aplicação do material em diversas técnicas de fabricação, incluindo a pultrusão. Em função da variedade de resinas acrílicas no mercado, compósitos acrílicos são encontrados na indústria automotiva, na construção civil, no setor *offshore*, dentre outras. Trata-se de um polímero formado por ésteres metacrilatos (ou acrílico), os quais podem ser modificados a partir da adição de monômeros como o estireno e o acrilonitrilo. De acordo com o monômero presente, as propriedades e características da resina variam (STARR 2010; PHS).

O mecanismo de cura ocorre a partir do estado líquido de forma livre e espontânea ou ainda, por ativação térmica ou química, semelhante á resina poliéster. Outra característica em comum com a resina poliéster é a não produção de subprodutos durante a cura. Diferente da maioria das resinas utilizadas no processo de pultrusão é necessária à adição de dois

catalisadores. A presença de um sistema duplo de catalisadores é fundamental para que a cura se dê de maneira completa e homogênea, evitando a presença de defeitos superficiais e internos. A quantidade e a proporção do catalisador são de acordo com as características e a complexidade de cada perfil (STARR, 2010).

A resina acrílica sem aditivos (ou crua) possui boas propriedades, mas devido a sua baixa viscosidade e compatibilidade com diversos aditivos é usual o emprego de aditivos para otimizar ou acrescentar novas propriedades ao material. Quando submetida ao fogo, a queima da resina ocorre de maneira lenta. Porém, sua resistência à chama e propriedades físicas podem ser melhoradas através da combinação simultânea de dois tipos de aditivos antichama, podendo até atender a critérios descritos em normas internacionais como a UL-94 (grau V-0). No entanto, esse mecanismo de aditivação requer menores quantidades do aditivo principal, de modo a evitar o detrimento de outras propriedades da material como observado para os aditivos orgânicos. Uma vez não adicionados na proporção correta, os aditivos antichamas podem aumentar a absorção de água pela resina, o que impossibilita a utilização de componentes em locais abertos (STARR, 2010; FINK, 2013; UNDERWRITERS LABORATORIES, 2013).

Outras importantes características gerais da resina acrílica é a resistência às intempéries e alta dureza superficial. Apesar de não apresentar alta vulnerabilidade à radiação ultravioleta, aditivos absorvedores de radiação promovem estabilidade e proteção extra ao material. Em contrapartida a resina acrílica, possui baixa flexibilidade e baixa resistência ao impacto, o que pode levar a fratura quando exposta a cargas adicionais ou ao impacto. No processo de pultrusão, em função da alta reatividade e da baixa viscosidade do material, é possível que com sistemas padrões de matrizes (ou molde aquecido) altas taxas de produtividade sejam alcançadas e perfis pultrudados com bom acabamento superficial e livre de defeitos sejam produzidos (STARR, 2010; FINK, 2013).

1.1.1.1.3 Resina fenólica

O estudo e desenvolvimento da resina fenólica teve início nos anos 70 do século XIX através de pesquisas envolvendo reações entre fenol e formaldeído (principais grupos funcionais presentes na resina fenólica). Outros pesquisadores deram seguimento aos trabalhos, porém, até o ano de 1889 ainda não havia aplicação para o material. Foi a partir da

produção de uma resina reticulada e insolúvel que, algum tempo depois, o processo de obtenção do material foi patentado, ainda sem fosse mencionada a resina fenólica (BORGES, 2004).

Em torno de 1900 surgiu a primeira possibilidade de aplicação, até então como isolante térmico e em uma possível substituição da madeira. Em 1907 o processo de fabricação foi patentado e a já reconhecida resina à base de fenol e formaldeído se tornou o primeiro material polimérico a ser produzido e vendido em escala comercial. A partir de então, as pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias não cessaram, ampliando o campo de aplicação e possibilitando o processamento através de diversas técnicas de produção, incluindo a pultrusão. As principais propriedades da resina fenólica são a excelente rigidez, resistência à chama, baixa liberação de fumaça, resistência a ataques químicos, baixa densidade, boa estabilidade térmica, resistência à corrosão e umidade. Devido a sua resistência térmica, a resina fenólica mantém suas propriedades mecânicas estáveis temperaturas em torno de 250°C (BORGES, 2004).

O processamento da resina fenólica apresenta uma característica particular, muitas vezes inconveniente, que é a liberação de água. O mecanismo ocorre durante a cura do material, ainda dentro do molde aquecido. Como consequência, tem-se um perfil poroso e com superfície irregular. E ainda, os perfis tendem a não apresentar um aspecto visual muito atraente em função da cor amarronzada (proveniente da própria resina) e da porosidade superficial citada anteriormente. É conveniente a aplicação de uma camada protetora na superfície do perfil após a cura para evitar exposição das fibras e a degradação precoce do componente. Outra dificuldade durante a produção é o controle da viscosidade, a qual aumenta significativamente durante com a manipulação do material (BORGES, 2004).

1.1.2 Fase reforço

A fase reforço encontra-se dispersa na matriz e usualmente é empregada na forma de partículas ou fibras, indo desde simples composições minerais a fibras de alta resistência. Independente do tipo de reforço, a principal finalidade é agregar propriedades mecânicas e resistência ao compósito. No caso das fibras, pode-se variar o tamanho (curtas ou longas) e a maneira com que estão distribuídas na matriz (contínuas ou desalinhas). Em compósitos reforçados com fibras as propriedades mecânicas dependem significativamente não apenas

das características isoladas de cada fase e da interação entre elas, mas também do comprimento e da maneira que as fibras encontram-se distribuídas na matriz e umas em relação às outras. Para um aumento relevante da resistência longitudinal do compósito, em geral opta-se pelo reforço com fibras contínuas e alinhadas (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; DAS, 2014). Dentre as fibras sintéticas (vidro, carbono e kevlar), a fibra de vidro apresenta menor custo, maior uniformidade, alta resistência ao impacto, excelente estabilidade química e térmica bem como elevada durabilidade (LAIK, 1995; SHACKELFORD, 2008).

1.1.2.1 Fibra de vidro

A fibra de vidro possui boas propriedades mecânicas e considerável resistência a ambientes agressivos, em contrapartida, características tais como: Dureza, resistência à fadiga, estabilidade em altas temperaturas e condições severas de umidade podem deixar a desejar. Em geral são empregadas como reforço em compósitos de baixo a médio desempenho (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; ALMEIDA, 2004). Sua manipulação requer alguns cuidados fundamentais para evitar danos superficiais que venham a alterar as características do material e, conseqüentemente, diminuir seu desempenho. Segundo Almeida (2004), pequenas imperfeições na superfície são capazes de alterar negativamente suas propriedades elásticas. A abrasão com outros materiais e a exposição, ainda que breve, em atmosfera não controlada são fatores prejudiciais ao seu desempenho. Materiais mais duros podem ocasionar falhas nas fibras e condições não apropriadas de armazenamento e manipulação tendem a alterar as características superficiais e prejudicar sua interação com a matriz. Com o objetivo de evitar danos e promover uma melhor adesão entre as fases, é comum durante a fabricação das fibras a deposição de uma fina camada protetora à sua superfície, a qual pode ser retirada durante a produção do compósito e substituída, em alguns casos, por um agente de acoplamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; ALMEIDA, 2004).

1.1.2.2 Tipos de fibra de vidro

As fibras de vidro são fabricadas pela fusão de vários óxidos e outros elementos em menores quantidades. Independente da composição, a sílica (SiO_2) encontra-se em maiores porcentagens com teores acima de 50% (Tabela 2). As proporções variam sutilmente entre os fornecedores e de acordo com as propriedades desejadas. Dentre as variedades disponíveis, a fibra de vidro atualmente mais utilizada é a do tipo E, onde a designação E corresponde a ‘tipo elétrico’. A pequena porcentagem de sódio (Na) na composição é responsável pela baixa condutividade elétrica e a presença do borossilicato (B_2O_3) pela durabilidade (LAIK, 1995; SHACKELFORD, 2008).

Tabela 2 – Composição de fibras de vidro de reforço

Designação	Característica	Composição (%p)			Módulo de elasticidade (MPa)
		SiO_2	NaO_2	B_2O_3	
Vidro – C	Resistência à corrosão química	65	8	5	69×10^3
Vidro – E	Composição elétrica	54	< 1	8	$72,4 \times 10^3$

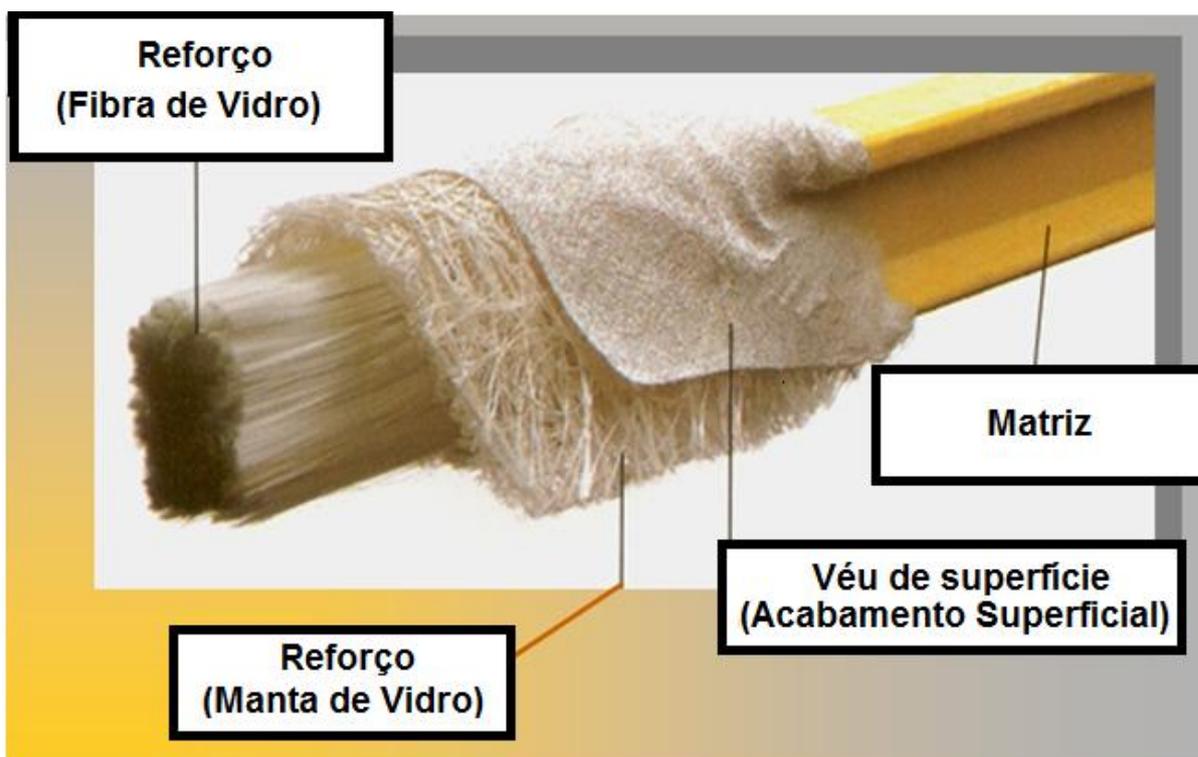
Fonte: SHACKELFORD, 2008.

1.1.3 Polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV)

Os polímeros reforçados com fibras de vidro, ou apenas PRFV, correspondem a uma categoria de compósitos que apresentam boas propriedades mecânicas, alta resistência a intempéries e baixo peso. Para a matriz, existe uma variedade de resinas no mercado, sendo as mais comuns as termofixas. As fibras de vidro, contínuas e alinhadas, são posicionadas paralelamente uma em relação ao eixo longitudinal da outra e seguem uma única direção. Em geral, cerca de 70% do volume total do compósito corresponde ao reforço, com pouco mais de 95% da carga aplicada suportada somente pelas fibras. Além das fibras, é comum a utilização de mantas e véu de superfície como sistemas de reforço adicional e acabamento superficial,

Figura 3, ambos compostos basicamente por fibras de vidro em diferentes orientações. Em compósitos pultrudados, além da resistência às intempéries e ambientes corrosivos, o véu de superfície possibilita maiores velocidades de produção e reduz o desgaste do molde. A resistência transversal (perpendicular à direção de alinhamento das fibras) do compósito é sutilmente melhorada na presença da manta (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; MEYER, 1985; SHACKELFORD, 2008).

Figura 3 – Perfil “I” pultrudado: Fibras contínuas e alinhadas longitudinalmente



Fonte: PULTRUSAO DO BRASIL, [s.d.].

Com propriedades mecânicas equiparáveis as do aço, os PRFV também apresentam alta relação entre a resistência à tração e o peso específico (ou resistência específica) e o módulo de elasticidade e o peso específico (ou módulo específico). Outra característica singular do material é o mecanismo de fratura quando o mesmo é submetido a carregamentos externos longitudinais (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

As fibras, materiais frágeis mediante a sollicitação de esforços mecânicos, em especial de tração, não apresentam deformação elástica significativa. Em contrapartida, a matriz polimérica é capaz de se deformar elasticamente em resposta a aplicação de cargas externas, pois se trata de um material dúctil. Como consequência da diferença entre as propriedades do reforço e da matriz, a fratura do compósito, pode se dizer que ocorre em etapas. Conforme as

fibras começam a se romper, cada qual no seu tempo devido à variação já esperada na resistência à fratura dessa classe de materiais, a fração que permanece íntegra do reforço continua a suportar parte carga aplicada externamente (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Segundo Almeida (2004), a fratura completa do material só ocorrerá quando um grande número de fibras adjacentes se rompe, formando assim um agrupamento de falha de tamanho crítico. Como consequência do mecanismo de falha apresentado, a resistência à fratura do compósito tende a diminuir de maneira gradual.

1.1.4 Pultrudados resistentes à chama e com baixa liberação de fumaça

A resistência à chama dos materiais compósitos é um requisito indispensável para componentes expostos em circunstâncias vulneráveis à ocorrência de incêndio, tal como locais com temperaturas elevadas e próximos à passagem de corrente elétrica. Dentre os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 15708 (parte 3), o material pultrudado deve ser submetido a ensaios de resistência ao fogo e, de acordo com a classificação alcançada (nível 1, 2 ou 3) o local de aplicação do componente é determinado. Componentes classificados como “nível 1” tendem a ser mais resistentes, para o “nível 3” o uso é o mais restrito e componentes “nível 2” apresentam resistência intermediária com campo de aplicação mais amplo do que o “nível 3”, porém inferior ao “nível 1” (ABNT NBR 15708; BOURBIGOT et al., 2007; PRABHAKAR et al., 2015). O Anexo A apresenta as áreas de aplicação conforme a classificação.

Uma vez que a maioria dos polímeros é inflamável, a baixa resistência ao calor e a alta flamabilidade do material compósito se deve essencialmente a matriz. Excluindo a resina fenólica, naturalmente resistente à chama, as demais resinas termofixas empregadas no processo de pultrusão em geral são aditivadas com retardantes de chama com intuito de aumentar sua capacidade de inibição ou extinção completa do fogo (RODA, 2014). A crescente preocupação com a segurança contra o fogo tem motivado o desenvolvimento de muitos trabalhos relacionados a materiais compósitos e retardantes de chama (BOURBIGOT et al., 2007; PRABHAKAR et al., 2015).

Os retardantes de chama podem ser à base de compostos halogenados ou não halogenados. O mecanismo básico de ação de retardamento do fogo consiste em aumentar a quantidade de resíduo carbonizado e, conseqüentemente, diminuir a liberação de compostos

químicos voláteis e o tamanho da chama produzida. Apesar da alta eficiência dos compostos halogenados seu uso foi vetado em alguns países em função da agressão ambiental e danos provocados à saúde. De modo geral, há uma tendência de substituição dos retardantes de chama halogenados por compostos não halogenados, tal como a alumina trihidratada (ATH). Pesquisas desenvolvidas por Connolly and Thornton (1965) mostraram que o desempenho da resina poliéster aditivada com ATH possui resistência à chama equiparável a resina aditivada com composto halogenado (RODA, 2014; MANHART et al, 2008).

Outra questão importante é a quantidade e a natureza da fumaça liberada pelo material durante a queima. Alguns aditivos retardantes de chama, em especial os halogenados, tendem a aumentar a produção de fumaça tóxica. Aditivos supressores de fumaça tendem a contornar este inconveniente (RODA, 2014).

1.1.4.1 Alumina trihidratada (ATH)

A Alumina trihidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) é um produto sintético e inorgânico que, além de ser retardante de chama também atua como supressor de fumaça. Outras características importantes são a fácil incorporação à resina, atoxidade, isenção de odor, não liberação de gases corrosivos e baixo custo dentre os demais retardantes. Sua capacidade de retardamento da chama se deve a decomposição endotérmica, na qual em torno de 34% da sua massa é liberada em forma de vapor d'água. A umidade proveniente da decomposição auxilia no resfriamento da chama e forma simultaneamente uma camada protetora na superfície do compósito. Em função da temperatura de decomposição da ATH, esta entre 180°C e 220°C, a cura de resinas aditivadas com o composto deve permanecer dentro do intervalo permitido de maneira a evitar a degradação do material (SILVA, 2006; COSER, 2009).

1.2 Juntas coladas

Juntas coladas (ou juntas adesivas) consistem na junção de duas superfícies, estas denominadas substratos, através de um material de união, em geral um adesivo. Atualmente o

mercado disponibiliza diversos tipos de adesivos os quais variam a forma, matéria prima e modo de aplicação. Estes comercializados como líquidos, pastas, gel e sólidos. De acordo com a solicitação a qual a junta colada deve resistir, o sistema adesivo empregado será diferente. Para componentes submetidas a esforços de baixa severidade, adesivos não estruturais (ou de fixação) são indicados. Selantes tendem a ser uma boa opção quando a finalidade se restringe ao isolamento da região adesiva à penetração de fluidos. No entanto, quando a junta colada é projetada para resistir a cargas consideráveis os adesivos estruturais são os mais aplicados na indústria moderna (SILVA 2010; QUINI 2011).

Resultante da mistura de dois componentes que apresentem propriedades mecânicas consideráveis e boa resistência química, os adesivos estruturais são polímeros termofixos (ou elastômeros) (QUINI 2011 apud SKEIST 1965) que tendem a promover a união de juntas coladas de maneira tão eficiente que, em geral, espera-se que a fratura ocorra no substrato, e não na região da área colada (QUINI, 2011). Dentre as variedades disponíveis no mercado, os principais são os adesivos epóxis, metacrilatos e uretanos.

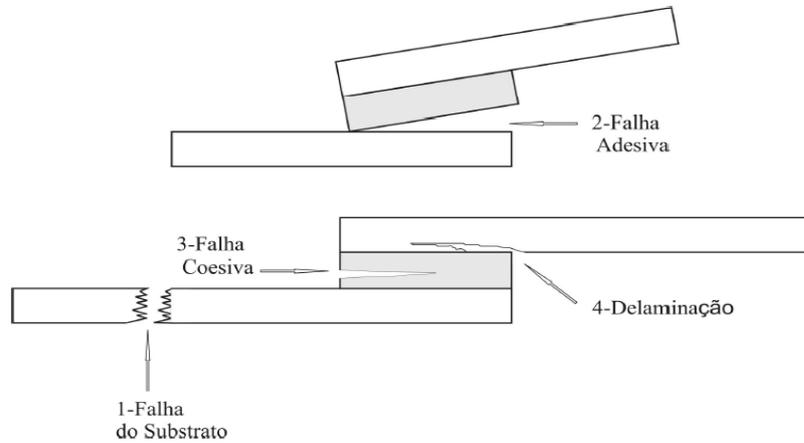
1.2.1 Tipos de fratura

O mecanismo de fratura em juntas coladas depende basicamente de dois fatores, o ponto de início e o trajeto de propagação da trinca. Com base nesses dois parâmetros, o tipo de fratura pode ser classificado em adesiva, coesiva, interlaminar (ou delaminação) e por falha do substrato (SILVA, 2010).

A fratura adesiva ocorre entre o adesivo e o substrato, com início e propagação da trinca na interface de colagem (SILVA, 2010). Em outras palavras, conforme Queiroz (2013), a linha de separação coincide com a interface substrato/adesivo fazendo com que parte do substrato fique exposta (sem presença de adesivo). Neste caso, a falha ocorre quando não há boa interação entre a superfície e o adesivo. Para uma junta que apresenta adesivo em ambas as superfícies de fratura, a falha caracteriza-se como coesiva. A linha de separação (fratura) ocorre no volume do adesivo e tanto o início como a propagação da trinca se dá na camada adesiva. Neste caso, a resistência da junta está diretamente relacionada ao adesivo (QUEIROZ, 2013; SILVA, 2010). Já a fratura interlaminar (ou delaminação), inicia-se nas extremidades das juntas, devido à presença de tensões de descascamento, e propaga-se ao longo do substrato (SILVA, 2010). Quando ocorre falha no substrato entende-se que a área

colada apresenta resistência superior, ocasionando a falha do mesmo antes da descolagem (Figura 4).

Figura 4 – Tipos de fratura em juntas coladas



Fonte: Adaptado de QUINI, 2011.

É comum que em uma mesma junta colada existam percentuais de falha do tipo adesiva e coesiva. Tal quantificação exige um trabalho minucioso, afinal, uma superfície de fratura inicialmente classificada com falha do tipo adesiva quando analisada em outra escala macroscópica pode apresentar vestígios do adesivo nos vales do perfil de rugosidade. O ideal é que a falha se dê de forma coesiva (QUEIROZ, 2013), ou ainda, com baixo percentual de falha do tipo adesiva. Neste caso, pode-se dizer que a interação substrato/adesivo é satisfatória e a resistência da junta se deve as propriedades do adesivo.

A interface substrato/adesivo das juntas é uma região complexa e sua resistência é influenciada por diversos fatores. Devido a diferença entre as propriedades dos materiais presentes cada qual é regido por equações distintas, fazendo com que para a definição da interface seja conveniente análise de um ponto de descontinuidade (QUEIROZ, 2013). Para isto, Sampaio (1998) propõe a modelagem para determinação do comportamento na interface das juntas onde, apesar da diferentes tensões em cada material, assume-se que a deformação é a mesma uma vez que elas estão unidas.

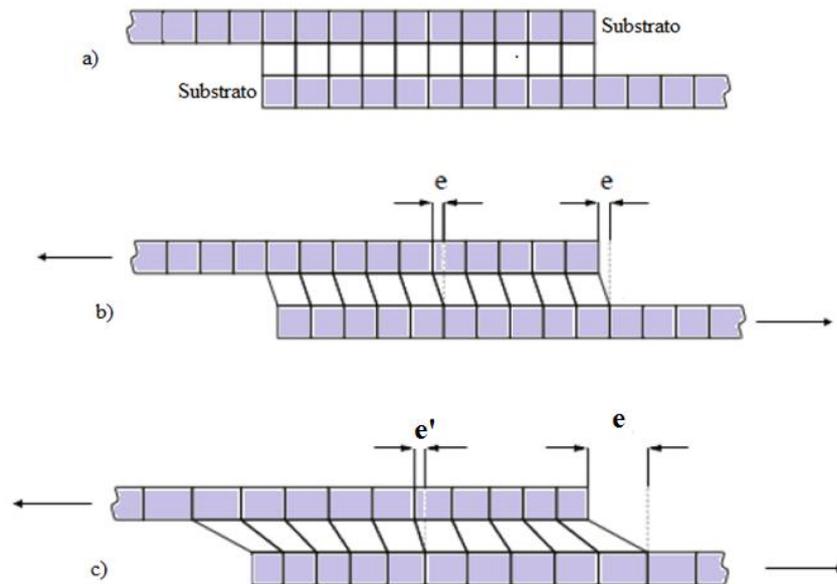
1.2.2 Esforços em juntas de cisalhamento

Juntas coladas de cisalhamento ao serem carregadas axialmente são submetidas a duas principais tensões: Tensão de cisalhamento no plano (ou apenas tensão de cisalhamento) e tensão normal. Esta última também denominada como tensão de descascamento afinal, de acordo com a geometria da junta, tende a favorecer o descascamento (QUEIROZ, 2013).

A tensão cisalhante média, $\tau_{\text{média}}$, definida como a razão entre a força aplicada e a área colada, a qual a junta é submetida tende a não ser uniforme em toda superfície. Existem regiões que, em função tanto de fatores geométricos bem como das propriedades dos materiais, estão submetidas a tensões cisalhantes máximas, $\tau_{\text{máx}}$. Comparando duas juntas coladas de cisalhamento unidas por um mesmo adesivo sendo que uma das juntas é composta por substrato rígido e a outra flexível (material não sofre deflexão), pode-se compreender de forma mais clara as tensões cisalhantes principais (BERRY, 2000).

A Figura 5.a mostra uma junta de cisalhamento sem carregamento na qual as linhas verticais sobrepostas representaram a deformação, caso exista, tanto no substrato, este último rígido ou flexível, como do adesivo após o carregamento. Na Figura 5.b a junta possui substrato rígido e encontra-se carregada axialmente. Neste caso, o substrato não sofre deformação (linhas verticais não se alteram), sendo esta totalmente absorvida e distribuída uniformemente pela cada adesiva. Com a deformação constante na camada adesiva a tensão cisalhante terá um único valor em toda extensão, sem pontos de máximos e mínimos. A junta representada na Figura 5.c é composta por substratos flexíveis suscetíveis à deformação na direção axial (sentido de aplicação da carga). Aplicada a carga, nota-se que o substrato inferior sofre uma deformação **e** maior (linhas verticais mais inclinadas) na extremidade da área colada e diminui a medida que se aproxima de centro, sendo $e' < e$. O mecanismo simétrico de deformação ocorre na junta superior, com deformação máxima **e** na extremidade oposta. Uma vez que tensões maiores correspondem a deformações superiores, entende-se que, substratos flexíveis carregados axialmente apresentam maiores tensões cisalhantes nas bordas da área colada quando comparadas à parte central (QUEIROZ, 2013).

Figura 5 – Esquema: Cisalhamento do adesivo em junta de colada



Legenda: Esquema ilustrativo da deformação no substrato e no adesivo de juntas coladas submetidas a carga axial: (a) - junta sem carregamento (substrato rígido ou flexível); (b) - junta com substrato rígido carregado – deformação uniforme ocorre somente no adesivo; (c) - junta com substrato flexível carregada axialmente – substrato e adesivo sofrem deformação, este último varia ao longo da área colada.

Fonte: Adaptado de BERRY, 2000.

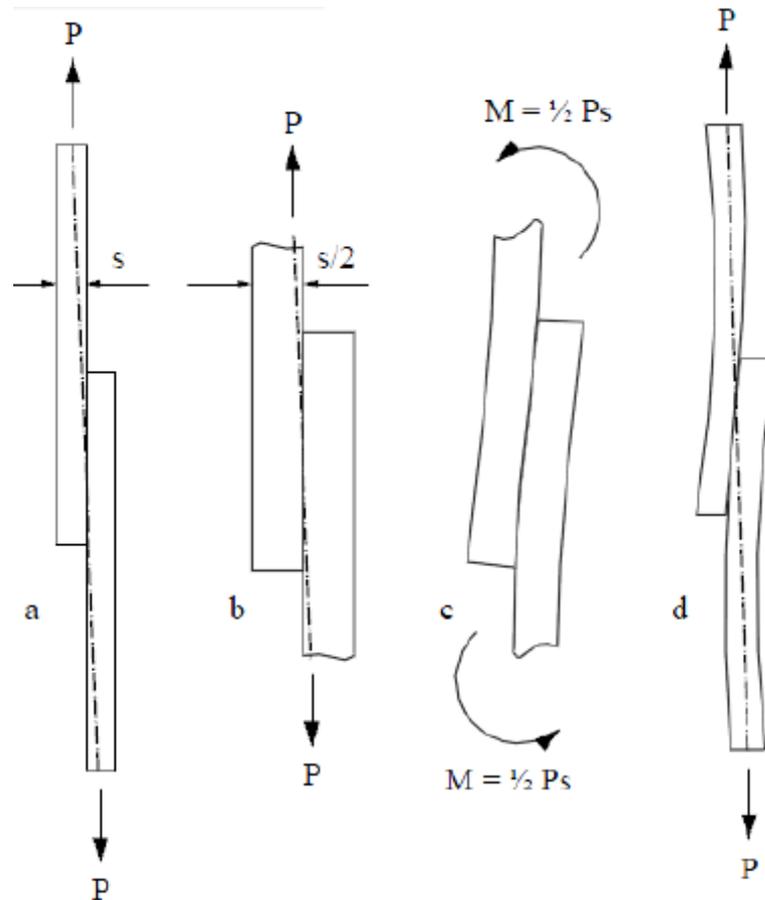
Conforme ressalta Queiroz (2013), todo material, independente do tipo de carregamento, sofre deformações. Ou seja, haverá uma distribuição não uniforme das tensões cisalhantes ao longo da camada adesiva. No entanto, na região elástica, a relação entre a tensão e a deformação é representada pelo módulo elástico, este, o quanto maior for mais o comportamento do material se aproximará do substrato rígido anteriormente exemplificado.

Outra questão importante com respeito ao carregamento das juntas de cisalhamento é o momento gerado, o qual gera tensões de descascamento. Sabe-se que os substratos deslocam-se entre si uma distância mínima igual à espessura do material. Com isso, a linha de carregamento, a qual passa pelo ponto médio e uni os pontos de aplicação da carga, pode ou não estar contida no material (Figura 6.a), isto dependerá do comprimento do substrato bem como da espessura do adesivo (QUEIROZ, 2013).

Quanto mais espesso for o conjunto substrato/adesivo e a medida que o comprimento da junta diminui, maior será a inclinação da linha de carregamento (Figura 6.b) e, conseqüentemente, o momento gerado (Figura 6.c). Em conseqüência, a junta deforma-se conforme mostra a Figura 6.d e surgem tensões de descascamento, as quais tendem a se

concentrar nas extremidades da área colada, aumentando as tensões máximas e diminuindo a resistência das juntas (BERRY, 2000).

Figura 6 – Esquema: Junta colada submetida a tensões de descascamento

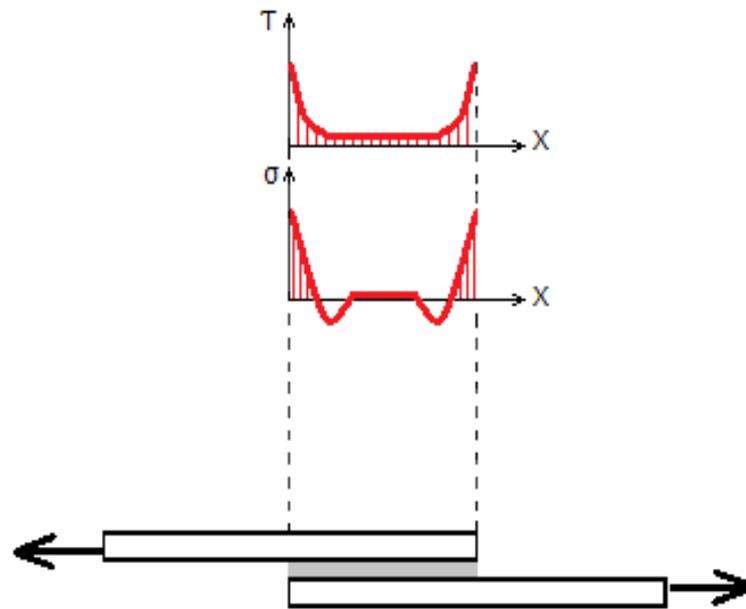


Legenda: Esquema ilustrativo da flexão e tensão de descascamento em juntas coladas: (a) - junta sobreposta antes da deformação; (b) - junta com carregamento excêntrico; (c) - momento fletor; (d) - deformação final com tensões de descascamento nas extremidades.

Fonte: Adaptado de BERRY (2000).

Através de técnicas de análise baseadas em elementos finitos (FEM) a distribuição das tensões cisalhantes e de descascamento ao longo da camada adesiva (*overlap*) foram modeladas e apresentam a distribuição conforme explicado anteriormente e ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Tensões em juntas de cisalhamento



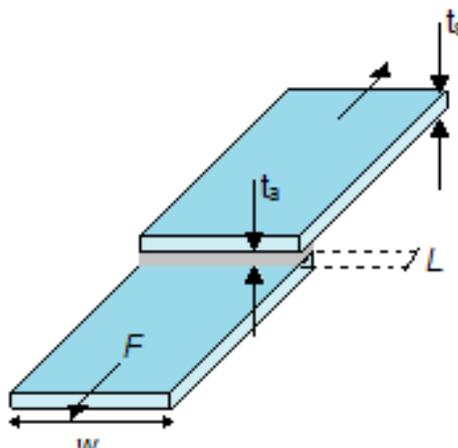
Nota: A análise considera o comportamento elástico linear da junta colada de cisalhamento.

Fonte: Adaptado de SILVA, 2010.

1.2.3 Resistência das juntas coladas: principais parâmetros de influência

As tensões presentes na área colada da junta são influenciadas tanto pelas características dos materiais bem como pelos parâmetros geométricos da própria junta. Para os materiais, a resistência do substrato e o módulo de cisalhamento do adesivo são fundamentais. Segundo Silva (2009), os parâmetros geométricos de maior influência são o comprimento da área colada (L), ou *overlap*, a espessura tanto da camada adesiva (t_a) como do substrato (t_s).

Figura 8 – Parâmetros das juntas de cisalhamento
sob ação da força axial (F)



Legenda: L representa o comprimento da área colada (ou *overlap*), t_a a espessura do adesivo e t_s a espessura do substrato.

Fonte: Adaptado de SILVA (2010).

Conforme a camada adesiva diminui, a tendência é que a tensão cisalhante suportada seja maior. Tal comportamento, segundo Quini (2011), está relacionado a menor probabilidade da existência de defeitos (vazios e microtrincas) no material. E ainda, devido ao incremento da camada adesiva, a deformação plástica tende a ocorrer mais rapidamente ao longo do comprimento da área colada, comprometendo a resistência. Alguns autores descrevem espessuras ideais para área de colagem. No entanto, cabe ressaltar que é sabido que a determinação da espessura também é diretamente dependente das propriedades do próprio adesivo, tais como viscosidade, molhabilidade e composição química. Na literatura existem pesquisas nas quais os resultados mostram que, para juntas coladas de aço carregadas axialmente a relevância da espessura do adesivo na falha apresenta energia de fratura estável para adesivos com espessura inferior a 0,3 mm e superior a 0,5 mm, sendo a energia máxima obtida para juntas com camada adesiva de 0,22 mm de espessura. Entretanto, outros autores defendem que a espessura, respeitados os limites práticos, influencia de maneira muito menos considerável quando comparada a qualidade da camada adesiva, ou seja, a uniformidade e isenção de defeitos na área colada. Para materiais de resistência moderada, substratos com maiores espessuras, em geral, promovem aumento da área resistente e a diminuição da deformação plástica em função do incremento na resistência. Em consequência, o adesivo pode-se utilizar de toda sua capacidade de deformação em cisalhamento. Por outro lado, materiais muito rígidos impedem a deformação plástica do substrato para qualquer espessura, ocasionando aumento do momento fletor e diminuição na resistência da junta (SILVA, 2010).

Segundo Silva (2010), apesar das máximas tensões presentes na área de colagem não serem afetadas de forma considerável pelo módulo do adesivo, materiais mais rígidos promovem menores deformações, conforme explicado na seção anterior. Com respeito ao módulo de elasticidade do substrato, o mesmo deve ser considerado quando as tensões presentes na área colada estão em análise. Para colagem de juntas a partir de dois substratos diferentes, as tensões irão variar de acordo com a razão entre os módulos dos dois materiais, sendo as tensões máximas cisalhantes localizadas próximas a extremidade livre da área colada do substrato mais rígido (QUINI, 2011).

Para juntas com maiores comprimentos da área colada (ou *overlap*) a tendência é que existam picos menores de tensões cisalhantes e de descascamento e ainda, que haja um aumento da área de colagem isenta de tensões. Silva (2010) ressalta que, as tensões supracitadas são, comprovadamente, responsáveis pela fratura das juntas com a falha tendendo a ocorrer nas quinas (pontos críticos) e de modo coesivo. Outro ponto importante já observado é que, quanto maior o *overlap* mais próximo das extremidades da área colada encontram-se os picos das tensões máximas (QUINI, 2011). Dentre os parâmetros mencionados Silva *et al* (2009) conclui que o *overlap* é a variável de maior influência na resistência das juntas coladas submetidas ao cisalhamento, atingindo um nível de 46% de importância. Não tão relevantes como está última, a espessura do adesivo e do substrato representam, respectivamente, 19% e 18% de influência nas propriedades finais de resistência.

Determinar e descrever de modo completo a distribuição de tensões em juntas de cisalhamento não é simples devido a presença de muitas regiões com altos gradientes de tensão e contornos com prováveis singularidades matemáticas. Para diminuição da concentrações de tensões, é sugerido alterações na configuração dos substratos. Carregamentos estáticos e angulação na região do *overlap*, de modo a formar o *tapering*, são exemplos úteis para redução de tensões em juntas coladas de cisalhamento (SILVA, 2010).

Figura 9 – Junta colada submetida a esforço de cisalhamento



Nota: Observar angulação (ou *tapering*) na extremidade da região colada (*overlap*).
Fonte: O autor, 2015.

Outro fator fundamental para resistência das juntas de cisalhamento é a atenção dada durante confecção e colagem das mesmas, isto em função da sobra de adesivo. Segundo FILHO *et al.* (2006), por mais que as juntas de cisalhamento não apresentem complexidades geométricas, tanto a produção como a colagem não são um processo simples. O excesso de adesivo nas bordas, proveniente ou da folga entre a junta e o molde de colagem ou ainda, da compressão do substrato no adesivo próximo a interface, tem influência direta na distribuição de tensões nesta região.

1.3 Adesão e molhabilidade

Sabe-se que a adesão entre o substrato e o adesivo é responsável em promover a colagem interfacial. Existe adesão quando é necessária uma quantidade razoável de trabalho mecânico para separar duas superfícies coladas, estas de composição química e forma distintas. Em geral, a força máxima necessária para separar duas superfícies coladas é utilizada como uma medida da adesão. No entanto, quando se tem uma boa adesão, grande parte da energia medida tende a ser utilizada em forma de trabalho para deformar o material adjacente à interface, com uma pequena parcela de energia restante destinada efetivamente à separar as superfícies (SILVA, 2010). De acordo Quini (2011), tanto as forças químicas como a ancoragem mecânica são responsáveis em promover a adesão entre o adesivo e o substrato com a falha tendendo a ser do tipo coesiva.

Sabe-se que, quanto melhor for o contato entre o adesivo e a superfície do substrato mais resistente será à junta colada. Para tal, primeiramente é fundamental analisar a capacidade que o adesivo tem de molhar a superfície do substrato, o que depende diretamente das características químicas da superfície (QUINI, 2011). Conforme descrito na literatura e indicado por diversos fabricantes, tratamentos superficiais por abrasão mecânica aumentam o nível de rugosidade na superfície do substrato e tendem a proporcionar juntas mais resistentes devido ao aumento da quantidade de sulcos disponíveis para ancoragem mecânica e da maior área efetiva de colagem. Uma análise mais específica mostrou também que a abrasão além de promover alterações que melhorem a adesão pode alterar a energia superficial e a molhabilidade do substrato.

Para um mesmo substrato é comum que as propriedades do núcleo sejam diferentes das propriedades da superfície devido as variações estruturais do material. Ao contrário das

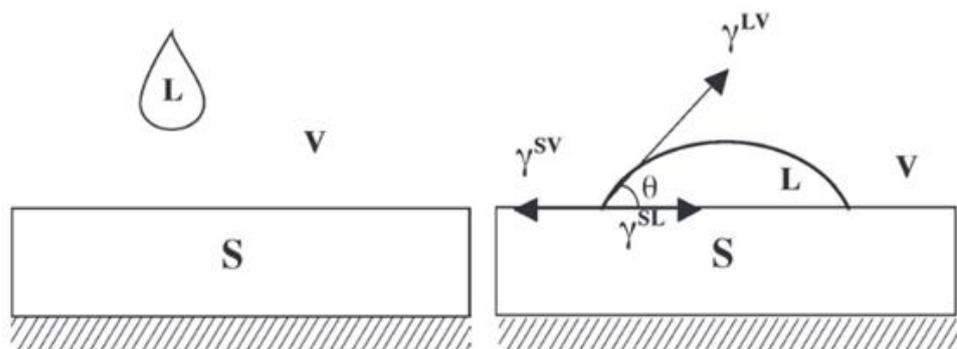
moléculas do núcleo, as moléculas da superfície são desbalanceadas devido a resultante não nula das forças presentes. Esse desequilíbrio origina uma energia livre de superfície (γ), esta definida como a energia necessária para criar uma nova unidade de área ou para mover uma molécula do núcleo para superfície. A capacidade do adesivo de molhar a superfície do substrato está diretamente relacionada com a energia livre superficial, ou seja, a resistência da junta em cisalhamento também vai depender da energia livre de superfície do substrato (SILVA, 2010).

A molhabilidade é capaz de nos fornecer informações úteis com respeito à capacidade de um determinado líquido molhar uma superfície específica e ainda, dentre outros fatores, pode ser um mecanismo facilitador (ou não) da adesão. Sendo assim, conhecer previamente a molhabilidade do adesivo na superfície do substrato a ser colado pode ser mais uma ferramenta útil para colagem de juntas. Expressa pela equação do trabalho termodinâmico de adesão (W_a) necessário para separar um líquido de uma superfície sólida (ambos estão em equilíbrio com a fase vapor), a equação da molhabilidade de uma superfície é dada por:

$$W_a = \gamma_{SV} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL}$$

Onde γ_{SV} , γ_{LV} e γ_{SL} são energias específicas de superfície, ou ainda, respectivamente, as tensões superficiais na interface sólido/vapor, líquido/vapor e sólido/líquido. O ângulo de contato Θ entre o substrato (fase sólida) e o adesivo (fase líquida representada por uma gota), com ambas as fases em equilíbrio com a fase vapor, é ilustrado na Figura 10. A Tabela 3 mostra a classificação da molhabilidade para uma determinada superfície de acordo com o ângulo de contato Θ (SILVA, 2010).

Figura 10 – Molhamento da superfície



Legenda: À esquerda superfície antes e à direita após o molhamento.
Fonte: Adaptado de LUZ et al., 2008.

Tabela 3 – Molhabilidade de uma superfície: Classificação de acordo com o ângulo Θ

Molhabilidade	Condição
Parcial	$0^\circ < \Theta < 180^\circ$, para a qual $\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \Theta$
Nula	$\Theta = 180^\circ$, para a qual $\gamma_{SV} + \gamma_{LV} < \gamma_{SL}$
Completa	$\Theta = 0^\circ$, para a qual $\gamma_{SL} + \gamma_{LV} < \gamma_{SV}$

Fonte: O autor, 2015.

Ainda que existam outros fatores relevantes, tal como a natureza das ligações presentes, de um modo geral, menores ângulos de contato proporcionam uma colagem mais adequada. Um sólido (metal) de alta energia de superficial, tal como os metais, apresentará boa molhabilidade por um líquido (adesivo polimérico) de baixa tensão superficial. Diferente dos metais, algumas superfícies poliméricas são de difícil molhabilidade em função da baixa tensão superficial. Cabe resaltar que, para uma análise completa da molhabilidade, a viscosidade do adesivo e a rugosidade superficial do substrato devem ser consideradas devido a sua influência nos resultados (SILVA, 2010; QUINI, 2011).

1.4 Adesivos estruturais uretânicos

Adesivos uretânicos são formados basicamente de uma reação de pólios e isocianatos, destacando-se em função da sua alta aderência a diferentes substratos (incluindo os compósitos), boas propriedades tais como baixa contração, alta capacidade de deformação e baixa liberação de calor durante a cura. No entanto, cabe ressaltar que, para que sejam alcançadas a adesão e resistência química desejável, é necessário o tratamento da superfície do substrato anteriormente a colagem (SILVA, 2010; QUINI, 2011).

Segundo Silva (2010), com base na prática extensiva de ensaios e em considerações teóricas, algumas recomendações foram descritas na literatura com intuito de indicar alguns procedimentos fundamentais para produção satisfatória das juntas coladas, sendo o tratamento da superfície uma das etapas fundamentais, talvez a mais importante. O controle da qualidade inicia-se na limpeza da superfície, a qual proporciona não só a retirada de resíduos e partículas remanescentes, mas também promove (ou auxilia) na transformação química e mecânica do substrato de modo a modificar a área e/ou a energia superficial de colagem.

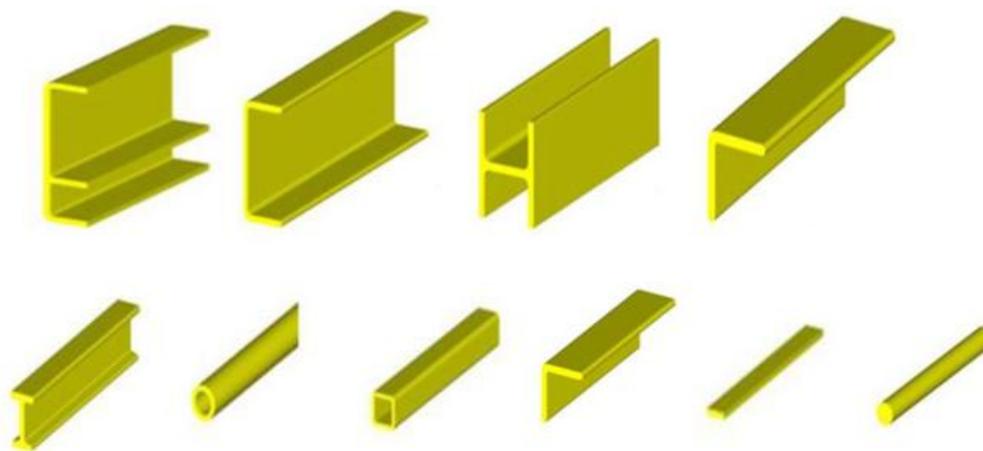
Outra questão importante para o desempenho das juntas é a proporção e a homogeneidade da mistura dos componentes A e B do adesivo, as quais devem ser fielmente respeitadas, caso contrário o processo de cura e conseqüentemente o desempenho do adesivo podem ser fortemente afetados. Deve-se atentar também para a possibilidade da existência de contaminantes na superfície do substrato. Ainda que na forma de uma simples camada molecular, contaminantes podem comprometer o desempenho do adesivo em função da tendência de reação primária com a camada contaminante ao invés de interagir diretamente com o substrato. Com relevância significativa, a distribuição não homogênea do adesivo na superfície do substrato tende a produzir descontinuidades de colagem e concentração de tensão em determinadas áreas da junta (SILVA, 2010; QUINI, 2011).

Para os pultrudados, grande parte dos contaminantes é proveniente dos aditivos, em geral, plastificantes e desmoldantes que migram para superfície durante a passagem do perfil no molde de aquecimento. Neste caso, para maior molhabilidade, sugere-se a limpeza com solventes e abrasão mecânica. Um cuidado especial deve ser dado a compósitos que empregam o estearato como desmoldante, pois mesmo após o tratamento superficial e a colagem pode ocorrer migração de contaminante para superfície, comprometendo a colagem. Nesses casos, adesivos poli-uretânicos e nitro-fenólicos são mais indicados devido a sua resistência superior a migração de contaminantes internos (QUINI, 2011).

1.5 O processo de pultrusão

A pultrusão é uma técnica de fabricação contínua de materiais compósitos no qual a fase matriz consiste em uma resina termofixa e o reforço em fibras de vidro contínuas alinhadas longitudinalmente. Os perfis pultrudados apresentam alta qualidade e abrangem desde simples configurações a seções transversais complexas (Figura 11) (CALLISTER; RETHWISCH, 2013).

Figura 11 – Perfis pultrudados com diversas seções transversais



Fonte: PULTRUSAO DO BRASIL, [s.d.].

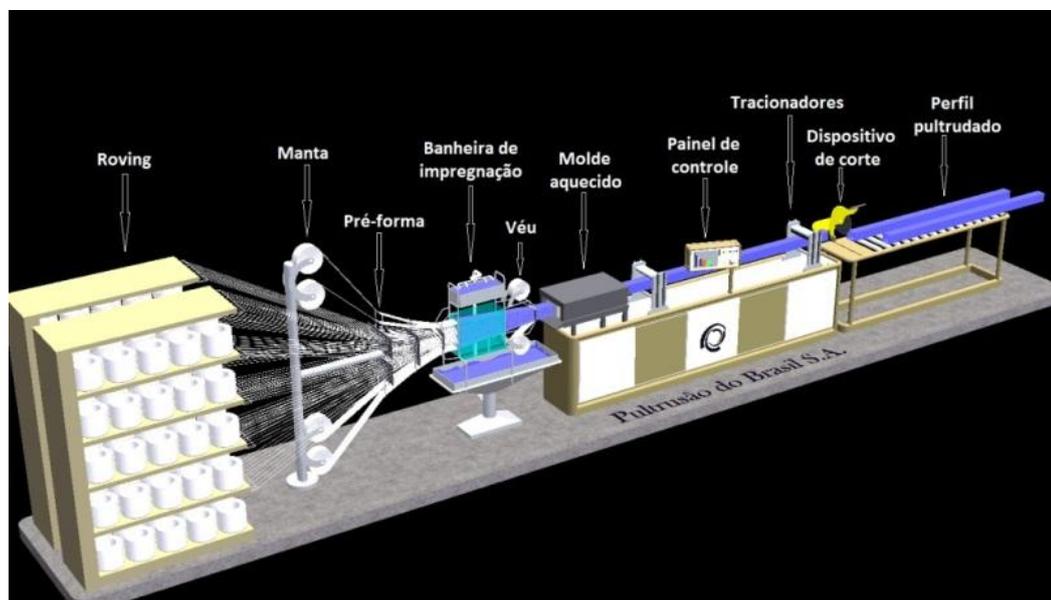
1.5.1 Histórico

A primeira patente industrial do processo de pultrusão foi conseguida por W. Brandt Goldsworthy em 1951, nos Estados Unidos. Inicialmente os perfis pultrudados eram limitados a barras sólidas destinadas a produzir varas de pesca, suporte de barracas e outros componentes simples. Ao final dos anos 50 perfis mais complexos foram produzidos e contribuíram significativamente para ampliação do mercado dos pultrudados. Entre os anos de 1960 e 1970 a pultrusão expandiu-se para outros países, sendo a década de 80 marcada por grandes avanços tecnológicos e pelo aperfeiçoamento da técnica com a inclusão de outros tipos reforços (mantas trançadas, véus de superfície e fibras especiais). Em seguida, surgiram novas máquinas pultrusoras e outras variedades de resinas termofixas que possibilitaram melhor produtividade e um produto final de qualidade superior a preços mais acessíveis. Em consequência, a demanda pelo material pultrudado teve um aumento significativo desde então (BORGES, 2004).

1.5.2 O processo de produção: Uma visão geral

O processo de produção inicia-se pela introdução das fibras (dispostas inicialmente em *rovings*) nas placas pré-forma e pelo posicionamento da manta, em alguns casos, também do véu de superfície. Uma vez o reforço tracionado adequadamente, o conjunto segue junto para banheira de impregnação e logo após é conduzido ao molde aquecido, onde ocorrerá a cura da resina. A produção é finalizada pelo corte do perfil no tamanho desejado (Figura 12).

Figura 12 – Esquema simplificado do processo de pultrusão



Fonte: PULTRUSAO DO BRASIL, [s.d.].

1.5.3 Principais variáveis de controle

O processo de pultrusão possui poucas variáveis diretamente controláveis, as quais estão restritas a dois pontos específicos da pultrusora, a banheira de impregnação e o molde aquecido. Outras variáveis secundárias, tal como a força de puxamento, também devem ser devidamente monitoradas, uma vez que influenciam indiretamente na velocidade e qualidade da produção. A dimensão do perfil, o tamanho do molde aquecido e o composto resinado são alguns parâmetros de produção fundamentais (BORGES, 2004; KERSTING, 2004). Em geral, segundo Kersting (2004), a produção de novos perfis, seja está a partir de modificações

das materiais primas ou mesmo das dimensões de um produto já fabricado, baseia-se na combinação de diferentes velocidades de puxamento e de temperatura no molde aquecido. Assim, de acordo com os resultados e o objetivo final, o processo é alterado até que sejam alcançadas condições de estabilidade.

1.5.3.1 Banheira de impregnação: Viscosidade da resina e molhabilidade das fibras

Durante a passagem das fibras pela banheira de impregnação o mecanismo é simples, a resina é despejada sobre o reforço, este já tracionado e com uma velocidade constante em direção ao molde aquecido. Apesar da aparente simplicidade, essa etapa é de extrema importância para o controle e ajuste da viscosidade da resina (KERSTING, 2004) e, conseqüentemente, na molhabilidade das fibras. Podemos entender a molhabilidade como o resultado macroscópico de interação molecular entre a superfície de um líquido (resina) e um sólido (fibra) que estão em contato direto. Nessa interação existem duas forças presentes, coesivas e adesivas. As forças coesivas são provenientes do líquido e as força adesivas resultado da interação interfacial líquido-sólido. Uma vez que a força adesiva é responsável em promover o espalhamento do líquido em toda superfície do sólido a molhabilidade total ocorrerá quando as forças adesivas predominarem proporcionando uma adesão máxima (ROTTA, 2008). Segundo KERSTING (2004), a boa interação entre as fases diminuirá a possibilidade do surgimento de defeitos no perfil.

Sabe-se que a viscosidade é inversamente proporcional à molhabilidade, com isso, sistemas de resinas com baixa viscosidade tende a molhar de forma mais eficiente às fibras. Dentre os fatores que alteram a viscosidade da resina a temperatura ambiente e o tempo de exposição do material são os principais. O grau de cura da resina tende a aumentar gradualmente com o decorrer do tempo e o acréscimo da temperatura. A evaporação de solventes presentes também pode provocar um sutil aumento da viscosidade (KERSTING, 2004).

1.5.3.2 Molde aquecido: Cura da resina

Os parâmetros diretamente controláveis nesta fase da produção são a velocidade de puxamento e a temperatura no interior do molde aquecido (ou apenas molde). O processo de cura é diretamente influenciado pela temperatura, enquanto a velocidade de tração controla o tempo que o perfil permanece no molde. Com isso, é fundamental estabelecer uma condição de estabilidade entre temperatura e tempo de permanência do perfil no molde. Ainda que a cura não seja totalmente concluída dentro do molde, é necessário que se atinja um grau que permita o desprendimento do perfil (KERSTING, 2004).

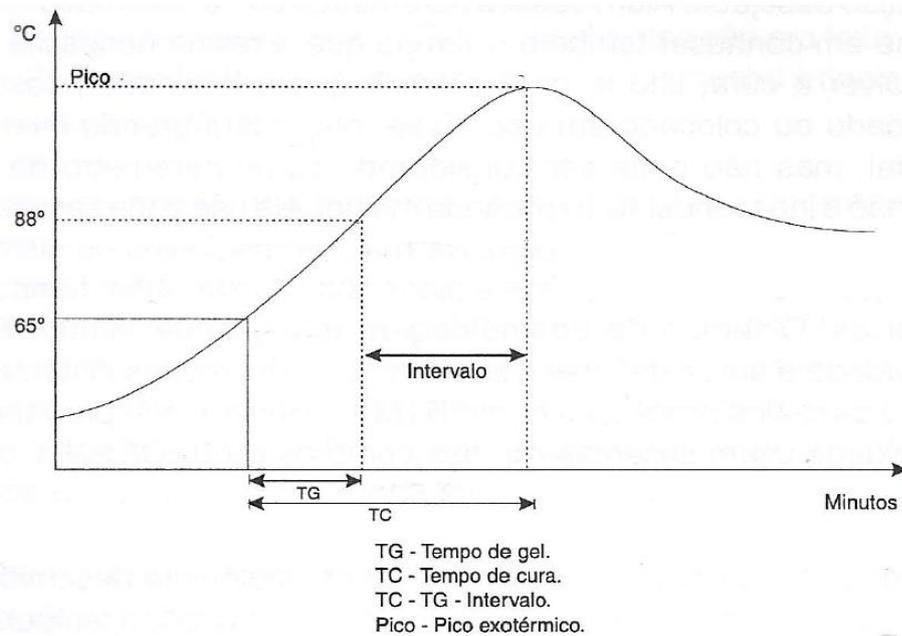
Tanto o controle e ajuste da temperatura como a velocidade de pultrusão podem ser facilmente executados através do painel eletrônico, este geralmente localizado próximo à saída do molde. Para monitoramento mais preciso do mecanismo de cura da resina dentro do molde, o ensaio de SPI é indicado.

1.5.3.3 Ensaio SPI

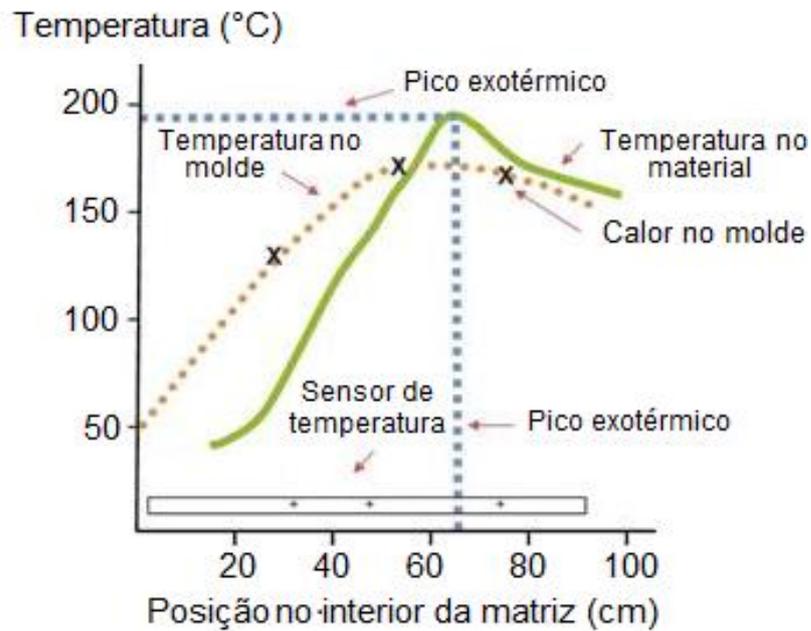
Desenvolvido pela *Society of the Plastics Industry* (SPI), o ensaio SPI permite medir a atividade de cura em qualquer sistema de resina para diferentes temperaturas de processo. A resposta do ensaio consiste na curva temperatura *versus* tempo (Figura 13) ou temperatura *versus* distância percorrida no molde, esta última mais usual na indústria (Figura 14) (CARVALHO, 2002).

A curva temperatura *versus* tempo permite medir três parâmetros responsáveis pela cura: Tempo de gel, tempo de cura e pico exotérmico. O tempo de gel (ou *geltime*) é o tempo entre o início da cura ao pico exotérmico, o qual depende, dentre outros mecanismos químicos, da reatividade da resina. A temperatura mais alta da resina é representada pelo pico exotérmico, denominado também ápice da cura. A partir do pico a velocidade do mecanismo de cura diminui até que se encerre próxima a temperatura ambiente (CARVALHO, 2002).

Figura 13 – Curva exotérmica típica do ensaio SPI



Nota: Ensaio original realizado com pequena amostra (7,5 gramas) de resina catalisada com 1,0% de BPO-100 imersa em banho de água mantida a 82°C.
 Fonte: Adaptada de CARVALHO, 2002.

Figura 14 - Curva temperatura *versus* posição no molde

Nota: Pico exotérmico característico do início da reticulação do material polimérico.
 Fonte: Adaptado de STARR, 2000.

1.5.4 Etapas do processo

1.5.4.1 Alinhamento do reforço nas placas de introdução

Cada conjunto de fibras (ou pontas) é posicionado manualmente em um orifício da placa de introdução (Figura 15). A quantidade de pontas depende do perfil e da porcentagem do reforço. A manta também é introduzida nesta etapa, o posicionamento varia de acordo com a configuração do perfil.

Figura 15 – Alinhamento das pontas e da manta na placa de introdução



Fonte: O autor, 2015.

1.5.4.2 Impregnação das fibras

Para proporcionar um contato maior entre as fibras e a resina, a banheira é projetada de maneira a permitir que em seu interior as fibras tracionadas sejam espaçadas (Figuras 16 e 17), aumentando a área superficial exposta e facilitando a impregnação. Na saída da banheira as fibras começam gradualmente a adquirir a forma do perfil passando pelas placas pré-forma. Nesta etapa a resina excedente retorna ao processo.

Figura 16 – Passagem do reforço pela banheira de impregnação



Fonte: O autor, 2015.

Figura 17 – Vista superior da banheira aberta: Fibras tracionadas e espaçadas



Fonte: O autor, 2015.

1.5.4.3 Passagem pelas placas pré-forma

Responsáveis em homogeneizar a impregnação e retirar o excesso de resina, as placas pré-forma também conduzem de maneira gradual o perfil ao formato final. O número de placas pré-forma entre a saída da banheira e a entrada do molde depende do perfil em produção. Em geral, quanto mais complexa a forma do perfil, uma quantidade maior de placas pré-forma são necessárias.

Figura 18 – Placas de introdução: Pultrusão de

perfil do tipo cantoneira



Fonte: O autor, 2015.

1.5.4.4 O molde aquecido

Dentre do molde aquecido o reforço impregnado com a resina é submetido a uma elevação gradual e controlada de temperatura até que o processo de cura seja concluído ou atinja um grau suficiente para que o perfil esteja rígido e se desprenda do molde. Resistências elétricas localizadas no molde são responsáveis pela transferência de calor molde-perfil. Para o controle e monitoramento da temperatura, pode-se utilizar como auxílio um dispositivo portátil para aferição em três pontos fundamentais do molde, entrada, meio e saída.

Figura 19 – Molde aquecido: Vista panorâmica

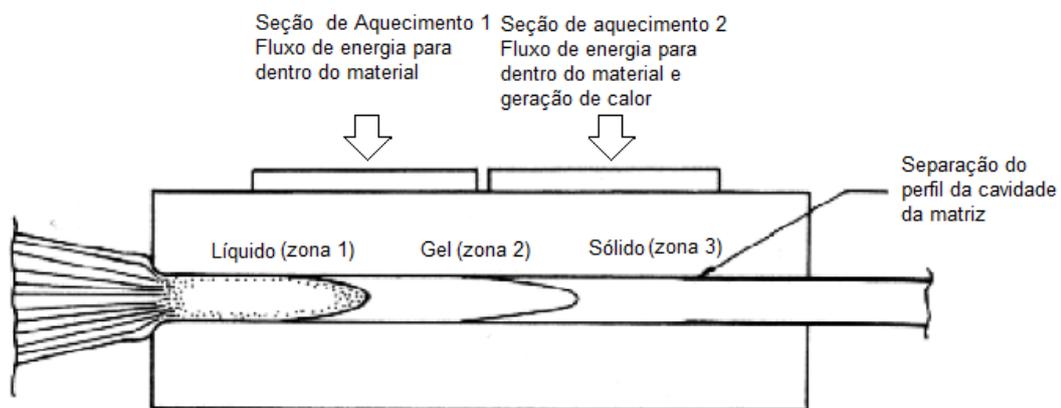


Fonte: O autor, 2015.

1.5.4.5 Interação molde x resina: Forças internas

Conforme a resina reage suas propriedades são alteradas bem como sua interação com o equipamento. Com base nas forças presentes, toda a extensão do molde foi dividida em três zonas distintas, zona 1, 2 e 3, de maneira a permitir o entendimento da dinâmica interna do processo (Figura 20).

Figura 20 - Dinâmica de energia e forças no interior da matriz aquecida

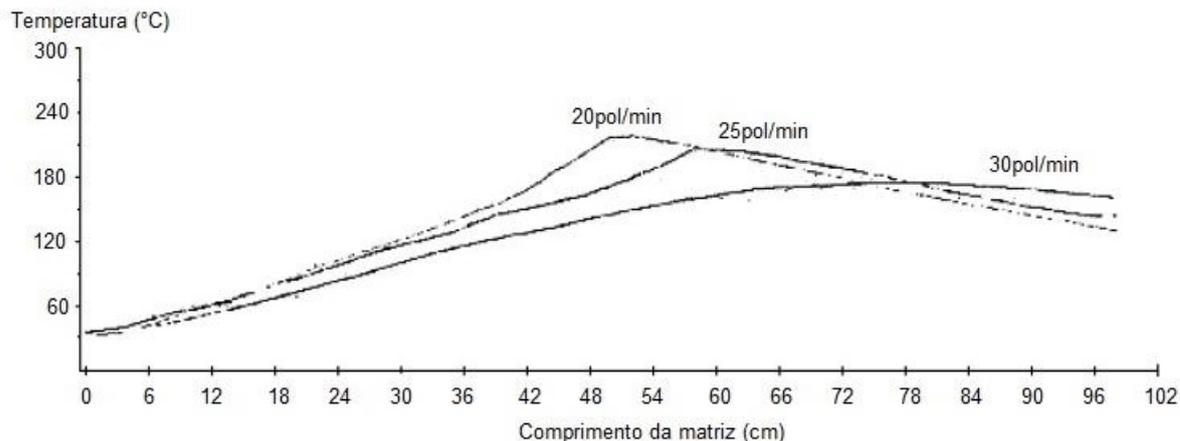


Fonte: Adaptado de STARR, 2000.

Em função das forças cisalhantes na zona 1, durante a entrada das fibras impregnadas na matriz é necessário um acréscimo da força de tração. Na zona 2 a resina está no estado gel e as forças coesivas prevalecem até que se atinja um grau de cura suficiente para solidificar o material. Com o perfil já no estado sólido (zona 3) ocorre a contração volumétrica e a diminuição da tensão entre a matriz e o perfil, a partir de então apenas forças friccionais estão presentes (KERSTING, 2004).

Um cuidado especial deve ser tomado para a cura de perfis maciços. De acordo com a dimensão da peça, o mecanismo de cura será diferente em função do tempo necessário para a dispersão de calor em todo seu volume, aumentando assim a necessidade de permanência na zona 2. Segundo KERSTING (2004), velocidades menores de puxamento tendem a ampliar a zona 2 e deslocar o pico exotérmico para regiões mais próximas da entrada da molde (Figura 21), o que possibilita a cura adequada de perfis maciços.

Figura 21 – Localização do pico exotérmico para diferentes velocidades de puxamento



Nota: Curva temperatura *versus* posição na matriz mostra deslocamento do pico exotérmico de acordo com incremento da velocidade de puxamento.

Fonte: Adaptado de KERSTING, 2004.

Além da velocidade de puxamento, a temperatura no molde também influencia diretamente na dimensão de cada uma das zonas. Uma vez que a matriz é responsável em fornecer calor ao perfil, o aumento da temperatura nas primeiras polegadas do molde deve ocorrer de forma gradual permitindo que o calor seja dissipado em todo interior do perfil uniformemente. Em perfis maciços o controle da temperatura deve ser ainda mais rigoroso, com a elevação do calor transferido mais lentamente e, em alguns casos, diminuindo a temperatura na saída do molde para evitar que defeitos provenientes da evaporação de solventes e monômeros não reagidos ocorram (KERSTING, 2004).

A força de puxamento e a resistência ao puxamento, apesar de variáveis secundárias do processo, fornecem boas informações com respeito ao andamento da produção. A força de puxamento deve ser estável, sem aumentos constantes e abruptos. Caso contrário, o perfil pode apresentar defeitos decorrentes do acúmulo de sobras na sua superfície. A fricção interna impõe resistência ao puxamento devido a diversos fatores presentes no interior do molde como a tensão cisalhante, a adesão entre as fases do compósito e contração volumétrica do perfil. No entanto, a contribuição de cada uma das variáveis supracitadas ainda não é bem compreendida (KERSTING, 2004).

Após a entrada do perfil no molde, a viscosidade da resina exerce pressão sobre as fibras e evita o escoamento e retorno do material. Com a cura em estado avançado, a pressão do molde sobre o perfil rígido é fundamental para evitar a formação de poros provenientes da liberação de água e outros produtos de reação. Outro parâmetro fundamental de controle é o volume de resina, quantidades insuficientes podem causar porosidade no perfil e afetar negativamente suas propriedades. Em contrapartida, o excesso do material causará um

aumento da pressão exercida pelo molde, o que pode fraturar o perfil ou travar o sistema de tração. O tamanho do molde interfere diretamente na produtividade, afinal, equipamentos com extensão inferior a um metro precisam manter o perfil durante mais tempo no seu interior, tornando o processo produtivo mais lento. No entanto, isso não impede que uma variedade de perfis sejam pultrudados (BORGES, 2004).

1.5.4.6 Corte do perfil

Após a saída do molde, o perfil curado passa pelos tracionadores (Figura 22) e segue para o corte (Figura 22) no tamanho desejado finalizando o processo de pultrusão.

Figura 22 – Tracionador e serra circular



Legenda: À esquerda o tracionador e a direita, a máquina de corte.
Fonte: O autor, 2015.

1.5.5 Pultrusão com resina fenólica: Algumas particularidades

Conforme dito anteriormente, compostos resinados à base de resina fenólica apresentam alta viscosidade exigindo adequação e monitoramento minucioso do processo produtivo, especialmente durante o banho de resina. Para molhabilidade satisfatória das fibras é usual o aumento da temperatura do composto, o que tende a diminuir a viscosidade do material e facilitar a impregnação. Entretanto, algumas resinas contem catalisadores ácidos

em sua formulação, sendo necessária sutil diminuição na temperatura do banho de modo à minimizar o efeito do ácido sem elevação significativa da viscosidade (BORGES, 2004).

Em geral, a pultrusão com resina fenólica utiliza moldes de um metro e meio, com tempo mínimo de permanência do perfil em seu interior de 1 minuto. O tamanho padrão de molde no Brasil não ultrapassa os 100 cm, o que exige a diminuição da velocidade de tração (BORGES, 2004).

Outra particularidade da resina fenólica é a liberação substâncias voláteis (subprodutos da reação de cura) e, conseqüentemente, a presença de poros no volume do perfil. Apesar da temperatura elevada (acima de 100°C) parte da água fica aprisionada no interior do perfil gerando alta pressão interna. Além da fricção com o molde devido à fina camada gasosa formada, o percentual de água que não evapora durante a cura forma esferas com diâmetros em escala micro no volume do perfil. O tamanho e a quantidade de vazios dependem diretamente do composto fenólico. Em outros sistemas de resina, o fenômeno tende a ocorrer somente no início da matriz (BORGES, 2004).

Segundo Borges (2004), a adição de siloxanos é uma opção para diminuição da porosidade, pois tendem a reagir e absorver a água remanescente no interior do perfil. Ainda que minimizada a porosidade interna, cabe ressaltar a importância de uma proteção superficial que evite a absorção de água e de outros líquidos presentes no ambiente em função da superfície irregular. Caso contrário, em um curto espaço de tempo, o perfil sofre deterioração com exposição das fibras (Figura 23) e diminuição da sua vida útil.

Figura 23 – Perfil fenólico exposto ao tempo sem proteção superficial



Legenda: Acima face do perfil que não teve contato direto com intempéries (radiação solar, umidade e chuva) e abaixo, superfície deteriorada com fibras expostas devido a exposição direta.

Nota: Ambos os perfis ficaram expostos as mesmas condições por aproximadamente 5 anos.

Fonte: O autor, 2015.

1.5.6 Materiais pultrudados

1.5.6.1 Propriedades gerais

Sabe-se que, de acordo com o sistema de resina, volume de reforço e aditivos empregados na produção do pultrudado suas características e propriedades podem variar consideravelmente. No entanto, uma vez estabelecida a porcentagem de reforço, resina e as propriedades inerentes a fibra e a resina na sua forma crua ou do composto resinado (mistura da resina crua com os aditivos) é possível determinar as propriedades e o desempenho esperado para o material pultrudado. Algumas propriedades gerais e suas respectivas características estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Principais propriedades e características dos materiais pultrudados

Propriedade	Característica
Resistência química	Elevada resistência química
Resistência à corrosão	Difícilmente sofrem corrosão
Resistência específica	20 vezes maior que a do aço-carbono
Resistência ao impacto	Alta resistência ao impacto e boa absorção de vibrações
Módulo de elasticidade	4 vezes menor que do aço e 2 vezes menor que do alumínio
Condutividade elétrica	Excelente isolante elétrico
Condutividade térmica	Baixa condutividade
Estabilidade dimensional	Baixo coeficiente de dilatação e deformação
Acabamento superficial	Excelente aspecto final. Possibilidade de pigmentação
Absorção de umidade	Baixa ou nula absorção de água
Flamabilidade	De acordo com a resina, excelente resistência à chama
Massa específica	75 % menor que o aço e 30% menor que o alumínio.

Fonte: FERRO, 1996.

1.5.6.2 Vantagens e desvantagens

Em função das suas características e do bom desempenho mecânico o pultrudado vem ganhando mercado como substituto de componentes antes produzidos em aço ou alumínio. A baixa densidade do pultrudado facilita tanto logística como a instalação, demandando menor tempo e, conseqüentemente, disponibilidade de mão de obra. O pultrudado não requer manutenção, em contra partida, o aço exige uma manutenção periódica com demanda de material, equipamentos, pessoal especializado e, em alguns casos, com parada total de produção em função da manutenção das instalações. Conforme Borges (2004), materiais pultrudados com revestimento protetor externo (pintura) tem uma vida útil superior a 20 anos. Em oposição, casos reais mostram que os metais não ultrapassam 2 anos se submetidos as mesmas condições de severidade.

Tabela 5 - Propriedades físicas e químicas: Perfis pultrudados x aço inoxidável

Propriedades físicas e químicas		Pultrudado (PRFV)	Aço inoxidável
Coeficiente linear de expansão (cm/cm °C).10 ⁻⁶		5.2	10
Temperatura segura de trabalho (°C)		130	600
Resistência à chama		Boa*	Excelente
Resistência à corrosão	Névoa marinha	Excelente	Excelente
	Ambientes externos	Excelente	Excelente
	Água efluente	Excelente	Excelente

Legenda: (*) Excelente com uso de aditivos adequados.

Fonte: Adaptado de MITTAL; BISWAS, 2009.

Além das boas propriedades do material, a pultrusão também apresenta vantagens relevantes. A possibilidade de produção de perfis variados (tamanhos, forma e comprimento) e a versatilidade de matéria prima (reforço, resina, carga e aditivo) são características particulares deste processo (BORGES, 2004).

Dentre as desvantagens do pultrudado, a baixa temperatura de trabalho tende a ser um fator limitante à sua aplicação. No entanto, alguns compostos resistem à temperaturas moderadamente elevadas. O custo do material pode também não ser atrativo, porém, a relação custo-benéfico em geral justifica o investimento. Cabe também ressaltar alguns inconvenientes durante a produção, como a liberação de produtos voláteis, mudança rápida de viscosidade da resina, tempo dedicado à preparação do equipamento e geração considerável de resíduos.

A liberação de produtos voláteis (acetona e estireno) pode ser prejudicial à saúde caso não sejam tomados os cuidados devidos. A instalação de um exaustor de alta potência e a reciclagem da acetona utilizada na limpeza de peças e dos equipamentos pode minimizar os efeitos. Alterações rápidas na viscosidade da resina podem ser evitadas pelo emprego de aditivos adequados e um controle contínuo durante do parâmetro durante processo.

Cada perfil pultrudado exige placas de introdução, dentre outros dispositivos, específicos. Por ser tratar de uma etapa totalmente manual, a tarefa pode demandar várias horas (BORGES, 2004). Para isto, uma programação prévia da produção tende a otimizar o tempo e limitar a preparação da produção apenas ao procedimento de passagem, inserção das fibras, seleção de material e ajuste de parâmetros. Por último, porém de fundamental importância, um estudo para redução do material descartado e alternativas viáveis de reprocessamento são alternativas possíveis.

2 METODOLOGIA

Anteriormente a pultrusão dos perfis foi realizada uma visita técnica as instalações de uma indústria pultrusora, a qual nos proporcionou uma vivência direta na produção de perfis das mais variadas configurações e matérias primas. Conhecidos os principais parâmetros e os processos básicos envolvidos nesta técnica de produção, em uma segunda visita os perfis do tipo "I 38" (Figura 25) fenólicos, acrílicos e poliéster foram produzidos para acompanhamento direto e coleta dos dados aqui apresentados.

2.1 Pultrusão dos perfis

Uma única pultrusora equipada com molde aquecido de 950 mm foi utilizada para produção dos três perfis: Fenólico, acrílico e poliéster. Manteve-se inalteradas todas as placas de introdução e de pré-forma, bem como seus respectivos posicionamentos. Após a pultrusão com cada uma das resinas, o procedimento de *passagem* foi executado.

As condições de partida (parâmetros iniciais da produção) para cada uma das resinas foram estabelecidas com base em valores médios padrões, os quais variam de acordo com a configuração do perfil, dimensões e materiais empregados. Após análise visual do perfil na saída do molde, a temperatura setada e a velocidade de tracionamento, ambas aferidas no painel de controle foram, quando necessário, alteradas até que se obtivesse um perfil estabilizado. Entende-se como *condição de estabilização* um processo produtivo que, para determinados parâmetros, mantêm-se estável e apresenta perfis conforme esperado, ou seja, aparentemente curado com superfície homogenia e livre de defeitos.

O monitoramento tanto da temperatura no interior do molde de aquecimento bem como da localização do pico isotérmico se deu através da execução de ensaios SPI. A temperatura ambiente e do composto foram apenas aferidas, sem controle fino. Para tal, disponhamos de um termômetro digital instalado próximo à pultrusora e um pirômetro *Fluke* modelo 62 MAX (Figura 24) para verificação da temperatura do composto à distância. Não adotamos a força de puxamento como parâmetro de controle, uma vez que sua magnitude tende a variar durante todo o processo de acordo com a alteração dos demais parâmetros

supracitados. Com respeito à viscosidade, não foi realizada aferição ou controle durante a produção.

Figura 24 – Medidores de temperatura



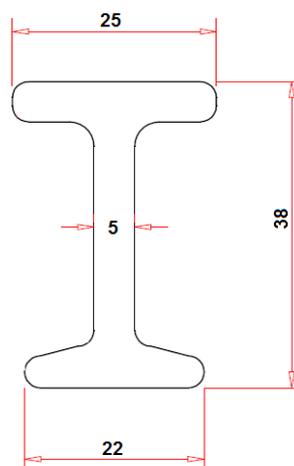
Legenda: À esquerda pirômetro *Fluke* modelo 62 MAX e à direita, medidor de temperatura e umidade digital Intrutherm HT 200 (descontinuado).

Fonte: PULTRUSÃO DO BRASIL., [s.d.].

2.1.1 Configuração dos perfis

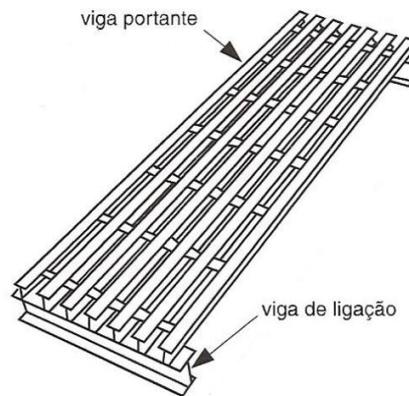
Para as três resinas foram pultrudados perfis do tipo “I 38”, Figura 25, estes em conformidade acordo com as dimensões sugeridas pela norma ABNT NBR 15708-3 para construção de grades de piso (Figura 26).

Figura 25 – Perfil “I” 38 mm pultrudado



Fonte: PULTRUSÃO DO BRASIL., [s.d.].

Figura 26 – Grades de piso: Exemplo de viga portante e viga suporte



Fonte: ABNT NBR 15708:3.

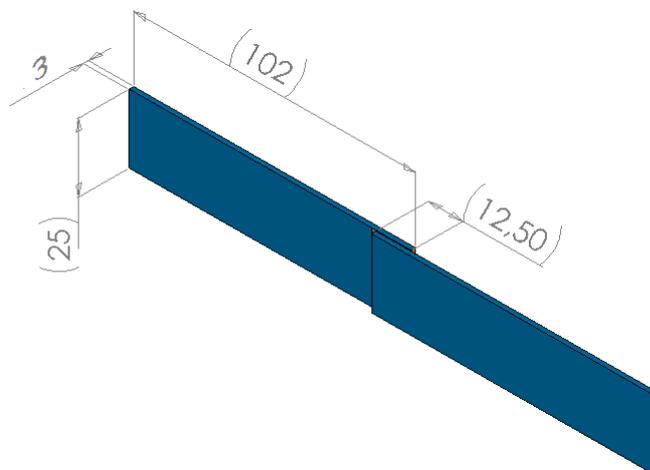
2.2 Juntas de cisalhamento

Como substrato optou-se apenas por perfis pultrudados em matriz poliéster em função da alta produtividade do material e suas diversas aplicações. Cabe ressaltar que os procedimentos e métodos empregados tiveram como base a metodologia desenvolvida em pesquisas anteriormente realizadas no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) para juntas coladas de aço carbono. Uma vez que se trata materiais distintos, compósitos pultrudados e aço carbono, e de um estudo inicial com juntas de pultrudados pequenas adaptações se fizeram necessárias e são descritas ao longo do trabalho.

2.2.1 Confeção dos corpos de prova

Se comparadas às juntas coladas de aço as dimensões dos corpos de prova de pultrudado diferiram apenas na espessura. Tal alteração dimensional se fez pois optou-se por ensaiar amostras provenientes de perfis representativos da produção padrão da indústria, os quais em geral tem espessura mínima de 3,0 mm. A largura e o comprimento foram mantidos conforme descrito no P.O 03 (Figura 27).

Figura 27 - Esquema: Dimensões dos corpos de prova para juntas pultrudadas



Fonte: IPRJ/LAA, 2010.

2.2.2 Tratamento da superfície de colagem

Para todos os métodos de tratamento superficiais propostos nesta pesquisa, a face do perfil que foi submetida aos procedimentos não continha véu superficial. Novamente, mantemos o padrão de colagem empregado na indústria pultrusora, o qual prioriza a união entre perfis sem véu de superfície. Como parâmetro da alteração (caso exista) na resistência mecânica proporcionada pela adesão proveniente do tratamento superficial empregado, juntas de cisalhamento com superfície sem tratamento também foram ensaiadas.

Foram selecionados três procedimentos alternativos ao lixamento, sendo dois *primers* à base de silano e um *primer* específico para superfície MDF (ALMASUPER). Juntas tratadas com o *primer* de silano hidrolisado foram coladas com o adesivo MasterPur, bem como os substratos que tiveram a superfície tratada com *primer* ALMASUPER. Em alternativa ao adesivo supracitado, juntas de cisalhamento unidas com fitas adesivas 3M tiveram a superfície tratada com *primer* de silano 3M.

Devido a falta de dados referentes a adesão e molhabilidade entre superfícies pultrudadas e o adesivo em estudo e por se tratar de um trabalho inicial, a escolha dos tratamentos para pesquisa foi feita de forma intuitiva (superfície MDF aparentemente semelhante ao pultrudado bem como a interação vidro/alumínio e pultrudado/adesivo) ou com

base em testes executados em juntas de cisalhamento de aço carbono, os quais mostraram incremento significativo na resistência mecânica das juntas tratadas com agentes de silanização (LIMAVERDE *et al*, 2008). Consta na literatura que o tratamento superficial com agentes de silanização promove a criação de sítios ativos de ligações químicas na interface adesivo substrato (CRITCHLOW *et al* (2000); HARRIS *et al* (1999); KALNINS *et al* (1999)). E ainda, a fácil aplicação, disponibilidade no mercado, custo acessível e não agressão ao ambiente também foram fatores relevantes na escolha do *primer* de silano tratamento para os testes.

2.2.2.1 Lixamento manual

Cada corpo de prova foi lixado manualmente com lixa grão 100 até que a superfície apresentasse coloração esbranquiçada e opaca, o que tende a ser um indício da retirada do desmoldante. O pó residual foi removido por meio de abrasão leve com papel toalha.

2.2.2.2 *Primer* ALMASUPER

Previamente a aplicação do *primer* a superfície foi limpa com acetona embebida em papel toalha. Logo em seguida, com a área de colagem livre de resíduos, aplicou-se o produto conforme procedimento indicado pelo fabricante, este através da borrifação e posterior secagem ao ar (cerca de 10 segundos).

2.2.2.3 *Primer* de silano 3M

A superfície foi limpa com álcool isopropílico embebido em algodão hidrófilo. Após a secagem (quase instantânea) do álcool, o *primer* foi aplicado seguindo o mesmo método empregado na limpeza, de modo a formar uma camada fina e uniforme. Os corpos de prova foram deixados ao ar para secagem espontânea.

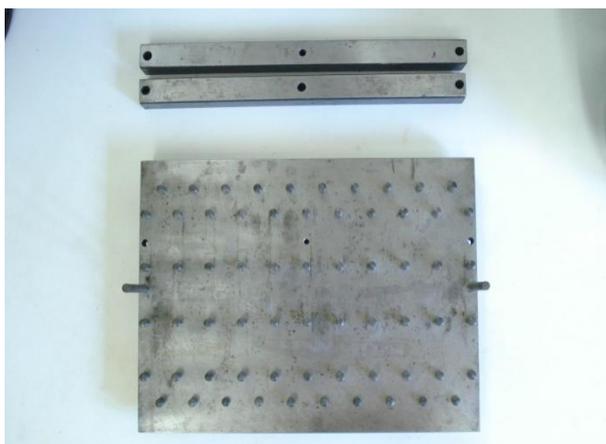
2.2.2.4 *Primer* de silano hidrolisado

A solução utilizada apresentava uma proporção de 1% de silano e 99% de água deionizada. Todo procedimento, desde a hidrólise à aplicação do produto no substrato, foi realizado em capela. A hidrólise teve duração total de 35 minutos. O pH inicial manteve-se entre 4 e 5 e o final no intervalo de 3 à 4, ambos aferidos por fita. O método de aplicação consistiu em borrifação sobre a área de colagem, esta previamente limpa com papel toalha, e secagem espontânea (24 horas) ao ar em temperatura e umidade ambientes, sem controle.

2.2.3 Colagem dos corpos de prova

Como dispositivo auxiliar para colagem dos corpos de prova, utilizamos um molde de aço (Figura 28), este projeto e construção do LAA, o qual possibilita a colagem simultânea e padronizada de até 10 juntas de cisalhamento. O molde foi projetado para que a área total colada seja de 312,5 mm² (12,50 mm x 25 mm) com camada adesiva padrão de 2,0 mm de espessura e angulação de 45° nas extremidades da área colada (*tapering*).

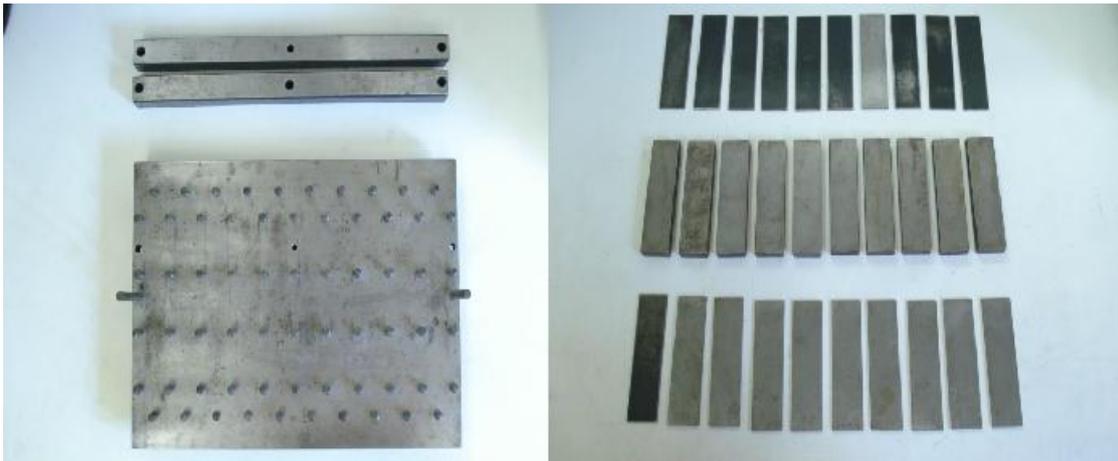
Figura 28 – Molde de colagem LAA



Legenda: Na parte superior da imagem o contra peso e abaixo a base principal.

Fonte: IPRJ/LAA, 2010.

Figura 29 – Molde de colagem LAA e regulador de espessura



(a)

(b)

Legenda: (a) acima o contra peso e abaixo a base principal; (b) reguladores de espessura de 2,0 mm (acima e abaixo) e no centro, base de apoio do contra peso com 10 mm de espessura.

Fonte: IPRJ/LAA, 2010.

Em função da diferença de espessura entre os substratos de aço e de pultrudado, para o posicionamento correto das juntas utilizadas neste trabalho se fez necessária adaptar o dispositivo com a substituição temporária da base de apoio original de 2,0 mm por outra de 3,0 mm (Figura 30), a qual serviu apenas de suporte para que a junta se mantivesse paralela em relação à base do dispositivo. Não houve controle da espessura da camada adesiva (ausência de reguladores) bem como acabamento nas extremidades (*tapering*). Logo após a colagem, o excesso de adesivo foi retirado e, após a cura, o adesivo extravasado foi removido com auxílio de estilete.

Figura 30 – Adaptação do molde de colagem para substrato pultrudado



Nota: Lote 13 posicionado sobre base de apoio de 3,0 mm de espessura (régua pultrudada amarela) sem regulador de espessura para camada adesiva.

Fonte: O autor, 2015.

2.2.3.1 Adesivo MasterPur

De acordo com as proporções indicadas pelo fabricante, utilizamos 10g do componente A e 1.9g do componente B para colagem de 10 juntas. Entende-se que a quantidade foi suficiente, pois não houve descarte de material. Ainda seguindo os procedimentos do boletim técnico do produto, o tempo total de manipulação foi inferior a 15 minutos para todos os lotes. As juntas só foram retiradas do molde após 24 horas, tempo indicado para cura total do adesivo.

2.2.3.2 Fitas adesivas

Devido à diferença no método de aplicação das fitas adesivas, todo procedimento de colagem se deu fora do molde e somente após a união dos corpos de prova as juntas foram posicionadas no dispositivo para aplicação de pressão uniforme e distribuída. As juntas coladas com a fita adesiva permaneceram sobre pressão por no mínimo 24 horas, tempo correspondente a 90% de adesão do material à superfície do substrato.

2.3 Ensaaios mecânicos

As juntas coladas foram analisadas em cisalhamento devido à importância desse tipo de tensão na resistência dos adesivos. Em geral, os adesivos apresentam menor tensão de resistência em cisalhamento se comparados a esforços axiais (tração e compressão). Como métodos de análise, as juntas coladas foram submetidas à ensaios de cisalhamento e fluência, ambos em temperatura ambiente.

2.3.1 Ensaio de cisalhamento

Para os testes de cisalhamento utilizamos a máquina de ensaio universal Shimadzu modelo Autography AG-X Plus 100 kN. Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASTM D1002, com velocidade de deslocamento das garras de 1.3 mm/min e célula de carga com capacidade máxima de 5 kN. A temperatura ambiente e umidade apenas aferidas, sem controle fino. Durante o posicionamento das juntas na garra, para evitar momento, utilizou-se dois batente, um em cada extremidade, de modo a manter a junta o máximo possível na posição vertical (ASTM D 1002).

O adesivo MasterPur foi avaliado sobre três condições distintas de tratamento superficial: Lixamento manual, *primer* ALMASUPER e *primer* de silano hidrolisado. Como parâmetro de comparação, corpos de prova com superfície crua (sem tratamento) também foram submetidos a testes, totalizando assim 4 lotes e 40 corpos de prova. As fitas adesivas VHB foram coladas somente em superfície tratada com o *primer* de silano 3M, cada um dos dois lotes também continham 10 corpos de prova.

Para facilitar a distinção e posterior análise, os lotes foram divididos em dois grupos: Grupo 1 – Juntas coladas com adesivo MasterPur e Grupo 2 - Juntas coladas com Fitas Adesivas 3M (Tabela 6).

Tabela 6 – Distribuição dos lotes ensaiados em cisalhamento

Grupo	Nº de CP's*	Lote	Adesivo/fita	Tratamento superficial
1	10	13	MasterPur	Lixamento manual (grão 100)
	10	14	MasterPur	Superfície crua (sem tratamento)
	10	15	MasterPur	<i>Primer</i> de silano hidrolisado
	10	16	MasterPur	<i>Primer</i> ALMASUPER
2	10	17	4312	<i>Primer</i> de silano 3M
	10	18	4972	<i>Primer</i> de silano 3M

Legenda: (*) sigla CP's corresponde a corpos de prova.

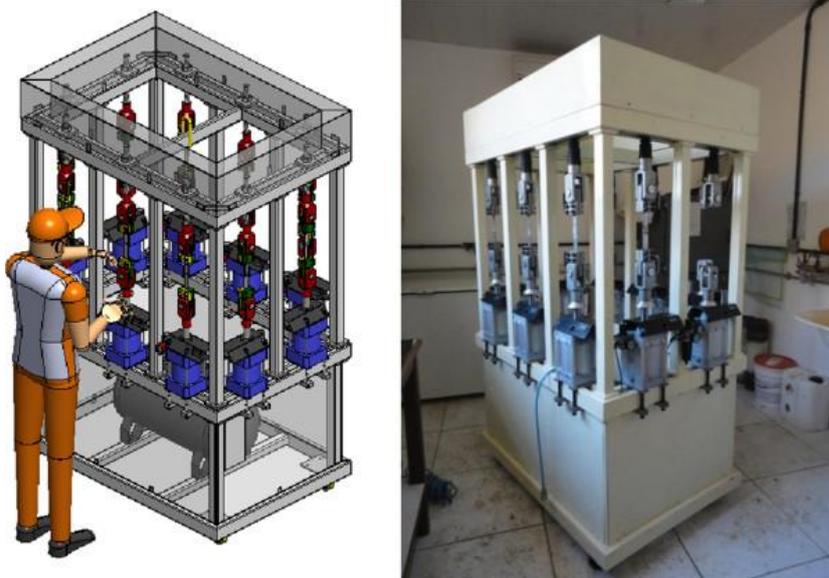
Nota: Adesivo Masterpur aplicado em substrato com diferentes tratamentos superficiais e fitas VHB 3M aplicada em superfície tratada somente com *primer* de silano 3M.

Fonte: O autor, 2015.

2.3.2 Ensaio de fluência

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento, para os dois lotes de melhor desempenho, mais 10 juntas coladas (5 por lote) foram submetidas ao ensaio de fluência. A força cisalhante aplicada corresponde a 50% da força média máxima suportada em cisalhamento. O equipamento disponível para o ensaio (Figura 31), projeto e desenvolvimento do LAA, permite que 10 corpos de prova sejam ensaiados simultaneamente com cada junta, se necessário, submetida a uma carga diferente. Ainda que ocorra fratura em algum corpo de prova ou determinado ensaio venha a ser interrompido os demais prosseguem normalmente.

Figura 31 – Máquina de fluência



Fonte: QUEIROZ et al.

2.4 Análise da superfície

2.4.1 Nível de rugosidade

Para cada um dos cinco tratamentos superficiais em estudo (Tabela 6) o nível de rugosidade foi aferido através do rugosímetro tridimensional Taylor Hobson – Talyscan 150

(Figura 32). Para cada método empregado, 5 corpos de prova foram analisados. Mais 10 corpos de prova com véu de superfície também tiveram suas superfícies avaliadas. Em todas as leituras o nível de rugosidade foi mantido em *medium range* (faixa média) com precisão de malha na direção da aferição de 1 μ m (SILVA, A. H. M. F. T. da)

Figura 32 – Rugosímetro tridimensional



Fonte: O autor, 2015.

2.4.2 Tipos de falha

Os corpos de prova ensaiados em cisalhamento foram submetidos inicialmente à análise visual da área colada, a partir da qual algumas amostras representativas do tipo de fratura predominante foram selecionadas para registro da imagem em microscópio eletrônico em tamanho real.

2.5 Análise estatística

Para avaliação da influência que o tratamento superficial representa na adesão entre o substrato e o material de união e, conseqüentemente, na resistência ao cisalhamento das juntas pultrudadas os dados obtidos foram comparados e processados através de

metodologias estatísticas. Inicialmente, dois aspectos importantes dos conjuntos de dados foram verificados: A normalidade e a homoscedasticidade, estes brevemente descritos em anexo. Para avaliação da hipótese nula foram utilizados os testes de *Cochran-Bartlett* e *Levene's*, com $\alpha=0,05$.

3 MATERIAIS

3.1 Perfis pultrudados

As três resinas utilizadas na pultrusão dos perfis (Tabela 7) foram selecionadas de acordo com a disponibilidade no mercado nacional, bem como em função das suas principais propriedades e composição química. *Rovings* diretos (fibras de vidro contínuas enroladas) e mantas de fibra contínua (Figura 33) foram empregadas como material de reforço. As fibras de vidro possuem tratamento superficial, este não especificado pelo fabricante. A Tabela 8 apresenta as principais propriedades da fibra e da manta de vidro supracitadas.

Tabela 7 – Resinas empregadas na pultrusão dos perfis: Principais propriedades

Material	PRINCIPAIS PROPRIEDADES* (25°C)		
	Viscosidade	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (MPa)
Resina acrílica MODAR 814 A ¹	15 – 400 cps ^{**}	1,05 -1,55 ^{**}	3100 (ASTM D 638)
Resina fenólica ASKOFEN 8030 ² (Mono componente “tipo resol”)	1200 – 3200 cps	Informação indisponível	Informação indisponível
Resina poliéster POLYDYNE 8025 ³ (Isoftálica e insaturada)	2800 – 3300 cp (ASTM D 2196)	1,12 – 1,15 (ASTM D 1475)	Informação indisponível

Legenda: (*) Informações fornecidas pelos fabricantes; (**) Valor inferior refere-se ao produto sem carga e valor superior com 150 phr (partes por 100 de resina) de ATH (Alumina trihidratada).

Fonte: ASHLAND, 2011¹; ASK CHEMICALS, 2013²; CRAY VALLEY, 2006³.

Tabela 8 – Materiais selecionados para reforço dos perfis pultrudados

Material	PRINCIPAIS PROPRIEDADES (25°C)		
	Resistência à tração	Densidade (g/cm ³)	Módulo (MPa)
Manta de fibra contínua U529	140 N* (ISO 3342)	2.63***	10760*** (Obtido em flexão com corpos de prova laminados com 31,2 % de manta no volume total compósito)
Fibra de Vidro** SE 1200	3100 – 3800 MPa* (ASTM D 2101)	2,62*	80 – 81* (Método sônico)

Legenda: (*) Informações fornecidas pelos fabricantes através dos boletins técnicos; (**) Propriedades da fibra única; (***) Dados obtidos via e-mail com fornecedores.

Fonte: OWENS CORNING, 2010, 2012.

Figura 33 – Material de reforço: manta de vidro contínua e *rovings*

Legenda: À esquerda, manta de vidro contínua e a direita, os *rovings* (fibra de vidro).

Fonte: OWENS CORNING, 2010, 2012.

De acordo com aplicação final do perfil o composto resinado (Tabela 9), ou apenas composto, foi preparado variando, se necessário, a proporção e composição dos aditivos empregados. No entanto, cabe ressaltar que, para todos os compostos o desmoldante interno e o retardante de chamas, este último halogenado ou não, foram utilizados.

Tabela 9 – Compostos resinados empregados na pultrusão dos perfis

Composto	Aditivos
Fenólico	Desmoldante interno Retardante de chama (não halogenado)
Acrílico	Desmoldante interno Retardante de chama (não halogenado) Iniciadores Protetores contra radiação ultravioleta e anti-oxidante Pigmento (pasta não reativa pigmentada a base de resina poliéster)
Poliéster	Diluyente Desmoldante interno Retardante de chama (supressor de fumaça halogenado) Iniciadores Protetores contra radiação ultravioleta e anti-oxidante Pigmento (pasta não reativa pigmentada a base de resina poliéster)

Fonte: PULTRUSÃO DO BRASIL, [s.d.].

3.2 Juntas coladas de pultrudado de matriz poliéster

Todos os corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram extraídos de um mesmo lote de chapas pultrudadas com 3 mm de espessura e véu de superfície apenas em uma das faces do perfil. O perfil selecionado foi produzido com percentuais de fibra, resina e véu de superfície de, respectivamente, 54 %, 45,2% e 0,8 %. Para o composto resinado optou-se pela resina poliéster isoftálica, afinal, como mencionado anteriormente, tem considerável representação no total da produção brasileira e inúmeras aplicações.

O adesivo empregado foi o mesmo utilizado atualmente na indústria pultrusora o qual, até então, apresentava desempenho satisfatório em campo. Em alternativa, também foram produzidas juntas coladas a partir de duas fitas adesivas da família VHB 3M. O adesivo selecionado foi o Masterpur Estrutural 1500, um adesivo uretânico, bicomponente e caracterizado como estrutural. Para aplicação deste último, utilizamos dois métodos distintos de tratamento superficial: *Primer* e abrasão manual. Os corpos de prova colados com as fitas adesivas 4312 e 4972 foram tratados apenas com o *primer* sugerido pelo próprio fabricante.

Tabela 10 apresenta a descrição e a resistência ao cisalhamento de cada material de união utilizado nas juntas coladas. A combinação material de união/tratamento superficial foi resumida na Tabela 11.

Tabela 10 – Materiais selecionados para colagem das juntas pultrudadas

Material	Composição/descrição	Resistência ao cisalhamento
Adesivo Masterpur Estrutural 1500 ¹ (Componente A + B)	Componente A (composição básica): Polióis, cargas e aditivos. Componente B (composição básica): Isocianatos polifuncionais e aditivos	4,109 MPa (ASTM D 3163) *Substratos PRFV x PRFV; Superfície lixada (lixadeira de bancada; lixa Norton R487; grãos de carbeto de silício; granulometria P100). Limpeza com álcool isopropílico.
Fita adesiva VHB 4972 3M ²	Fita dupla-face de espuma acrílica cinza. Espessura: 2,0 mm	0,398 MPa (ASTM D 1002) Substrato em aço inox e limpeza com álcool isopropílico.
Fita adesiva VHB 4312 3M ²	Fita dupla-face de espuma acrílica cinza. Espessura: 0,8 mm	0,405 MPa (ASTM D 1002) Substrato em aço inox e limpeza com álcool isopropílico.

Legenda: (*) Informações adicionais obtidas com o fabricante via e-mail.

Fonte: MASTERPOL, [s.d.]¹; 3M, 2014².

Tabela 11 – Materiais de união e respectivos tratamentos superficiais (pré-colagem)

Material de união	Tratamento superficial
Adesivo MasterPur ¹	Primer ALMASUPER² (componente A). Indicado para tratamento superficial de superfícies de MDF* (<i>Medium Density Fiberboard</i>), coladas com adesivos à base de cianoacrilato líquido.
	Lixamento manual (grão 100)
	Primer de silano hidrolisado
Fita Adesiva	Primer de silano 3M. Primer à base de álcool isopropílico, água e silano.

Legenda: (*) Material constituído basicamente de um núcleo em madeira revestido por uma lâmina melamínica (resina termorrígida).

Fonte: MASTERPOL, [s.d.]¹; ALMATA QUIMICA, [s.d.]².

4 RESULTADOS

4.1 Pultrusão dos perfis

Em função da falta de qualidade nas imagens de alguns dos ensaios SPI, optou-se por não apresentá-las em sua totalidade neste trabalho, sendo apenas os dados obtidos listados em tabela. Cabe registrar que as curvas temperatura *versus* distância no molde mantiveram o padrão em todas as análises para os três compostos resinados pultrudados nesta pesquisa, com expressiva ascensão até o pico exotérmico e decaimento sutil até a proximidade da saída do molde.

4.1.1 Composto fenólico

4.1.1.1 Teste 1

Tabela 12 – Condições de partida (teste 1): Perfil “I 38” composto fenólico

Condições de partida		
Temperatura setada (painel de controle)		185°C
Molde de aquecimento	Temperatura na boca (entrada)	50°C
	Temperatura à meia altura*	110 °C
Velocidade de tração		9 pol/min
Número de pontas		70

Legenda: (*) Ponto localizado à 425 mm da entrada do molde.

Fonte: O autor, 2015.

1° Ajuste: Os primeiros metros de perfil apresentaram alta porosidade superficial e coloração não característica (marrom claro) do composto fenólico curado. Como medida de ajuste, foram promovidas ações combinadas de aumento da temperatura setada (230°C) e diminuição da velocidade (2.5 pol/min). Após estabilização (cerca de 5 minutos) o aspecto superficial do perfil melhorou, apresentando coloração marrom escura e considerável diminuição da

porosidade. Devido ao forte atrito entre as paredes do molde e o perfil, mecanismo caracterizado por movimentos de “vai e volta” na saída do molde, se fez necessário um pequeno acréscimo da velocidade (3.5 pol/min) em tentativa de retomada da estabilidade.

2° Ajuste: Alcançada a estabilidade, ações rápidas de aumento e diminuição da velocidade foram executadas até que se atingisse 8 pol/min. Minutos após, foi constatado que o aumento da velocidade resultou em um perfil mal curado. Com isso, optou-se em uma parada rápida (2-3 segundos) para reaquecimento do material dentro do molde e decréscimo da velocidade (7 pol/min). Os próximos metros de perfil já apresentaram coloração característica composto fenólico (amarronzada), no entanto, com alto grau de porosidade.

3° Ajuste: Devido à alta porosidade observada, optou-se por acrescentar mais 10 pontas ao perfil, atingindo-se 80 pontas e 71% de reforço. Com intuito de possibilitar que o perfil permaneça mais tempo no molde para cura, a velocidade sofreu novo decréscimo (5 pol/min) e a temperatura setada foi novamente aumentada (250°C).

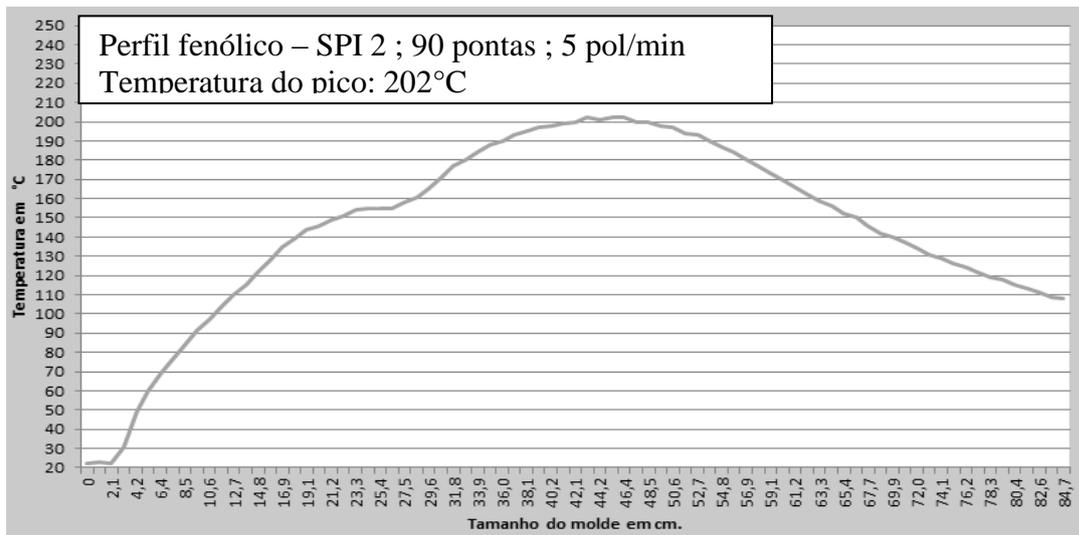
4° Ajuste: Estabilizadas as condições impostas na etapa anterior (3° ajuste), foram promovidas novas ações rápidas de aumento e diminuição da velocidade, passando-se de 5 pol/min para 8 pol/min e decaindo para 5.5 pol/min. Decorridos cerca de 5 minutos, o primeiro ensaio SPI foi executado e mostrou que o pico exotérmico estava posicionado a 47,7 cm da boca do molde e ocorria a 197°C. Ainda que muito próxima da temperatura máxima suportada pela alumina trihidratada (ATH), está em torno de 200°C, tais condições foram consideradas aceitáveis.

5° Ajuste: Pultrudados alguns metros, novamente foi verificado um forte atrito entre o molde e o perfil. Diferente do procedimento anterior, diminuiu-se a velocidade de tração (5.0 pol/min), permitindo que o perfil permaneça mais tempo no interior do molde de modo a homogeneizar a cura e cessar o mecanismo. Apesar da aparente estabilidade no processo, foi observado que a alma do perfil apresentava uma “pequena barriga”, defeito supostamente proveniente do estufamento da manta e volume insuficiente de resina próximo à superfície.

6° Ajuste: Com intuito de promover maior molhabilidade da manta e diminuir a porosidade superficial por meio da migração da resina do interior perfil para superfície, mais 10 pontas foram adicionadas alcançando-se um total de 90 pontas e 73.8% de reforço. O segundo ensaio

SPI (Figura 34) mostrou um ligeiro aumento na temperatura do pico exotérmico (202°C) o que é sua favorável a cura do perfil, no entanto, ainda que sutil, o aumento de 2,5% na temperatura do pico exotérmico poderia degradar a ATH e, conseqüentemente, comprometer a resistência ao fogo do material.

Figura 34 – Perfil fenólico: Segundo ensaio SPI



Nota: Perfil “I” 38 fenólico: 90 pontas; 5 pol/min; 250°C.

Fonte: O autor, 2015.

7° Ajuste: Apesar da considerável diminuição da “barriga”, deu-se seguimento ao aumento da porcentagem de reforço com a introdução de mais 10 pontas, atingindo-se um total de 100 pontas e 78,6% de reforço. O objetivo principal dessa ação foi padronizar a alma do perfil, diminuir a porosidade superficial remanescente e a temperatura do pico exotérmico, isto sem alterar a velocidade de tração. Minutos após os ajustes supracitados, foi constatado molhabilidade inadequada das fibras (Figura 35) levando a interrupção da produção sem que fosse obtido um perfil em condições de estabilização.

Figura 35 – Perfil fenólico (teste 1) com 100 pontas e 78,9% de reforço



Nota: Perfil com logo após a banheira de impregnação com molhamento incompleto das fibras.

Fonte: O autor, 2015.

A Tabela 13 apresenta os principais parâmetros obtidos nos dois ensaios SPI executados durante a pultrusão do perfil fenólico.

Tabela 13 – Primeiro dia de pultrusão do perfil “I 38” fenólico

SPI	Molde aquecido (°C)		Pico exotérmico (°C)		Velocidade de tração (pol/min)
	Entrada	Saída	Temperatura	Localização	
1°	39	103	197°C	47,7 cm	5.5
2°	23	108	202°C	43,2 cm	5.5

Nota: Principais parâmetros obtidos no ensaio SPI.

Fonte: O autor, 2015.

4.1.1.2 Teste 2

Tabela 14 – Condições de partida (teste 2): Perfil “I 38” composto fenólico

Condições de partida		
Temperatura setada (painel de controle):		250 °C
Molde de aquecimento	Temperatura na boca (entrada):	70 °C
	Temperatura à meia altura*:	-
Velocidade de tração		4 pol/min
Número de pontas		90

Legenda: (*) Não foi realizada aferição.

Fonte: O autor, 2015.

Logo após estabilização das condições de partida, o 1° ensaio SPI foi realizado mostrando que o pico exotérmico ocorria em 212°C e há uma distância de 41,5 cm da boca do molde. Para evitar a degradação da ATH, se fez necessário o ajuste imediato dos parâmetros.

1° Ajuste: De acordo com o supracitado, a temperatura setada foi reajustada em 240°C e a velocidade diminuída para 3.5 min/pol. Após 57 minutos executou-se o segundo ensaio SPI, o qual apresentou apenas uma pequena diminuição na temperatura do pico exotérmico (207°C). Entretanto, a diferença verificada entre a temperatura de entrada no molde e de saída foi significativa conforme mostra a Tabela 15. O aumento gradual e considerável da temperatura ao longo do molde, em geral, tende a favorecer o processo de cura. Não houve alteração na localização do pico.

2° Ajuste: Com intuito de alcançar uma produtividade razoável, mantemos a temperatura setada em 240°C e retornamos a velocidade para 4 pol/min, conforme início do processo. Decorridos 82 minutos, o terceiro ensaio SPI mostrou uma aproximação do pico exotérmico da saída do molde, bem como um novo decaimento da temperatura na entrada do molde (Tabela 15). Além disso, a temperatura do pico, ainda que próxima do limite adequado decaiu para 197°C. A partir desses últimos ajustes o perfil apresentou coloração amarronzada (característica de compostos fenólicos curados), baixo volume de poros, isenção de defeitos superficiais e também não foi verificado estufamento da manta na alma do perfil.

Tabela 15 – Perfil “I 38” fenólico (teste 2): Parâmetros do ensaio SPI

SPI	Molde aquecido (°C)		Pico exotérmico		Velocidade de tração (pol/min)
	Entrada	Saída	Temperatura	Localização	
1°	57	78	212°C	41,5 cm	4
2°	26	85	207°C	41,5 cm	3.5
3°	20	102	197°C	48,3 cm	4

Fonte: O autor, 2015.

4.1.2 Composto acrílico

Tabela 16 – Condições de partida: Perfil “I 38” composto acrílico

Condições de partida		
Temperatura setada (painel de controle)		160 °C
Molde de aquecimento	Temperatura na boca (entrada)	85 °C
	Temperatura à meia altura*	146 °C
Velocidade de tração		13 pol/min
Número de pontas		76

Legenda: (*) Corresponde a uma distância de 425 mm da entrada do molde.

Fonte: O autor, 2015.

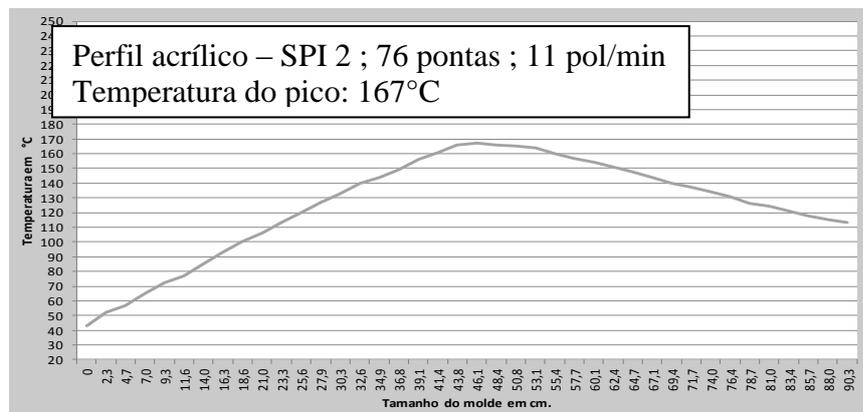
1° Ajuste: Em função do atrito excessivo entre o perfil e o molde, provável que em decorrência da alta porcentagem de reforço (aproximadamente 53% de fibras) para dado composto, optou-se por diminuir o número de pontas passando de 76 para 66 pontas. A temperatura foi mantida em 160° C e a velocidade reajustada para 15 pol/min. Após estabilização, a análise visual do perfil mostrou que os primeiros metros pultrudados apresentaram porosidade não característica da resina acrílica, exigindo novamente que o percentual de reforço fosse ajustado.

2° Ajuste: Mais 10 pontas foram acrescentadas ao perfil, retornando-se ao percentual inicial de 76 pontas sem alteração da velocidade. Em inspeção, foi verificado que na saída da

banheira parte das fibras não estavam completamente molhadas pela resina. Como medida de ajuste a temperatura foi reajustada em 180°C com intuito de que na entrada do molde o acréscimo da temperatura juntamente com a pressão exercida pelo equipamento torne homogeneia à distribuição da resina bem como o molhamento do reforço antes que se inicie a cura. Estabilizada a produção, executamos o primeiro ensaio SPI (Tabela 17).

3° Ajuste: Apesar da temperatura do pico exotérmico (166°C) mostrar-se adequada no primeiro ensaio SPI, em função da localização do mesmo e com intuito de evitar a cura incompleta do perfil optou-se por diminuir a velocidade de tração para 11 pol/min. Após estabilização, o segundo ensaio SPI (Figura 36) mostrou que as medidas supracitadas promoveram alterações significativas deslocando o pico exotérmico para mais próximo da entrada do molde (46,1 cm a partir da boca), possibilitando que após o ápice da curva exotérmica (sutilmente elevado para 167°C) ainda exista tempo e espaço suficiente para conclusão da cura.

Figura 36 – Perfil acrílico: Segundo ensaio SPI



Fonte: O autor, 2015.

4° Ajuste: Nesta etapa o perfil apresentava características de uma cura completa, com superfície isenta de poros e coloração uniforme. Uma vez obtidas às condições desejadas, a velocidade foi reajustada para 20 pol/min. Após estabilização do ajuste, os metros seguintes do perfil pultrudado mantiveram-se estáveis conforme descrito anteriormente. De acordo com os dados obtidos no terceiro SPI, apesar da proximidade do pico exotérmico da saída do molde (67,7 cm a partir da boca) e da diminuição da temperatura do ápice (146 °C) entende-se que, para a velocidade de produção imposta (20 pol/min), os parâmetros encontrados são aceitáveis para perfis pultrudados a partir de compostos acrílicos, ainda que seja necessário o

monitoramento constante do pico exotérmico. Entendido que o perfil apresentava as características desejadas, a produção seguiu sem mais alterações.

Tabela 17 – Perfil “I 38” acrílico: Parâmetros do ensaio SPI

SPI	Molde aquecido (°C)		Pico exotérmico		Velocidade de tração (pol/min)
	Entrada	Saída	Temperatura	Localização	
1°	50	123	166 °C	50,2 cm	15
2°	52	113	167° C	46,1 cm	11
3°	39	128	146°C	67,7 cm	20

Fonte: O autor, 2015.

4.1.3 Composto poliéster

Tabela 18 – Condições de partida: Perfil “I 38” composto poliéster

Condições de partida		
Temperatura setada (painel de controle)		160°C
Molde de aquecimento	Temperatura na boca (entrada)	55°C
	Temperatura à meia altura* (°C)	-
Velocidade de tração		13 pol/min
Número de pontas		75

Legenda: (*) Localizado a 425 mm da entrada do molde.

Fonte: O autor, 2015.

1° Ajuste: Estabilizada as condições de partida os primeiros metros do perfil apresentaram características superficiais consideradas satisfatórias, com superfície lisa, homogênea, sem exposição de fibras e isenta de porosidade. E ainda, a inspeção visual realizada logo após a banheira de impregnação mostrou que, aparentemente, boa parte das fibras encontrava-se cobertas pela resina, o que induz a concluir que existe alta molhabilidade das fibras pelo composto resinado (Figura 37).

Figura 37 – Perfil poliéster com 75 pontas (56,7% de reforço)

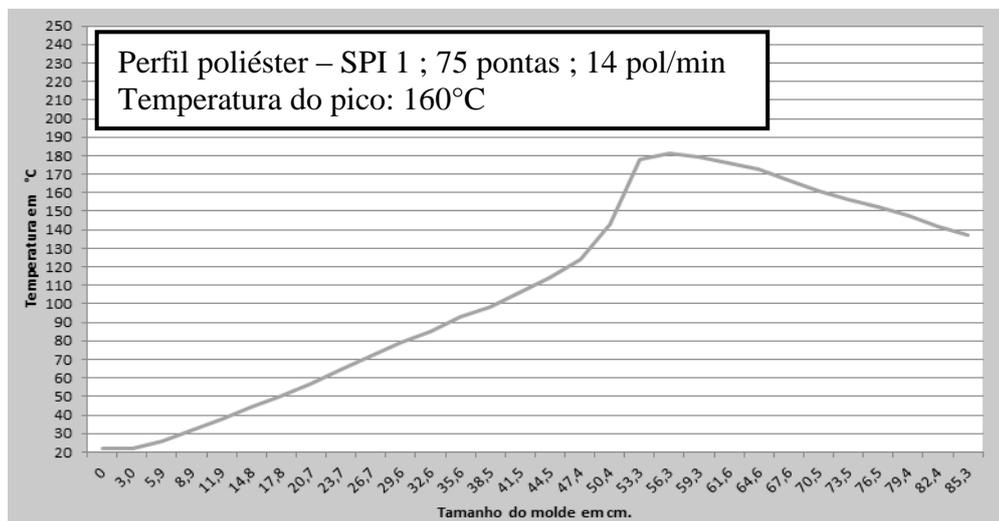


Nota: Inspeção das fibras logo após a saída da banheira. Condições verificadas características de bom molhamento, aparentemente sem fibras secas.

Fonte: O autor, 2015.

2° ajuste: Em função da alta qualidade e estabilidade dos perfis observada, a velocidade de tração foi acrescida até que se atingisse 14 pol/min. Após estabilização, por meio do ensaio SPI (Figura 38), constatou-se que o pico exotérmico encontrava muito próximo da saída do molde (56,3 cm da boca) para a velocidade empregada, o que pode prejudicar a cura.

Figura 38 – Perfil poliéster: Primeiro ensaio SPI



Fonte: O autor, 2015.

3° Ajuste: Aumento da temperatura setada para 170°C bem como da velocidade para 15 pol/min. Apesar da maior velocidade de produção e menor tempo disponível para a cura, o intuito do ajuste foi de que o acréscimo da temperatura acelera-se a cura deslocando o pico

exotérmico mais próximo da boca do molde mantendo, espera-se, a cura completa do perfil. Após estabilização, os perfis mantiveram as características superficiais observadas anteriormente. Com isso, as condições empregadas foram entendidas como estáveis para o perfil poliéster e deu-se seguimento a produção sem demais alterações, apenas com a execução de medidas de controle, tal como ensaios SPI para monitoramento dos parâmetros.

Durante os testes foi perceptível a alta complexidade para a pultrusão dos perfis fenólicos devido a baixa velocidade de produção (4 pol/min) e altas temperaturas necessárias à cura (250°C), parâmetros que tendem a aumentar o custo de produção. Outro ponto observado foi a alta porosidade superficial (Figura 39), esta muito provável que também interna devido a expressiva liberação de vapores. Com isso, a tendência é que mesmo que revestido com *primer* e tinta protetora contra intempéries o perfil apresente acabamento superficial inferior e fique mais vulnerável a ação do meio. Com respeito à baixa molhabilidade das fibras, entende-se ser passível de alguns ajustes tais como: Alteração química do composto ou adaptação no projeto da banheira de impregnação. Tais alterações tenderiam, respectivamente, a diminuir a viscosidade da resina e proporcionar maior exposição (abertura) das fibras de reforço dentro da banheira.

Figura 39 – Perfil fenólico (teste 1): Final da pultrusão



Legenda: Perfil “I 38” com 90 pontas pultrudado à 5.5 pol/min e temperatura de 250°C.

Nota: Condições superficiais observadas no material logo após a saída do molde aquecido.

Fonte: O autor, 2015.

Se comparado com o perfil fenólico, a pultrusão de perfis a partir de compostos acrílicos se mostrou muito mais “amigável”, solicitando poucos ajustes e com uma

produtividade quatro vezes superior (20 pol/min). O acabamento superficial também é um ponto favorável, homogêneo, livre de poros e defeitos (Figura 40).

Figura 40 – Perfil acrílico: Final da pultrusão



Legenda: Perfil “I 38” produzido com 76 pontas pultrudado à 15 pol/min e temperatura de 180°C.

Nota: Condições superficiais observadas no material logo após a saída do molde aquecido.

Fonte: O autor, 2015.

A pultrusão de perfis a partir do composto poliéster apresentou algumas vantagens se comparada à resina acrílica e, principalmente, a fenólica. Uma vez estabelecidos os parâmetros de partida dificilmente são necessárias paradas ou ajustes na produção, o monitoramento da localização e temperatura do pico exotérmico em geral são suficientes para produção de perfis com excelente acabamento superficial (Figura 41). Apesar da velocidade de tração inferior e, conseqüentemente, menor produtividade do perfil poliéster, se comparado ao acrílico, entende-se 15 pol/min como um parâmetro de produção satisfatório e viável.

Figura 41 – Perfil poliéster: Final da pultrusão



Legenda: Perfil “I 38” com 75 pontas pultrudado à 13 pol/min e temperatura de 160°C.

Nota: Condições superficiais observadas no material logo após a saída do molde aquecido.

Fonte: O autor, 2015.

4.2 Ensaio de cisalhamento

Durante a execução do ensaio com as amostras do Lote 13 os dados referentes à 5 dos 10 corpos de prova foram perdidos em função da falta de energia elétrica e consequente parada máquina de testes. Para que o padrão de 10 amostras por lote fosse mantido se fez necessário a realização de um segundo ensaio. No entanto, os resultados obtidos no segundo ensaio apresentaram alto desvio padrão para força e energia os quais alcançaram, respectivamente, 34.94% e 57.57% (Apêndice A). Supõe-se que durante a confecção dos corpos de prova, ou ainda durante a execução dos testes, tenha ocorrido alguma falha e/ou interferência do meio, os quais não foram identificados e vieram a prejudicar o desempenho do material de maneira significativa. Com isso, optou-se em não utilizar os dados obtidos, uma vez que os mesmo não são representativos do real desempenho do material.

Em função do exposto anteriormente, apenas os resultados do primeiro ensaio para o Lote 13, sem exclusão de nenhum corpo de prova, foram considerados nesta pesquisa. Para os demais lotes (Grupo 1 e Grupo 2), resultados fora do desvio padrão, este calculado para as 10 amostras ensaiadas inicialmente, foram excluídos da análise. Com isso, para cada lote, obteve-se uma nova média para força e energia conforme mostram as Tabelas 19 e 20. Os resultados obtidos para cada corpo de prova, a média inicial (Média) e após a exclusão de dados fora do desvio padrão (Média 2) encontram-se todos no Apêndice A.

Tabela 19 – Resultados dos ensaios de cisalhamento: Força máxima Grupos 1 e 2

Grupo	Lote	Trat. superficial / Adesivo (Fita)	Força máxima média (N)
1	13	Lixamento / MasterPur	752.373 ± 92.633 (12.31%)
	14	Superfície sem tratamento / MasterPur	743.857 ± 70.157 (9.43%)
	15	<i>Primer</i> de silano hidrolisado / MasterPur	754.654 ± 44.005 (5.83%)
	16	<i>Primer</i> ALMASUPER / MasterPur	439.607 ± 64.922 (14.77%)
2	17	<i>Primer</i> de silano 3M/ VHB 4312	90.752 ± 5.438 (5.99%)
	18	<i>Primer</i> de silano 3M/ VHB 4972	96.025 ± 3.865 (4.03%)

Nota: Força máxima média dos Grupos 1 e 2 com os respectivos desvios padrão e a porcentagem deste último em relação a força máxima média.

Fonte: O autor, 2015.

De acordo com a Tabela 19, em ordem decrescente, os lotes 15, 13 e 14 (Grupo 1) suportaram maior força cisalhante dentre os demais. As juntas dos lotes 13 foram lixadas e do lote 15 tratadas com *primer* de silano hidrolisado. Comparando com o lote 14 (superfície não foi tratada) a resistência mecânica das juntas lixadas e tratadas com o *primer* de silano foi ligeiramente aumentada em, respectivamente, 1.14% e 1.45%. O lote 16 teve o pior desempenho mecânico dentre os demais. Neste último, as juntas tratadas com *primer* ALMASUPER suportaram uma força média cerca de 40% inferior aos outros lotes do grupo 1, bem como apresentaram maior desvio padrão (14.77%). De acordo com as propriedades fornecidas pelo fabricante do adesivo, esperava-se que as juntas de cisalhamento pertencentes ao grupo 1, resistissem, no mínimo, a 4 MPa. No entanto, nenhum dos tratamentos empregados atingiu o parâmetro supracitado. Acredita-se que a diferença entre os resultados seja proveniente de algum, ou da soma, dos seguintes fatores:

- **Tratamento superficial:** Nesta pesquisa os substratos foram lixados manualmente com lixa grão 100 e, após a abrasão, o pó remanescente foi removido apenas com auxílio de papel toalha. O procedimento foi realizado do modo supracitado com intuito de reproduzir em laboratório ao máximo das condições de campo. Com respeito ao procedimento de preparação da superfície adotado pelo fornecedor, sabe-se que, além de utilizarem uma lixadeira de bancada, a qual tende a produzir superfícies mais uniformes e com maior rugosidade (dados não fornecidos), também foi realizada a limpeza com álcool isopropílico.

- **Espessura da camada adesiva:** Ainda com o objetivo de reproduzir condições de campo, em nenhum das juntas foi realizado o controle da espessura, apenas simples aferição (Apêndice D). Neste trabalho a espessura média variou entre 0.1125 mm e 0.261 mm diferente dos 7 mm adotados pelo fabricante. Sabe-se, de acordo com a literatura, que juntas de cisalhamento com cerca de 2 mm apresentam maior resistência. No entanto, os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que a variação entre espessura da camada adesiva das juntas não se mostrou relevante na resistência mecânica das mesmas (Tabela 20).

- **Tapering:** Nenhum corpo de prova recebeu acabamento após colagem para formação da angulação nas faces na extremidade da área colada (*tapering*), o que tende a suavizar as tensões. O procedimento também não é descrito no boletim técnico do produto. É sabido pela resistência dos materiais que juntas de aço coladas com acabamento nas bordas produz juntas

mais resistentes. Entende-se que a ausência do acabamento nas juntas de cisalhamento confeccionadas nesta pesquisa pode ter afetado sua resistência.

Tabela 20 – Espessura média na região colada e força máxima em cisalhamento

Lote	Tratamento superficial	Força máx. média (N)	Espessura média (mm)
13	Lixamento	752.373 ± 92.633	6.1125 ± 0.0647
14	Superfície sem tratamento	743.857 ± 70.157	6.186 ± 0.049
15	Primer de silano hidrolisado	754.654 ± 44.005	6.21 ± 0.0397

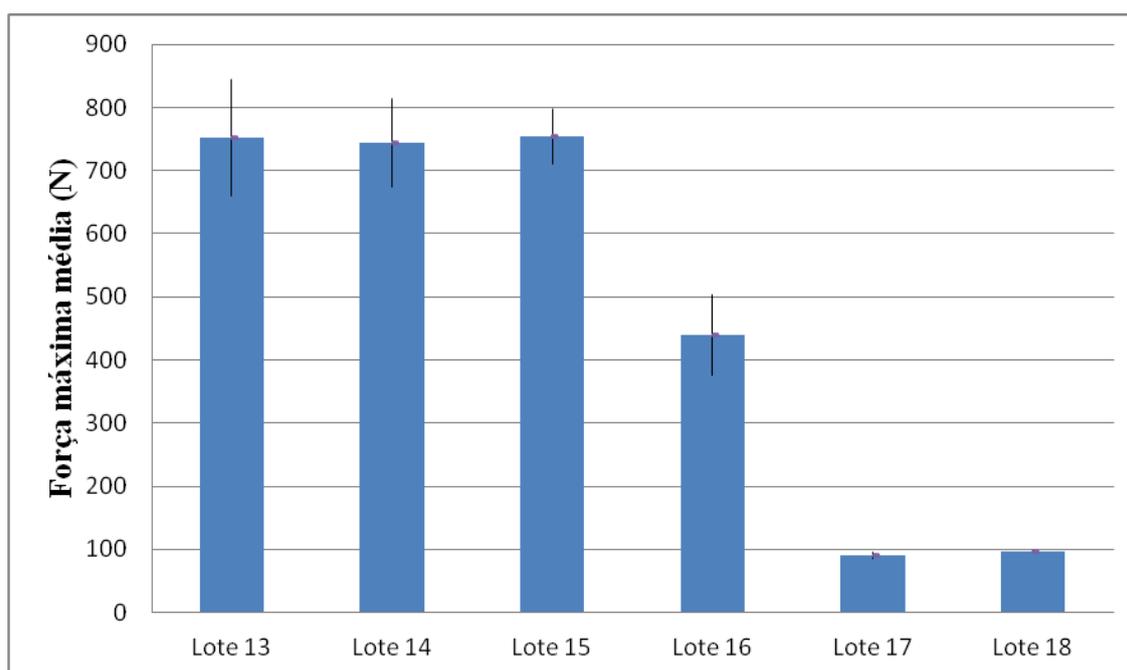
Nota: Todos os substratos possuem 3 mm de espessura. A camada adesiva em cada junta corresponde ao valor apresentado subtraindo-se 6 mm. Para os lotes 13, 14 e 15 as espessuras médias foram de, respectivamente, 0.1125 mm, 0.186 mm e 0.21 mm.

Fonte: O autor, 2015.

Durante os ensaios do Grupo 2, lotes 17 e 18, observamos que ambas as fitas apresentam uma deformação considerável e baixa resistência ao cisalhamento. Com isso, entende-se que não cabe comparar os resultados obtidos para o Grupo 1 e Grupo 2, pois tratam-se de materiais e comportamentos distintos. Cabe ressaltar que o baixo desvio padrão obtido nos ensaios e a capacidade de deformação do material podem ser pontos favoráveis em outras aplicações onde não se deseja resistência ao cisalhamento, e sim tolerância a variações dimensionais por parte dos componentes colados. E ainda, cientes que os dados de referência (Tabela 10) foram obtidos com juntas coladas produzidas a partir de substratos de aço inox, as quais tendem a apresentar superfície mais aderente, a força cisalhante média obtida nesta pesquisa para os lotes 17 e 18 foi satisfatória, afinal, alcançaram, respectivamente, 69.38% e 74.67% da resistência esperada.

A Figura 42 apresenta graficamente os resultados, a partir dos quais, considerando o desvio padrão, pode-se dizer que os lotes 13, 14 e 15 apresentam mesmo desempenho em cisalhamento, e os lotes 16, 17 e 18 são diferentes, e inferiores, aos supracitados.

Figura 42 – Gráfico: Força máxima média para os Lotes do Grupo 1 e Grupo 2



Fonte: O autor, 2015.

A seguir a Tabela 20 apresenta os resultados do ensaio de cisalhamento para a energia média, está calculada com base na área abaixo da curva a qual abrange desde o início do ensaio até a força máxima suportada. Da mesma forma que observado na Tabela 19, fica evidente a diferença de comportamento entre os lotes do Grupo 1 e 2.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios de cisalhamento: Energia média Grupos 1 e 2

Grupo	Lote	Trat. Superficial / Adesivo ou fita	Energia (J)
1	13	Lixamento / MasterPur	0.16473 ± 0.01636 (9.93%)
	14	Superfície sem tratamento / MasterPur	0.15680 ± 0.01835 (13.28%)
	15	Silano hidrolisado / MasterPur	0.15622 ± 0.03528 (22.58%)
	16	Primer Alma Super / MasterPur	0.10959 ± 0.02437 (22.24%)
2	17	Primer de silano 3M/ VHB 4312	0.43163 ± 0.04680 (10.84%)
	18	Primer de silano 3M/ VHB 4972	0.63720 ± 0.04157 (6.52%)

Nota: Energia média Grupos 1 e 2 com os respectivos desvios padrão e a percentagem deste último em relação a energia média.

Fonte: O autor, 2015.

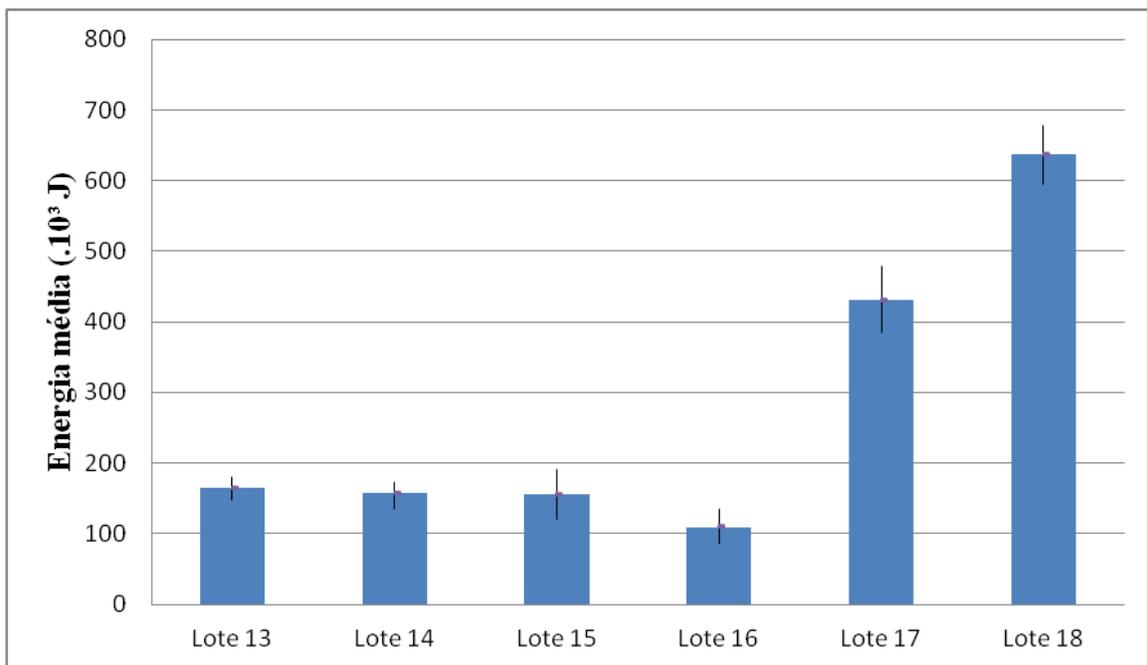
Comparando com lote 14 (superfície sem tratamento), dentre as juntas coladas do Grupo 1, novamente o lote 16 (superfície tratada com *primer* ALMASUPER) mostrou desempenho inferior com decréscimo expressivo de aproximadamente 30.1% na energia

absorvida. O lote 13 (superfície lixada) teve a energia absorvida acrescida em 5.05% e o lote 15 apresentou decréscimo de 0.36%.

Os dois lotes pertencentes ao Grupo 2 foram capazes de absorver grandezas consideráveis de energia quando comparados ao Grupo 1, o que já era esperado em função da alta capacidade de deformação de ambos materiais observadas durante o ensaio. Foi notória a diferença entre os resultados para lotes 17 e 18, este último com desempenho superior. Supõe-se que a diferença citada anteriormente pode ser proveniente da propriedade de cada uma das fitas bem como do tratamento superficial, afinal, o *primer* de silano 3M foi desenvolvido especialmente para a fita VHB 4972 (lote 18).

Da mesma maneira que para a força, o gráfico apresentado na Figura 43 nos permite visualizar a semelhança no desempenho dos lotes 13, 14 e 15, bem como, em oposição, a expressiva diferença entre os lotes do Grupo 2.

Figura 43 – Gráfico: Energia absorvida para os Lotes do Grupo 1 e Grupo 2



Fonte: O autor, 2015.

4.3 Ensaio de fluência

O lote 13 (superfície lixada) e o lote 15 (superfície tratada com *primer* de silano) apresentaram maior força média em cisalhamento, em função disto os mesmos tiveram as condições de tratamento superficial e colagem replicadas em novas juntas para os testes de fluência. A Tabela 21 resume as condições de ensaio e descreve as características de cada lote.

Tabela 22 – Parâmetros do ensaio de fluência

Lote	Descrição	Carga em fluência* MPa / bar)
19	Superfície tratada com <i>primer</i> de silano hidrolisado e colada com adesivo MasterPur	1.13 / 0.318 (Força cisalhante média = 752.4 N; área colada média = 333.5 mm ² ; tensão cisalhante média = 2.26 MPa ^{**})
20	Superfície pultrudada lixada manualmente (grão 100) e colada com adesivo MasterPur	1.14 / 0.321 (Força cisalhante média = 754.7 N; área colada média = 331.1 mm ² ; tensão cisalhante média = 2.28 MPa ^{**})

Legenda: (*) Equipamento de fluência com sistema pneumático, no qual 0.2 bar equivale à 710KPa; (**) Dado obtido no ensaio de cisalhamento.

Nota: Fórmula base para o cálculo da tensão cisalhante: $T = F/A$, onde F é a força cisalhante média e A corresponde a área média.

Fonte: MASTERPOL, [s.d.]; 3M, 2014.

Devido ao baixo desempenho das juntas pultrudadas a força necessária para os testes de fluência, esta correspondente a cerca de 50% da suportada em cisalhamento, para ambos os lotes seria de aproximadamente 370N. A máquina de fluência possui sistema de aplicação da carga pneumático, onde 0.2 bar correspondem a 710 kPa. Para os ensaios propostos, seria necessário o ajuste da pressão em aproximadamente 0.3 bar. Como o equipamento possui manômetros que variam de 0 a 10 bar, sendo que de 0 a 1 bar a escala é de 0.25 bar, não foi possível submeter às juntas a pressão necessária devido a dificuldade na visualização e calibração manual do manômetro. Cabe ressaltar que a sensibilidade do equipamento é corrente para a finalidade inicialmente proposta ao mesmo, ensaios em juntas coladas de aço (QUEIROZ, 2013).

Com intuito de conhecer o comportamento em fluência das juntas, optou-se por submeter alguns corpos de prova a uma pressão superior à pré-estabelecida (0.3 bar) e registrar o tempo até fratura. A pressão mínima conseguida foi de 0.5 bar, a qual corresponde cerca de 80% da carga suportada em cisalhamento. Ainda durante o procedimento de

posicionamento das amostras no equipamento três delas (CP 19.1, CP 19.3 e CP 20.5) fraturaram, restando apenas sete. Supõe-se que apenas o peso da própria garra e a força exercida pelos demais dispositivos de fixação foram suficientes para fraturar as juntas.

Figura 44 – Equipamento de fluência LAA



Legenda: À esquerda vista geral do equipamento e à direita corpo de prova fraturado posicionado na garra.

Nota: Corpo de prova de outra pesquisa, imagem apenas para ilustração.

Fonte: O autor, 2015.

Entendida a baixa resistência à fluência do material e incompatibilidade com o equipamento, duas soluções foram propostas: Troca do manômetro para outro de menor escala e mais preciso ou ainda, adaptação dos componentes por meio da retirada das garras e substituição das mesmas por pesos que proporcionem a pressão necessária. Inicialmente, com principal intuito de evitar aquisição de dispositivos desnecessários e obter dados confiáveis da resistência do material em fluência, optou-se em submeter às juntas coladas a ensaios individuais sob carga constante na máquina de ensaios universal.

O procedimento de ensaio consistiu calibrar ambos os lotes a uma força estática e constante de 350N. O teste foi iniciado com uma velocidade de 0.1mm/min sendo que, uma vez estabilizada a força, o deslocamento da garra ocorre somente se necessário para ajuste ou manutenção dos parâmetros iniciais. Consideramos possíveis deslocamentos provenientes somente da camada adesiva devido a rigidez do substrato. Os resultados do ensaio são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de fluência

Lote	CP	Máxima força (N)	Tempo até a fratura (minutos)
19	19.2	350.073	6.9
	19.4	243.444	5.4
	19.5	350.122	8.1
20	20.1	253.776	6.3
	20.2	350.079	33
	20.3	350.471	7.2
	20.4	317.846	12.3

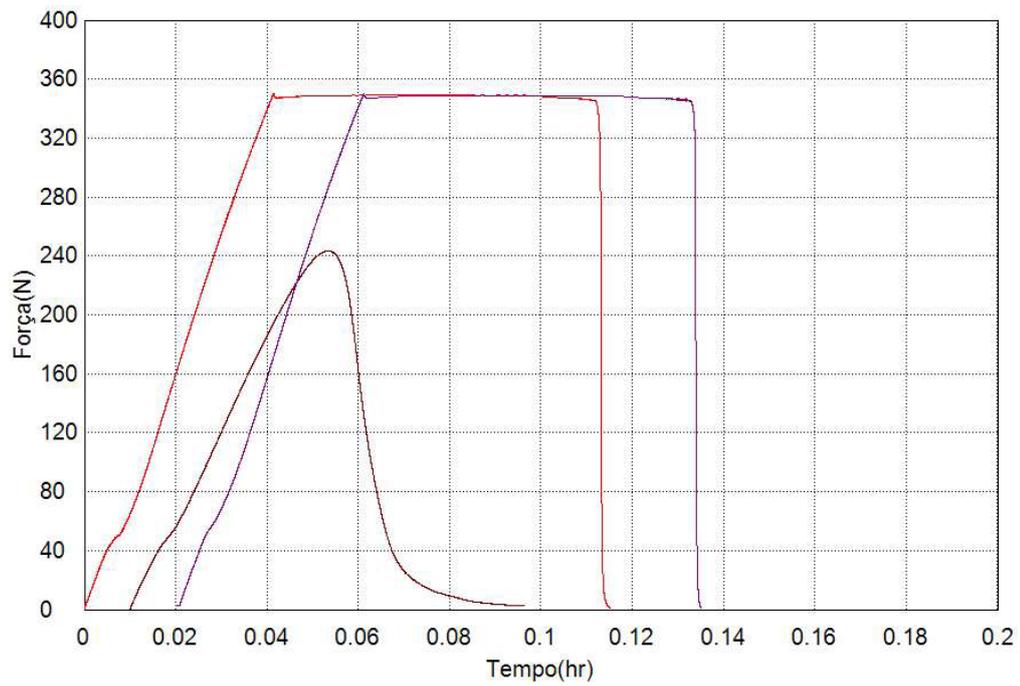
Nota: Ensaios executados na máquina de ensaio universal.

Fonte: O autor, 2015.

Conforme mostra a Tabela 23, a maioria dos corpos de prova não suportou um tempo superior a 10 minutos e alguns nem mesmo atingiram a força mínima desejada e fraturam. Com isso, entende-se não ser válido para esta pesquisa executar as adaptações propostas anteriormente para realização de novos ensaios uma vez que as juntas não apresentam resistência à fluência.

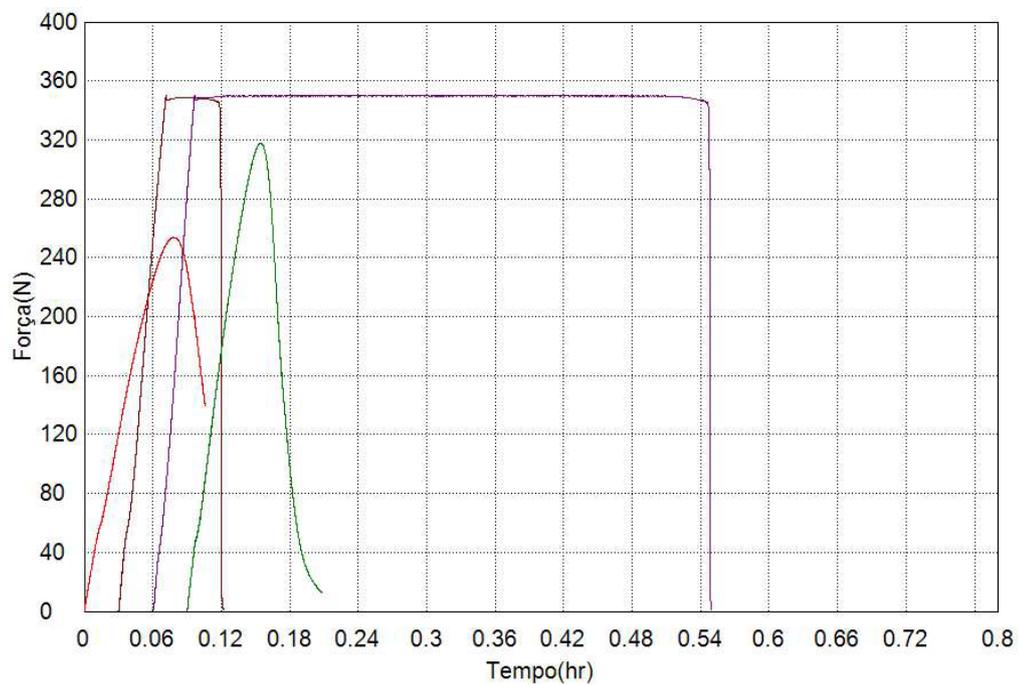
As curvas força *versus* tempo obtidas são apresentadas nas Figuras 45 e 46. Para melhor visualização, a curva referente ao lote 19 possui o eixo das abscissas em escala menor, variando de 0 a 0.2 horas. Diferente do lote 20, o qual varia de 0 a 0.8 horas. No eixo das ordenadas o padrão da escala foi mantido, de 0 a 400N.

Figura 45 – Ensaio de fluência (Lote 19): Curva força *versus* tempo



Fonte: O autor, 2015.

Figura 46 – Ensaio de fluência (Lote 20): Curva força *versus* tempo



Fonte: O autor, 2015.

4.4 Análise da rugosidade

Em todas as superfícies analisadas (com e sem véu) obtivemos alto desvio padrão para os parâmetros aferidos (R_a , R_q , R_t , e R_z), fazendo-se necessário repetir a leitura em alguns corpos de prova. A rugosidade superficial irregular, provável que proveniente da presença de fibras próximas à superfície (visíveis à olho nu) pode ser a causa do alto desvio padrão observado. Avaliou-se o nível de rugosidade em cada superfície apenas com base em um dos parâmetros aferidos, o R_t . No entanto, o Apêndice C apresenta todos os dados e imagens.

4.4.1 Rugosidade total: Superfície pultrudada (com e sem véu) submetida à abrasão manual com lixa grão 100.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 24 entende-se a preferência durante o processo produtivo para colagem de perfis a partir da face sem véu, priorizando a face com véu como parte externa do componente.

Tabela 24 – Rugosidade total em superfície pultrudada com e sem véu

Superfície pultrudada		R_t (μm)
Com véu	Sem tratamento	5.034 ± 0.079 (1.57%)
	Lixada	19.52 ± 1.066 (5.46%)
Sem véu	Sem tratamento	6.542 ± 1.143 (17.47%)
	Lixada	15.9 ± 1.744 (10.97%)

Nota: Abrasão com lixa grão 100.

Fonte: O autor, 2015.

Os dados mostram que a superfície pultrudada sem tratamento apresentou rugosidade total (R_t) na face sem véu, conforme esperado, em média 30% superior a verificada em face com véu. O maior desvio padrão obtido nas leituras para amostras sem véu de superfície provavelmente é proveniente da maior porosidade, uma vez que, dentre as finalidades do véu o acabamento superficial é uma delas. Em contrapartida, após abrasão com lixa grão 100 o aumento do nível de rugosidade foi mais significativo na amostra com véu. A superfície

pultrudada sem véu teve um acréscimo percentual de 143% na média da rugosidade total. Para superfície com véu, o incremento foi de aproximadamente 288%. A considerável diferença entre as porcentagens supracitadas, uma vez que o procedimento é manual, provavelmente é resultado da ausência de um padrão no lixamento, o qual está sujeito a variação da força empregada pelo operador ou tempo de execução do procedimento. O Apêndice C apresenta as imagens para os corpos de prova analisados anteriormente.

4.4.2 Rugosidade total: Superfície pultrudada (sem véu) submetida a diferentes tratamentos superficiais

Tabela 25 – Rugosidade total em superfície pultrudada sem véu submetida à diferentes tratamentos

Grupo	Tratamento superficial	R _t (µm)	Alteração* da R _t (%)
1	Sem tratamento	6.542 ± 1.143 (17.47%)	-
	<i>Primer</i> ALMASUPER	7.554 ± 3.714 (49.17%)	+ 15.47
	<i>Primer</i> de silano hidrolisado	7.266 ± 2.143 (29.49%)	+ 11.07
	Lixa grão 100	15.9 ± 1.744 (11%)	+ 143.04
2	<i>Primer</i> de silano 3M	5.022 ± 0.840 (16.73%)	- 23.23

Legenda: (*) Cálculo refere-se a superfície sem tratamento.

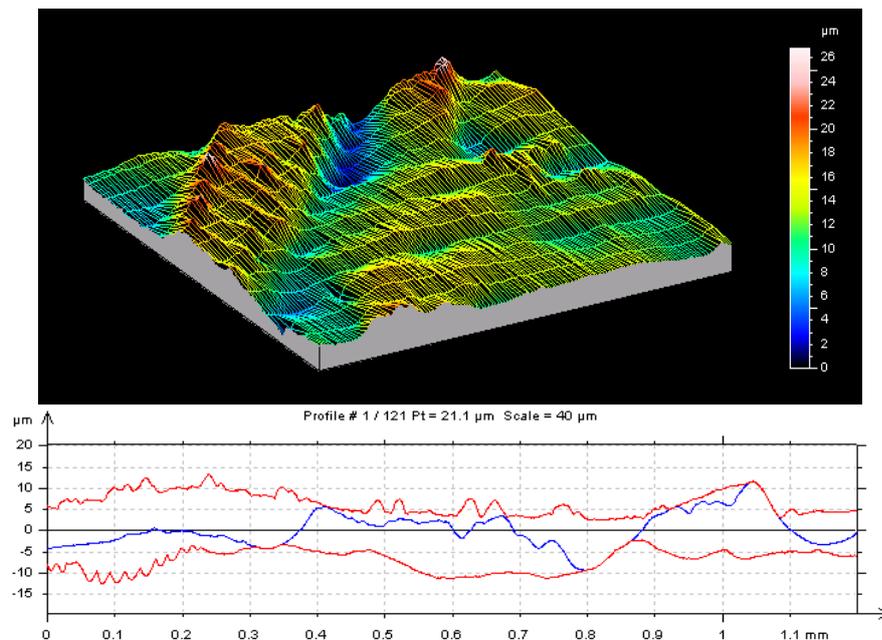
Nota: O valor apresentado para rugosidade total (R_t) corresponde a média das 5 leituras executadas em diferentes corpos de prova para cada um dos tratamentos propostos.

Fonte: O autor, 2015.

Para cada um dos tratamentos superficiais foram identificadas diferentes alterações no nível de rugosidade. Comparando com a superfície sem tratamento (crua) o *primer* ALMASUPER promoveu um aumento na rugosidade de 15.47%. No entanto, o aumento da rugosidade não favoreceu a resistência mecânica das juntas, afinal, o desempenho verificado em cisalhamento foi inferior a superfície que não recebeu tratamento. Em contrapartida, a aplicação do *primer* de silano hidrolisado acrescentou cerca de 11.0% na rugosidade total da superfície, porém, os resultados em cisalhamento foram próximos a superfícies lixadas, as quais tiveram incremento de 143% na rugosidade total. Diferente dos demais, o *primer* de silano 3M diminuiu a rugosidade da superfície em pouco mais de 23% e apresentou desempenho inferior em cisalhamento se comparado aos lotes do Grupo 1.

Sabe-se que o aumento da rugosidade total de uma superfície promove um acréscimo da área superficial e da quantidade de sulcos disponíveis para ancoragem mecânica do adesivo. Tal incremento tende a aumentar a resistência das juntas coladas de cisalhamento, conforme verificado nos ensaios mecânicos para os substratos que tiveram a superfície lixada. Para as demais, substratos com baixo aumento da rugosidade, uma vez que não foram realizadas análises que detectem alterações de natureza química da superfície não se pode afirmar que o incremento, ou detrimento, das propriedades mecânicas observadas foram resultado de alterações químicas decorrentes da aplicação dos *primers*. As Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 mostram o aspecto da rugosidade para cada um dos tratamentos descritos anteriormente. Foram selecionados corpos de prova com resultado mais próximo da média para ilustração dos resultados, os demais encontram-se no Apêndice C.

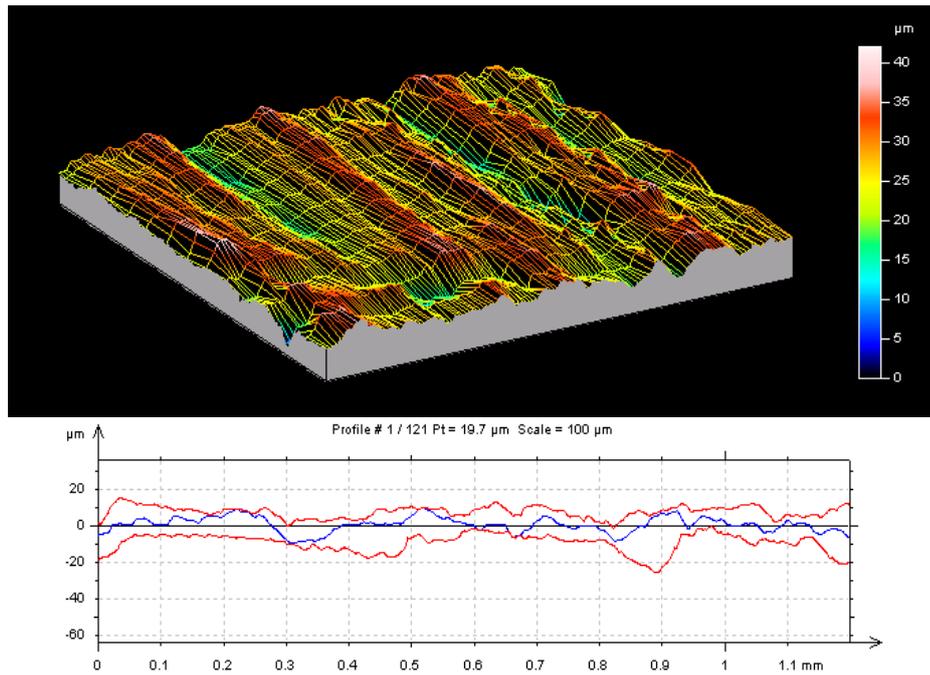
Figura 47 – Rugosidade total: Superfície pultrudada isenta de tratamento



Nota: Corpo de prova 12 ($R_t = 6.63 \pm 3.89 \mu\text{m}$).

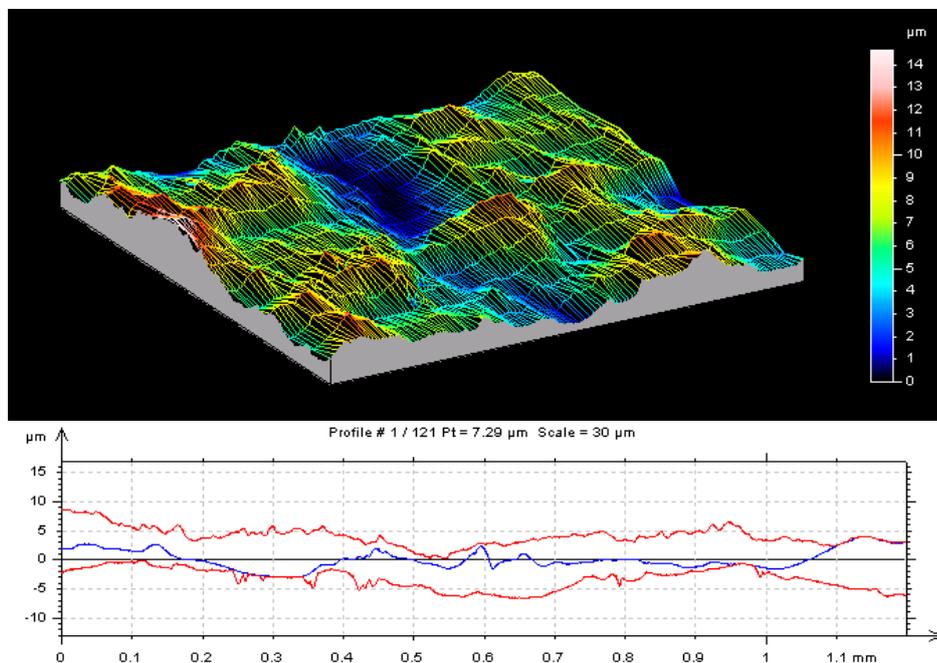
Fonte: O autor, 2015.

Figura 48 – Rugosidade total: Superfície pultrudada lixada (grão 100)



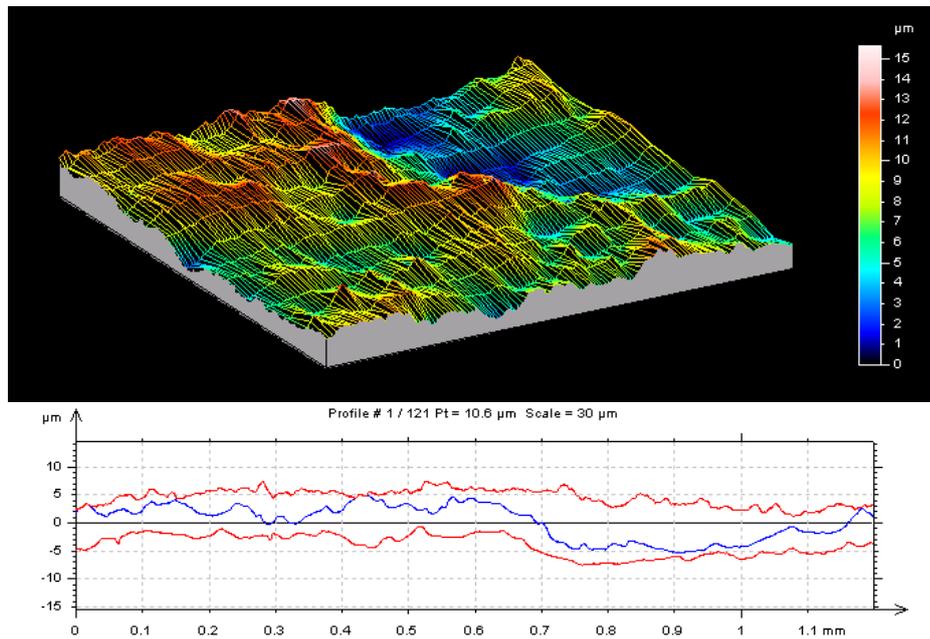
Nota: Corpo de prova 16 ($R_t = 18.4 \pm 4.25 \mu\text{m}$).
 Fonte: O autor, 2015.

Figura 49 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com *primer* de silano 3M



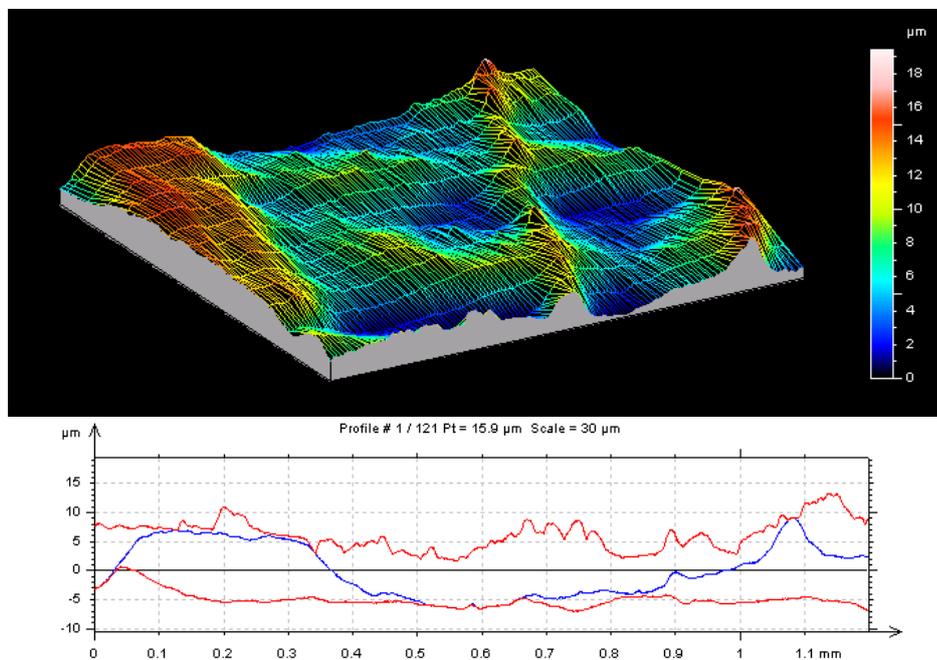
Nota: Corpo de prova 32 ($R_t = 5.35 \pm 1.11 \mu\text{m}$).
 Fonte: O autor, 2015.

Figura 50 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com *primer* ALMASUPER



Nota: Corpo de prova 27 ($R_t = 5.37 \pm 1.18 \mu\text{m}$).
 Fonte: O autor, 2015.

Figura 51 – Rugosidade total: Superfície pultrudada tratada com silano hidrolisado



Nota: Corpo de prova 25 ($R_t = 6.35 \pm 1.76 \mu\text{m}$).
 Fonte: O autor, 2015.

4.5 Análise da superfície de fratura

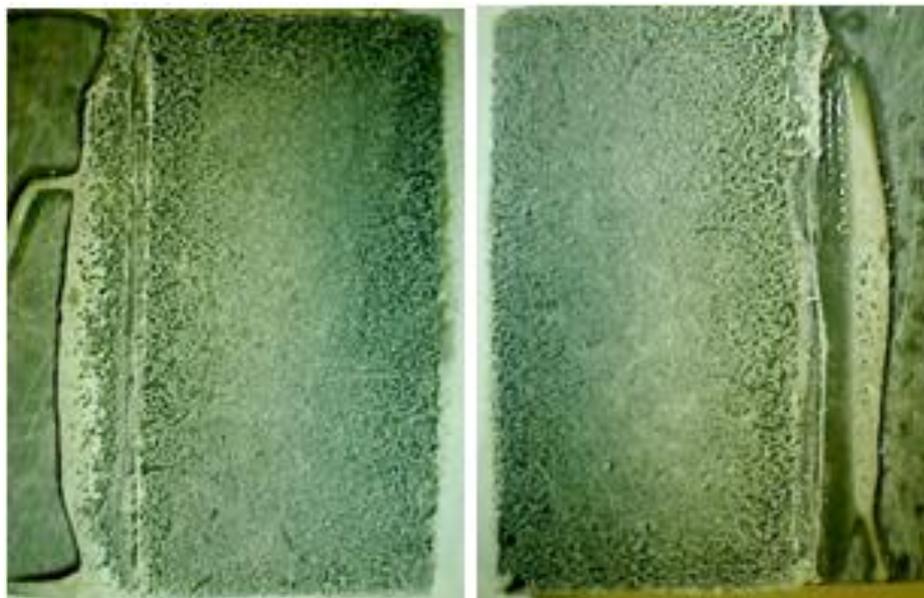
Não houve falha do substrato nos testes de cisalhamento executados neste trabalho, apenas fratura da área colada. Entende-se não ser necessário o registro de todos os corpos de prova para ilustração do mecanismo de falha presente, uma vez que muitos deles apresentaram, visualmente, alta semelhança. Com isso, foram selecionados corpos de prova representativos dos demais dentro de um mesmo lote para registro da imagem da superfície de fratura no microscópio eletrônico. Os corpos de prova que tiveram a superfície tratada com o *primer* de silano 3M e foram colados com as fitas adesivas 3M apresentaram somente falha adesiva e, em função do exposto e dos resultados em cisalhamento, não são apresentadas imagens da superfície de fratura para este grupo de corpos de prova.

Com intuito de facilitar a análise da superfície de fratura, algumas imagens possuem setas, estas indicam a posição de colagem das juntas nas quais as regiões em destaques estavam sobrepostas antes da falha.

4.5.1 Superfície lixada

Todos os corpos de prova apresentaram superfície de fratura com alto percentual de falha coesiva. No entanto, a característica da superfície diferiu em relação à homogeneidade e tamanho dos poros presentes na camada adesiva. Os CP's com superfície de fratura mais homogenia e poros menores (Figura 52), tiveram desempenho em cisalhamento superior aos demais, com força máxima de ruptura variando entre 1162 N e 718 N. Com superfície de fratura aparentemente homogenia, porém com poros maiores se comparados ao observados no CP 13.4 (Figura 52), o CP 13.1 (Figura 53) representa um grupo de corpos de prova que suportaram cargas entre 688 N e 855 N em cisalhamento. Diferindo dos demais, o CP 13.2 (Figura 54), apesar da fratura também coesiva, apresentou acúmulo de adesivo em algumas regiões. Neste último conjunto de corpos de prova, a força máxima e mínima suportada pelas juntas coladas em cisalhamento foi de, respectivamente, 672 N e 435 N.

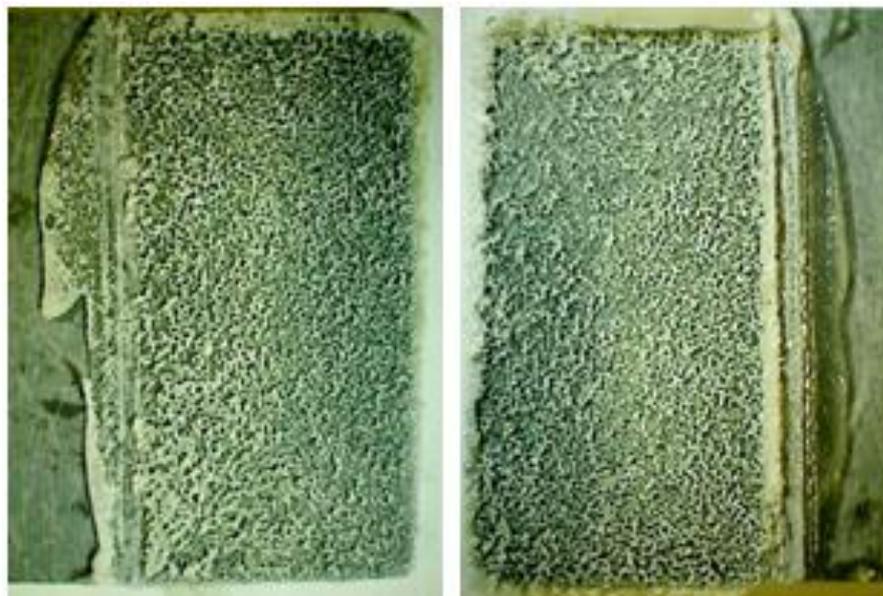
Figura 52 – Superfície de fratura CP 13.4



Nota: Falha predominantemente coesiva com poros/sulcos pequenos. Mesma superfície de fratura observada nos CP's 13.8, 13.9 e 13.10.

Fonte: O autor, 2015.

Figura 53 – Superfície de fratura: CP 13.1



Nota: Falha predominantemente coesiva com presença de poros, comparando aos demais, médios. A mesma superfície de fratura observada nos CP's 13.3 e 13.6.

Fonte: O autor, 2015.

Figura 54 – Superfície de fratura: CP 13.2



Nota: Falha predominantemente coesiva, similar ao verificado nos CP's 13.5 e 13.7.

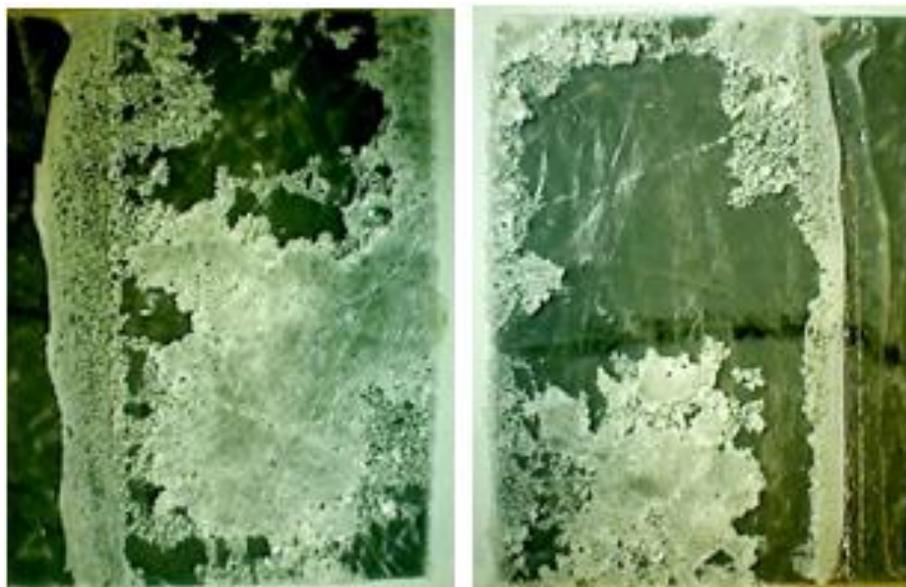
Observar excesso de adesivo na extremidade inferior do substrato à esquerda e menor volume de adesivo na parte superior do substrato à direita. Superfície de fratura com maior porosidade dentre os demais corpos de prova do lote.

Fonte: O autor, 2015.

4.5.2 Superfície sem tratamento

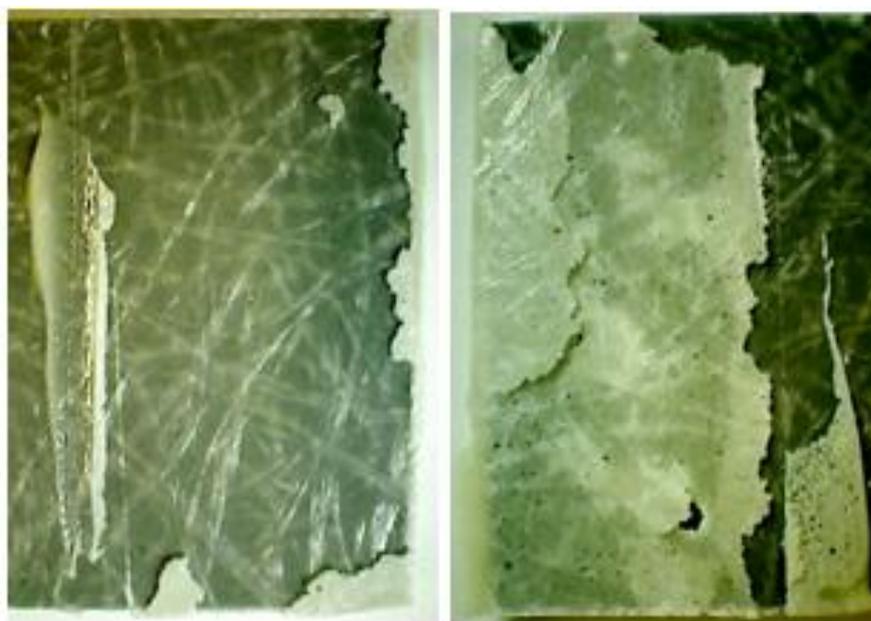
As juntas coladas que não receberam tratamento superficial apresentaram apenas falha do tipo predominantemente adesiva. No entanto, a distribuição de adesivo entre as faces diferiu bem como a resistência ao cisalhamento das juntas. O CP 14.1 (Figura 55) representa os demais que tiveram adesivo distribuído em ambos os substratos. Neste caso, a força máxima em cisalhamento variou entre 638 N e 807 N. Na Figura 56, nota-se que o CP 14.8 possui grande volume de adesivo em apenas um dos substratos. A força máxima alcançada para grupo representado variou entre 728 N e 366 N.

Figura 55 – Superfície de fratura: CP's 14.1



Nota: Falha predominante adesiva com presença de adesivo em ambos os substratos, semelhante ao observado nos CP's 14.2, 14.3, 14.4 e 14.10.
Fonte: O autor, 2015.

Figura 56 – Superfície de fratura: CP's 14.8

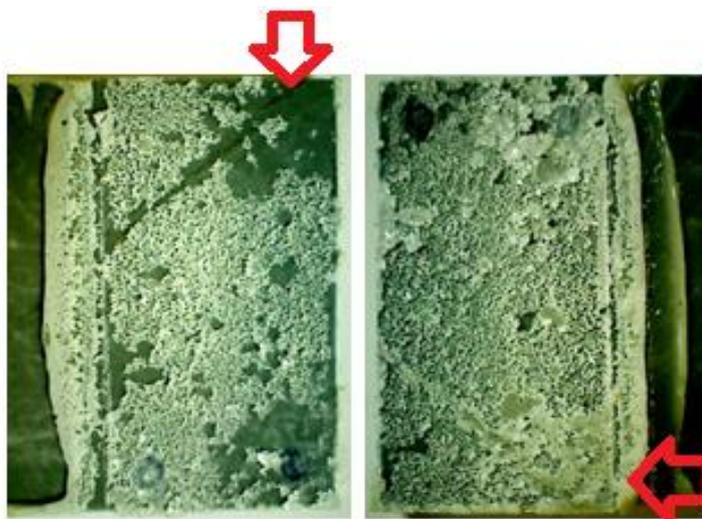


Nota: Falha predominantemente adesiva com maior volume de adesivo em apenas um dos substratos, semelhante ao observado nos CP's 14.6, 14.7 e 14.9.
Fonte: O autor, 2015.

4.5.3 Superfície tratada com *primer* de silano hidrolisado

Não obtivemos um padrão no tipo de fratura para as juntas que foram tratadas com o *primer* de silano hidrolisado. Corpos de prova com, aparentemente, maior percentual de falha coesiva bem como predominância de falha adesiva são apresentados, respectivamente, nas Figuras 57, 58 e 59. No caso da falha do tipo adesiva, em alguns corpos de prova observou-se o descolamento quase total do adesivo da superfície de um dos substratos (Figura 59). As juntas que apresentaram maior percentual de falha coesiva mantiveram a força máxima em cisalhamento entre 899 N e 717 N, para superfícies de fratura do tipo adesiva com presença de adesivo em ambos substratos a resistência máxima foi de 758 N e mínima de 736 N. Quando ocorreu grande volume de adesivo apenas na face de um dos substratos, a resistência mecânica foi inferior as demais com intervalo de 713 N e 621 N.

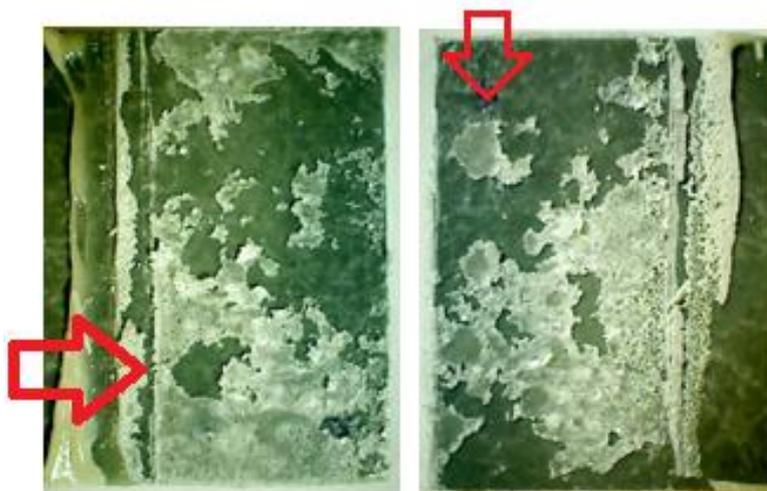
Figura 57 – Superfície de fratura: CP 15.4



Nota: Falha predominante coesiva, semelhante aos CP's 15.1, 15.3, 15.6 e 15.9. Observar que no substrato à direita o excesso de adesivo na parte inferior corresponde a área sem adesivo na parte superior do substrato localizado à esquerda da figura.

Fonte: O autor, 2015.

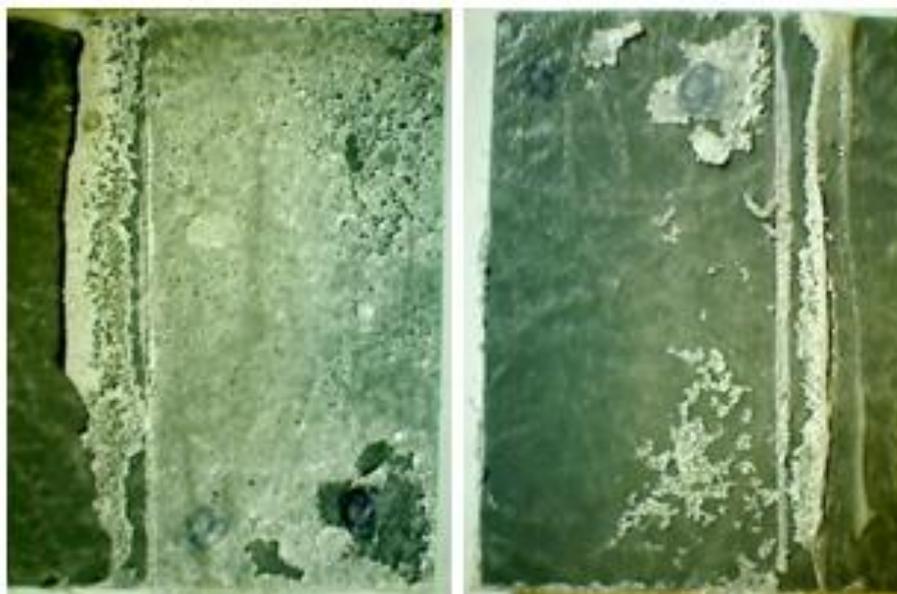
Figura 58 – Superfície de fratura: CP 15.10



Nota: Falha predominantemente adesiva com presença do adesivo em ambas os substratos, tipo de falha semelhante ao observado nos CP's 15.5 e 15.7.

Fonte: O autor, 2015.

Figura 59 – Superfície de fratura: CP 15.8



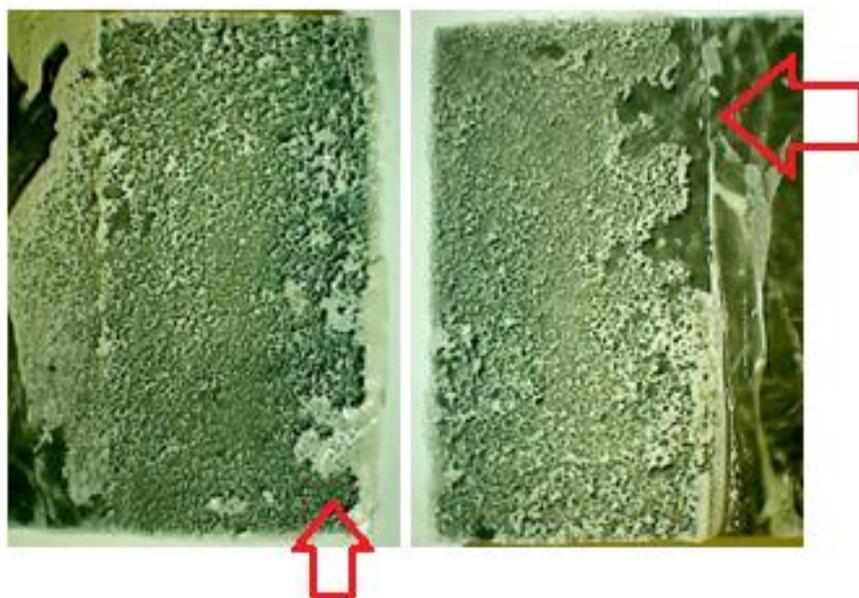
Nota: Falha predominantemente adesiva com maior volume de adesivo apenas em um dos substratos, idem CP 15.2.

Fonte: O autor, 2015.

4.5.4 Superfície tratada com *primer* ALMASUPER

Juntas com maior percentual de falha do tipo coesiva (Figura 60), adesiva/coesiva em uma única superfície (Figura 61) e descolamento quase que total do adesivo de um dos substratos (Figura 62) foram identificadas. Conforme verificado nos ensaios de cisalhamento, a resistência mecânica das juntas tratadas com *primer* ALMASUPER foi bem inferior aos demais tratamentos. Com falha predominantemente coesiva, a força máxima suportada foi de 588 N a 266 N. Para percentuais de falha do tipo adesiva/coesiva, está última em maior proporção, a força cisalhante variou entre 429 N e 496 N. Quando a falha foi predominantemente adesiva, a resistência máxima e mínima foi, respectivamente, de 480 N a 375 N.

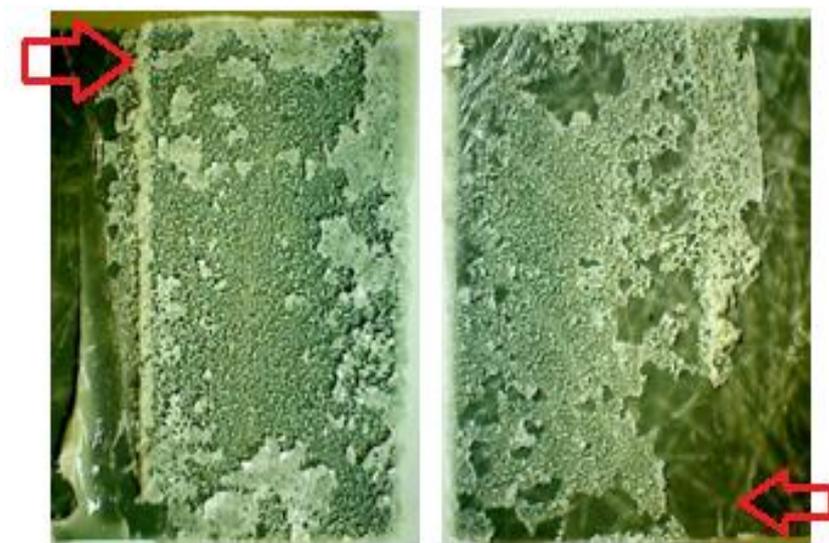
Figura 60 – Superfície de fratura: CP 16.3



Nota: Superfície com falha predominante coesiva, semelhante ao observado nos CP's 16.2, 16.4, 16.5 e 16.10.

Fonte: O autor, 2015.

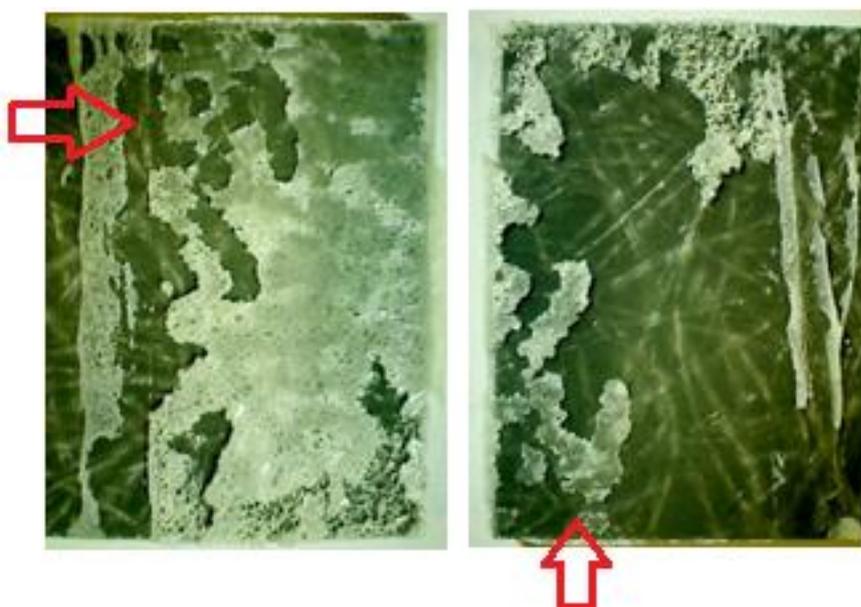
Figura 61 – Superfície de fratura: CP 16.1



Nota: Superfície com falha predominantemente coesiva e pequenas regiões com falha adesiva, semelhante ao observado nos CP's 16.7 e 16.8. Em destaque no substrato à direita, superfície aparentemente isenta de adesivo e substrato à esquerda com excesso do material.

Fonte: O autor, 2015.

Figura 62 – Análise da superfície de fratura: CP 16.6



Nota: Superfície de fratura predominantemente adesiva com acúmulo de adesivo em apenas um dos substratos, idem ao CP 16.10.

Fonte: O autor, 2015.

De modo geral, em concordância com descrito na literatura, foi observado que as juntas coladas que apresentaram falha do tipo predominantemente coesiva tiveram o melhor desempenho em cisalhamento. Além disso, camadas adesivas mais homogêneas (poros menores) e, para o caso de falha do tipo coesiva e adesiva em uma mesma superfície, o maior percentual de falha coesiva proporcionou maior resistência ao cisalhamento. Apenas as juntas sem tratamento e lixadas mantiveram um padrão de falha, respectivamente, adesiva e coesiva. A Tabela 26 mostra o tipo de fratura e os respectivos intervalos da força máxima suportada em cisalhamento.

Tabela 26 – Análise do tipo de fratura e resistência ao cisalhamento

Tratamento superficial	Tipo de fratura		Força máxima* (N)
Sem tratamento	Predominante adesiva		638 – 807
	Predominante adesiva		366 - 728
<i>Primer</i> ALMASUPER	Predominante coesiva		266 – 588
	Adesiva/coesiva		429 – 496
	Predominante adesiva		375 - 480
<i>Primer</i> de silano hidrolisado	Predominante coesiva		717 – 899
	Predominante adesiva		736 – 758
	Predominante adesiva		621 – 713
Lixamento manual	Predominante coesiva	Poros pequenos	718 – 1162
		Poros médios	688 – 855
		Regiões com acúmulo de adesivo	435 - 672

Legenda: (*) Resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento.

Nota: Análise visual e intuitiva realizada pelo próprio autor, não foram utilizadas técnicas para determinação das porcentagens para cada tipo de falha descrita na tabela.

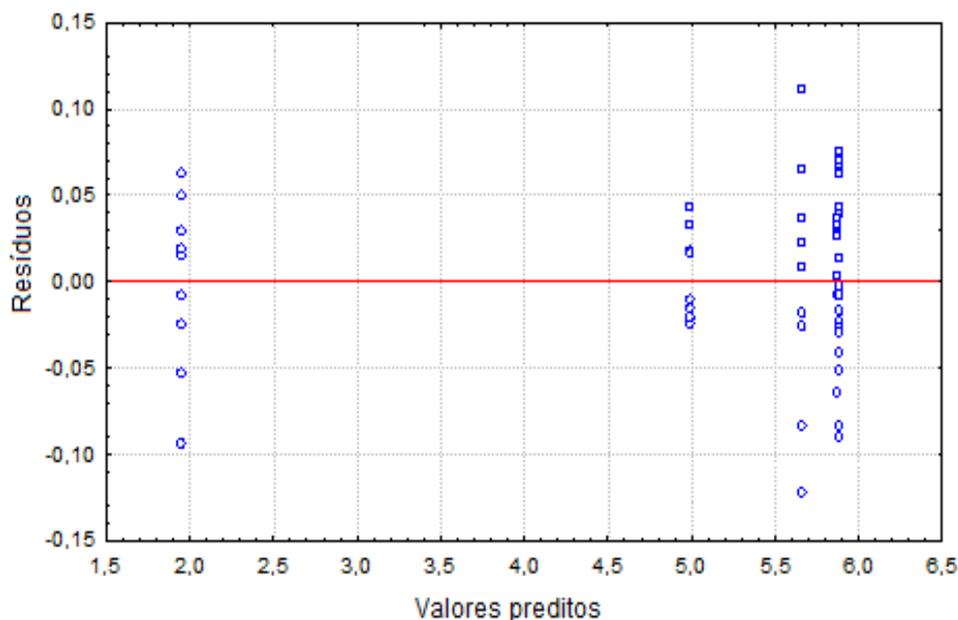
Fonte: O autor, 2015.

4.6 Análise estatística

Iniciamos a análise pela avaliação das hipóteses nulas de homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos. Primeiramente, foi necessário transformar os dados de força para base logarítmica, isto em função da dispersão dos resíduos com respeito às

hipóteses nulas de homogeneidade das variâncias e normalidade dos resíduos pelo modelo da análise de variâncias (ANOVA). Desta forma, se fez possível seguir corretamente os pré-requisitos para as hipóteses em análise.

Figura 63 – Resultado da análise estatística: Resíduos *versus* valores preditos

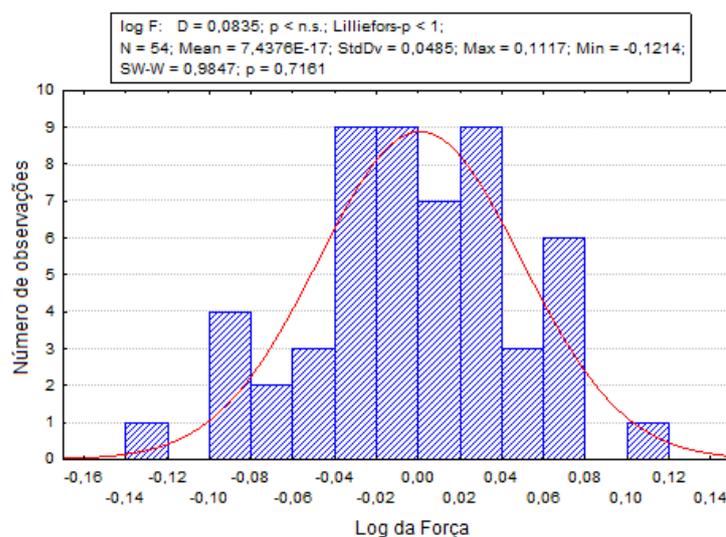


Nota: Gráfico dos resíduos *versus* valores preditos pelo modelo.

Fonte: O autor, 2015.

Transformados os dados, segundo os testes de *Cochran-Bartlet* e *Levene's* a hipótese nula de homogeneidade das variâncias não foi rejeita com resultados de, respectivamente, $p = 0,17$ e $p = 0,18$ para $\alpha = 0,05$. Também não houve rejeição da hipótese nula de normalidade, esta segundo os testes de *Shapiro-Wilks* ($p = 0,72$) e *Liliefors* ($p = 1$) ambos com um nível de significância $\alpha = 0,05$.

Figura 64 – Resultado da análise estatística: Histograma dos resíduos



Fonte: O autor, 2015.

A próxima etapa foi a avaliação dos lotes 13 e 18 segundo metodologia ONE-WAY-ANOVA para a qual, em um nível de significância de $\alpha = 0,05$, o fator “Lote” foi considerado significativo com $p \rightarrow 0$ dentro do nível de significância adotado. Com base no teste de Fisher LSD, fez-se a comparação entre os lotes trabalhados. Para $\alpha = 0,05$, cada par de lotes teve a hipótese nula de ausência de diferença entre as médias avaliadas. De acordo com os resultados, foi observada a ausência de diferença estatística entre os lotes 13, 14 e 15 ($p > 0,05$). Com respeito aos lotes, 16, 17 e 18 os mesmo foram considerados diferentes entre si ($p \rightarrow 0$) bem como dos demais.

Em outras palavras, os resultados mostraram que, de acordo com a força média obtida nos ensaios de cisalhamento às juntas coladas, e seus respectivos tratamentos superficiais, foram divididos estatisticamente em quatro grupos distintos e dentro de cada um deles não existe diferença estatística entre a resistência mecânica de cada amostra avaliada. Um dos grupos (GRUPO A) compreende as juntas que tiveram a superfície lixada (lote 13), tratadas com *primer* de silano hidrolisado (lote 15) bem como as que não receberam tratamento (lote 14). Ou seja, estatisticamente, nenhum dos tratamentos superficiais empregados no GRUPO A proporcionou diferença na resistência mecânica das juntas coladas. Os demais grupos são unitários e, estatisticamente, diferentes entre si e do GRUPO A. O GRUPO B é representado pelas juntas tratadas com *primer* ALMASUPER (lote 16) e os GRUPOS C e D pelas juntas coladas com as fitas adesivas 3M sob superfície tratada com *primer* de silano 3M.

CONCLUSÕES

Para os diferentes tratamentos superficiais investigados neste trabalho foi verificado nos ensaios de cisalhamento que, para o adesivo empregado, nenhum dos tratamentos promoveu acréscimo significativo da resistência mecânica das juntas, apesar da alteração no nível de rugosidade. Em fluência, independente do tratamento aplicado à superfície, as juntas tiveram baixa resistência.

De acordo com a análise estatística, superfícies lixadas, tratadas com *primer* de silano hidrolisado e sem tratamento são iguais entre si e diferentes dos demais tratamentos e mecanismos de união avaliados.

Na análise da superfície de fratura foi verificado que nenhum dos tratamentos apresentou um padrão único para o tipo de falha. No entanto, todas as juntas que tiveram falha predominantemente coesiva suportaram maior força em cisalhamento.

Em alternativa ao adesivo Masterpur, juntas de pultrudado coladas com fitas adesivas 3M também foram avaliadas e demonstraram baixa resistência mecânica e alta deformação, características incompatíveis para a aplicação desejada.

Ao final, independente do tratamento superficial, o adesivo MasterPur não é recomendado para aplicações estruturais de juntas coladas de pultrudado. No entanto, entende-se que o tratamento com *primer* de silano hidrolisado é um possível substituto ao lixamento.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise do tipo de esforço empregado em campo aos componentes de pultrudado.
- Produção de componentes pultrudados com superfície tratada com *primer* de silano hidrolisado e coladas com adesivo MasterPur para verificação resistência proporcionada pelo tratamento em campo.
- Pesquisa de novos tratamentos, químicos e mecânicos, para superfícies pultrudadas passíveis de serem aplicados em campo.
- Investigação de novos adesivos para colagem de perfis pultrudados.
- Construção de um molde colagem para juntas de cisalhamento de pultrudado para o controle de espessura e acabamento adequado (*tapering*).

REFERÊNCIAS

ALMATA QUIMICA. Primer Almasuper. Disponível em: < <http://almata.com.br/adesivos-instantaneos/>>. Acesso em: 15 nov. 2015 .

ALMEIDA, Sandra Penha de Souza. Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro. 2004. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 1002: Standard Test Method for Strength Properties of Adesives in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal). New York: ASTM, 1983.

ASHLAND. MODAR® 814 A: Acrylic Modified Resin. 2011. Disponível em: <http://www.ashland.com/Ashland/Static/Documents/APM/MODAR%20814%20A%20TDS.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2015.

ASK CHEMICALS. Resinas especiais: Catálogo de produtos. 2013. Disponível em: http://www.ask-chemicals.com/fileadmin/user_upload/Download_page/Resins___Specialties_Brochures/BR/Necowel_Produktuebersicht_Kunstharze_BR.pdf. Acesso em: 12 ago. 2015.

ASOKAN, P. et al. Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. Journal of Cleaner Production, v. 17, n. 9, p. 821-829, jun. 2009.

_____. Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete. Journal of Cleaner Production, v. 24, n. 4, p. 448-460, abr. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15708: Indústrias do petróleo e gás natural - Perfis pultrudados - Parte 3: Grade de piso. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 12 f.

_____. NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2010. 31 p.

BERRY, N. G. Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas carbono-epóxi. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282000000300010. Acesso em 07 fev. 2015.

BORGES, Sandro Gaspareto. Síntese e caracterização de resinas fenólicas líquidas do tipo novalac aplicáveis ao processo de pultrusão. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

BOURBIGOT, S. et al. Fire retardant polymers: Recent developments and opportunities. Journal of Materials Chemistry, n. 17, p. 2283-2300, abr. 2007.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia dos materiais. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CARVALHO, A. Cura e Pós-cura de Resinas Poliéster e Viniléster. [s.1.: s.n.], 2002. 289p.

CASTRO, A. C. M. et al. An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: Recycling and reuse assessment into new composite materials using Fuzzy Boolean Nets. Journal of Cleaner Production, v. 66, p. 420-430, mar. 2014.

CLARKE, John L. (Eds.) Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP Design Code and handbook. New York: Chapman & Hall, 1996. 762p.

COSER, E. Caracterização da borracha de silicone utilizada em isoladores para rede elétrica. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Materiais da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CRAY VALLEY. Polydyne® 8025. 2006. Disponível em: <http://www.crayvalley.com.br/produtos/resina/boletins/8025-02.php>. Acesso em: 12 ago. 2015.

CRITCHLOW, G.W.; Webb, P.W.; TREMLETT, C.J.; BROWN, K. Chemical conversion coatings for structural adhesive bonding of plain carbon steels, International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 20, p. 113-122, 2000.

DAS, D.; POURDEYHIMI, B. Composite Non-Woven Materials: Structure, properties and applications. New York: Elsevier, 2014. 232 p.

FERRO, Simone. Pultrudado suporta meio agressivo e desinformação. Plástico Moderno, n. 269, p. 8-17, 1996.

FILHO, A. M. L. et al. Influência do tratamento superficial na resistência mecânicas de juntas de cisalhamento coladas. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2006.

PRABHAKAR, M.N et al. A Review on the Flammability and Flame Retardant Properties of Natural Fibers and Polymer Matrix Based Composites. Composites Research, v. 28, n. 2, p 29-39, 2015.

FINK, J. K. Reactive polymers fundamentals and applications. 2 ed. New York: Elsevier, 2013. 576 p.

GURIT. Guide to composites. Disponível em: < <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx> > . Acesso em 27 jan. 2015.

HARRIS, A.F. & BEEVERS, A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion, International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 19, p. 445-452, 1999.

KALNINS, M.; SIRMACS, A.; MALERS, L. On the importance of some surface and interface characteristics in the formation of the properties of adhesive joints, International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 17, p. 365-372, 1999.

KERSTING, Daniel de Freitas. Avaliação de Resinas Epóxi para Fabricação de Materiais Compósitos pelo processo de Pultrusão. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

LABORATÓRIO DE ADESÃO E ADERÊNCIA /IPRJ. Colagem de juntas metálicas de aço carbono para ensaios de cisalhamento. Rio de Janeiro: LAA/ IPRJ/UERJ, 2010a. 13p. (LAA/IPRJ. Procedimento operacional; n. 11)

LABORATÓRIO DE ADESÃO E ADERÊNCIA/IPRJ. Usinagem de cp's metálicos em aço carbono para confecção de juntas coladas para ensaio de cisalhamento. Rio de Janeiro: LAA/IPRJ/UERJ, 2010b. 4p. (LAA/IPRJ. Procedimento operacional; n. 3)

LAIK, Cristina Cossermelli. Influência do ciclo de cura da resina fenólica nos testes de inflamabilidade, densidade e emissão de calor. 1995. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

LUZ, A. P. et al. Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. Cerâmica, v. 54, n.330, p. 174-183, 2008.

MANFREDI, L. B. et al. Thermal degradation and fire resistance of unsaturated polyester, modified acrylic resins and their composite with natural fibres. Polymer Degradation and Stability, v. 91, n. 2, p. 255-261, feb. 2006.

MANHART, A. et al. Study on Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, Not Regulated by the RoHS Directive. 2008. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/hazardous_substances_report.pdf> Acesso em: 31 dez. 2015.

MASTERPOL. MasterPur estrutural. Disponível em: <<http://www.masterpol.com.br/index.php/contato/index>> Acesso em: 31 ago. 2014.

MENDONÇA, Paulo de Tarso R. Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche – Projeto e Análise. Ed. Barueri, SP: E. Manole, 2005. 632p.

MEYER, W. Handbook of Pultrusion Technology. New York: Chapman and Hall, 1985.

MITTAL, Atul; BISWAS, Soumitra. Pultrusion of Composite: An Overview. 2009. Disponível em: <http://tifac.org.in/index.php?option=com_content&view=article&id=555:pultrusion-of-composites-an-overview&catid=85:publications&Itemid=952>. Acesso em: 18 mar. 2015.

MURPHY, John. The reinforced plastics handbook. 2 ed. E. Elsevier Advanced Tecnology Oxford, 1998.

OWENS CORNING. SE 1200: Roving Direto para Tecelagem, Enrolamento Filamentar e Pultrusão. 2012. Disponível em:

<http://www.owenscorning.com.br/upload/produto/pdf/a9ec73ef-624b-4892-aefc-c00b19059375.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.

OWENS CORNING. Unifilo® for pultrusion. 2010.

Disponível em: <http://owenscorning.com.br/upload/produto/pdf/4bc6cb13-605d-4367-82c4-68bfac6893f1.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2015.

PHS - Plastics Historical Society. Disponível em: <

<http://www.plastiquarian.com/index.php?id=85> >. Acesso em: 22 de julho de 2015.

PRABHAKAR, M.N et al. A Review on the Flammability and Flame Retardant Properties of Natural Fibers and Polymer Matrix Based Composites. Composites Research, v. 28, n. 2, p 29-39, 2015.

PULTRUSÃO DO BRASIL. História Pultrusão. Disponível em:

<<http://www.pultrusao.com.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

_____. Perfis pultrudados. Disponível em: <<http://www.pultrusao.com.br/> >. Acesso em: 29 jan. 2015.

_____. Soluções em material pultrudado. Disponível em: <<http://www.pultrusao.com.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2016.

QUALIDADE e produtividade elevadas permitem disputar aplicações mais renováveis.

Disponível em: < <http://www.plastico.com.br> >. Acesso em: 10 jan. 2015.

QUEIROZ, Rodrigo Albani. Estudo do comportamento em fluência de juntas metálicas coladas. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Instituto Politécnico de Rio de Janeiro, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, 2013.

QUEIROZ, R. A. et al. Study on the creep behavior of bonded metallic joints. Disponível em: < <http://www.appliedadhesionscience.com/content/2/1/8> >. Acesso em: 16 nov. 2015.

QUINI, Josué Garcia. Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RODA, Daniel Tietz. Aditivos retardantes de chama. 2014. Disponível em:

<<http://www.tudosobreplasticos.com/aditivos/antichamas.asp> >. Acesso em: 08 maio 2015.

ROTTA, J. Propriedades físico-químicas de soluções formadoras e de filmes de quitosana e hidroxipropilmetilcelulose. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SAMPAIO, Eduardo Martins. Um modelo de dano em juntas coladas. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SHACKELFORD, James F. Ciências dos materiais. 6 ed. Rio de Janeiro: E. Pearson, 2008. 556p.

SILVA, A. H. M. F. T da. Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos. 2010. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

_____. Procedimentos básicos para varredura de superfície e Processamento de imagens do Rugosímetro Tridimensional TaylorScan. Rio de Janeiro: Laboratório de Adesão e Aderência – IPRJ/UERJ, [s.d.]. 14p. Procedimento operacional.

SILVA, Ricardo Hudson da. Estudo do fator de forma de área em reparo com chapa colada em tubulações com furo. 2015. 99 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2015.

SILVA, Vera Lúcia Dias da. Comportamento mecânico e de Flamabilidade de Compósitos de Polipropileno Reciclado com Fibra de coco e Hidróxido de alumínio. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

STARR, Trevor F. Pultrusion for engineers. Boca Raton: CRC, 2000. 336p.

3M. Fitas VHB^{MR} Dupla - Face de Espuma Acrílica e de Adesivo Transferível. 2014. Disponível em: < <http://multimedia.3m.com/mws/media/10311330/boletim-tecnico-familia-vhb.pdf> >. Acesso em: 31 dez. 2015.

UL STANDARDS. Test for flammability of plastics materials for parts in devices and appliances. 2013. 36 f.

UL STANDARDS. UL 94: Standard for Tests for Flammability of Plastic Materials. Disponível em: < <http://ulstandards.ul.com> >. Acesso em: 27 mar. 2015.

UL STANDARDS. UL 94: V-0, V-1, V-2 Flammability Standard. Disponível em: < <http://web.rtpcompany.com/info> >. Acesso em: 26 de março de 2015.

APÊNDICE A - Resultados dos ensaios de cisalhamento

Curvas força *versus* deslocamento

Média 1 = Cálculo da média considera todos os corpos de prova ensaios.

Média 2 = Exclusão dos corpos de prova (destacados em amarelo) fora do desvio padrão (referente à Média 1) para o cálculo.

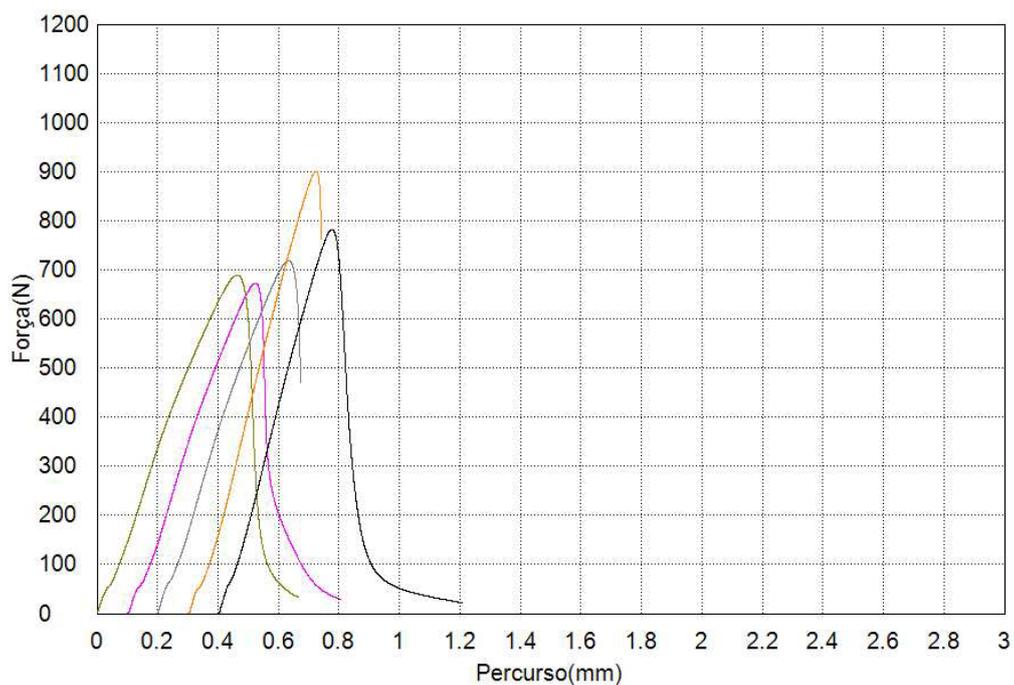
Nota 1: Valores entre parênteses ao lado da Média indica a porcentagem que o desvio padrão representa no valor total da média referente.

Nota 2: Os gráficos referentes aos Lotes 17 e 18, em função do comportamento em cisalhamento distinto dos demais lotes, apresenta-se com escala diferente no eixo das ordenadas e das abscissas.

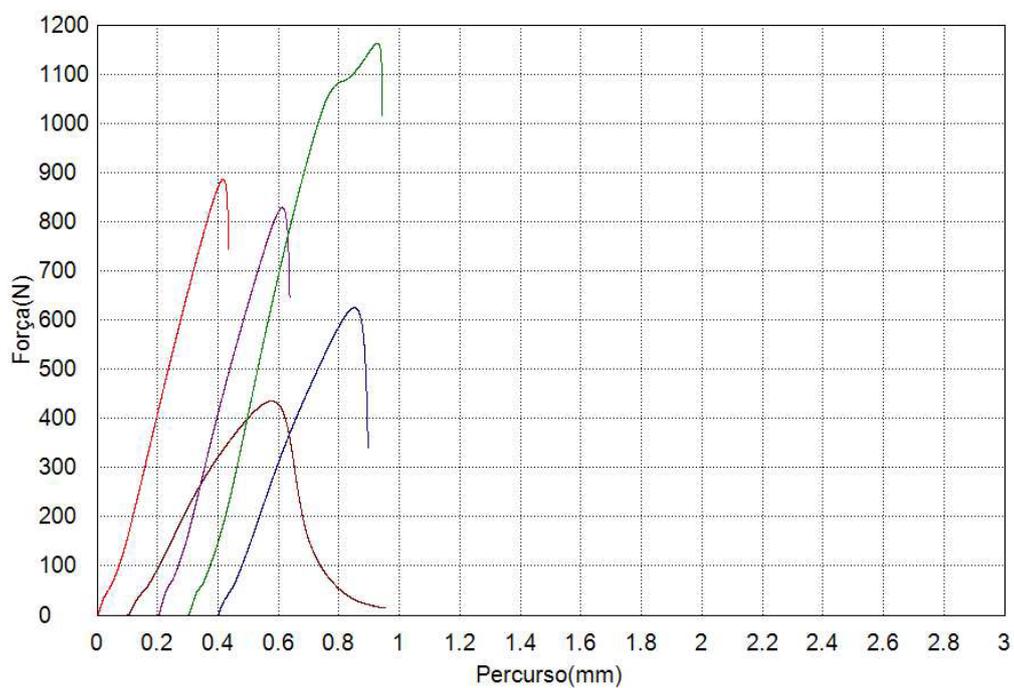
Tabela 27 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 13

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
13.1	885.606	0.17961
13.2	435.038	0.11582
13.3	828.770	0.17193
13.4	1162.62	0.41614
13.5	624.878	0.15142
Média – Ensaio 2	787.382 ± 275.099 (34.94%)	0.20698 ± 0.11950 (57.53%)
13.6	688.907	0.17229
13.7	672.383	0.14859
13.8	718.244	0.16706
13.9	900.174	0.18693
13.10	782.157	0.14879
Média – Ensaio 1	752.373 ± 92.633 (12.31 %)	0.16473 ± 0.01636 (9.93%)

Fonte: O autor, 2015.

Figura 65 - Lote 13: 1º ensaio de cisalhamento - curva força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

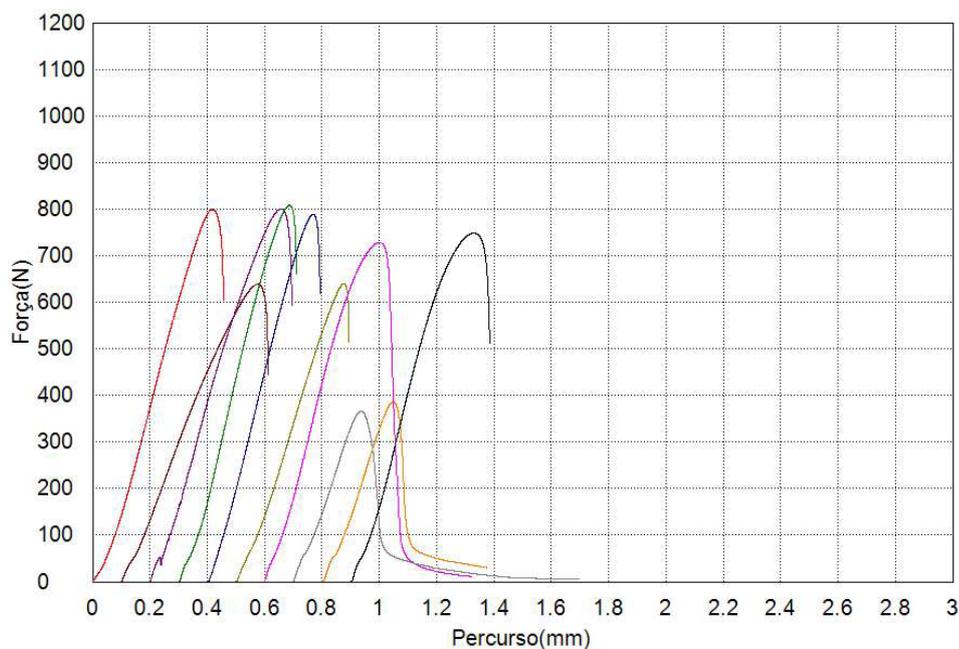
Figura 66 – Lote 13: 2º ensaio de cisalhamento - curva força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 28 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 14

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
14.1	798.826	0.16500
14.2	638.738	0.16439
14.3	800.256	0.19428
14.4	807.871	0.15881
14.5	789.081	0.14940
14.6	639.952	0.12005
14.7	728.188	0.16159
14.8	366.175	0.04388
14.9	386.288	0.04740
14.10	747.942	0.17833
Média	670.332 ± 166.964 (24,91%)	0.13831 ± 0.05242 (37.9%)
Média 2	743.857 ± 70.156 (9.43%)	0.15680 ± 0. 01835 (13.28%)

Fonte: O autor, 2015.

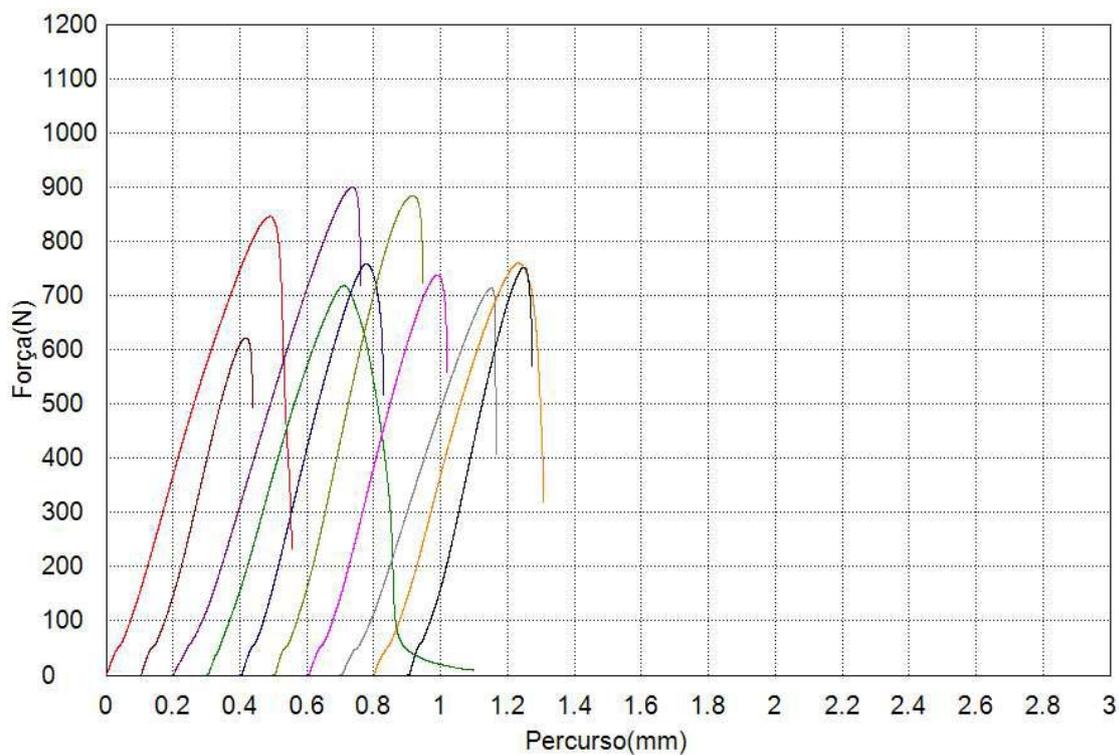
Figura 67 – Ensaio de cisalhamento Lote 14: Curvas força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 29 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 15

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
15.1	845.295	0.21874
15.2	621.307	0.09545
15.3	899.232	0.24093
15.4	717.971	0.15367
15.5	758.340	0.14615
15.6	883.676	0.18952
15.7	736.605	0.14471
15.8	713.331	0.15817
15.9	759.383	0.17118
15.10	751.650	0.12836
Média	768.679 ± 84.986 (11.06%)	0.16469 ± 0.04271 (25.93%)
Média 2	754.654 ± 44.045 (5.84%)	0.15622 ± 0.03528 (22.58%)

Fonte: O autor, 2015.

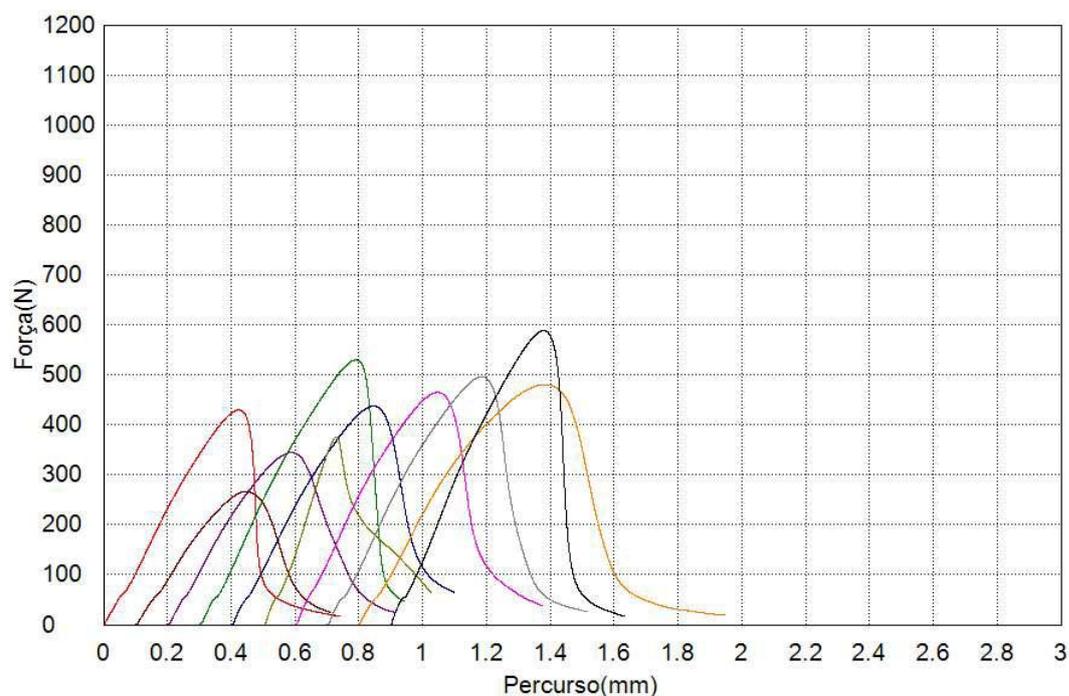
Figura 68 – Ensaio de cisalhamento Lote 15: Curvas força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 30 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 16

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
16.1	429.705	0.09964
16.2	266.198	0.05282
16.3	344.194	0.07655
16.4	529.700	0.14258
16.5	437.152	0.10971
16.6	375.405	0.04094
16.7	464.871	0.11946
16.8	496.219	0.13472
16.9	480.231	0.16535
16.10	588.693	0.15535
Média	441.237 ± 93.815 (21.26%)	0.10971 ± 0.04236 (38.61%)
Média 2	439.607 ± 64.922 (14.77%)	0.10959 ± 0.02437 (22.24%)

Fonte: O autor, 2015.

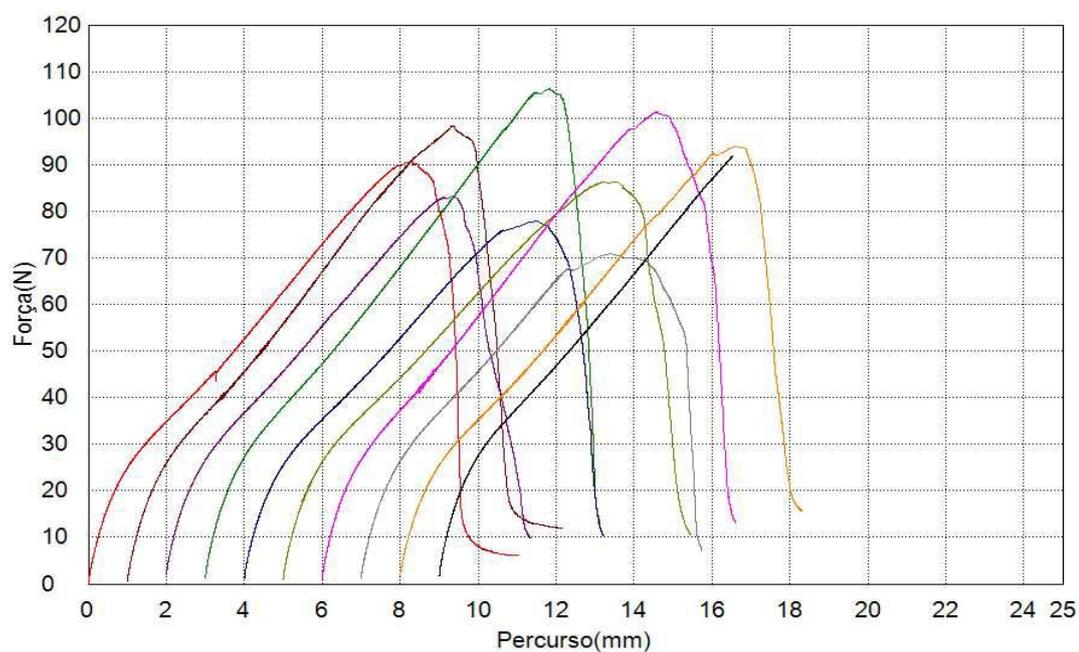
Figura 69 – Ensaio de cisalhamento Lote 16: Curvas força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 31 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 17

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
17.1	90.83	0.45032
17.2	98.37	0.48436
17.3	83.11	0.37957
17.4	106.401	0.54978
17.5	77.82	0.37305
17.6	86.32	0.43959
17.7	101.31	0.51507
17.8	70.81	0.29744
17.9	93.99	0.48798
17.10	91.89	0.40654
Média	90.01 ± 10.87 (12.08%)	0.43837 ± 0.07573 (17.28%)
Média 2	90.752 ± 5.438 (5.99%)	0.43163 ± 0.04680 (10.84%)

Fonte: O autor, 2015.

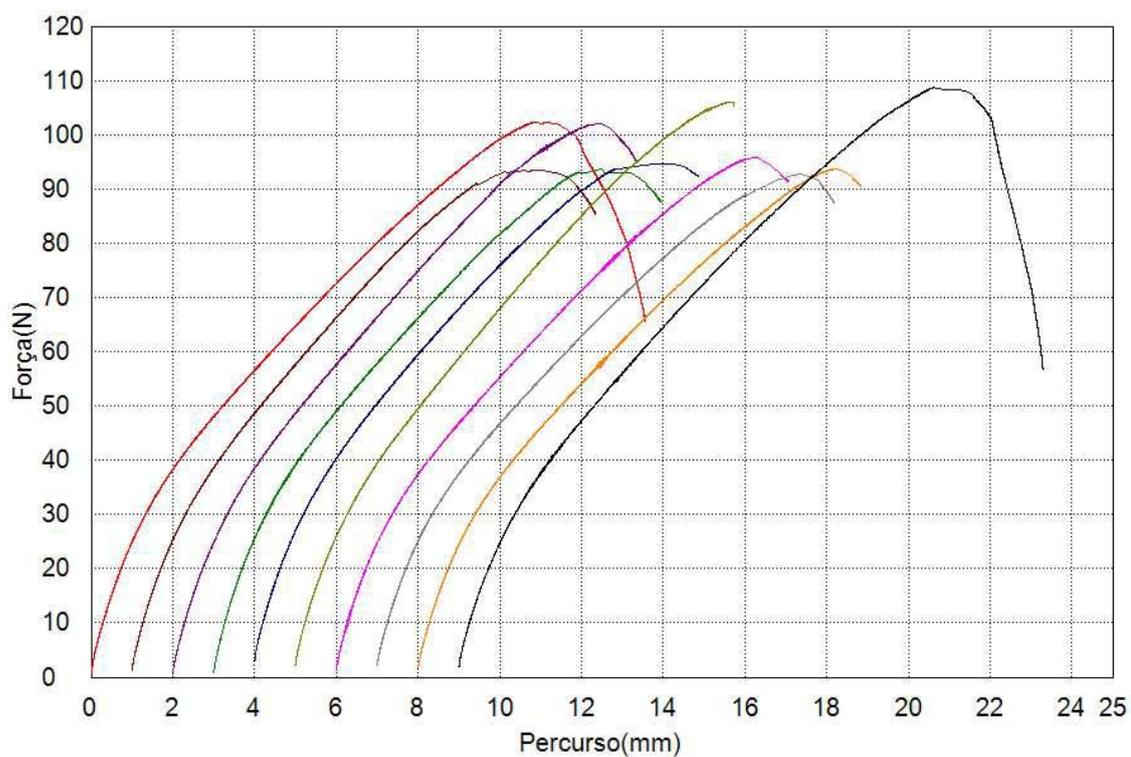
Figura 70 – Ensaio de cisalhamento Lote 17: Curvas força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 32 – Resultados do ensaio de cisalhamento: Lote 18

CP	Força Máxima (N)	Energia (J)
18.1	102.248	0.69741
18.2	93.368	0.58454
18.3	101.972	0.68032
18.4	93.664	0.57525
18.5	94.604	0.63752
18.6	106.069	0.72804
18.7	95.838	0.63512
18.8	92.798	0.62865
18.9	93.706	0.60610
18.10	108.647	0.78708
Média	98.291 ± 5.901 (6%)	0.65600 ± 0.06693 (10.20%)
Média 2	96.025 ± 3.865 (4,03%)	0.63720 ± 0.04157 (6.52%)

Fonte: O autor, 2015.

Figura 71 – Ensaio de cisalhamento Lote 18: Curvas força *versus* deslocamento

Fonte: O autor, 2015.

APÊNDICE B - Espessura da área colada (Grupo 1)

Metodologia de aferição: Paquímetro digital (Pro-Max Fower – Electronic Digital Caliper).

Aferição 1 e 2 realizada em extremidades opostas ao logo do *overlap*.

Tabela 33 – Espessura e área total média Grupo 1

Lote	Espessura média (mm)	Área colada (mm²)
13	6.1125 ± 0.0647	333.493 ± 11.683
14	6.186 ± 0.049	337.778 ± 7.97
15	6.21 ± 0.0397	331.098 ± 6.790
16	6.21 ± 0.0397	331.098 ± 6.790

Nota: A espessura média apresentada corresponde à soma da espessura do substrato (3 mm cada) e do adesivo

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 34 – Lote 13: Espessura e área total colada (continua)

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm²)
13.1	6.17	6.19	336.28
13.2	6.15	6.18	350.87
13.3	6.22	6.25	315.43
13.4	6.05	6.07	331.40
13.5	6.16	6.10	331.91
13.6	6.10	6.12	346.70
13.7	6.09	6.03	334.28
13.8	6.05	6.06	327.92

Tabela 34 – Lote 13: Espessura e área total colada (conclusão)

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm ²)
13.9	6.08	6.11	316.73
13.10	6.03	6.04	343.41

Nota: Aferição realizada após cura do adesivo Masterpur em superfície pultrudada tratada previamente lixada.
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 35 – Lote 14: Espessura e área total colada

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm ²)
14.1	6.22	6.28	335.142
14.2	6.26	6.21	347.964
14.3	6.26	6.20	338.594
14.4	6.12	6.11	326.387
14.5	6.17	6.18	345.448
14.6	6.20	6.16	332.363
14.7	6.10	6.18	348.582
14.8	6.17	6.18	331.819
14.9	6.13	6.12	329.338
14.10	6.25	6.22	342.139

Nota: Aferição realizada após cura do adesivo Masterpur em superfície pultrudada sem tratamento.
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 36 – Lote 15: Espessura e área total colada

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm ²)
15.1	6.20	6.23	6.215
15.2	6.33	6.11	6.22
15.3	6.16	6.18	6.17
15.4	6.19	6.22	6.205
15.5	6.18	6.19	6.185
15.6	6.21	6.20	6.205
15.7	6.25	6.19	6.22
15.8	6.14	6.20	6.17
15.9	6.20	6.20	6.20
15.10	6.13	6.18	6.31

Nota: Aferição realizada após cura do adesivo Masterpur em superfície pultrudada tratada com *primer* de silano hidrolisado.

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 37 – Lote 16: Espessura e área total colada (continua)

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm ²)
16.1	6.27	6.23	319.965
16.2	6.26	6.25	334.755
16.3	6.33	6.28	334.487
16.4	6.27	6.28	322.661
16.5	6.26	6.36	326.984

Tabela 37 – Lote 16: Espessura e área total colada (conclusão)

CP	Aferição 1 (mm)	Aferição 2 (mm)	Área Colada (mm ²)
16.6	6.26	6.01	327.021
16.7	6.33	6.34	345.72
16.8	6.30	6.37	344.839
16.9	6.40	6.35	332.156
16.10	6.26	6.31	328.163

Nota: Aferição realizada após cura do adesivo Masterpur em superfície pultrudada tratada com *primer* ALMASUPER.

Fonte: O autor, 2015.

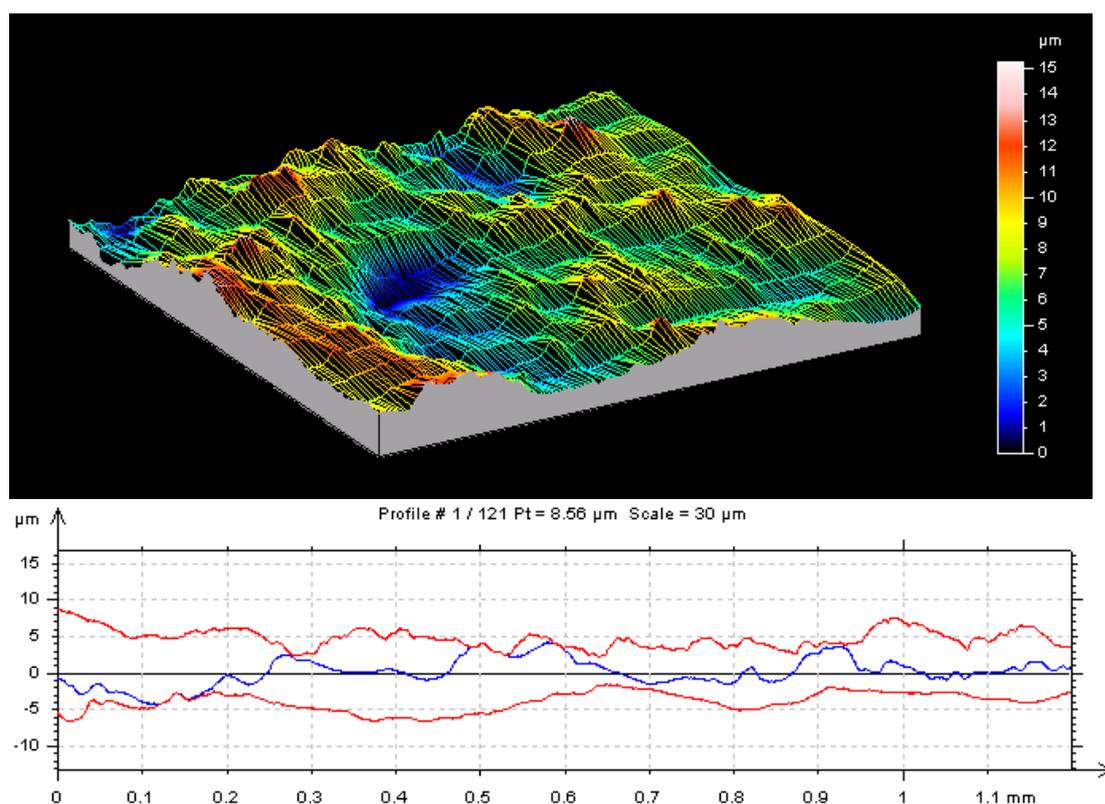
APÊNDICE C - Análise da rugosidade – Tabelas e imagens

Tabela 38- Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada com véu sem tratamento

Parâmetro (μm)	CP 01	CP 02	CP 03	CP 04	CP 05
Ra	0.94 ± 0.19	0.95 ± 0.21	0.94 ± 0.25	0.93 ± 0.18	0.87 ± 0.24
Rq	1.18 ± 0.22	1.17 ± 0.23	1.19 ± 0.29	1.14 ± 0.20	1.1 ± 0.30
Rt	5.05 ± 0.89	5.04 ± 0.85	5.1 ± 1.12	4.9 ± 0.84	5.08 ± 1.74
Rz	5.05 ± 0.89	5.04 ± 0.85	5.09 ± 1.12	4.89 ± 0.84	5.08 ± 1.73

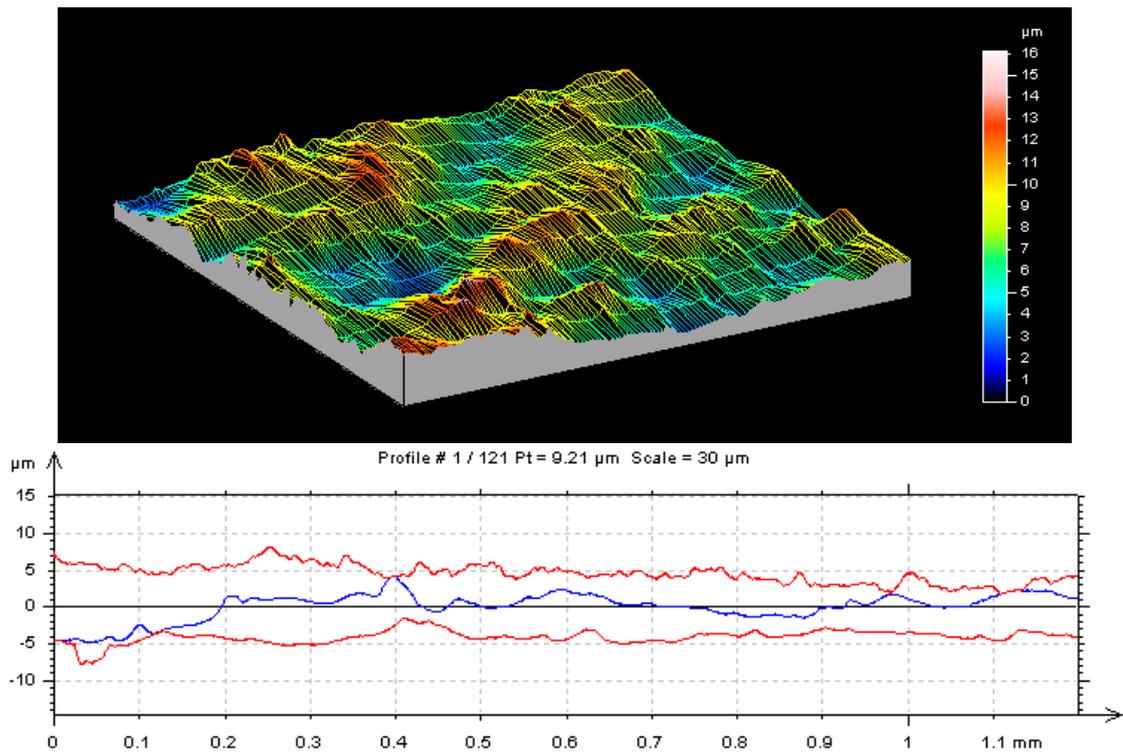
Fonte: O autor, 2015.

Figura 72 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 01)



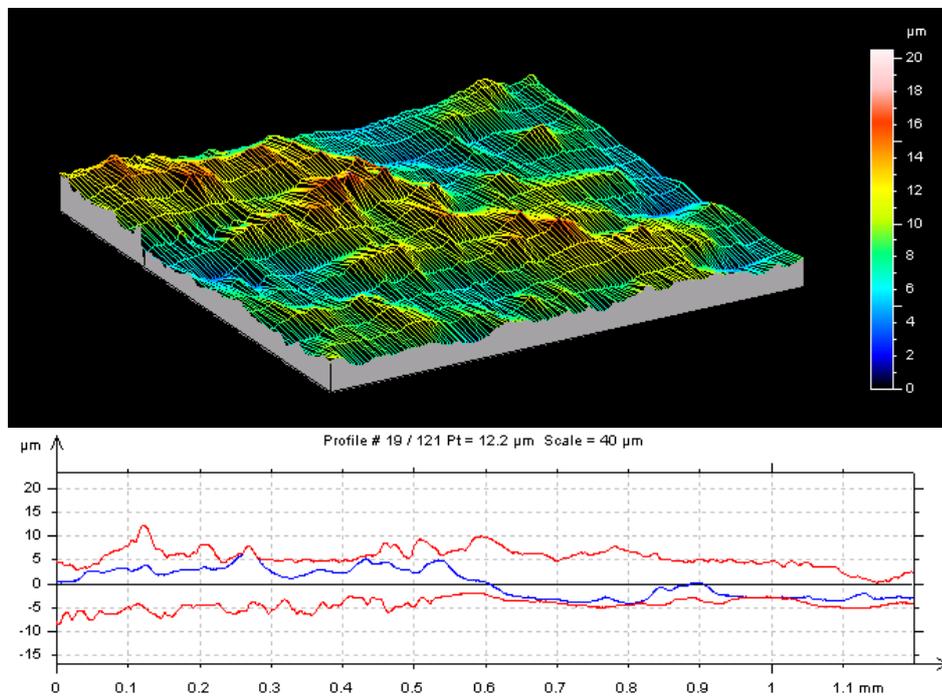
Fonte: O autor, 2015.

Figura 73 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 02)



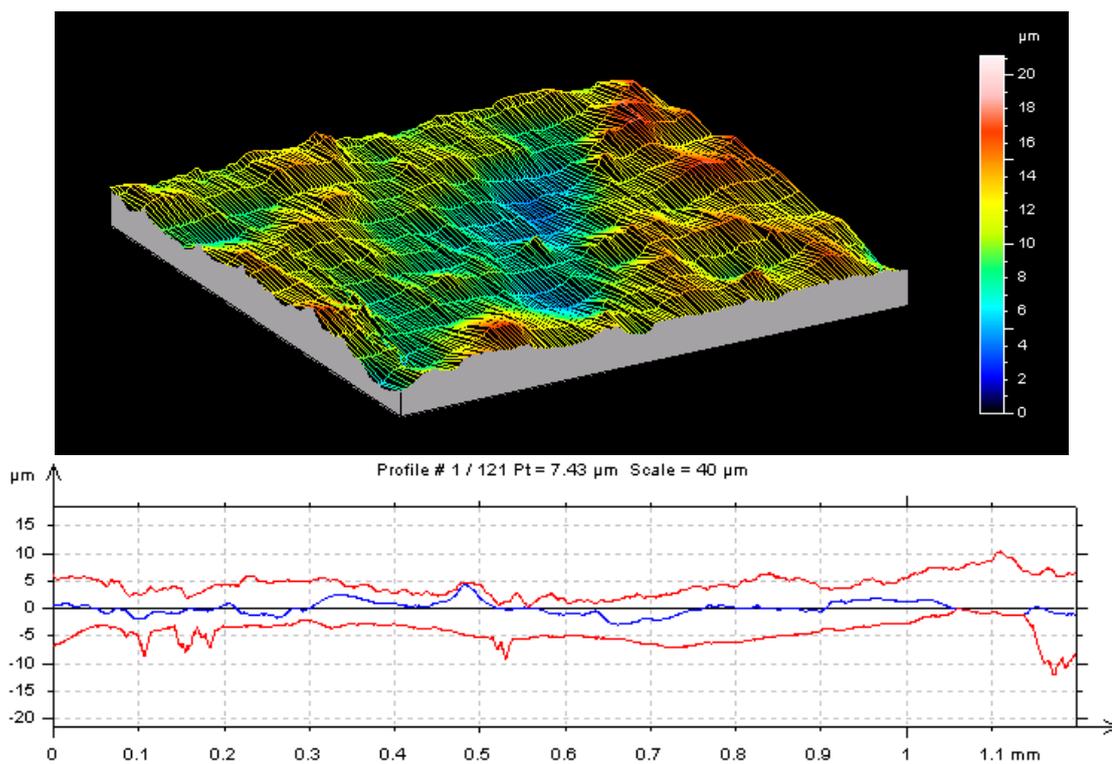
Fonte: O autor, 2015.

Figura 74 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 03)



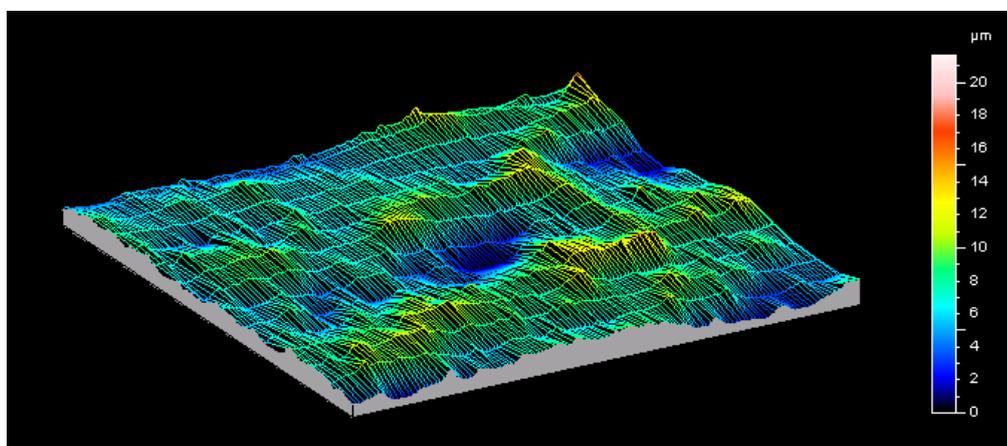
Fonte: O autor, 2015.

Figura 75 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 04)



Fonte: O autor, 2015.

Figura 76 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem tratamento (CP 05)



Nota: Gráfico não encontrado nos arquivos.

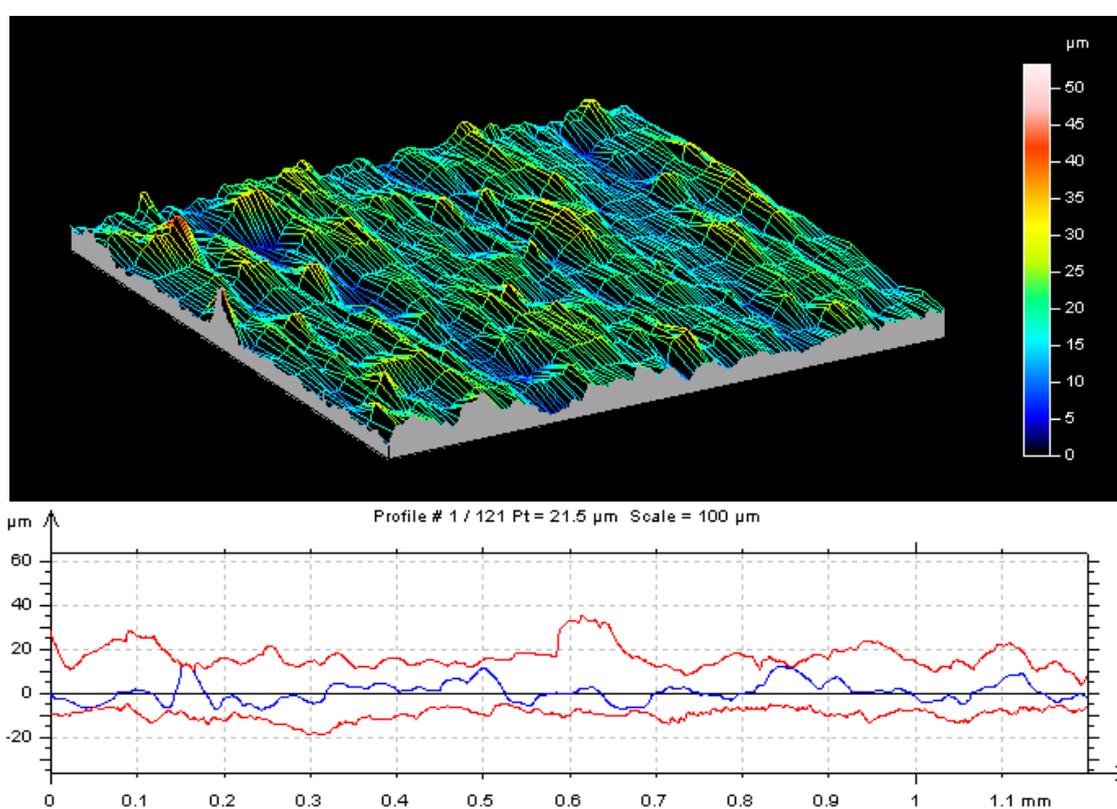
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 39 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada com véu lixada (grão 100)

Parâmetro (μm)	CP 06	CP 07	CP 08	CP 09	CP 10
Ra	3.72 ± 0.69	3.2 ± 0.74	3.33 ± 0.82	3.02 ± 0.66	3.33 ± 0.06
Rq	4.67 ± 0.96	4.01 ± 0.92	4.29 ± 1.09	3.91 ± 0.94	4.29 ± 0.86
Rt	20.6 ± 4.8	18.5 ± 4.40	20.4 ± 5.72	18.3 ± 4.78	19.8 ± 4.31
Rz	20.6 ± 4.8	18.5 ± 4.40	20.4 ± 5.72	18.3 ± 4.78	19.8 ± 4.31

Fonte: O autor, 2015.

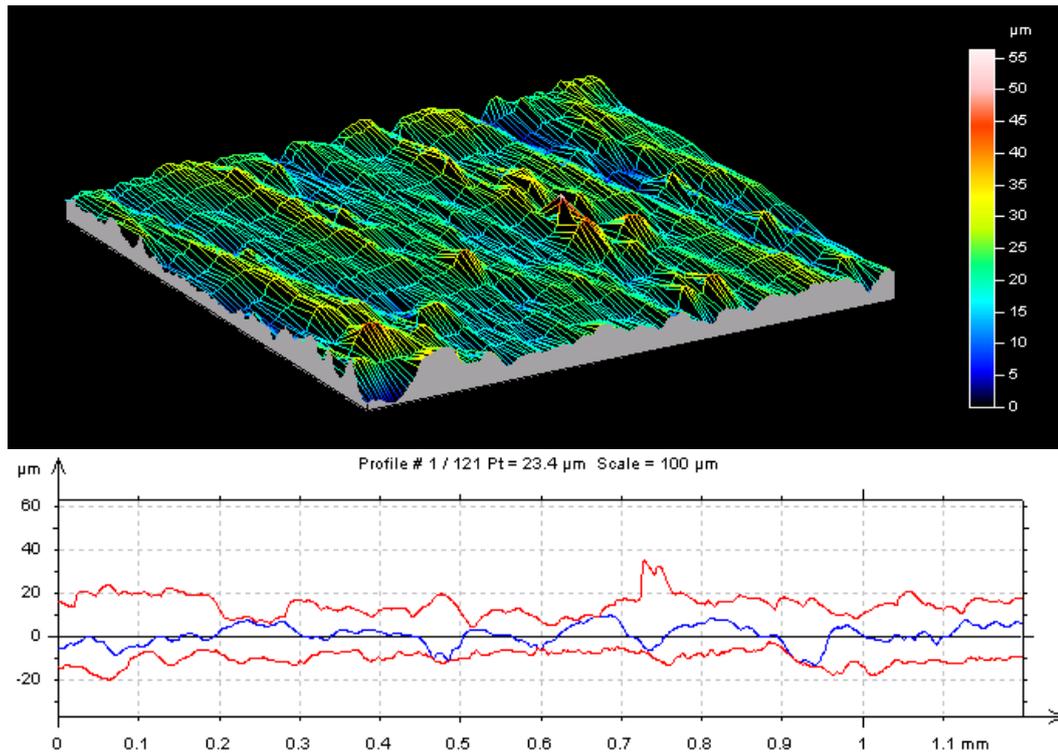
Figura 77 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 06)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

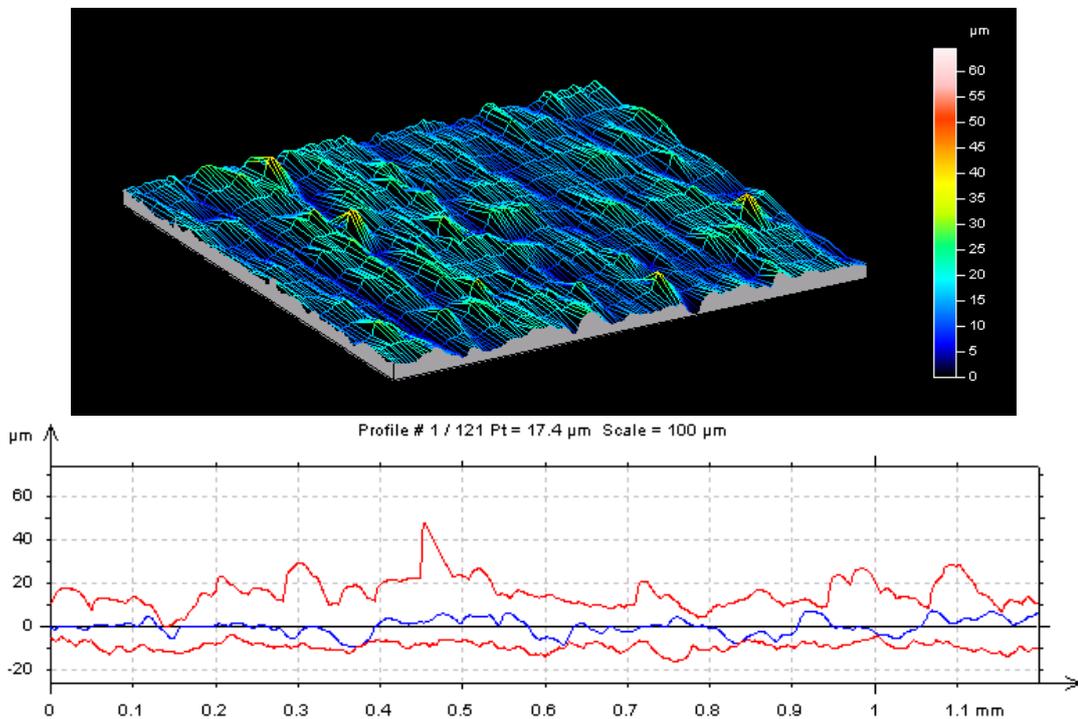
Figura 78 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 07)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

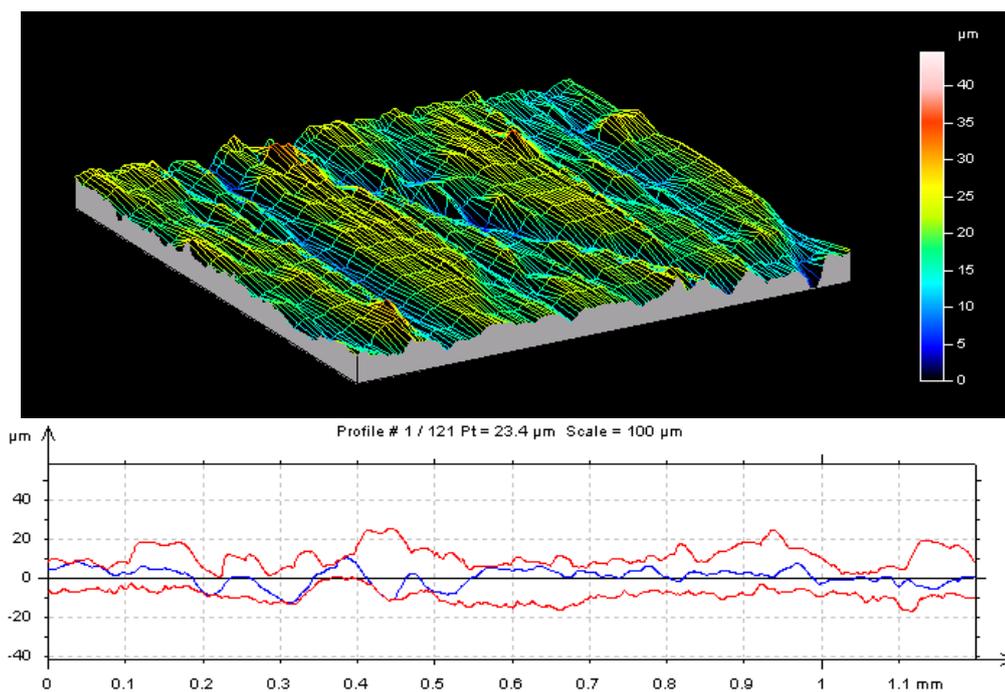
Figura 79 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 08)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

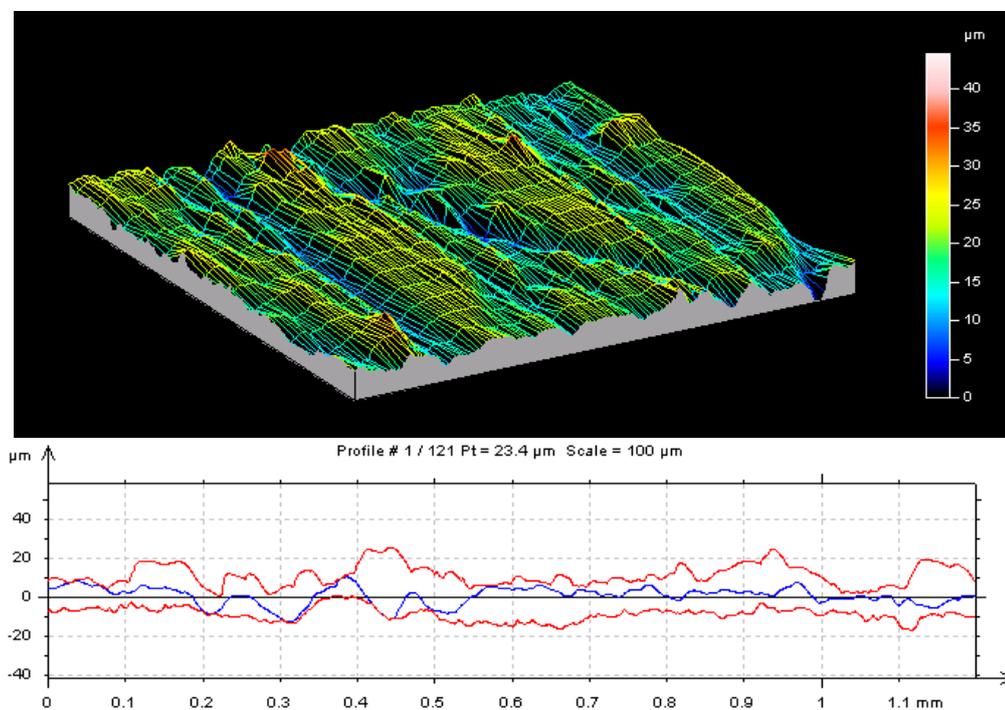
Fonte: O autor, 2015.

Figura 80 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 09)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).
Fonte: O autor, 2015.

Figura 81 – Aspecto da rugosidade: Superfície lixada (CP 10)



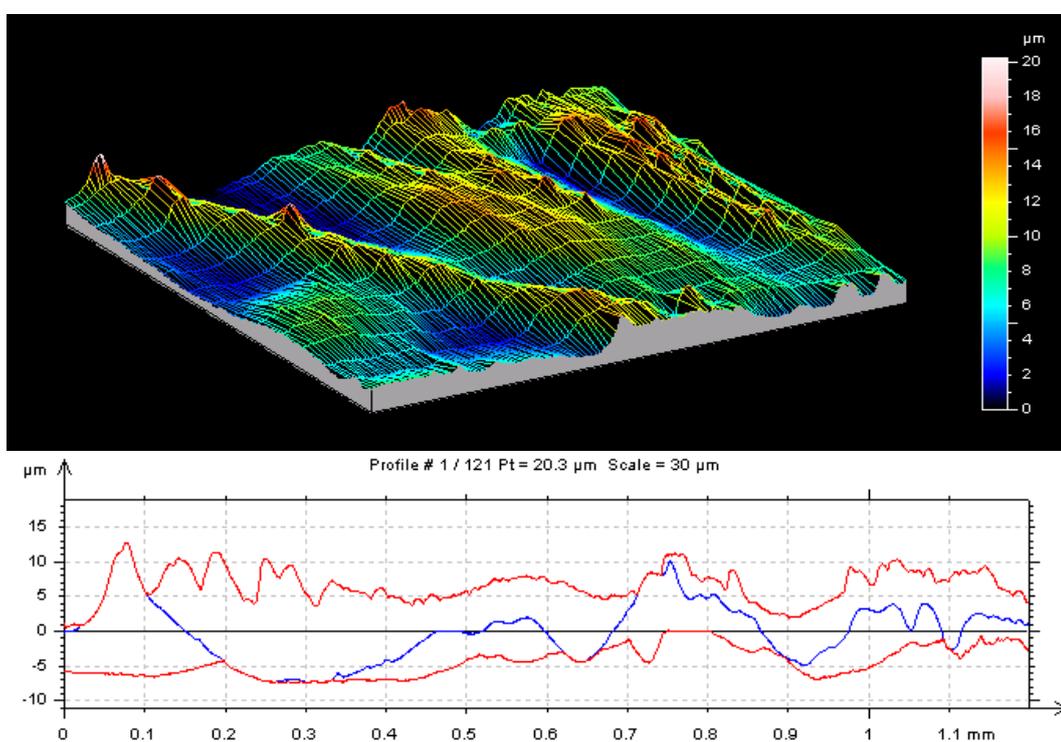
Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 40 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu sem tratamento

Parâmetro (μm)	CP 11	CP 12	CP 13	CP 14	CP 15
Ra	1.77 ± 0.25	1.19 ± 0.75	1.24 ± 0.31	1.21 ± 0.55	1.06 ± 0.26
Rq	2.11 ± 0.25	1.52 ± 0.96	1.55 ± 0.38	1.48 ± 0.63	1.28 ± 0.28
Rt	8.32 ± 1.34	6.63 ± 3.89	6.65 ± 1.93	5.78 ± 1.98	5.33 ± 1.28
Rz	8.29 ± 1.33	6.62 ± 3.90	6.62 ± 1.92	5.77 ± 1.98	5.33 ± 1.28

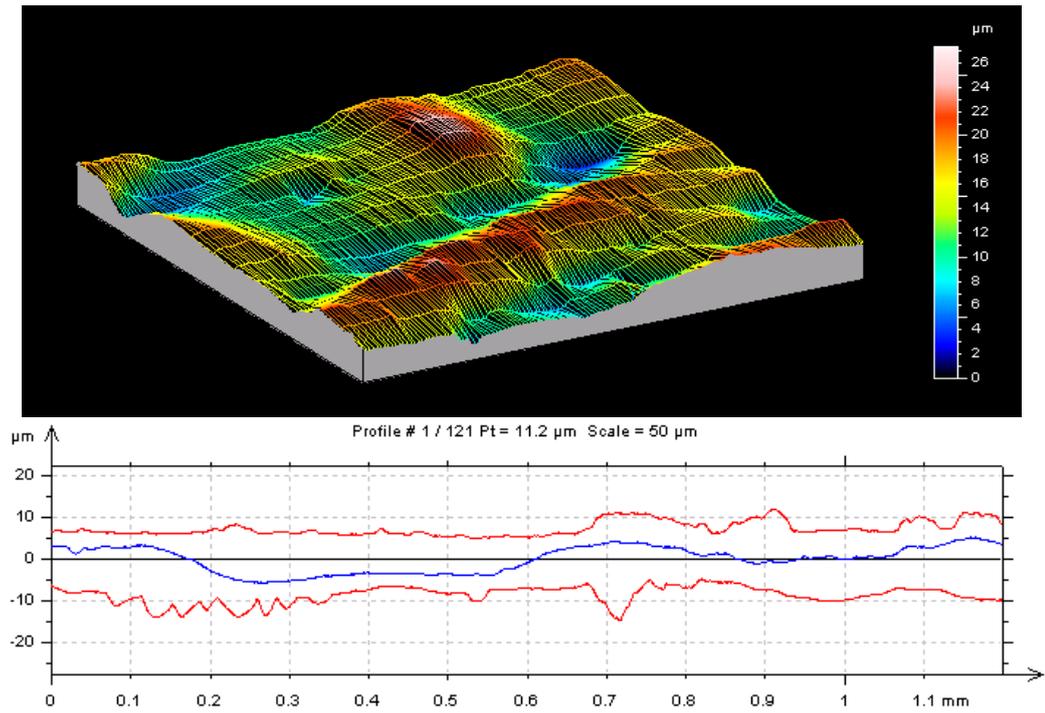
Fonte: O autor, 2015.

Figura 82 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 11)



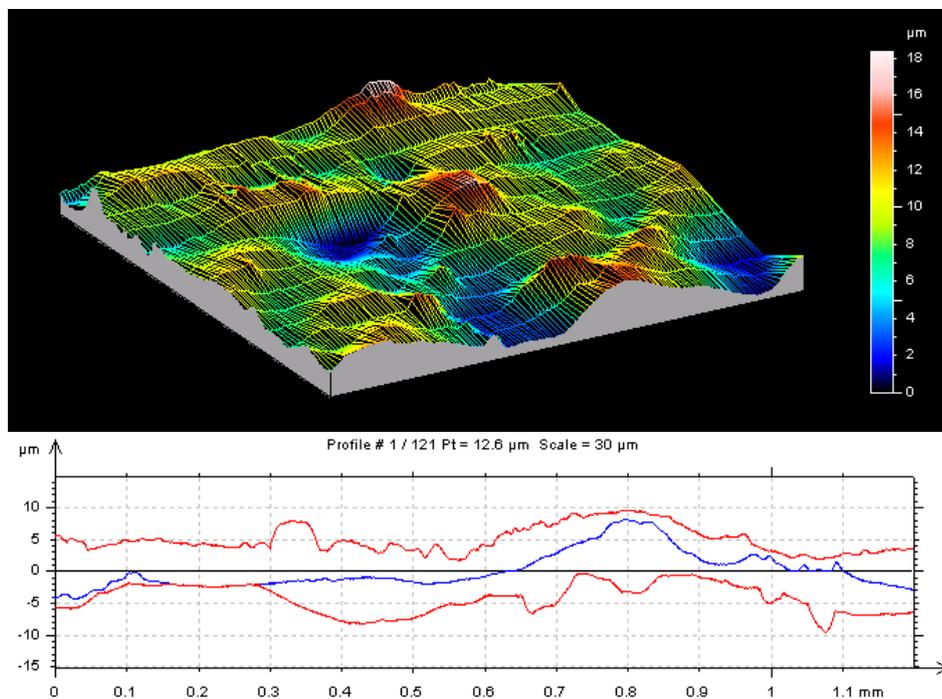
Fonte: O autor, 2015.

Figura 83 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 13)



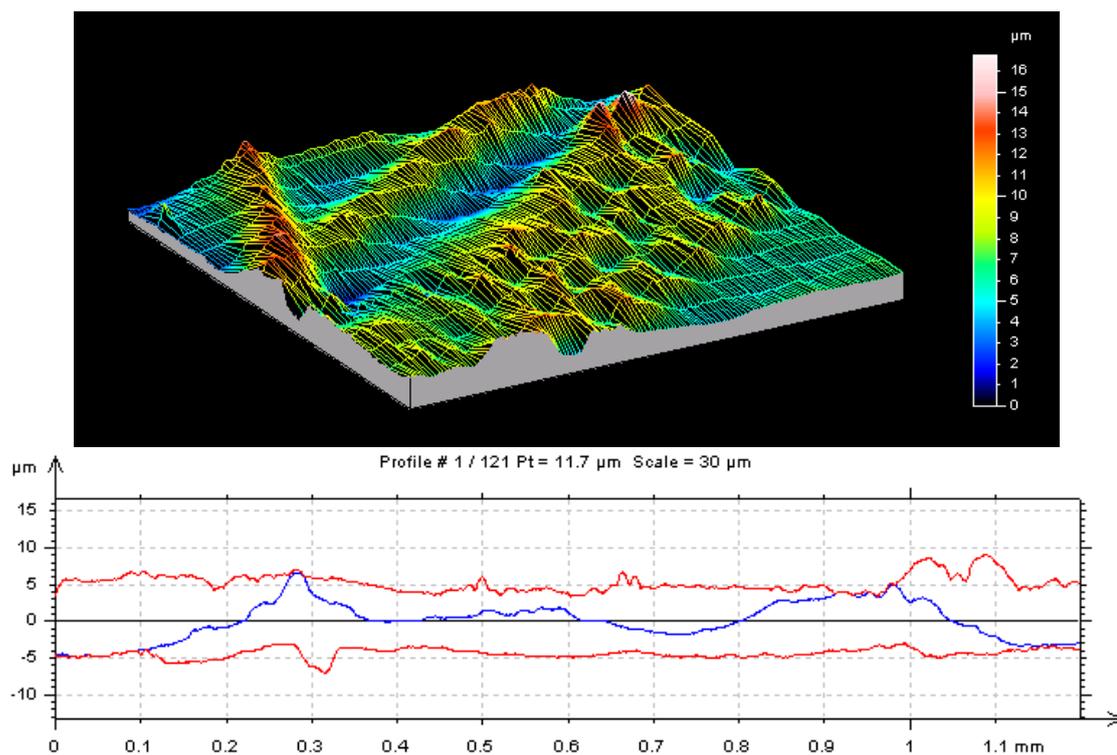
Fonte: O autor, 2015.

Figura 84 Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 14)



Fonte: O autor, 2015.

Figura 85 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu isenta de tratamento (CP 15)



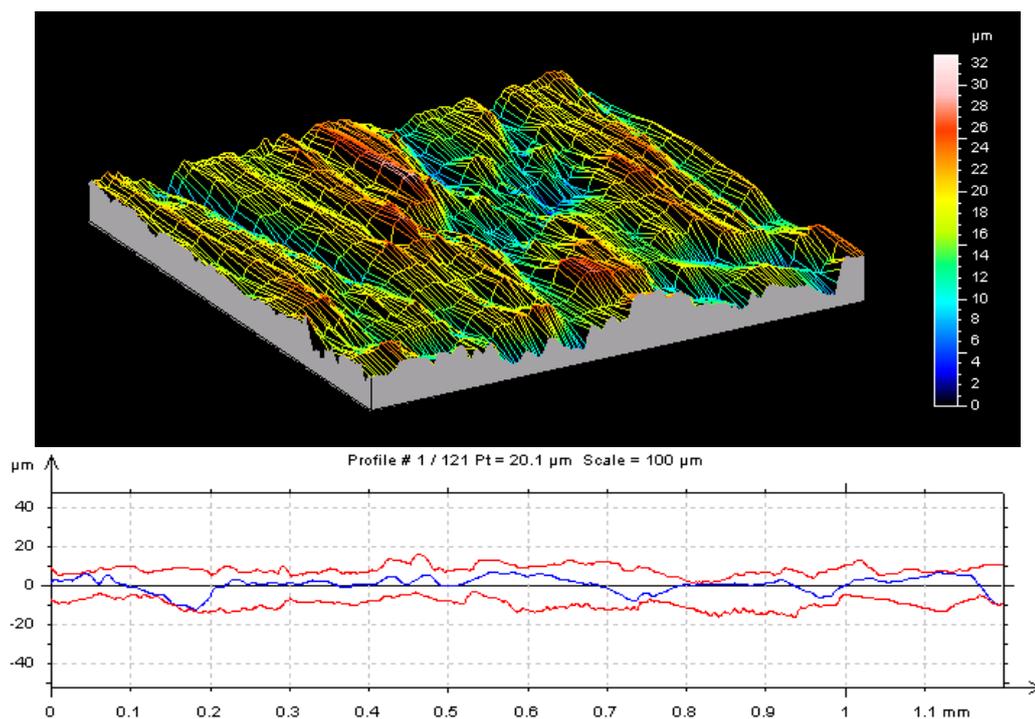
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 41 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu de superfície lixada (grão 100)

Parâmetro (μm)	CP 16	CP 17	CP 18	CP 19	CP 20
Ra	3.16 ± 0.37	2.72 ± 0.41	2.42 ± 0.40	2.46 ± 0.35	2.95 ± 0.44
Rq	4.04 ± 0.59	3.39 ± 0.50	3.01 ± 0.51	3.14 ± 0.43	3.65 ± 0.58
Rt	18.4 ± 4.25	15.2 ± 2.48	14.0 ± 2.56	15.0 ± 2.18	16.9 ± 3.53
Rz	18.4 ± 4.30	15.2 ± 2.49	13.9 ± 2.57	15.0 ± 2.18	$16. \pm 3.53$

Fonte: O autor, 2015.

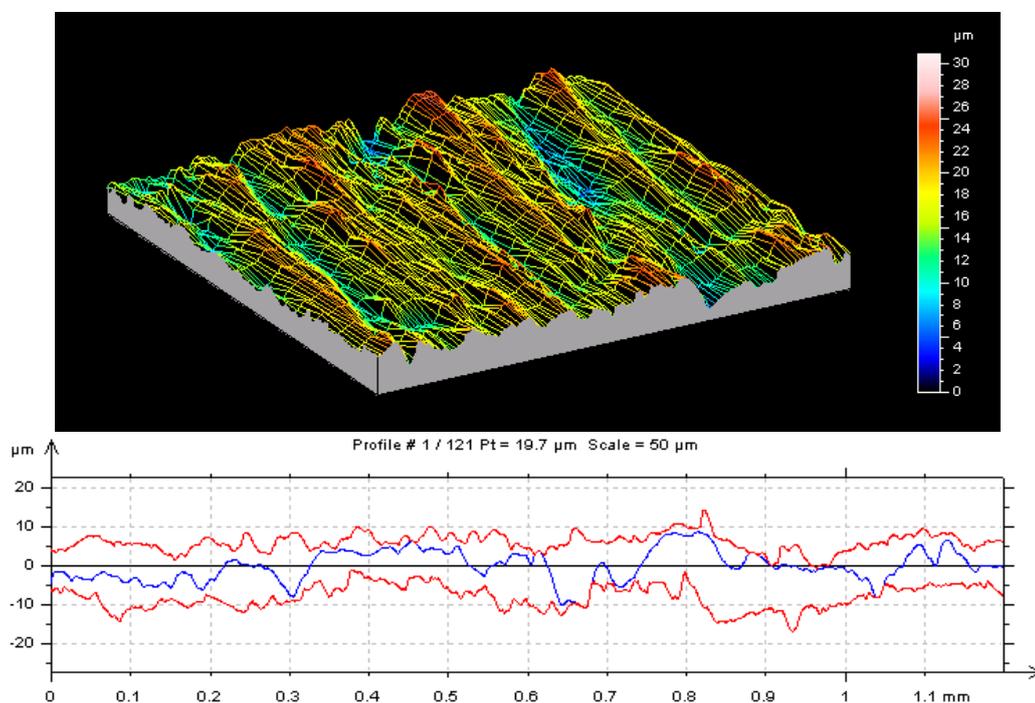
Figura 86 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 17)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

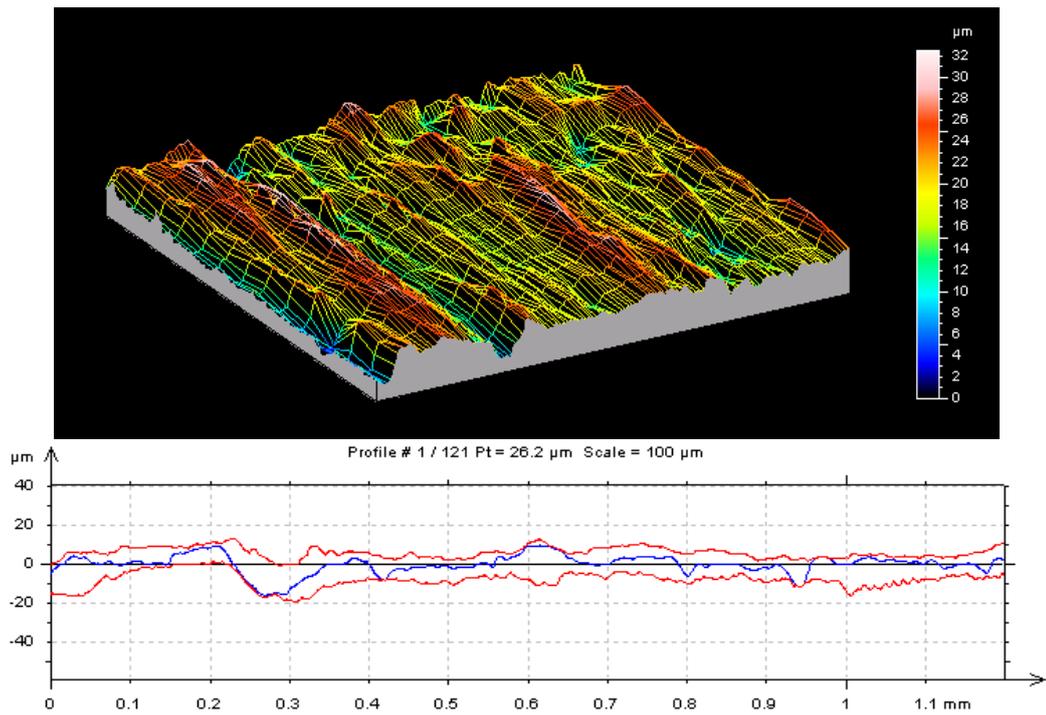
Figura 87 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 18)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

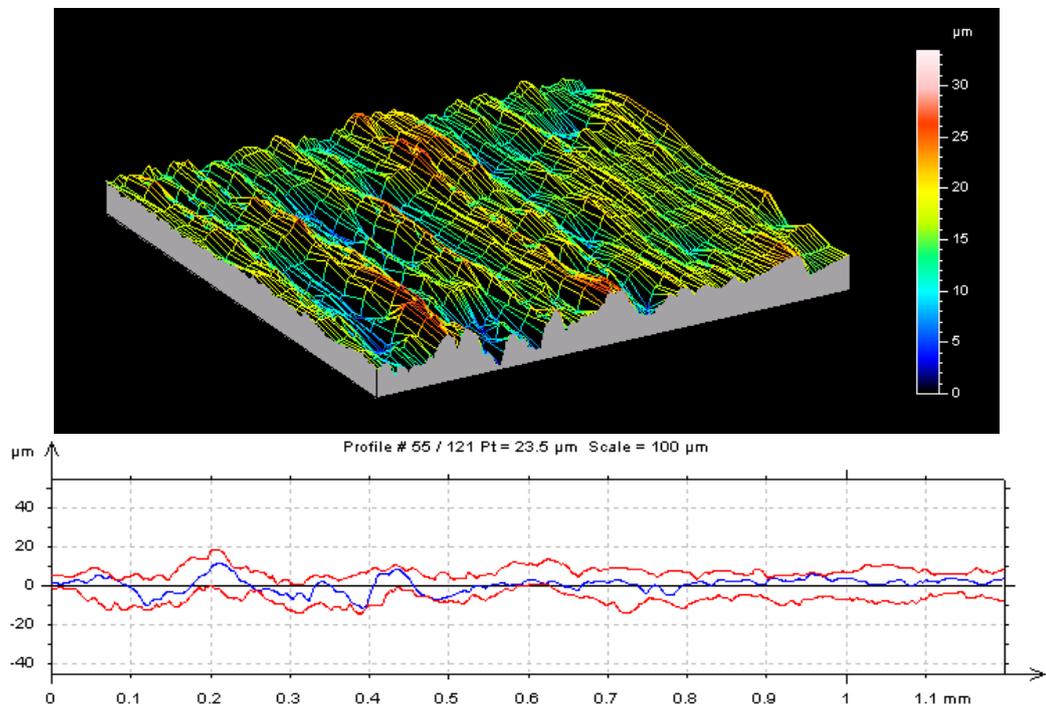
Figura 88 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 19)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

Figura 89 – Aspecto da rugosidade: Superfície sem véu de superfície lixada (CP 20)



Nota: Abrasão manual (lixa grão 100).

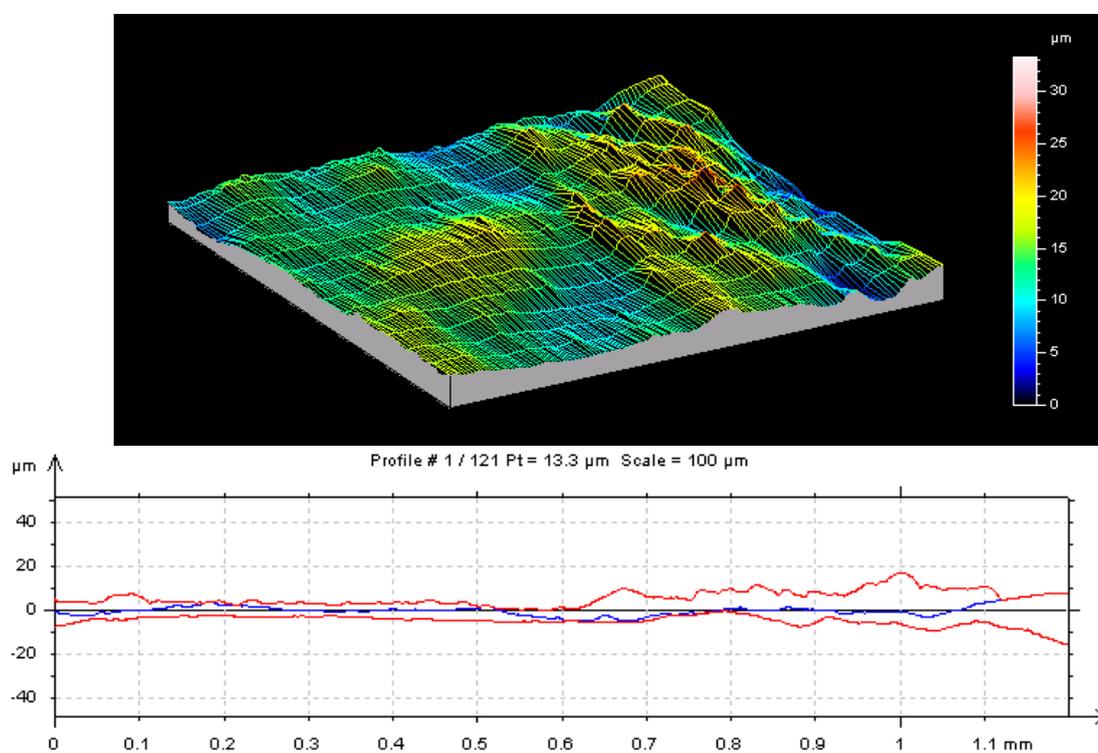
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 42 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com *primer* de silano hidrolisado

Parâmetro (μm)	CP 21	CP 22	CP 23	CP 24	CP 25
Ra	1.55 ± 0.37	0.91 ± 0.89	0.83 ± 0.51	1.97 ± 0.39	1.07 ± 0.28
Rq	1.97 ± 0.44	1.13 ± 0.25	1.18 ± 0.97	2.44 ± 0.40	1.43 ± 0.40
Rt	8.96 ± 2.34	4.77 ± 1.37	6.26 ± 5.69	9.99 ± 1.35	6.35 ± 1.76
Rz	8.94 ± 2.35	4.76 ± 1.37	6.26 ± 5.69	9.97 ± 1.34	6.34 ± 1.17

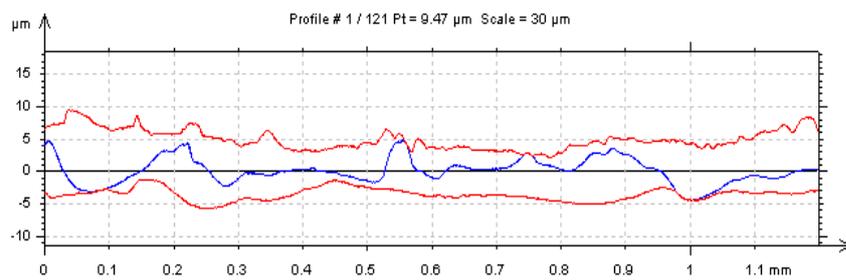
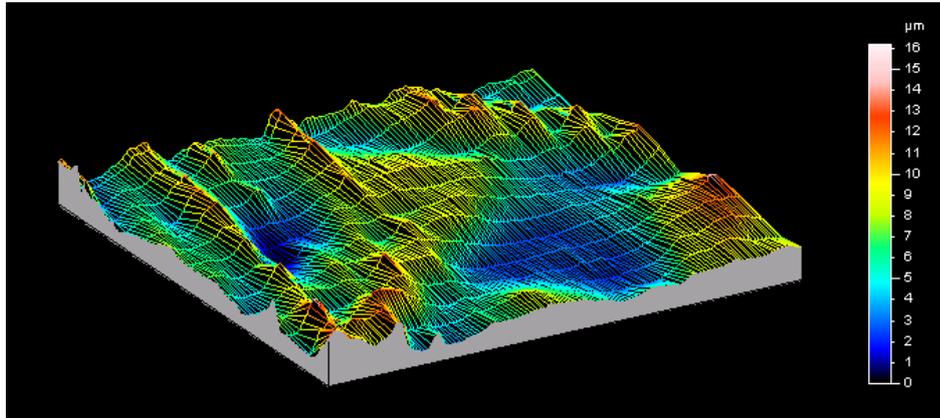
Fonte: O autor, 2015.

Figura 90 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 21)



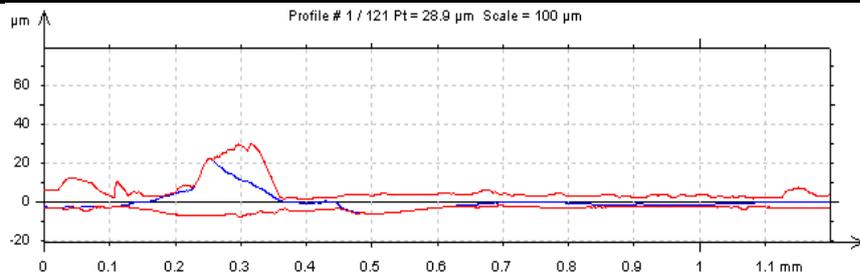
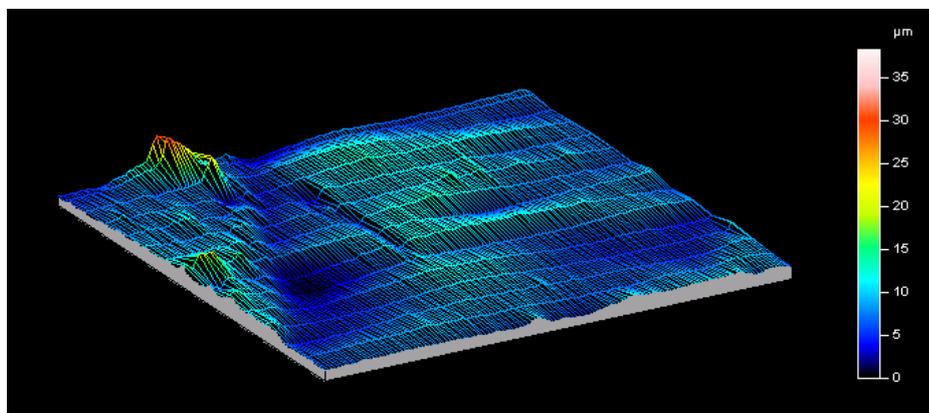
Fonte: O autor, 2015.

Figura 91 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 22)



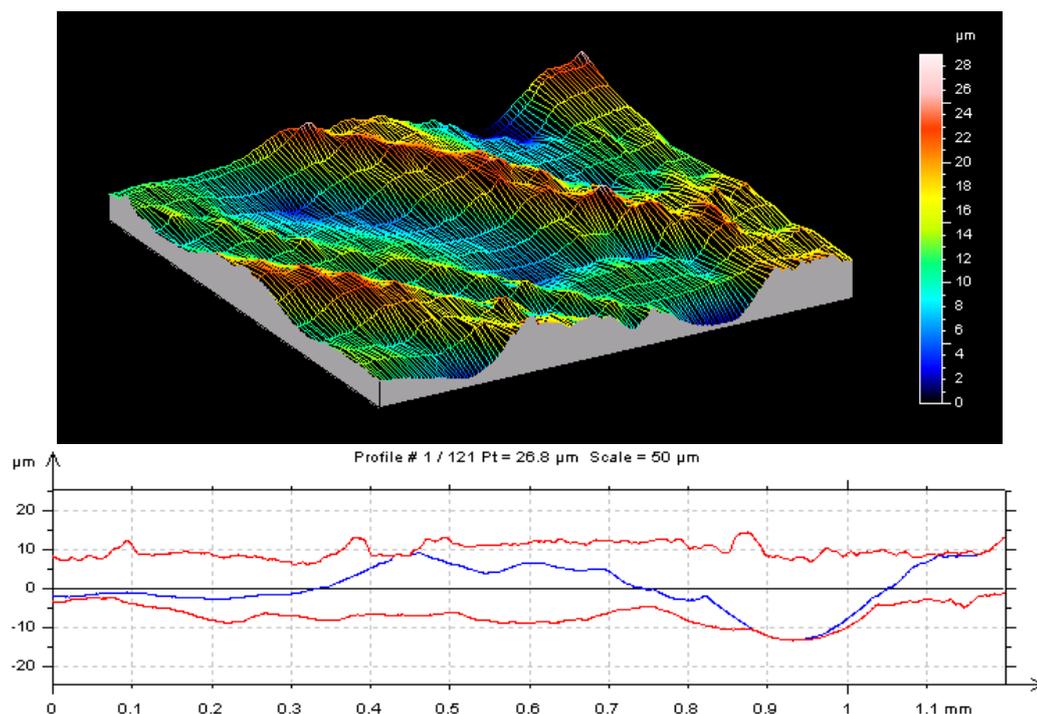
Fonte: O autor, 2015.

Figura 92 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 23)



Fonte: O autor, 2015

Figura 93 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano hidrolisado (CP 24)



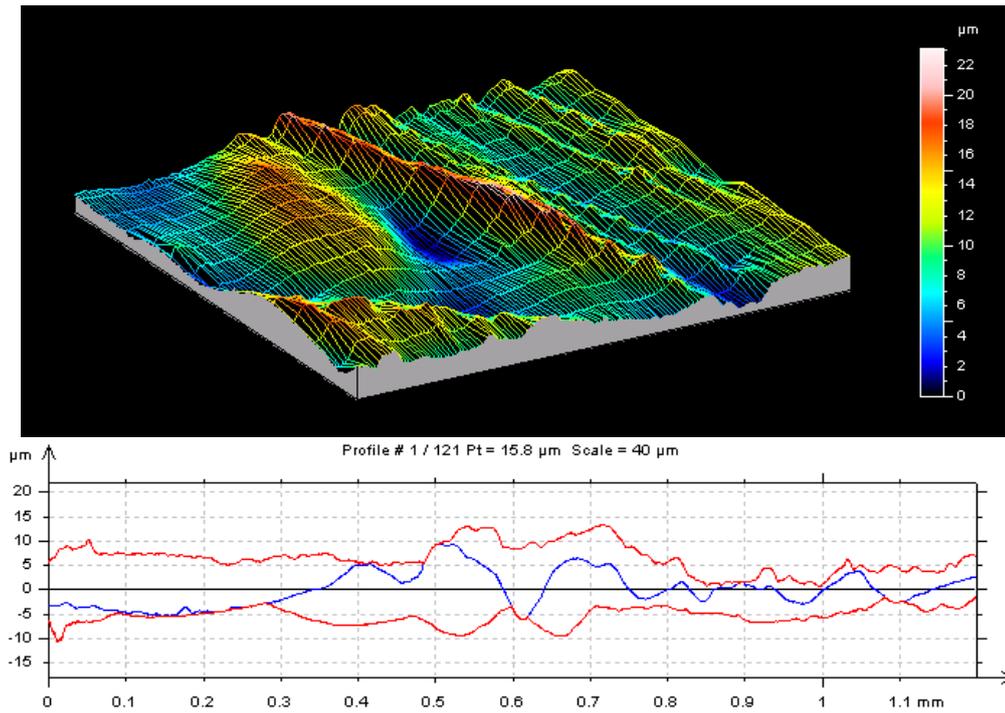
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 43 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com ALMASUPER

Parâmetro (μm)	CP 26	CP 27	CP 28	CP 29	CP 30
Ra	2.25 ± 0.61	1.07 ± 0.30	0.88 ± 0.28	2.16 ± 0.51	0.95 ± 0.22
Rq	2.88 ± 0.74	1.30 ± 0.34	1.07 ± 0.37	2.61 ± 0.60	1.16 ± 0.26
Rt	12.7 ± 3.16	5.37 ± 1.18	4.50 ± 1.74	10.3 ± 2.34	4.9 ± 0.93
Rz	12.7 ± 3.16	5.36 ± 1.18	4.50 ± 1.74	10.3 ± 2.34	4.9 ± 0.93

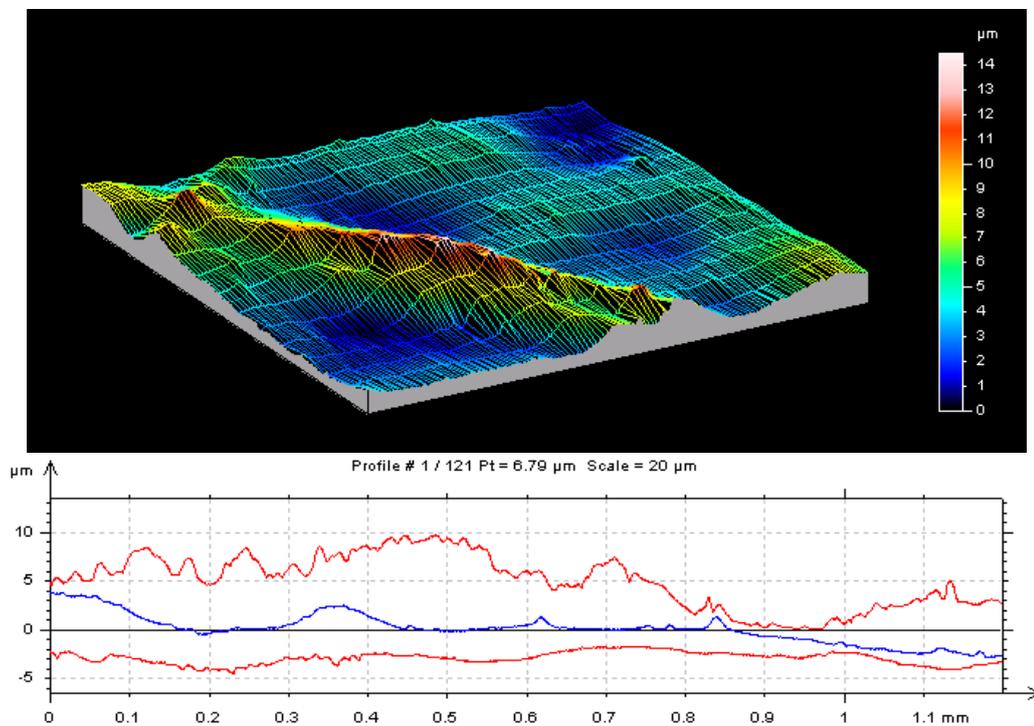
Fonte: O autor, 2015.

Figura 94 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 26)



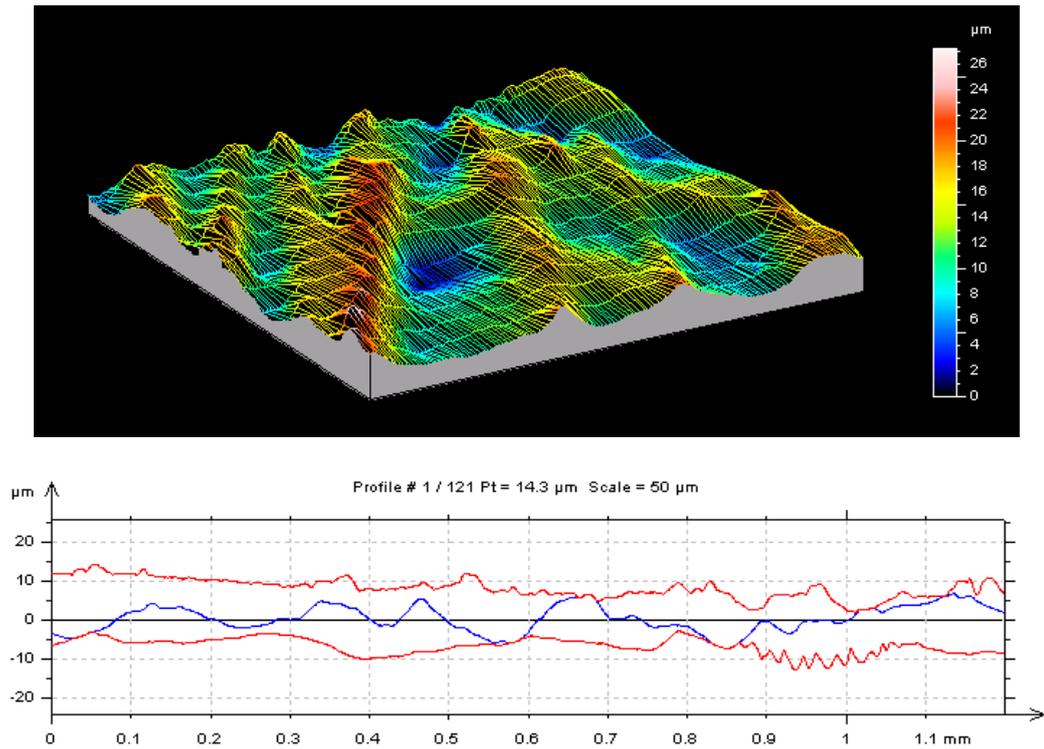
Fonte: O autor, 2015.

Figura 95 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 28)



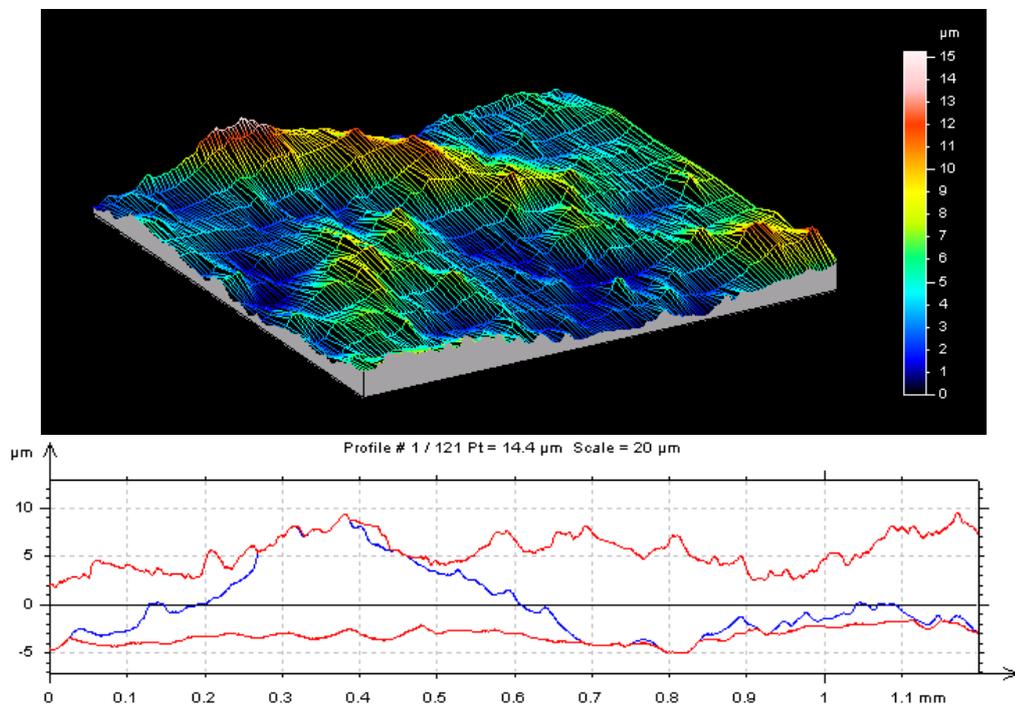
Fonte: O autor, 2015.

Figura 96 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 29)



Fonte: O autor, 2015.

Figura 97 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com ALMASUPER (CP 30)



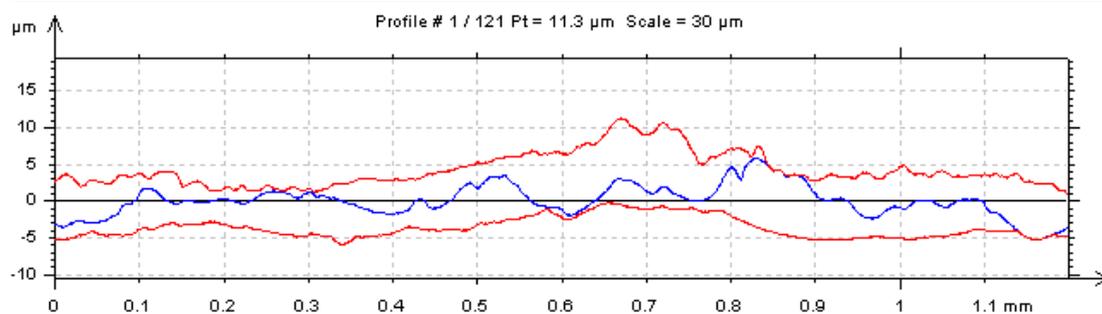
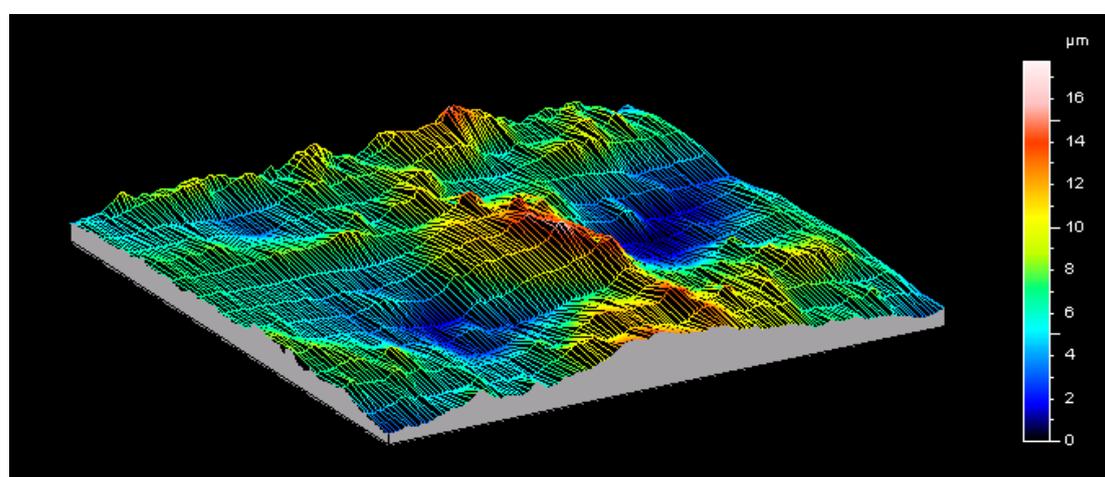
Fonte: O autor, 2015.

Tabela 44 - Parâmetros de rugosidade: Superfície pultrudada sem véu tratada com silano 3M

Parâmetro (μm)	CP 31	CP 32	CP 33	CP 34	CP 35
Ra	1.13 ± 0.32	1.06 ± 0.23	0.70 ± 0.19	0.80 ± 0.13	1.09 ± 0.28
Rq	1.41 ± 0.40	1.28 ± 0.26	0.88 ± 0.24	0.99 ± 0.16	1.33 ± 0.31
Rt	5.85 ± 1.62	5.35 ± 1.11	3.89 ± 1.01	4.4 ± 0.86	5.62 ± 1.18
Rz	5.85 ± 1.62	5.35 ± 1.12	3.89 ± 1.01	4.4 ± 0.86	5.62 ± 1.18

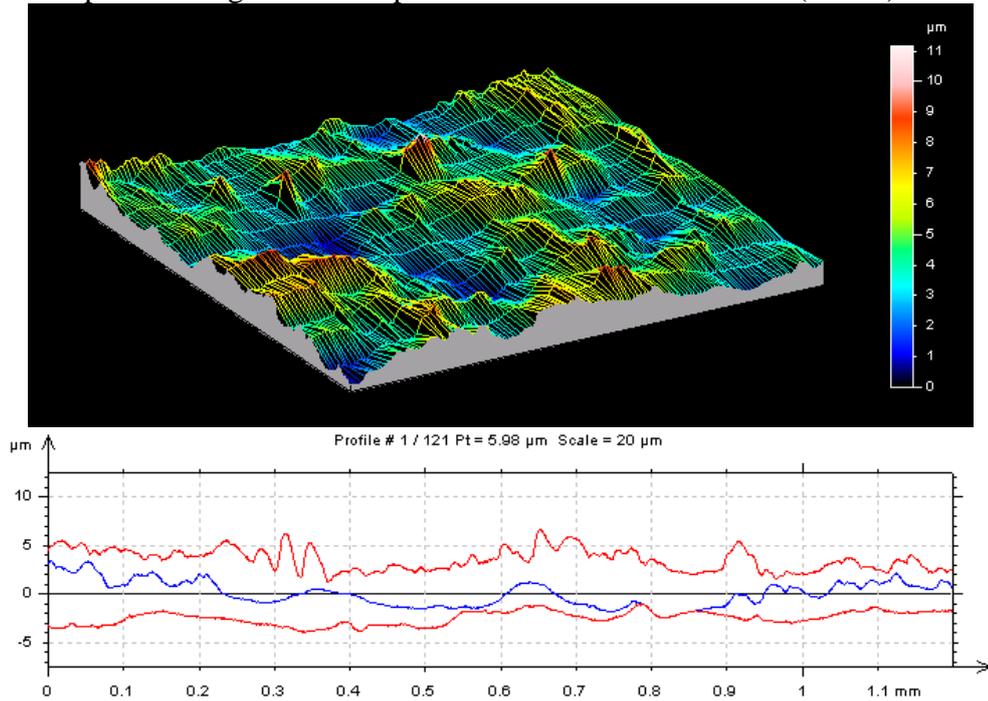
Fonte: O autor, 2015.

Figura 98 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 31)



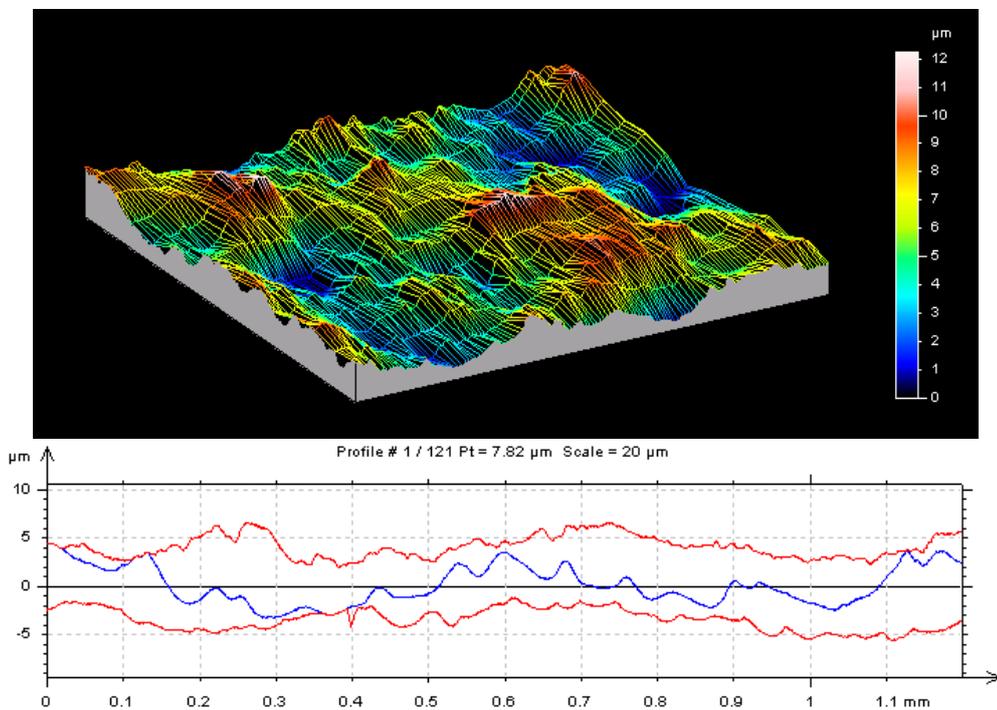
Fonte: O autor, 2015.

Figura 99 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 33)



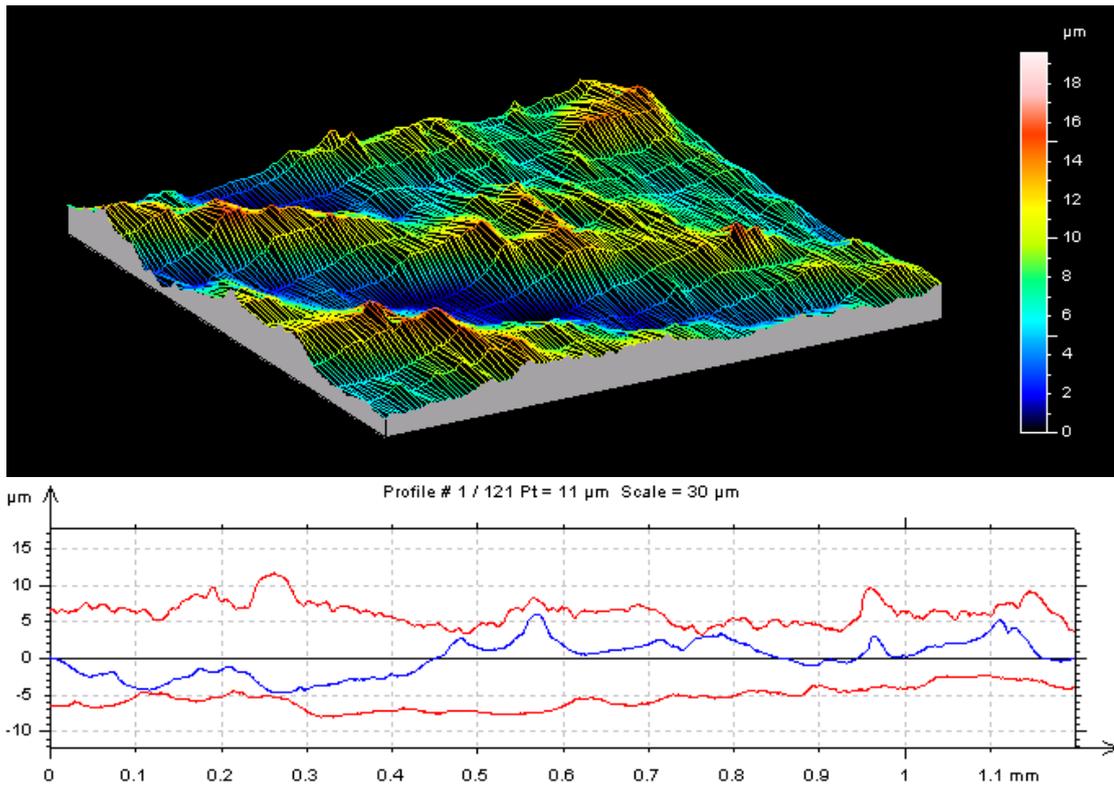
Fonte: O autor, 2015.

Figura 100 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 34)



Fonte: O autor, 2015.

Figura 101 – Aspecto da rugosidade: Superfície tratada com silano 3M (CP 35)



Fonte: O autor, 2015.

APÊNDICE D – Espessura do adesivo em juntas coladas com adesivo MasterPur

Nota 1: “Aferição 1” e “Aferição 2” realizadas em extremidades opostas da região colada após cura total do adesivo a retirada da rebarba (adesivo em excesso nas extremidades do *overlap* bem como na largura). Como dispositivo de medida, utilizou-se um paquímetro digital (*Pro-Max Fower – Electronic Digital Caliper*).

Nota 2: Medidas consideram o substrato, este com 3 mm de espessura. Para espessura somente do adesivo, subtrair 6 mm dos valores apresentados a seguir para espessura na região colada bem como para média das espessuras.

Tabela 45 – Espessura e área média na região colada: Lote 13

CP	Espessura na região colada Aferição 1 (mm)	Espessura na região colada Aferição 2 (mm)	Média da espessura (mm)	Área colada (mm ²)
13.1	6.17	6.19	6.18	336.28
13.2	6.15	6.18	6.165	350.87
13.3	6.22	6.25	6.235	315.43
13.4	6.05	6.07	6.06	331.4
13.5	6.16	6.10	6.13	331.91
13.6	6.10	6.12	6.11	346.7
13.7	6.09	6.03	6.06	334.28
13.8	6.05	6.06	6.055	327.92
13.9	6.08	6.11	6.095	316.73
13.10	6.03	6.04	6.035	343.41
Média	6.1125 ± 0.0647			333.493 ± 11.683

Nota: Substratos lixados (grão 100).

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 46 – Espessura e área média na região colada: Lote 14

CP	Espessura na região colada Aferição 1 (mm)	Espessura na região colada Aferição 2 (mm)	Média das espessuras (mm)	Área colada (mm ²)
14.1	6.22	6.28	6.25	335.142
14.2	6.26	6.21	6.235	347.964
14.3	6.26	6.20	6.23	338.594
14.4	6.12	6.11	6.115	326.387
14.5	6.17	6.18	6.175	345.448
14.6	6.20	6.16	6.18	332.363
14.7	6.10	6.18	6.14	348.582
14.8	6.17	6.18	6.175	331.819
14.9	6.13	6.12	6.125	329.338
14.10	6.25	6.22	6.235	342.139
Média	6.186 ± 0.049			337.778 ± 7.97

Nota: Substratos sem tratamento.

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 47 – Espessura e área média na região colada: Lote 15(continua)

CP	Espessura na região colada Aferição 1 (mm)	Espessura na região colada Aferição 2 (mm)	Média das espessuras (mm)	Área colada (mm ²)
15.1	6.20	6.23	6.215	323.9
15.2	6.33	6.11	6.22	333.72
15.3	6.16	6.18	6.17	335.66

Tabela 47 – Espessura e área média na região colada: Lote 15 (conclusão)

CP	Espessura na região colada Aferição 1 (mm)	Espessura na região colada Aferição 2 (mm)	Média das espessuras (mm)	Área colada (mm ²)
15.4	6.19	6.22	6.205	335.14
15.5	6.18	6.19	6.185	342.66
15.6	6.21	6.20	6.205	327.74
15.7	6.25	6.19	6.22	330.75
15.8	6.14	6.20	6.17	334.89
15.9	6.20	6.20	6.20	327.55
15.10	6.13	6.18	6.31	318.97
Média	6.21 ± 0.0397			331.098 ± 6.790

Nota: Substratos tratados com *primer* de silano hidrolisado.

Fonte: O autor, 2015.

Tabela 48 – Espessura e área média na região colada: Lote 16

CP	Espessura na região colada Aferição 1 (mm)	Espessura na região colada Aferição 2 (mm)	Média das espessuras (mm)	Área colada (mm ²)
16.1	6.27	6.23	6.25	319.965
16.2	6.26	6.25	6.255	334.755
16.3	6.33	6.28	6.305	334.487
16.4	6.27	6.28	6.275	322.661
16.5	6.26	6.36	6.31	326.984
16.6	6.26	6.01	6.135	327.021
16.7	6.33	6.34	6.335	345.72
16.8	6.30	6.37	6.335	344.839
16.9	6.40	6.35	6.375	332.156
16.10	6.26	6.31	6.285	328.163
Média	6.261 ± 0.0657			31.675 ± 8.58

Nota: Substratos tratados com *primer* ALMASUPER.

Fonte: O autor, 2015.

APÊNDICE E – Conferência Luso Brasileira de Adesão e Adesivos (CLBA)**Estudo do Comportamento Mecânico de Juntas Coladas de Pultrudado em Matriz Poliéster com Superfície Submetida a Diferentes Tratamentos de Pré-Colagem**

A.C.V Passos¹, E.M.Sampaio¹

¹Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) - Instituto Politécnico do Rio de Janeiro - IPRJ/UERJ, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil.

Diversos componentes pultrudados são fixados por meio da colagem adesiva e, em geral, o tratamento superficial empregado consiste no lixamento e limpeza para retirada do pó remanescente. Tal procedimento exige um tempo considerável no processo produtivo, disponibilidade de pessoal e tende a produzir superfícies heterogêneas. Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um método alternativo e eficaz ao atualmente empregado na indústria pultrusora. Para tal, avaliamos dois tipos diferentes de materiais para união das juntas de cisalhamento, fita e adesivo. A fita adesiva foi aplicada sobre superfície de pultrudado tratada apenas com o *primer* de silano. Para o adesivo uretânico bicomponente, os corpos de prova foram submetidos a diferentes métodos de tratamento superficial: Abrasão manual (lixa grão 100), *primer* de silano (hidrolisado à 1%) e *primer* específico para superfícies melamínicas. A leitura do nível de rugosidade superficial foi realizada em rugosímetro tridimensional para cada um dos tratamentos empregados. O comportamento mecânico das juntas coladas foi avaliado em ensaios de cisalhamento e de fluência ambos à temperatura ambiente. Os ensaios de fluência em 10 juntas simultaneamente foram realizados no equipamento desenvolvido pelo LAA. Como critérios de análise para determinação da resistência das juntas coladas, adotou-se a tensão máxima suportada em cisalhamento e o tempo total em fluência até ruptura, este último com carga correspondente a 50% da máxima carga suportada em cisalhamento.

[1] R.A. Queiroz, E.M. Sampaio, V.J. Cortines e N.R.F. Rohem, J. Adhes. Sci. Technol., Study on the creep behavior of bonded metallic joints, 2:8, Doi:10.1186/2196-4351-2-8 (2014).

Nota: Resumo apresentado na edição de 2016 do CBLA. Artigo em preparo.

ANEXO A - Classificação de grade de piso quanto à resistência ao fogo

Tabela 49 – Locais de aplicação de grades de piso pultrudadas conforme nível de resistência ao fogo (continua)

Local	Serviço	Nível de classificação
Espaço de máquinas	Passadiços ou áreas que podem ser utilizadas para fuga ou acesso para combate a incêndio, operações de emergência ou resgate.	1 (ver Nota 1)
	Passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso diferente das descritas anteriormente.	3
Salas de bombas de carga	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	1
Porões de carga	Passadiços ou áreas que podem ser utilizadas para fuga ou acesso para combate a incêndio, operações de emergência ou resgate.	1
	Passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso diferente das descritas anteriormente.	Não aplicável (ver Nota 5)
Tanques de carga	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	Não aplicável (ver Notas 2 e 5)

Tabela 49 – Locais de aplicação de grades de piso pultrudadas conforme nível de resistência ao fogo (continuação)

Local	Serviço	Nível de classificação
Tanques de óleo combustível	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	Não aplicável (ver Notas 2 e 5)
Tanque de água de lastro	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	Não aplicável (ver Notas 3 e 5)
Compartimentos estanques, espaços vazios, fundos duplos, túneis tubulares etc.	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	Não aplicável (ver Notas 3 e 5)
Espaços de acomodações, serviços e controle	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	1
Estações de embarque em botes salva-vidas ou de refúgio temporário em área de conveses abertos	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	2
Áreas de conveses abertos ou semiabertos	Passadiços ou áreas que podem ser utilizadas para fuga ou acesso para combate a incêndio, operações de emergência ou resgate.	3 (ver Nota 4)
	Passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso diferente das descritas anteriormente.	Não aplicável (ver Nota 5)

Tabela 49 – Locais de aplicação de grades de piso pultrudadas conforme nível de resistência ao fogo (conclusão)

Local	Serviço	Nível de classificação
Esferas de armazenamento e tanques de estocagem de instalações	Todos os passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso.	Não aplicável (ver Notas 2 e 5)
Outras áreas abertas ou semiabertas	Passadiços ou áreas que podem ser utilizadas para fuga ou acesso para combate a incêndio, operações de emergência ou resgate.	3 (ver Nota 4)
	Passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas de acesso diferente das descritas anteriormente.	Não aplicável (ver Nota 5)
Outras áreas fechadas não descritas anteriormente	Passadiços de pessoal, passarelas, escadas, plataformas ou áreas que podem ser utilizadas para fuga de acesso para combate a incêndio, operações de emergência ou resgate.	1
<p>Nota 1: Se o espaço de máquinas não contiver máquinas de combustão interna, outras unidades de queima de óleo, aquecimento de óleo, estações de abastecimento de óleo combustível ou quaisquer outras fontes de incêndio em potencial envolvendo hidrocarbonetos e não possuir mais de 2,5 kg/m² de armazenamento de combustível, podem ser utilizadas grades de integridade nível 3 em vez de nível 1.</p> <p>Nota 2: Caso seja previsto o acesso a esse espaço durante um incêndio, devem ser exigidas grades de integridade nível 1.</p> <p>Nota 3: Caso seja previsto o acesso a esse espaço durante um incêndio, devem ser exigidas grades de integridade nível 3.</p> <p>Nota 4: Para vasos com sistemas de combate a incêndio com espuma localizados no convés, são exigidas grades de integridade nível 1 para rotas de acesso e áreas operacionais com sistema de espuma.</p> <p>Nota 5: Para estas aplicações, é necessária a realização dos demais ensaios previstos na norma ABNT NBR 15708-3.</p>		

Fonte: ABNT NBR 15708.

ANEXO B – Análise estatística: Normalidade e homoscedasticidade

Segue uma breve descrição dos aspectos avaliados na análise estatística:

- i) Normalidade: Trata-se da avaliação gráfica da distribuição dos resíduos em torno da curva na qual os valores esperados para normalidade dos dados estão distribuídos. O ideal é que os pontos estejam o mais próximo da curva normal quanto possível. Com isso, aumenta-se a probabilidade de que os resíduos e a variável resposta analisada apresentem distribuição normal de probabilidade. Na verificação da normalidade dos dados obtidos utilizou-se o gráfico de distribuições dos resíduos da variável resposta, neste caso, a força máxima suportada em cisalhamento. O histograma dos resíduos apresenta a distribuição dos mesmos para a variável resposta e os resultados da estatística p dos testes da hipótese nula H_0 de normalidade dos resíduos, isto de acordo com *Lilliefors* e *Shapiro-Wilks*, para $\alpha = 0,05$
- i) Homoscedasticidade (igualdade das variâncias): A avaliação da igualdade das variâncias foi realizada com base no gráfico que apresenta a distribuição dos resíduos em torno dos valores da variável dependente baseada nos valores preditos. Durante a análise da hipótese nula de homoscedasticidade, o ideal é que os resíduos estejam dispersos de maneira uniforme sem tendências perceptíveis ao longo do eixo que representa os valores médios da variável dependente. O teste da hipótese nula H_0 de homoscedasticidade a ser executado considerou que não havia diferença entre as estatísticas analisadas. Não haverá rejeição da hipótese nula quando p apresentar um valor superior a 0,05.

Ainda que não citados neste trabalho, na literatura existem inúmeros métodos estatísticos os quais permitem a comparação entre (SILVA, 2015).