



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE ADESIVO EPÓXI REFORÇADO COM NANOTUBO
DE CARBONO E COMPARAÇÃO PARA JUNTAS COLADAS,
REBITADAS E HÍBRIDAS**

HENRIQUE NUNES PEREIRA OLIVA

Belo Horizonte

2016

Henrique Nunes Pereira Oliva

**ESTUDO DE ADESIVO EPÓXI REFORÇADO COM NANOTUBO
DE CARBONO E COMPARAÇÃO PARA JUNTAS COLADAS,
REBITADAS E HÍBRIDAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Antonio Ferreira Ávila, PhD.

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2016

O48e

Oliva, Henrique Nunes Pereira.

Estudo de adesivo epóxi reforçado com nanotubo de carbono e comparação para juntas coladas, rebitadas e híbridas [manuscrito] / Henrique Nunes Pereira Oliva.- 2016.

xix, 115 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Ferreira Ávila.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices : f. 103-115.

Bibliografia: f. 94-102.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Projetos mecânicos - Teses.
3. Materiais compostos - Teses. 4. Adesivos - Teses. 5. Juntas (Engenharia) - Teses. I. Ávila, Antônio Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

"ESTUDO DE ADESIVO EPÓXI REFORÇADO COM NANOTUBO DE CARBONO E COMPARAÇÃO PARA JUNTAS COLADAS, REBITADAS E HÍBRIDAS"

HENRIQUE NUNES PEREIRA OLIVA

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Projeto Mecânico".

Dissertação aprovada no dia 30 de setembro de 2016.

Por:

Dr. Antônio Ferreira Ávila
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Rudolf Huebner
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Matheus Pereira Porto
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dr. Almir Silva Neto
Centro Federal de Educação Tecnológica de MG/CEFET

Dr. Hermano Nascimento Junior
Fiat Automóveis S/A

À minha família,

José Henrique, Divalda e Katherine.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelas bênçãos que concede a mim e a meus entes queridos.

Aos meus pais, José Henrique e Divalda, pelo apoio e suporte incondicionais e a todo o momento.

Ao meu orientador, professor Antonio Ávila, pela sabedoria compartilhada e paciência imensurável.

Aos colegas e professores da UFMG, sobretudo aqueles dos laboratórios de mecânica de compósitos e de bioengenharia. A equipe de funcionários do PPGMEC, sobretudo a Marina.

Ao professor Marcos Pinotti (*in memoriam*).

A toda equipe do SENAI-MG, instrutores e colegas. Em especial Fábio de Medeiros.

A todos meus familiares e amigos que torceram e me apoiaram na concretização desse trabalho.

Aos amigos de Belo Horizonte, Montes Claros e Janaúba.

Aos colegas e amigos da FIPMOC.

À Coordenação de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento!

“Reach for the stars and if you don't grab 'em, at least you're on top of the world”

Armando Pérez

RESUMO

Uniões estruturais possuem uma grande variedade de configurações em termos de geometria e método de união utilizado para junção dos aderentes. Por isso, é de grande importância o entendimento de suas aplicações, no sentido de combiná-las e compará-las entre si. O presente trabalho contempla uniões estruturais em configurações distintas em termos do método de fixação. São estudadas propriedades mecânicas de uniões adesivas, uniões por fixação mecânica (rebitagem) e uma combinação das duas: união híbrida (adesivada e rebitada). Para as uniões adesivas e híbridas, foi utilizado o sistema epóxi de resina AR300 e endurecedor AH-30/150, como adesivo estrutural, em diferentes situações: puro e nanomodificado pela presença de nanotubos de carbono, com o intuito de investigar o efeito da dispersão dessas nanoestruturas de base carbono na união das juntas. O tipo de junta utilizado para os experimentos é a junta de sobreposição simples. Nanoestruturas são dispersas em diferentes concentrações em adesivo epóxi e o adesivo modificado é testado, tanto para juntas coladas quanto para juntas híbridas. Nanotubo de carbono (CNT) é utilizado em estado bruto nas juntas e sua concentração é variada para o entendimento de suas implicações no método de união. Os resultados apontam para ganhos de até 189% na resistência aparente ao cisalhamento para juntas de sobreposição simples. Nesse caso, somam-se dois efeitos: a adição de CNT e a formação de uma estrutura complementar formada pelo excesso de adesivo nas extremidades.

Palavras-chave: juntas coladas, juntas rebitadas, juntas híbridas, compósitos, CNT.

ABSTRACT

Structural joints have a wide variety of configurations in terms of geometry or the joining method involved within the adherents. Therefore, it is very important to understand their applications in order to combine them and compare between each other. This work includes the study of structural joints in different configurations in terms of the method of attachment. Mechanical properties are examined for adhesive joints, mechanical fastened (riveting) joints and even a combination of both: the hybrid joint (e.g. adhesively bonded and riveted). For the adhesively bonded and hybrid joints, it was applied an epoxy system with AR300 resin and AH-30/150 hardener, structural adhesive was applied in different configurations: blank and nanomodified by the dispersion of carbon nanotube, with the purpose of investigating the effect of dispersing those nanostructures within the joining area. The type of joint applied for the experiments was the single lap joint. Nanostructures were dispersed in different concentrations in epoxy adhesive and the modified adhesive was tested for both hybrid and bonded joints. Carbon nanotube (CNT) is used as grown and its concentrations are varied in order to allow the understanding of its implications in the joining method. The final results revealed improvements of up to 189% in apparent shear strength for the single lap joints with. This result is a combination of two factors: the CNT addition and tapering.

Keywords: bonded joints, riveted joints, hybrid joints, composites, CNT.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Uniões Adesivas.....	4
3.1.1 Adesivos.....	4
3.1.2 Juntas adesivas.....	6
3.1.3 Tipos de juntas adesivas.....	6
3.1.4 Principais características da união adesiva.....	8
3.1.5 Mecanismos de falha.....	9
3.1.6 Dimensionamento de juntas coladas.....	11
3.2 Uniões Mecânicas.....	24
3.2.1 Junta Aparafusada / Rebitada.....	24
3.2.2 Mecanismos de falha.....	25
3.2.3 Dimensionamento da fixação mecânica.....	26
3.3 Nanotecnologia e Adesivos Nanomodificados.....	30
3.3.1 Nanotecnologia.....	30
3.3.2 Nanoestruturas.....	30
3.3.3 Adesivo Nanomodificado e Nanocompósitos.....	31

3.3.4	Nanotubos de Carbono.....	34
4.	METODOLOGIA.....	41
4.1	Materiais e equipamentos.....	41
4.1.1	Materiais.....	41
4.1.2	Equipamentos.....	42
4.2	Procedimento Experimental	45
4.2.1	Preparação das juntas de sobreposição simples	45
4.2.2	Investigação da espessura da camada adesiva	50
4.2.3	Ensaio dos Corpos de Prova.....	51
4.2.4	Análise dos modos de falha	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	Juntas coladas	54
5.1.1	Junta colada sem adição de CNT	54
5.1.2	Junta colada com 0,5% CNT.....	57
5.1.3	Junta colada com 1,0% CNT.....	60
5.1.4	Junta colada com 2,0% CNT.....	62
5.1.5	Comparação geral do grupo de juntas coladas.....	67
5.2	Juntas Rebitadas	70
5.2.1	Ensaio de cisalhamento aparente	70
5.2.2	Comparação – junta colada e junta rebitada	73
5.3	Juntas Híbridas	74
5.3.1	Junta híbrida sem adição de CNT	74
5.3.2	Junta híbrida com 0,5% CNT.....	77

5.3.3	Junta híbrida com 1,0% CNT.....	80
5.3.4	Junta híbrida com 2,0% CNT.....	83
5.3.5	Comparação geral do grupo de juntas híbridas.....	86
5.4	Curvas de modelo analítico para tensões de peel e shear.....	90
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94
	<i>APÊNDICE A</i>	103
	<i>APÊNDICE B</i>	105
	<i>APÊNDICE C</i>	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aeronaves fabricadas com utilização de união adesiva estrutural e compósitos: (a) SAAB 2000; (b) SAAB JAS 39.....	2
Figura 2: Exemplos de possíveis configurações para juntas de sobreposição.	7
Figura 3: Junta de sobreposição simples com união adesiva.	7
Figura 4: Influência do aumento da largura e do comprimento de sobreposição na carga de falha de juntas de sobreposição simples.	8
Figura 5: Distribuição de tensão em uma junta de sobreposição simples submetida a cisalhamento.	9
Figura 6: Exemplos de falha por adesão e coesão.	10
Figura 7: Tipos de carregamentos aplicados às juntas coladas.	12
Figura 8: Deformação em junta de sobreposição simples carregada, com aderentes rígidos.	15
Figura 9: Deformação em junta de sobreposição simples carregada, com aderentes elásticos.	16
Figura 10: Representação do fator de momento de flexão do modelo de Goland e Reissner.	17
Figura 11: Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da camada adesiva quando a tensão nula é verificada nas extremidades.	22
Figura 12: Junta de sobreposição simples modificada com a adição de <i>tabs</i> para maior centralização das cargas.	23
Figura 13: Gráfico de eficiência da junta, para juntas coladas de sobreposição simples com adesivo frágil.	23
Figura 14: Representação de casos de aplicação de fixação mecânica.	25
Figura 15: Modos de falha. (a) Falha total da seção; (b) Esmagamento; (c) Cisalhamento da seção; (d) Cisalhamento do parafuso.	26
Figura 16: Rebite de repuxo ou rebite POP.	26

Figura 17: Distâncias entre rebites. Tendo Q como carga aplicada à junta e d diâmetro do furo do rebite.....	27
Figura 18: Tipos de rebite: (a) de cabeça redonda; (b) de cabeça escareada.	29
Figura 19: Representação esquemática de reforços nanométricos.....	30
Figura 20: Tipos de nanopartículas e suas relações entre dimensão e superfície específica.	32
Figura 21: Representação esquemática dos tipos de nanoestruturas.....	33
Figura 22: Formas alotrópicas do carbono que podem ser obtidas a partir do grafeno. Da esquerda para a direita: Fulerenos, Nanotubo e Grafite.....	35
Figura 23: Esquema ilustrativo de um nanotubo de carbono, formado a partir de uma camada composta por anéis aromáticos, que se enrola entre si dando origem a uma estrutura tubular.	36
Figura 24: Esquema ilustrativo para nanotubo de parede múltipla.....	36
Figura 25: Diferentes tipos de nanotubos de carbono.....	37
Figura 26: Efeito da concentração de CNT na taxa de liberação de energia de deformação em adesivo reforçado com CNT.	39
Figura 27: Micrografia Eletrônica de Transmissão de adesivo reforçado com 2% em peso de CNT. São destacadas regiões contendo aglomerados (<i>agglomerates</i> , em inglês).	40
Figura 28: Dispositivo utilizado na montagem e colagem dos corpos de prova. (a) Dispositivo; (b) Projeto em programa 3D (SILVA NETO, 2011).	43
Figura 29: Colagem dos <i>Tabs</i> : (a) Grampo C; (b) Posicionamento para colagem.	43
Figura 30: Modelo de junta adesiva utilizada, com dimensões em milímetros.	45
Figura 31: Modelo de junta rebitada (e híbrida), com dimensões em milímetros.	46
Figura 32: Posicionamento dos CPs com a utilização dos dispositivos de colagem do Laboratório de Compósitos da UFMG.	49
Figura 33: CP antes e depois da remoção do <i>tapering</i>	49
Figura 34: Cálculo da espessura da camada adesiva, com auxílio do programa ImageJ.....	50

Figura 35: Corpo de prova posicionado para ensaio na Máquina de ensaios universal.....	51
Figura 36: Previsão do modo de falha a partir das dimensões dos aderentes.	52
Figura 37: Medição e caracterização do modo de falha para o CP 3 - junta híbrida 1% p/p CNT....	53
Figura 38: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 1 (0,0% CNT) – juntas coladas.....	55
Figura 39: Modos de falha das juntas coladas sem adição de CNT.....	57
Figura 40: Curvas de juntas coladas, para corpos de prova do grupo 2 (0,5% CNT).....	58
Figura 41: Modos de falha das juntas coladas com 0,5% CNT.	60
Figura 42: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 3 (1,0% CNT) – juntas coladas.....	61
Figura 43: Modos de falha das juntas coladas com 1,0% CNT.	62
Figura 44: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 4 (2,0% CNT), para juntas coladas.....	63
Figura 45: Modos de falha das juntas coladas com 2,0% CNT.	65
Figura 46: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas coladas do grupo 4.	66
Figura 47: Representação de medição da área correspondente à presença de <i>tapering</i>	66
Figura 48: Resultados de força para juntas coladas – Carga máxima.....	68
Figura 49: <i>Box Plot</i> dos dados de força máxima em corpos de prova de juntas coladas.....	69
Figura 50: <i>Box Plot</i> dos dados de deslocamento na força máxima para corpos de prova de juntas coladas.....	70
Figura 51: Curvas de força por deslocamento para corpos de prova de juntas rebitadas.	71
Figura 52: Modos de falha – juntas rebitadas.	72
Figura 53: Comparação de CPs para junta rebitada e junta colada sem CNT. CP3 do grupo das rebitadas e CP5 do grupo das coladas.....	73

Figura 54: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 1 (0,0% CNT), para juntas híbridas.....	75
Figura 55: Modos de falha – juntas híbridas sem adição de CNT.	77
Figura 56: Curvas de força por deslocamento para corpos de prova do grupo 2 (0,5% CNT), para juntas híbridas.	78
Figura 57: Modos de falha – juntas híbridas com 0,5% CNT.....	79
Figura 58: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 3 (1,0% CNT), para juntas híbridas.....	81
Figura 59: Modos de falha – juntas híbridas com 1,0% CNT.....	82
Figura 60: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 4 (2,0% CNT), para juntas híbridas.....	83
Figura 61: Modos de falha – juntas híbridas com 2,0% CNT.....	85
Figura 62: Resultados de força para juntas híbridas – Carga máxima.....	87
Figura 63: Curva força-deslocamento para junta híbrida do grupo 1 (CP6).....	88
Figura 64: <i>Box Plot</i> dos dados de força máxima em corpos de prova de juntas híbridas.....	89
Figura 65: <i>Box Plot</i> dos dados de deslocamento na força máxima para corpos de prova de juntas híbridas.....	89
Figura 66: Distribuição de tensões de cisalhamento e arrancamento calculadas pelo modelo analítico de Hart-Smith (1973).	90
Figura 67: Transferencia de carga e distribuição de tensão para juntas coladas.....	91
Figura 68: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas coladas.....	103
Figura 69: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas Híbridas (antes de serem rebitadas).....	104
Figura 70: Modos de falha das juntas coladas.	105
Figura 71: Modos de falha – juntas rebitadas.	106

Figura 72: Modos de falha – juntas híbridas.....	107
Figura 73: ANOVA dos dados de força de ruptura para juntas coladas.	108
Figura 74: ANOVA dos dados de deslocamento para juntas coladas.....	110
Figura 75: ANOVA dos dados de força de ruptura para juntas híbridas.	112
Figura 76: ANOVA dos dados de deslocamento para juntas coladas.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modos de falha para materiais compósitos.	11
Tabela 2: Propriedades mecânicas de nanocompósitos reforçados.	34
Tabela 3: Dados típicos Sistema epóxi resina AR-300 com endurecedores AH-30 e AH-150.	41
Tabela 4: Concentração de nanoestruturas nos corpos de prova.	46
Tabela 5: Condição ambiente na colagem dos CPs.	47
Tabela 6: Exemplo de sistema alfanumérico adotado para identificação dos CPs.	48
Tabela 7: Espessuras de camada adesiva – juntas sem CNT.	55
Tabela 8: Resultados dos ensaios das juntas coladas sem adição de CNT.	56
Tabela 9: Espessuras de camada adesiva – juntas com 0,5% CNT.	57
Tabela 10: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 0,5% CNT.	59
Tabela 11: Espessuras de camada adesiva – juntas com 1,0% CNT.	60
Tabela 12: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 1,0% CNT.	61
Tabela 13: Espessuras de camada adesiva – juntas com 2,0% CNT.	63
Tabela 14: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 2,0% CNT.	64
Tabela 15: Subgrupos do grupo 4.	65
Tabela 16: Áreas em milímetros quadrados.	67
Tabela 17: Resultados dos ensaios das juntas coladas.	67
Tabela 18: Análise ANOVA com teste de Tukey para resultados de força máxima e deslocamento na força máxima para juntas coladas.	69
Tabela 19: Resultados dos ensaios das juntas rebitadas.	72
Tabela 20: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas sem CNT.	74
Tabela 21: Resultados dos ensaios das juntas híbridas sem adição de CNT.	76

Tabela 22: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 0,5% CNT.	77
Tabela 23: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 0,5% CNT.	79
Tabela 24: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 1,0% CNT.	80
Tabela 25: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 1,0% CNT.	81
Tabela 26: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 2,0% CNT.	83
Tabela 27: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 2,0% CNT.	84
Tabela 28: Resultados dos ensaios das juntas híbridas.	86
Tabela 29: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – força máxima - Juntas coladas	109
Tabela 30: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – deslocamento na força máxima - Juntas coladas	111
Tabela 31: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – Força máxima - Juntas híbridas.....	113
Tabela 32: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – deslocamento na força máxima - Juntas híbridas.....	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de variância
ADH	Falha adesiva
ASTM	<i>American Society for Testing Materials</i>
CNT	Nanotubo de carbono
COH	Falha coesiva
CP	Corpo de prova
CVD	Deposição química de vapor
MWCNT	Nanotubo de carbono de múltiplas camadas
SLJ	<i>Single-lap joint</i>
SWCNT	Nanotubos de carbono de parede única
<i>Tab</i>	Reforço nas extremidades dos corpos de prova
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{F}	Carga por unidade de largura
b	Largura da região de sobreposição colada
E	Módulo de elasticidade ou de Young
F	Força
G_c	Módulo de elasticidade do adesivo
l	Comprimento da região de sobreposição colada
M	Momento Fletor
t_i	Espessura do aderente
V	Força de cisalhamento
η	Espessura da camada adesiva
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante

1. INTRODUÇÃO

Em muitas situações é difícil, às vezes impossível, a construção de uma estrutura de grande porte em uma única peça. Algumas das razões para isso são o alto custo de produção e limitações na geometria do objeto a ser construído. De acordo com Avila *et al.* (2004), uma solução para essas situações, é a fabricação de pequenos componentes e posterior montagem. Para que essa montagem seja realizada, é preciso a utilização de juntas ou uniões. Silva Neto *et al.* (2013) comentam que alguns dos processos de união mais comuns envolvem os conceitos de juntas adesivas ou rebitadas. Por apresentarem boa gama de aplicações em engenharia, as formas de união por fixadores mecânicos e adesivos estruturais estão entre as principais soluções para união de componentes. No entanto, a utilização exclusiva de elementos de fixação implica em concentração de tensões, enquanto as uniões por uso de adesivo estrutural dependem da resistência do adesivo e da área de colagem.

Segundo De Sousa (2010), as juntas adesivas constituem um método de união promissor e em desenvolvimento. Algumas das vantagens que justificam essa afirmação são observadas quando essas juntas são comparadas a outros métodos mais tradicionais de união. Juntas adesivas apresentam distribuições relativamente uniformes de tensão ao longo da superfície ligada, permitindo boa rigidez, bem como transmissão de carga e resistência à fadiga. Fatores esses que podem estar relacionados a uma redução de peso da estrutura envolvida, amortecimento, ligação de materiais dissimilares, conservação do estado da estrutura envolvida por evitar furos ou cordões de soldadura, além de possível redução de custos de produção. Segundo Zeng (2001), um bom exemplo da importância da união por adesivo estrutural está na indústria aeronáutica, com aeronaves como a SAAB 2000, como pode ser visto na Figura 1a tendo grande parte de sua estrutura unida por uniões adesivadas, em larga escala.

Uma das configurações mais comuns de juntas adesivadas é a de sobreposição simples. De acordo com Da Silva *et al.* (2008), o extenso uso das juntas de sobreposição simples é devido aos seguintes fatores: facilidade de produção, baixo custo e simplicidade de projeto. No entanto, as juntas de sobreposição simples carecem de melhoria de suas propriedades mecânicas. A introdução dos materiais compósitos¹ fez com que a capacidade de carga dessas juntas fosse aumentada. A melhoria de estabilidade química e resistência à fadiga das juntas de sobreposição simples são

¹ Para maiores detalhes ver o livro de Kaw (2006)

consequências do uso de materiais compósitos (GAY *et al.*, 2003 e MAZUMDAR, 2002). A aplicação de materiais compósitos à uniões adesivadas tem como objetivos o aumento da capacidade de carga, mas também evitar a formação de concentradores de tensão.

A perfuração de estruturas para o intento de uní-las, com fixadores mecânicos, pode causar grandes concentrações de tensão ao redor da área do furo e isso pode comprometer a resistência da junta (BUDYNAS; NISBETT, 2011; CHAKHERLOU; VOGWELL, 2003 *apud* FALLAHNEZHAD *et al.* 2015). Contudo, juntas híbridas do tipo rebitadas e coladas podem apresentar grandes vantagens, como mencionado por Moroni *et al.* (2010); para eles, essa configuração híbrida obteve resultados superiores à outros tipos de união, comparados em termos de resistência estática e à fadiga. Exemplos dos usos de uniões adesivadas e materiais compósitos são os aviões SAAB 2000 e SAAB JAS 39, mostrados nas Figura 1a e Figura 1b.



Figura 1: Aeronaves fabricadas com utilização de união adesiva estrutural e compósitos:

(a) SAAB 2000; (b) SAAB JAS 39.

(SAAB AIRCRAFT, 2016)

O presente estudo está alinhado à crescente demanda no uso de adesivos estruturais, em razão de vantagens dos adesivos quando comparados a outras formas de união ou reparo. Além disso, é importante por apresentar um comparativo com o método de fixação mecânica, extensivamente utilizado e, por vezes, indispensável. O trabalho visa estudar melhoria para efeito de adesivo estrutural, em juntas coladas e híbridas, por meio da adição de nanotubos de carbono.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Entender, por meio de análise de regiões de falha, o efeito da dispersão de nanoestruturas de nanotubo de carbono não funcionalizado em adesivo de base epóxi de baixa viscosidade, para diferentes configurações de uniões estruturais (união por fixador mecânico, união colada e híbrida). Além de relacionar a resistência apresentada para os tipos de junta, com variáveis como a espessura do adesivo, seus modos de falha e concentração de nanoestruturas utilizadas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência de Nanotubos de Carbono (CNT) na resistência ao cisalhamento aparente de juntas adesivas de sobreposição simples;
- Analisar a influência dos CNTs nos modos de falha de juntas de sobreposição simples;
- Investigar o comportamento mecânico (capacidade de carga e modos de falha) de uniões híbridas (rebitadas e coladas) com e sem a presença de CNTs;
- Comparar os resultados das juntas adesivas e híbridas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 *Uniões Adesivas*

3.1.1 Adesivos

Um adesivo pode ser definido como um material o qual vem a ser aplicado à superfície de outros materiais e pode uni-los, para que resistam à separação após a consolidação (TONG; STEVEN, 1999). Segundo Bueno (2002), há dois tipos fundamentais de união adesiva: a união adesiva estrutural e a união adesiva não estrutural. Uma união adesiva estrutural apresenta alta resistência mecânica, permitindo que o aderente possa ser tensionado próximo ao seu limite de escoamento sem que haja falha da junta. Para realizar essa função, os adesivos estruturais devem ser capazes de transmitir esforços sem a perda de sua própria integridade, dentro dos limites de projeto. Já a união adesiva não estrutural é utilizada para outros propósitos, como selamento contra vazamentos de fluidos ou amortecimento de vibrações.

A união adesiva é adequada, se não o melhor caminho, para unir materiais similares ou dissimilares tais como: metais com polímeros, cerâmicas com polímeros e metais com compósitos de matriz orgânica, entre outros (ÁVILA; BUENO, 2004). A união adesiva ainda apresenta outras vantagens, principalmente quando comparada a outros métodos de união. Algumas dessas vantagens são citadas por Ebnesajjad (2008 apud DA CRUZ, 2013):

- Distribuição uniforme de tensões;
- Capacidade de unir materiais finos ou espessos independentemente da forma;
- Capacidade de unir materiais dissimilares;
- Minimiza ou previne a corrosão galvânica entre materiais dissimilares;
- Apresenta alta resistência à fadiga;
- Produzem juntas com contornos suaves;
- Isola ou permite a transferência de calor e condução de eletricidade;

- O calor requerido para a cura das juntas é geralmente muito pequeno para reduzir a resistência das partes metálicas;
- Amortece vibrações e absorve choques;
- Produzem juntas com uma boa relação entre resistência e peso;
- O processo de união é realizado de maneira mais rápida e ou com menor custo que as fixações mecânicas;
- Existência de uma maior área de transmissão de carga implica um maior potencial de suportar cargas.

As desvantagens da união adesiva estão, principalmente, no cuidadoso processo de fabricação e controle de qualidade das mesmas (SILVA NETO, 2011). Dentre as desvantagens das uniões adesivas, Ebnesajjad (2008 apud DA CRUZ, 2013) cita:

- Não permite a inspeção visual da área de colagem;
- Preparação cuidadosa da superfície de colagem é necessária para obter-se uma união durável;
- Extenso período de cura pode ser necessário quando a mesma é realizada a baixas temperaturas;
- Dispositivos de fixação, prensas, fornos e autoclaves, geralmente não utilizados nos outros métodos de fixação são necessários neste caso;
- A temperatura de serviço fica limitada aproximadamente em 177 °C na maioria dos casos. Adesivos especiais, geralmente com custo mais elevado, são disponíveis para uso até 371 °C;
- Severo controle de processo é necessário, foco na limpeza é necessário para a maioria dos adesivos;
- A vida útil da junta colada depende do ambiente ao qual a mesma se encontra exposta;
- Adesivos naturais ou de origem vegetal estão sujeitos ao ataque de bactérias, mofos, roedores e vermes;
- A exposição a solventes usados na limpeza pode causar problemas de saúde.

3.1.2 Juntas adesivas

Segundo Zeng (2001), juntas ou uniões adesivas estruturais podem ser consideradas como uma classe de juntas que são formadas pela aplicação de adesivos estruturais entre dois ou mais substratos ou aderentes. Essas juntas podem ser exclusivamente adesivadas ou possuírem algum elemento fixador, como rebite ou parafuso. Além disso, elas têm a capacidade de sustentar a aplicação de cargas externas de grande magnitude. Juntas adesivas são, frequentemente, capazes de suportar carregamentos estáticos ou cíclicos por longos períodos de tempo, antes que se observe algum efeito indesejado na capacidade de suportar as cargas impostas, como fratura ou rompimento dos aderentes (DA CRUZ *et al.*, 2013).

O objetivo de projeto para uma junta adesivamente unida é obter máxima capacidade de carga para uma dada área de colagem. Para tanto, deve-se seguir alguns preceitos básicos, entre eles o tipo de junta e os materiais a serem unidos. É importante notar que a união adesiva atua sobre áreas e não sobre pontos discretos. Desta forma, as juntas devem ser projetadas com o objetivo de minimização da concentração de tensões e maximização da área de colagem, quando possível (NETO, 2011).

Segundo Silva Neto (2011), além do critério de desempenho (resistência mecânica), a seleção de um projeto de junta é influenciada entre outros fatores, pelas limitações relacionadas à facilidade de produção e restrições no custo de produção. Por fim, Silva Neto cita alguns fatores principais que são determinantes quanto à resistência de uma junta colada:

- Geometria da junta;
- Propriedades mecânicas do adesivo e do aderente;
- Tensões residuais internas geradas durante o processo de colagem;
- Grau de contato interfacial alcançado através da aplicação e molhamento do adesivo;
- Tipo de carregamento com o qual a junta é submetida.

3.1.3 Tipos de juntas adesivas

A literatura apresenta diferentes tipos de juntas coladas, também chamadas de juntas de sobreposição. Em geral, as juntas de sobreposição podem variar conforme sua aplicação estrutural.

Elas variam no tipo de aderente utilizado na união, na quantidade de membros unidos, no tipo de fixação (p. ex. fixador mecânico, adesivo ou soldagem), definitiva ou não, dos membros utilizados e, ainda, na possibilidade de combinação de diferentes tipos de fixação existentes.

Os projetos de juntas de sobreposição são dos mais variados. Critérios como o estudo da eficiência da união, seja para testar o adesivo, como para conhecer os aderentes ou mesmo a aplicação final, podem determinar a melhor configuração de junta colada. A Figura 2 apresenta alguns dos principais tipos de juntas de sobreposição.

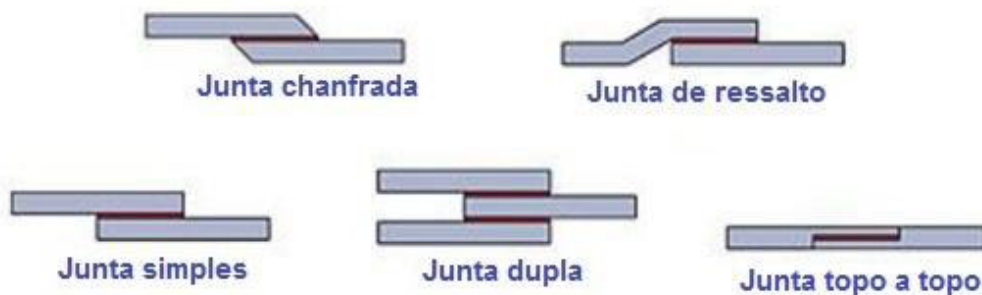


Figura 2: Exemplos de possíveis configurações para juntas de sobreposição.

(DEWOLFE, 2010, adaptado)

Segundo Kulak *et al.* (1987), a junta de sobreposição simples, mais conhecida internacionalmente como *single-lap joint* (Figura 3) é a mais utilizada dentre as juntas adesivas para testes e experimentos, devido a sua simplicidade, facilidade de fabricação e montagem, eficiência e baixo custo.

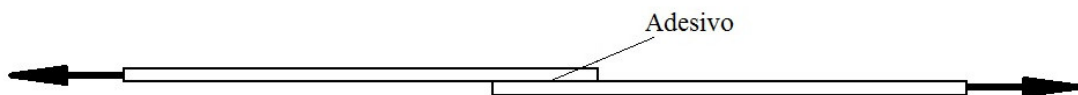


Figura 3: Junta de sobreposição simples com união adesiva.

3.1.4 Principais características da união adesiva

De acordo com Ebnesajjad (2008), a união adesiva mais indicada ou ideal seria a que, quando submetida a qualquer condição de carregamento, o adesivo seria solicitado na direção em que possui maior resistência. Além disso, Petrie (2000) menciona que a maneira mais efetiva de aumentar a resistência de uma junta colada é por meio do aumento da largura da colagem, pois as extremidades de uma junta suportam uma parcela maior do carregamento do que o interior. Esse fato pode ser visualizado pelo gráfico da Figura 4 e pela ilustração da Figura 5.

É possível comparar as influências relativas do aumento de largura e aumento de comprimento sobreposto, relacionados à carga de falha, pela visualização da Figura 4. Para um mesmo comprimento de sobreposição, com o aumento da largura da junta, aumenta-se proporcionalmente a carga de falha. Em contrapartida, para uma conservação da largura, a força suportada cresce somente até certo ponto limite, com a elevação do comprimento de sobreposição. Portanto, ambos os fatores (largura e comprimento de sobreposição) exercem influencia no sentido de elevar a carga de falha, contudo, o comprimento de sobreposição se restringe à um valor máximo, sendo esse o limite para o aumento na força suportada.

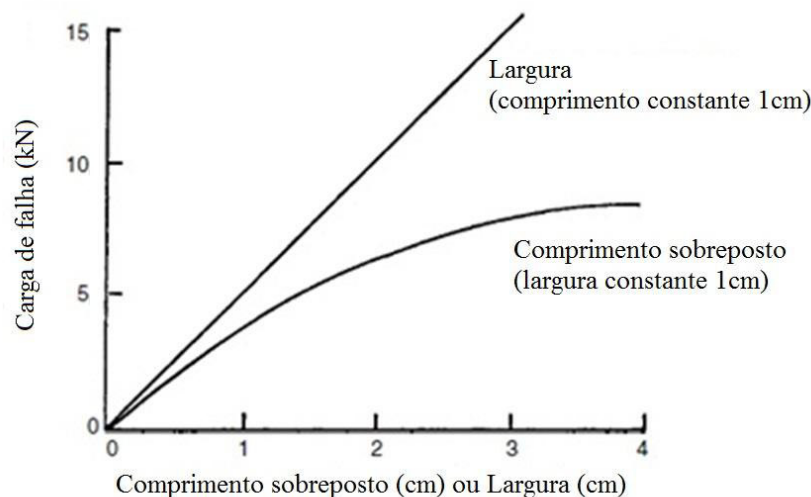


Figura 4: Influência do aumento da largura e do comprimento de sobreposição na carga de falha de juntas de sobreposição simples.

(EBNESAJJAD, 2008, adaptado)

A Figura 5 ilustra a distribuição de tensões da camada adesiva, para uma junta *single-lap*, evidenciando a concentração da tensão nas extremidades da mesma e, contrastando, níveis de tensão comparativamente menores, próximo ao centro. Com isso, é possível concluir que a resistência mecânica da junta pode ser aumentada com o aumento da região de sobreposição da mesma. Essa evidência, apresentada por Petrie (2000) e representada na Figura 5 está alinhada ao exposto por Ebnesajjad (2008) na Figura 4.

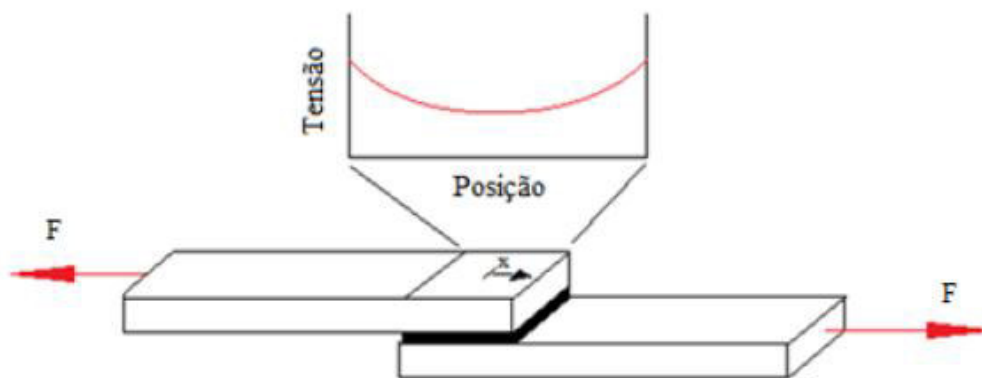


Figura 5: Distribuição de tensão em uma junta de sobreposição simples submetida a cisalhamento.
(PETRIE, 2000, adaptado)

Uma outra característica importante é a espessura da camada adesiva. Da Silva *et al.* (2006) mencionam que a camada adesiva entre 0,05 e 0,5mm seria a mais adequada para juntas *single-lap*, visto que espessuras maiores poderiam facilitar a ocorrência de vazios e microfissuras. Contudo, em seu trabalho, Silva *et al.* (2006) admitem que os resultados podem variar conforme a natureza do adesivo, seja ela dúctil ou frágil, além do tipo de carregamento aplicado (cisalhamento, delaminação, clivagem etc.).

3.1.5 Mecanismos de falha

Petrie (2000) explica que os adesivos atuam com base em sua propriedade de adesão e, essa adesão, é resultante das interações de forças intermoleculares entre duas substâncias distintas. Da Cruz (2013) explica que o conceito de adesão difere do conceito de coesão, apesar de ambos

envolverem forças de *Van der Waals*. Para o caso de coesão, a interação das forças intermoleculares é atuante na mesma substância.

Juntas coladas podem falhar por adesão, coesão ou por alguma combinação dos dois mecanismos, como é ilustrado na Figura 6. A falha adesiva é uma falha interfacial da colagem entre o adesivo e o aderente. Já a falha coesiva, acontece quando a fratura ocorre no adesivo, de maneira que uma camada de adesivo permanece em ambos os aderentes. Quando o aderente falha antes do adesivo e a área de colagem permanece intacta, é dado o nome de falha coesiva do aderente (PETRIE, 2000).

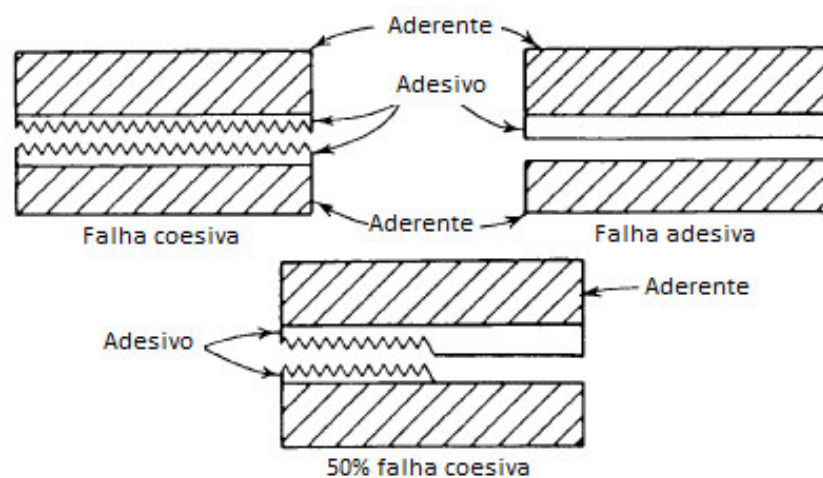


Figura 6: Exemplos de falha por adesão e coesão.

(PETRIE, 2000, adaptado)

Da Cruz (2013) lembra que para o caso de materiais poliméricos reforçados com fibras, há uma norma, a D5573-99 (2012), da ASTM *International*, que define tipos de falhas possíveis. A Tabela 1 ilustra esses modos de falha.

Tabela 1: Modos de falha para materiais compósitos.
(DA CRUZ, 2013 *apud* SILVA NETO, 2011, adaptado)

Abreviação	Modo de falha	Descrição	Representação
ADH	Falha adesiva	Ruptura da união adesiva na qual a separação parece ocorrer na interface entre adesivo e aderente.	
COH	Falha coesiva	Ruptura da união adesiva na qual a separação ocorre no adesivo.	
TLC	Falha coesiva de fina camada	Ruptura da união adesiva na qual a separação ocorre no adesivo, porém muito próximo à interface adesivo/aderente.	
LFT	Falha de rompimento leve da fibra	Ruptura exclusivamente da matriz da primeira camada do aderente.	
FT	Falha de rompimento da fibra	Ruptura no aderente com ruptura de camadas de fibra	
SB	Falha na haste do aderente	Ruptura do aderente no corpo de prova fora da região colada.	

3.1.6 Dimensionamento de juntas coladas

De acordo com Bueno (2002), o projeto de juntas deve seguir alguns preceitos básicos, como escolha dos materiais utilizados como aderentes e o tipo de junta, entre outras questões. Bueno ainda comenta quanto à importância de se maximizar a área colada, quando possível, devido ao fato de uniões adesivas atuarem sobre áreas em detrimento de pontos específicos. Por fim, critérios como resistência mecânica, facilidade de produção das juntas, custos envolvidos no processo e aparência final, podem ser influentes em um projeto de junta.

Bueno (2002) lista os fatores de maior significância para a resistência de juntas coladas:

- Geometria da junta;
- Tipo de carregamento ao qual a junta é submetida;

- Propriedades mecânicas, do adesivo e do aderente;
- Tensões residuais internas geradas durante o processo;
- Grau de contato interfacial alcançado por meio da aplicação, molhamento e espalhamento do adesivo na região de sobreposição.

3.1.6.1 Campos de tensões nas juntas

Segundo Da Cruz (2013), as juntas coladas podem ser submetidas a cinco tipos de carregamentos e várias combinações desses carregamentos podem ser encontradas nas aplicações dos adesivos. Os carregamentos são compressão, tração, cisalhamento, delaminação (*peel*) e clivagem. É possível visualizar uma representação de cada um desses cinco carregamentos na Figura 7.

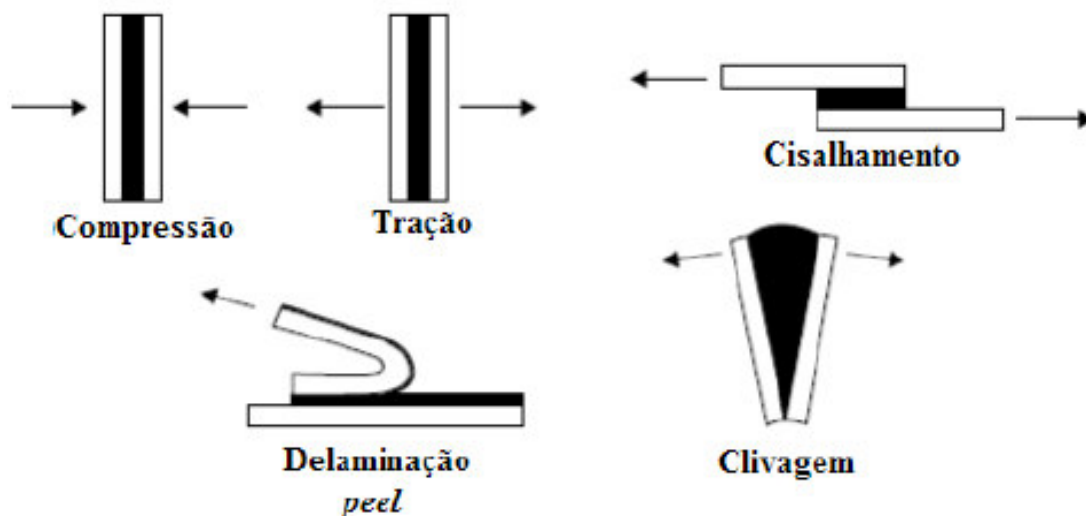


Figura 7: Tipos de carregamentos aplicados às juntas coladas.

(DA CRUZ, 2013, adaptado)

Bueno (2002) diferencia os cinco tipos de tensões em juntas coladas da seguinte forma:

- 1) Compressão: tipo de esforço raramente evidenciado na prática e, dentre os tipos de tensões aos quais a junta adesiva pode ser submetida, é a última a ocasionar falha.

- 2) Tração: para a situação de existir somente tração pura, as tensões nas superfícies do adesivo e aderente seriam uniformemente distribuídas. Este tipo de tensão pode estar intimamente relacionado às tensões do tipo clivagem e *peel* ou delaminação, pois deslocamentos da junta ou flexão dos aderentes podem desencadear distribuição desuniforme ou não linear, o que configura surgimento de tensões de *peel* ou clivagem.
- 3) Cisalhamento: é o tipo de esforço mais comum encontrado para juntas coladas. Quando ocorre isoladamente, o esforço é paralelo ao plano da junta e tenta separar os elementos por deslizamento de planos. É, ainda, imposta uma tensão uniforme pela área inteira colada, o que permite utilização de toda a área unida para suportar o esforço aplicado.
- 4) Delaminação: distribuição complexa envolvendo tensões normal e cisalhante no adesivo quando uma força é aplicada na extremidade de um dos aderentes, flexível, no sentido de retirá-lo.
- 5) Clivagem: também relacionada à complexa combinação de tensões normal e cisalhante, quando a força é aplicada na extremidade de uma junta constituída por aderentes rígidos, no sentido de tentar separá-los.

3.1.6.2 Análise de tensões

A análise de tensões envolve o estudo da distribuição de tensões na junta colada, bem como entendimento das deformações associadas às tensões. Essas informações são de grande valia por auxiliarem o projetista, quanto ao conhecimento da resistência mecânica e vida útil da estrutura, fatores que podem estar relacionados à segurança do processo. A análise, para juntas coladas, pode ser complexa, por envolver distintas variáveis, como por exemplo, concentradores de tensões, relacionados a descontinuidades geométricas, interface entre adesivo e aderentes e, em casos como o do presente estudo, presença de elemento de fixação mecânica. Elementos de fixação mecânica podem estar associados à concentração local de tensões.

Relacionado ao início do processo de análise de tensões de uma junta colada, é importante definir o tipo de geometria da junta, conhecer as propriedades dos materiais empregados em sua fabricação, saber as condições de operação e os esforços aplicados no processo. Bueno (2002) classifica as técnicas de análise de tensões em três grupos principais e complementares entre si, a saber:

1. Análise experimental das tensões;
2. Formulação analítica;
3. Análise numérica.

Segundo Gomes e Vaz (2004), consiste em determinar o estado de tensão em pontos arbitrários de uma estrutura, a partir de condições como a geometria e o tipo de solicitação, entre outras. Dá-se pela aplicação de carregamentos arbitrados no corpo de prova e a tensão é obtida de forma indireta por meio de levantamento do campo de deformações, através da medição dos deslocamentos. Já a formulação analítica visa, a partir de certo número de simplificações ou suposições, obter expressões simplificadas para o comportamento mecânico da junta e, ao mesmo tempo, aproximadas. Segundo Sousa (2016), as técnicas analíticas na análise de juntas adesivadas, geralmente envolvem pressupostos para a simplificação dos modelos na obtenção da solução para o problema. Um exemplo de simplificação é assumir o adesivo como tendo um comportamento linear elástico, o que comumente não representa o comportamento real dos adesivos. As hipóteses simplificativas utilizadas nesses métodos, muitas vezes, são justificadas pela vantagem na rapidez da análise. Para se obter um modelo mais detalhado é possível recorrer a métodos numéricos. A solução numérica das equações constitutivas do modelo representativo do fenômeno físico permite conhecer a distribuição das variáveis de interesse, de forma rápida e eficiente. Bueno (2002) menciona que esse tipo de análise pode reduzir custos de projeto e fabricação de juntas adesivadas. O método dos elementos finitos (MEF) tem se destacado na engenharia, devido aos avanços computacionais dos últimos anos. Esses avanços permitiram a análise facilitada de variadas geometrias de juntas coladas, além do estudo de diferentes tipos de adesivos (BANEJA; SILVA, 2009).

3.1.6.3 Formulações analíticas

A junta do tipo simples de sobreposição, empregada neste trabalho, deve ser analisada em detalhe. O tratamento analítico visa propiciar uma compreensão da distribuição de tensões, que envolva tanto a camada adesiva quanto os aderentes. Fatores como cargas mecânicas e comprimento relativo da sobreposição, serão levados em conta.

A literatura mostra que a análise de tensões para juntas do tipo de sobreposição simples, vem sendo continuamente desenvolvida ao longo das últimas sete décadas. É possível constatar o desenvolvimento de modelos teóricos, experimentais e numéricos com o intuito de se determinar

com precisão o campo de tensões dessas juntas, designadas *single-lap*. Os próximos itens relacionam resultados analíticos para juntas adesivamente unidas.

1) Análise linear elástica

A análise mais simples, leva em consideração o tipo de junta *single-lap*. Nessa análise, o adesivo se deforma somente em cisalhamento, enquanto os aderentes são considerados rígidos (DA SILVA *et al.*, 2009). A tensão de cisalhamento no adesivo, τ , é constante ao longo da região de sobreposição, como ilustrado na Figura 8, e é dada pela equação Eq. 1:

$$\tau = \frac{F}{bl} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde F é a carga aplicada (em Newtons), b é a largura da junta e l é o comprimento de sobreposição da região colada (ambos em milímetros).

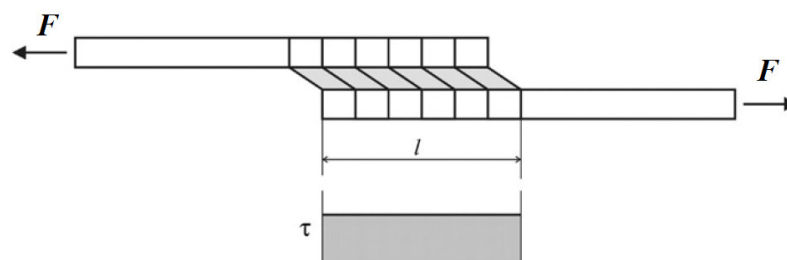


Figura 8: Deformação em junta de sobreposição simples carregada, com aderentes rígidos.

(DA SILVA *et al.*, 2009, adaptado)

É possível notar que o valor da tensão de cisalhamento pode ser interpretado como valor de tensão médio atuante na camada de adesivo. A partir de tal análise, pode ser possível a comparação de adesivos distintos para diversas condições de serviço, contudo, devido à grande simplificação envolvida, não é tida como realística e não representa a real distribuição de tensões ao longo da região colada.

2) Análise de Volkersen

Um dos primeiros modelos analíticos de juntas de sobreposição simples foi proposto por Volkersen (1938). Essa análise introduz o conceito de cisalhamento diferencial, que é ilustrado na Figura 9. Tal distribuição de tensões considera o aderente como flexível e, com isso, implica diferentes valores de tensão que variam do ponto A ao ponto B (Figura 9). A tensão é máxima no ponto A, decresce até a região média e cresce até o ponto B, o que implica a existência de redução da deformação ao longo da região de sobreposição. Essa característica mostra distribuição de tensões não uniformes: a tensão cisalhante é máxima nas extremidades e se aproxima de zero na região média. No entanto, Volkersen não foi capaz de avaliar a concentração de tensões nas extremidades desse tipo de junta.

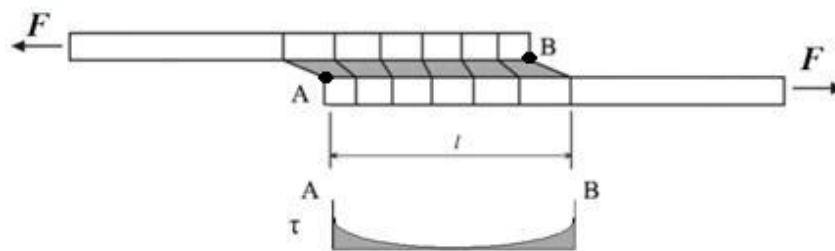


Figura 9: Deformação em junta de sobreposição simples carregada, com aderentes elásticos.

(ADAMS *et al.*, 1997, adaptado)

Tong e Steven (1999) foram capazes de quantificar o fator de concentração de tensão, representado pela razão entre a tensão máxima de cisalhamento, observada na extremidade da junta, e a tensão média observada na equação Eq. 2.

$$\Phi = \frac{\delta}{\varepsilon} \left(\frac{2\varepsilon^2 - 1 + \cosh(2\varepsilon\delta)}{\sinh(2\varepsilon\delta)} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que,

$$\delta = \sqrt{\frac{l^2 G_c}{E_2 t_2 \eta}} \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{E_1 t_1 + E_2 t_2}{2 E_1 t_1}} \quad \text{Eq. 3}$$

E_1 e E_2 são, respectivamente, os módulos de elasticidade para os aderentes superior e inferior, em MPa; G_c é o módulo de cisalhamento do adesivo, em MPa; t_1 e t_2 são as espessuras dos aderentes superior e inferior, respectivamente, em mm; η representa a espessura da camada adesiva, em mm; l é o comprimento da região de sobreposição, em mm.

3) Análise de Goland e Reissner

Goland e Reissner (1944) foram os primeiros a levar em consideração o efeito da excentricidade, característico da deformação das juntas simples de sobreposição, quando submetidas ao esforço de cisalhamento aparente por tração (Figura 10).

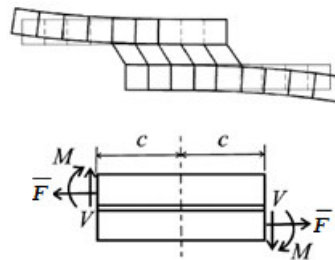


Figura 10: Representação do fator de momento de flexão do modelo de Goland e Reissner.

(DA SILVA *et al.*, 2009, adaptado)

A excentricidade no caminho da carga das juntas *single-lap* resulta em grandes deflexões do aderente e da região de sobreposição, ocasionando a presença de um momento fletor (M), além de uma força de cisalhamento (V), que se somam à carga aplicada à junta, por unidade de largura (\bar{F}), como mostrado na Figura 10. Devido ao momento fletor, a junta se rotaciona, alternando a direção da linha ao longo da qual a carga é aplicada. À medida que a junta é rotacionada, a linha de carga se move aproximando para a linha de centro dos aderentes, reduzindo-se o valor do momento (BUENO, 2002).

Goland e Reissner (1944) utilizaram um fator de momento fletor, k , e um fator de força de cisalhamento, k' , que relacionam a carga aplicada por unidade de largura, \bar{F} , com o momento fletor, M , e a força cisalhante, V , nas extremidades da região de sobreposição (DA SILVA *et al.*, 2009). As Eq. 4 e Eq. 5 representam as expressões matemáticas propostas por Goland e Reissner:

$$M = k \frac{\bar{F}t}{2} \quad \text{Eq. 4}$$

$$V = k' \frac{\bar{F}t}{c} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde t é a espessura do aderente e c , metade do comprimento da região de sobreposição, ambos em mm. Os valores de k e k' serão aproximadamente iguais a 1 (um), para o caso de não ocorrer rotação da junta. Com o processo de rotação, os valores de k e k' diminuem e, conseqüentemente, os valores do momento fletor e da força axial cisalhante. Considerando-se, respectivamente, E como o módulo de Young (em MPa) e ν , o coeficiente de Poisson dos aderentes (adimensional), a expressão para o fator de momento fletor, proposta por Goland e Reissner (1944), pode ser descrita como nas equações Eq. 6 e Eq. 7:

$$k = \frac{\cosh(u_2c)}{\cosh(u_2c) + 2\sqrt{2}\sinh(u_2c)} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que:

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{F}}{tE}} \quad \text{Eq. 7}$$

Como para este modelo são consideradas duas tensões atuantes, a cisalhante e a transversal (*peel*), duas são as expressões para representação das tensões. As tensões cisalhante, τ_0 , e

transversal, σ_0 , do adesivo foram supostas constantes ao longo da espessura da camada adesiva relativamente fina e dadas pelas equações Eq. 8 e Eq. 9:

$$\tau_0 = -\frac{1}{8} \frac{\bar{P}}{c} \left\{ \frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta c}{t}\right)\left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\sigma_0 = -\frac{1}{\Delta} \frac{\bar{P} t}{c^2} \left[\left(\frac{R_2 \lambda^2 k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(\frac{R_1 \lambda^2 k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \sinh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \sin\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \right] \quad \text{Eq. 9}$$

Em que,

$$\beta = \sqrt{8 \frac{G t}{E \eta}} \quad \lambda = \gamma \frac{c}{t} \quad \gamma = \sqrt[4]{6 \frac{E_c t}{E \eta}} \quad k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1 - \nu^2) - \frac{\bar{P}}{tE}}$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda)$$

$$R_2 = \sinh(\lambda) \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \sin(\lambda)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda))$$

4) Análise de Hart-Smith

Hart-Smith (1973) *apud* Da Silva *et al.* (2009), assim como Goland e Reissner (1944), leva em consideração o efeito de grandes deflexões. Contudo, Hart-Smith considera o efeito da deformação individual para os aderentes superior e inferior na região de sobreposição, fato não considerado por Goland e Reissner. Por conseguinte, a camada adesiva não é desprezada. Sendo D como a rigidez à flexão do aderente, a expressão, obtida por Hart-Smith, para o fator de momento de Goland e Reissner, é expresso na Eq. 10:

$$k = \left(1 + \frac{t_a}{t}\right) \frac{1}{1 + \xi c + \frac{1}{6}(\xi c)^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que:

$$\xi = \sqrt{\frac{\bar{F}}{D}} \quad \text{e} \quad D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad \text{Eq. 11}$$

5) Análise de Oplinger

De acordo com Da Silva *et al.* (2009), a análise proposta por Oplinger (1991) é ainda mais detalhada do que aquelas comentadas anteriormente, no presente documento. Partindo da análise de Goland e Reissner (1944), Oplinger (1991) levou em consideração os efeitos de grandes deflexões para os aderentes tanto fora quanto dentro da região de sobreposição.

Oplinger (1991) encontrou resultados similares àqueles de Goland e Reissner, no que se refere a grandes razões de espessura de aderente por espessura de adesivo. Contudo, segundo Da Silva *et al.* (2009), para o caso de aderentes relativamente finos, os resultados encontrados por Oplinger são substancialmente diferentes dos de Goland e Reissner. Bueno (2002) mostra que, de acordo com Oplinger, o momento fletor M na borda é dado pela Eq. 12:

$$M = \left(\frac{\bar{F}t}{2}\right) \frac{R_3(1 + R^2C_2) + 8R_4 \frac{T_{h21}}{T_{h22}} R(C_1 - C_2)}{R_3 + 8R_4 \frac{T_{h21}}{T_{h22}} RC_1 + \sqrt{8}(1 + R^2C_1) \frac{T_{h21}}{T_{h1}}} \quad \text{Eq. 12}$$

Em que,

$$R = \sqrt{24 \frac{p\eta(1+v_c)}{tE_c}} \quad R_3 = \sqrt{\frac{8v_1}{R}} \quad R_4 = \sqrt{\frac{v_2}{8}}$$

$$v_1, v_2 = a \pm b \quad a = \left[4 \left(1 + \frac{3\eta}{4t} \right) + \frac{R_2}{4} \right] \quad b = \sqrt{a^2 + R^2}$$

$$T_{h2j} = \tanh\left(\mu_j \frac{c}{t}\right), \quad \text{para } j = 1, 2 \quad T_{h1} = \tanh\left(l \sqrt{\frac{12(1-v^2)T}{Et^3}}\right) = \tanh(u_1 l)$$

$$\mu_1 = \frac{R_3}{\sqrt{8}} R \sqrt{\frac{E\eta}{G_c(1-v^2)t}} \quad \mu_2 = \sqrt{8} R_4 \sqrt{\frac{E\eta}{G_c(1-v^2)t}}$$

$$C_1 = \frac{K_1}{K_2} \quad C_2 = \frac{1}{K_2}$$

$$K_1 = \frac{12}{16R_4^2 - R^2} \quad K_2 = \frac{48R_4^2}{4R_4^2 - 1}$$

Por fim, Tong e Stevens (1999) *apud* Bueno (2002), comentam que o fator de momento proposto por Oplinger, apresentado pela equação para M , estaria entre a solução de Goland e Reissner e a solução de Hart-Smith, apresentados anteriormente. Por mais que o modelo de Oplinger seja o mais complexo e completo dentre os comentados, objetivando melhorar o modelo proposto por Hart-Smith, com a inclusão de efeitos de grandes deflexões na região de sobreposição, o modelo de Oplinger ainda é considerado limitado para uma sobreposição com camada de adesivo fina e flexível (Tsai e Morton, 1994).

Da Silva *et al.* (2009) apontam algumas limitações para os modelos descritos no presente trabalho, também chamadas análises clássicas, além de, ao mesmo tempo, mencionar o que ocorre no fenômeno real:

- a) Não levam em conta as variações de tensão no adesivo ao longo da direção de espessura, sobretudo, as tensões de interface, as quais são de extrema importância para os casos em que a falha ocorre próxima à região de interface;
- b) O pico da tensão de cisalhamento é obtido para as extremidades da região de sobreposição, o que, é sabido atualmente, que viola a condição de tensão nula evidenciada nas extremidades da região de sobreposição. Tal fenômeno pode ser observado na Figura 11. Ao ignorarem a região de tensão cisalhante nula, as análises podem superestimar as tensões nas extremidades da região de sobreposição e, com isso, fornecer previsões de capacidade de carga demasiadamente conservativas;
- c) Por fim, os aderentes eram tomados como barras extremamente finas, ignorando a tensão cisalhante ao longo da espessura, além da deformação normal relacionada. A tensão de cisalhamento no aderente é particularmente importante, sobretudo, quando são utilizados aderentes de material compósito, que são mais significativamente afetados por tal tensão.

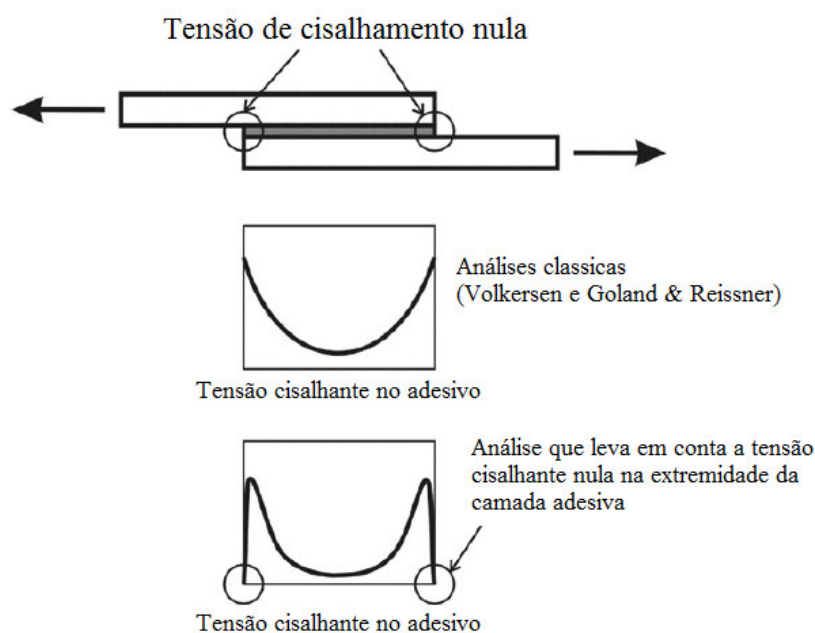


Figura 11: Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da camada adesiva quando a tensão nula é verificada nas extremidades.

(DA SILVA *et al.*, 2009, adaptado)

As deformações, como a apresentada na Figura 10, podem ser minimizadas com a aplicação de uma restrição à flexão ou uma forma de centralizar as cargas (KULAK *et al.*, 1987). A adição dos elementos denominados “*tabs*”, que usualmente são pequenas placas de mesmo material e espessura que os aderentes, pode ser uma solução. A Figura 12 ilustra uma junta *single-lap* com a presença de *tabs*.

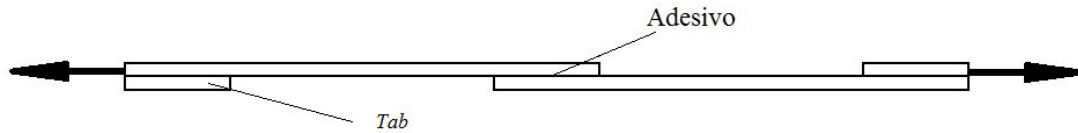


Figura 12: Junta de sobreposição simples modificada com a adição de *tabs* para maior centralização das cargas.

É possível unir a interpretação dos tratamentos analíticos com uma caracterização dos modos de falha. Hart-Smith (1983) apresenta uma caracterização dos modos de falha para juntas coladas de alumínio, do tipo *single-lap*, em um diagrama. A Figura 13 ilustra esse diagrama, para adesivos frágeis, que envolve a eficiência da junta em função da espessura dos aderentes.

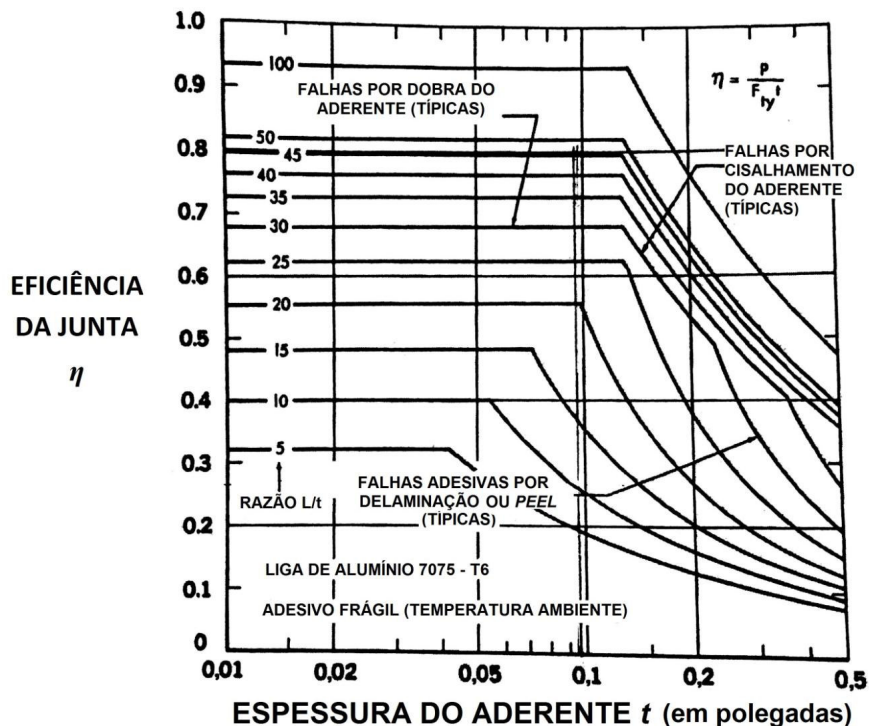


Figura 13: Gráfico de eficiência da junta, para juntas coladas de sobreposição simples com adesivo frágil.

(HART-SMITH, 1983)

3.2 *Uniões Mecânicas*

Os elementos de fixação objetivam unir duas ou mais peças, de forma fixa ou móvel, em projetos mecânicos. Dentre eles, vale destacar os rebites e parafusos. A diferença básica entre juntas rebitadas e aparafusadas é a possibilidade de desmonte da junta aparafusada, o que não ocorre nas juntas rebitadas. Além disso, a resistência mecânica do fixador é determinante na resistência da junta aos esforços aplicados.

3.2.1 **Junta Aparafusada / Rebitada**

Para os casos de uniões por fixadores mecânicos, a resistência da junta está associada ao limite de resistência ao cisalhamento do fixador (parafuso ou rebite), juntamente com as forças de atrito entre as superfícies que se encontram em contato (MARQUES *et al.*, 2009). Petrie (2000) cita vantagens e desvantagens relacionadas às juntas fixadas mecanicamente. Algumas vantagens das juntas fixadas mecanicamente são:

- Facilmente desmontáveis (caso das aparafusadas), quando comparadas à soldagem, brasagem ou mesmo os adesivos estruturais;
- Podem ser projetadas para suportar cargas trativas;
- Não demandam tempo de cura ou pós-cura relacionada à sua utilização;
- Dispensam a necessidade de aquecimento do material aderente ou outros processos que alterem as propriedades do mesmo.

Como desvantagens, podem ser citados:

- Requerem furos no material, o que pode gerar concentradores de tensões e outros modos de falha;
- Pré-carga pode ser difícil de mensurar com precisão, pois depende do método de aperto;
- Corrosão entre o fixador e o material ao qual este se une pode ocorrer.

A Figura 14 mostra uma ilustração de fixação mecânica, com destaque para as deformações causadas pela aplicação de rebites em furos de uma chapa, o que pode ocasionar concentradores de tensões na região de posicionamento do elemento fixador.

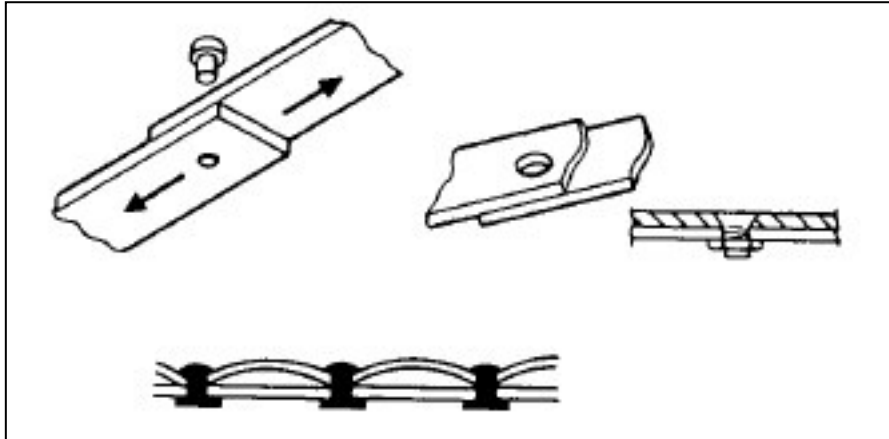


Figura 14: Representação de casos de aplicação de fixação mecânica.
(PETRIE, 2000, adaptado)

3.2.2 Mecanismos de falha

Tide *et al.* (2004) comentam que para o caso de ausência de pré-carga em situação de junta exposta a ensaio de cisalhamento aparente por tração, a carga pode ser transferida por cisalhamento aos parafusos e esmagamento no aderente. Com o limite de resistência, a falha se dá de três formas distintas: cisalhamento do fixador, esmagamento do aderente ou rompimento do aderente. A Figura 15 ilustra os modos de falha mencionados, para o caso de uma união aparafusada.

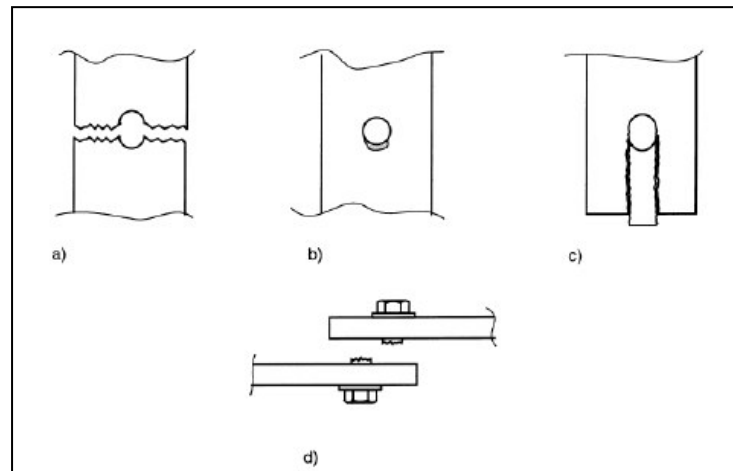


Figura 15: Modos de falha. (a) Falha total da seção; (b) Esmagamento; (c) Cisalhamento da seção; (d) Cisalhamento do parafuso.

(IREMAN *et al.*, 2000, adaptado)

3.2.3 Dimensionamento da fixação mecânica

No presente estudo, o tipo de fixador mecânico utilizado é o rebite, mais especificamente os rebites do tipo de Repuxo, também conhecidos como rebites POP (do inglês, *POP rivets* ou *Blind rivets*), ou ainda, rebites tubulares. Portanto, são abordados parâmetros para o seu dimensionamento. O rebite de repuxo é ilustrado na Figura 16.

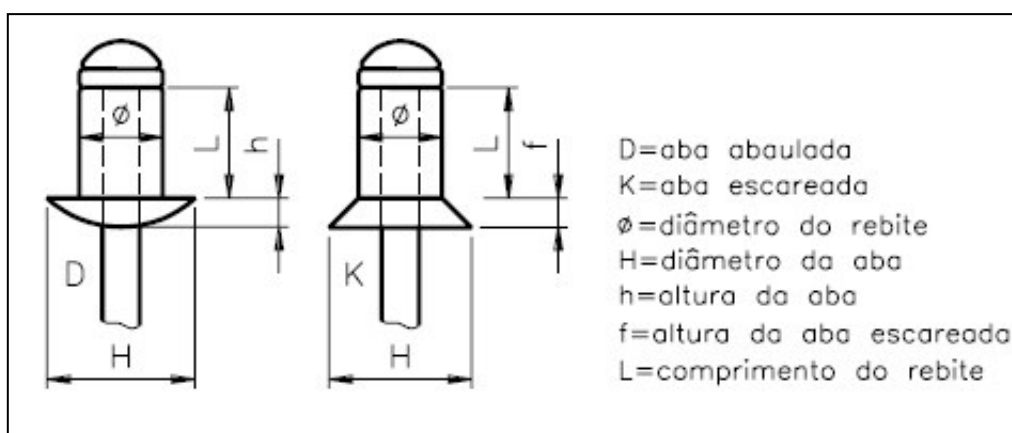


Figura 16: Rebite de repuxo ou rebite POP.

(ESSEL, 2015)

Segundo Melconian (1999), a norma ABNT NB14 1996 propõe distâncias mínimas estabelecidas na junta, quanto à distribuição de rebites na mesma. As restrições contemplam materiais isotrópicos, em geral, metais. Da lateral da chapa aderente até o centro do furo, a distância deve ser de 2 (duas) vezes o diâmetro do rebite, na direção da carga sendo aplicada. Já para o sentido transversal de aplicação de carga, da lateral da chapa até o centro do furo a distância deve ser de 1,5 (uma vez e meia) o diâmetro do rebite. Além disso, para múltiplos rebites, a distância entre centros deve ser de 3 (três) vezes o diâmetro do rebite. A Figura 17 ilustra tais proposições. Essas distâncias previnem a ocorrência de esmagamento ou rasgamento dos aderentes.

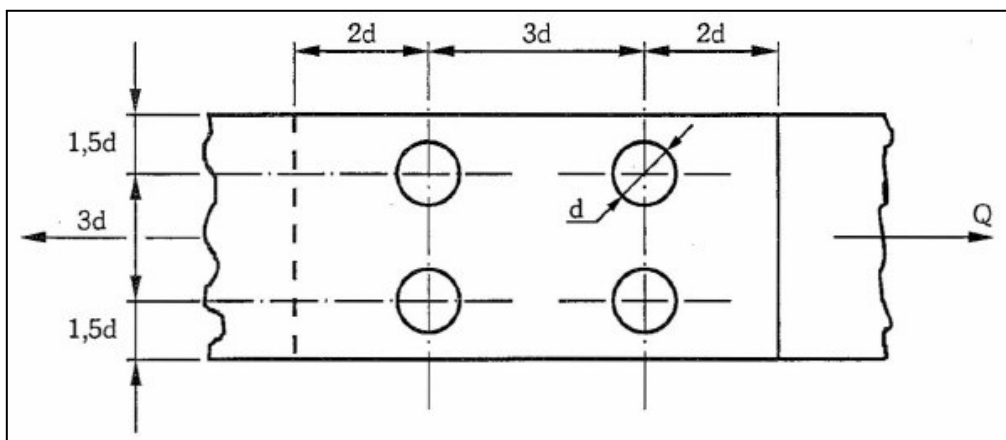


Figura 17: Distâncias entre rebites. Tendo Q como carga aplicada à junta e d diâmetro do furo do rebite.

(MELCONIAN, 1999)

ESSEL (2015) afirma que é preciso escolher o rebite em função da espessura dos aderentes a serem unidos, do diâmetro do furo e comprimento excedente, que formará a segunda “cabeça”. Para a escolha do diâmetro do rebite a ser utilizado em determinada aplicação, o fator determinante está relacionado à espessura dos aderentes que serão fixados. Deve ser considerada a condição mais crítica, ou seja, o aderente com menor espessura. O valor da menor espessura é multiplicado pelo valor constante de 1,5 (um e meio) e, a partir daí se tem o diâmetro mínimo indicado, como representado na Eq. 13.

$$dR = 1,5 \times |< S| \quad \text{Eq. 13}$$

Em que:

dR = diâmetro, em mm;

$< S$ = menor espessura, em mm;

1,5 = constante ou valor predeterminado.

No caso do diâmetro do furo para posicionamento do rebite, existem catálogos que recomendam a realização do furo com valor cerca de um a dois décimos de milímetro (0,1-0,2mm) maior do que o diâmetro do rebite, como é o caso do catálogo da MACROSUL (2015). Já ESSEL (2015) recomenda que tal diâmetro seja calculado por meio de multiplicação da constante 1,06 pelo valor do diâmetro do rebite, como exposto na Eq. 14. A razão para essas recomendações é evitar formação de trinca devido à conformação mecânica do rebite, em sua aplicação.

$$dF = dR \times 1,06 \quad \text{Eq. 14}$$

Em que:

dF = diâmetro do furo, em mm;

dR = diâmetro do rebite, em mm;

1,06 = constante ou valor predeterminado.

Por fim, com relação ao comprimento útil do rebite, ESSEL (2015) determina que o cálculo leve em consideração, além das espessuras dos aderentes, o diâmetro do corpo do rebite multiplicado pelo valor de uma constante relacionada ao formato da cabeça do rebite, como mostrado na Eq. 15.

$$L = y \times d + S \quad \text{Eq. 15}$$

Em que:

L = comprimento útil do rebite, em mm;

y = constante determinada pelo formato da cabeça do rebite;

d = diâmetro do rebite, em mm;

S = soma das espessuras das chapas, em mm.

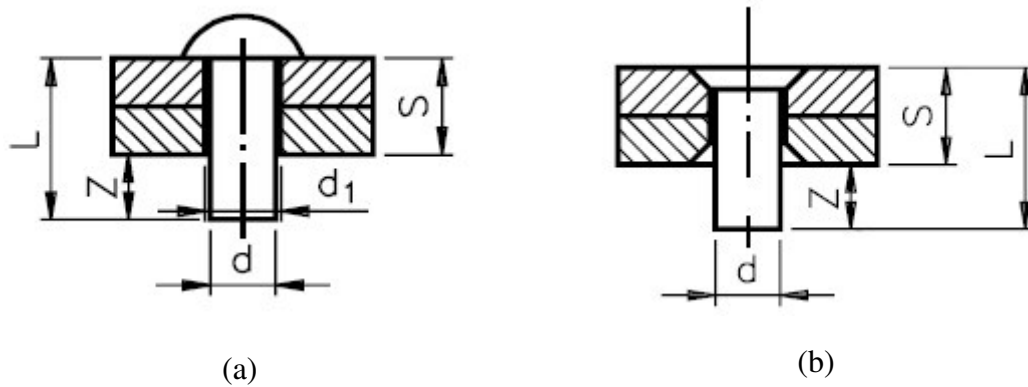


Figura 18: Tipos de rebite: (a) de cabeça redonda; (b) de cabeça escareada.

(ESSEL, 2015)

Para rebites de cabeça redonda e cilíndrica, tem-se:

$$L = 1,5 \times d + S \quad \text{Eq. 16}$$

Para rebites de cabeça escareada, tem-se:

$$L = l \times d + S \quad \text{Eq. 17}$$

A relevância do correto dimensionamento do elemento de fixação é abordada no trabalho de Kulak *et al.* (1987), pois os autores comentam a importância dos cálculos para adequação do rebite à espessura das chapas. Ainda, comentam quanto à necessidade do conhecimento do tipo de rebite utilizado e a quantidade de rebites a serem aplicados. Os cálculos de projeto visam prevenir a ocorrência de falhas precoces, esmagamento do aderente, rasgamento do aderente, concentradores de tensão na junta e formação de trincas devido ao processo de conformação mecânica da aplicação do rebite.

3.3 Nanotecnologia e Adesivos Nanomodificados

3.3.1 Nanotecnologia

De acordo com Thostenson *et al.* (2005), nanotecnologia pode ser definida como a criação, processamento, caracterização e utilização de materiais, dispositivos e sistemas com dimensões na ordem de 0,1 a 100nm. Devido à tão reduzida escala, os materiais dessa ordem apresentam propriedades que, quando comparadas aos demais, são muito superiores.

Segundo Li (2008), deve-se ressaltar que as propriedades de nanomateriais são distintas das apresentadas pelos materiais em macroestrutura. Suas propriedades mecânicas, térmicas e eletrônicas são alteradas significativamente pela redução das dimensões e o aumento da relação entre a área superficial e o volume desses materiais, o que possibilita um variado leque de novas aplicações para os materiais nanoestruturados.

3.3.2 Nanoestruturas

Carvalho (2011) menciona que as nanopartículas, de acordo com seu tamanho e forma, podem ser classificadas em três categorias principais: nanofibras e nanotubos, nanopartículas lamelares e nanopartículas tridimensionais, conforme ilustrado na Figura 19.

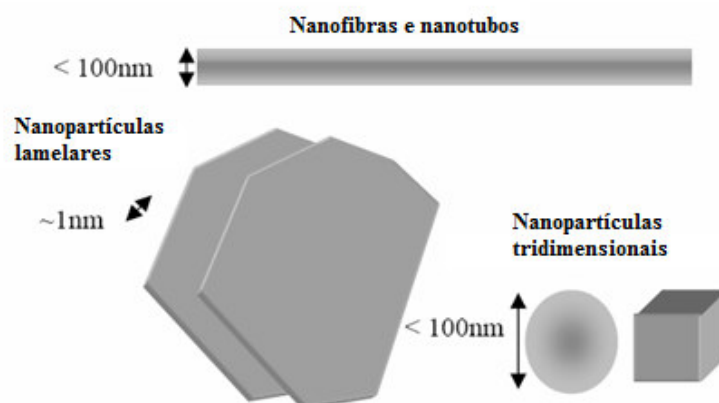


Figura 19: Representação esquemática de reforços nanométricos.

(AJAYAN *et al.*, 2006, *apud* CARVALHO, 2011, adaptado)

De acordo com Chuto e Chaumet-Riffaud (2010), as nanopartículas (NP) são compostas de algumas centenas ou milhares de átomos. Seu campo de desenvolvimento é extremamente vasto e inclui pesquisa médica: podendo se diferenciar em dois grupos principais, as NP orgânicas (sistema micelar², NP à base de polímeros, nanotubos de carbono e fulerenos³) e nanopartículas inorgânicas (pontos quânticos, NP de óxido de ferro magnético e sondas Raman).

Nanotubos de carbono (CNTs), agrupamentos de folhas de grafeno, nanopartículas de prata, ouro e sílica coloidais estão entre as nanopartículas mais utilizadas na síntese de materiais nanoestruturados (SILVA NETO, 2011). Uma das classes de materiais nanoestruturados, é a de nanocompósitos, dentre os quais os CNT e agrupamentos de folhas de grafeno fazem parte. Em sessão seguinte, essas nanoestruturas são descritas e relacionadas à aplicações de engenharia.

3.3.3 Adesivo Nanomodificado e Nanocompósitos

Dentre as muitas vantagens do advento da nanotecnologia, a adição de nanopartículas pode melhorar as propriedades mecânicas de adesivos estruturais. Um exemplo disto pode ser evidenciado pelo trabalho realizado por Silva Neto, (2011), o qual investigou a possibilidade do uso de um adesivo epóxi nanomodificado pela adição de nanoplaquetas de grafeno. Para uma dispersão de 2% em massa de nanopartículas na matriz epóxi, foi verificado aumento de 57% na capacidade de carga do adesivo quando comparado ao grupo controle (grupo com 0% CNT). Observou-se também um aumento de 22% na rigidez desses adesivos. Note que o adesivo modificado por nanoestruturas/nanopartículas pode ser classificado como um nanocompósito.

Os nanocompósitos diferem dos compósitos tradicionais pelas dimensões reduzidas dos componentes de reforço, denominados nanopartículas, ou nano-reforços. As nanopartículas possuem, em geral, dimensões variando entre 1 nm e 100 nm, o que representa uma elevada área de superfície específica. Como pode ser visto na Figura 20, as mudanças no diâmetro das nanopartículas ou das fibras e na espessura da lamela alteram a razão entre a superfície e o volume (THOSTENSON *et al.*, 2005).

² Consiste em estruturas globulares formadas por agregados de moléculas com características polares e apolares.

³ O fulereno é uma forma alotrópica do Carbono.

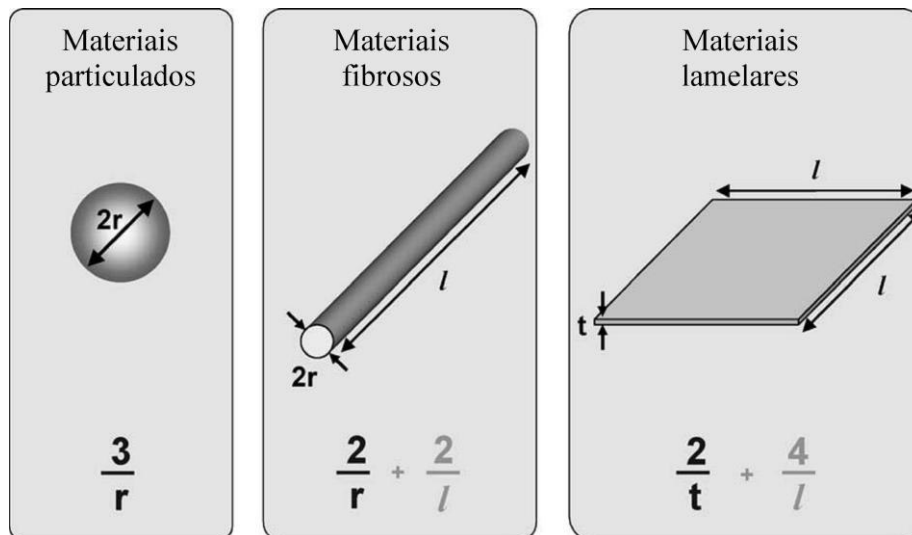


Figura 20: Tipos de nanopartículas e suas relações entre dimensão e superfície específica.

(THOSTENSON *et al.*, 2005 *apud* CARVALHO, 2011, adaptado)

Nanocompósitos poliméricos podem ser considerados materiais nos quais estruturas, com pelo menos uma de suas dimensões em escala nanométrica, encontram-se no meio de uma matriz polimérica termofixa, termoplástica ou elastomérica (MOHAN *et al.*, 2009). A mistura da matriz polimérica com tais reforços pode melhorar propriedades mecânicas do material, tais como rigidez, resistência mecânica, resistência ao impacto e tenacidade, além de manter a processabilidade. Propriedades como coeficiente de expansão térmica, condutividade elétrica e permeabilidade a gases também podem ser melhoradas com a dispersão de nanoestruturas. Essa combinação de propriedades é denominada multifuncionalidade (KOO, 2006).

Segundo Da Cruz (2013), as propriedades de um nanocompósito são muito influenciadas pelo tamanho de escala, pelas fases dos seus componentes e pelo grau de mistura entre eles. Dependendo da natureza dos componentes utilizados e do método de preparação, diferenças significativas no compósito formado podem ser obtidas. Para compósitos de materiais lamelares, há três principais tipos, que são ilustrados na Figura 21.

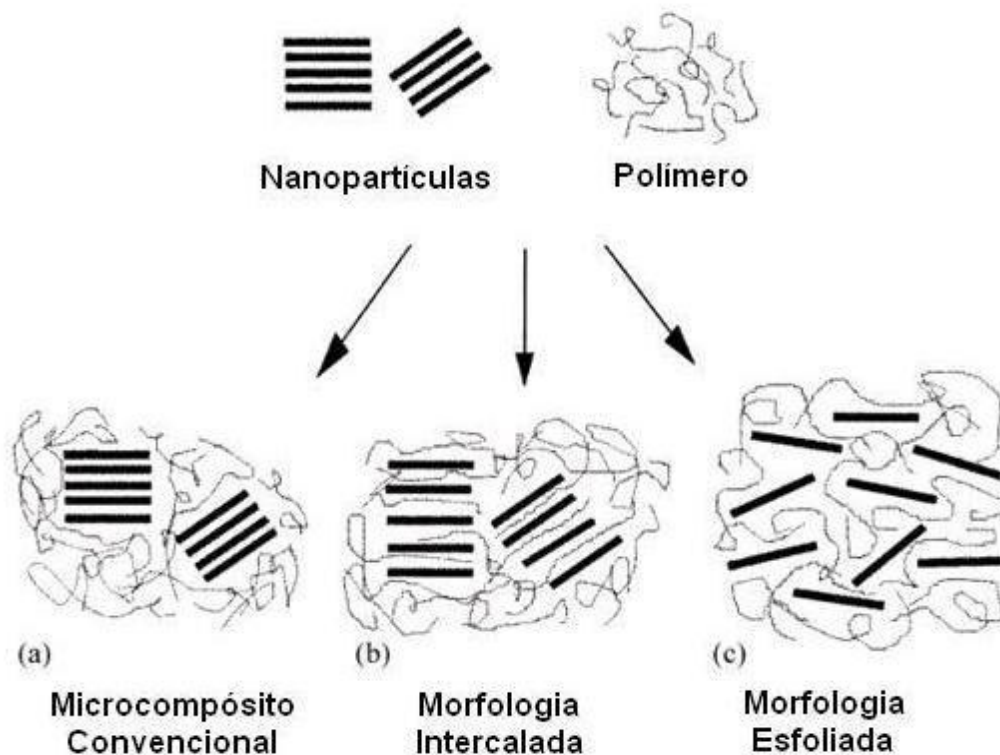


Figura 21: Representação esquemática dos tipos de nanoestruturas.

(HUSSAIN *et al.*, 2006, adaptado)

De maneira geral, para uma mesma concentração de nanopartículas, os nanocompósitos com morfologia esfoliada (Figura 21c) apresentam melhores propriedades quando comparados aos de morfologia intercalada. Este fato se deve à interação individual das lâminas do reforço com a matriz e a presença de uma maior área superficial específica, que estão diretamente relacionadas às propriedades mecânicas, térmicas e elétricas dos materiais (STANKOVICH *et al.*, 2007).

Dentre as nanopartículas de base carbono mais recentemente pesquisadas estão os nanotubos de carbono e as estruturas de grafeno (CARVALHO, 2011). Martin-Gallego *et al.* (2013) executaram ensaios de tensão em compósitos com a finalidade de ilustrar os ganhos devidos à adição de nanotubos de carbono e/ou folhas grafeno. Na Tabela 2, é possível observar propriedades mecânicas associadas aos nanocompósitos modificados. Os compósitos citados são resina epóxi (do inglês *Diglycidyl Ether of Bisphenol A* (DGEBA)), nanotubo de carbono de múltiplas paredes (do inglês *Multi-Walled Carbon Nanotubes* (MWCNT)) e folha de grafeno funcionalizado (do inglês *Functionalized Graphene Sheet* (GS)).

Tabela 2: Propriedades mecânicas de nanocompósitos reforçados.
(MARTIN-GALLEGO, 2013)

	E (MPa)	σ (MPa)	ϵ (%)
DGEBA	1631 \pm 37	58,9 \pm 3,5	5,9 \pm 0,5
0,25 wt.% MWCNT	1954 \pm 97	68,4 \pm 3,1	5,4 \pm 0,7
0,5 wt.% MWCNT	2005 \pm 32	69,1 \pm 6,8	4,8 \pm 0,7
0,75 wt.% MWCNT	2267 \pm 21	72,1 \pm 3,6	4,9 \pm 0,6
1,5 wt.% MWCNT	2039 \pm 51	75,4 \pm 2,0	5,7 \pm 0,4
0,25 wt. % FGS	2163 \pm 72	65,2 \pm 4,0	4,3 \pm 0,3
0,5 wt. % FGS	2296 \pm 55	64,4 \pm 6,6	3,8 \pm 0,7
0,75 wt. % FGS	2393 \pm 62	68,1 \pm 7,6	3,7 \pm 0,6
1,5 wt. % FGS	2466 \pm 34	68,5 \pm 8,3	3,7 \pm 0,8

wt. é referente à porcentagem em peso (do inglês *weight percent*).

Analisando a tabela, é possível observar algumas implicações relacionadas à adição das nanoestruturas. A tensão suportada pelos compósitos ensaiados aumenta com o aumento da concentração de MWCNT. O mesmo é evidenciado para a adição de FGS, com exceção da concentração de 0,5%, que se mostrou inferior à de 0,25. Além disso, a rigidez, representada por E, também apresenta aumento, com a adição das nanoestruturas. Essas evidências comprovam ser vantajosa a interação química decorrente da adição de nanoestruturas.

3.3.4 Nanotubos de Carbono

Segundo Carvalho (2011), desde quando foram descobertos, no ano de 1991, pelo físico Iijima, os nanotubos de carbono têm atraído a atenção da comunidade científica em razão de suas propriedades elétricas e mecânicas. Pereira (2013) comenta que a tensão de ruptura para o nanotubo de carbono é cerca de 10 a 250 vezes maior que a dos aços e que sua rigidez é cerca de cinco vezes maior. Os nanotubos são estruturas unidimensionais de formato tubular, cujas paredes são formadas por arranjos hexagonais de átomos de carbono (WONG e AKINWANDE, 2011). Melechko *et al.* (2005) definem um nanotubo como uma estrutura cilíndrica oca constituída exclusivamente por átomos de carbono, ligados por ligações covalentes, dispostos em um arranjo reticular hexagonal. A forma mais simples para o nanotubo de carbono se dá por meio do enrolamento de uma folha ou camada de grafeno de modo a se obter uma estrutura na forma de um cilindro fechado (semi-

fulereno) (Figura 22). Tal estrutura constitui o chamado nanotubo de carbono de paredes simples (Figura 23).

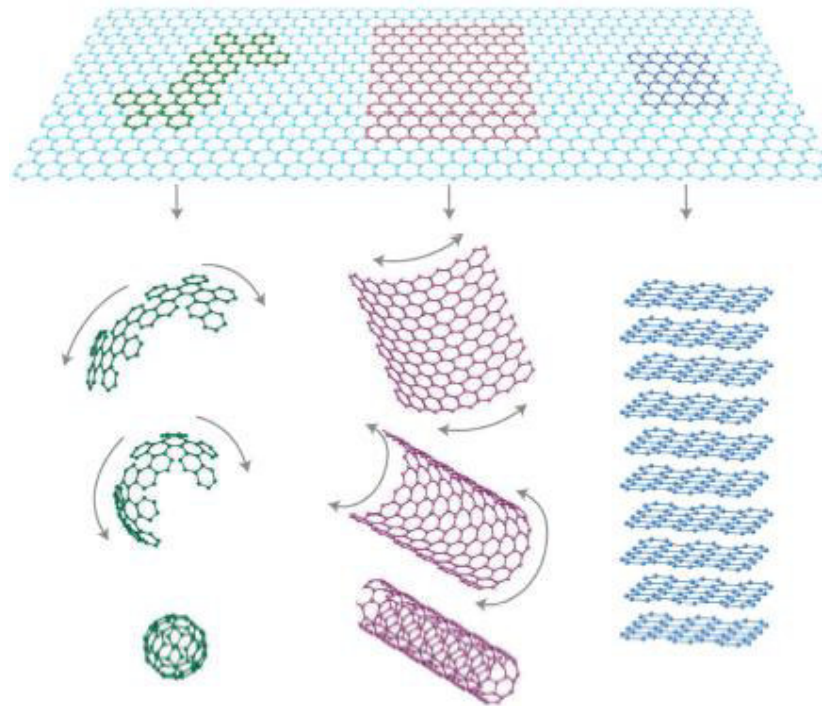


Figura 22: Formas alotrópicas do carbono que podem ser obtidas a partir do grafeno. Da esquerda para a direita: Fulereno, Nanotubo e Grafite.

(CARVALHO, 2011)

3.3.4.1 Tipos de Nanotubo de Carbono (CNT)

Ferreira e Rangel (2009) explicam que há duas formas principais de nanotubos de carbono: os de parede simples – SWCNT (do inglês *Single-Walled Carbon Nanotubes*) – como é ilustrado na Figura 23, e os de paredes múltiplas – MWCNT (do inglês *Multi-Walled Carbon Nanotubes*) – representados em esquema na Figura 24. A distinção que se dá entre os SWCNTs e os MWCTNs é descrita por Ferreira e Rangel (2009), como o fato de o MWCNT ser essencialmente considerado

como nanotubos de parede simples dispostos de forma concêntrica com diâmetros que decrescem de modo radial.

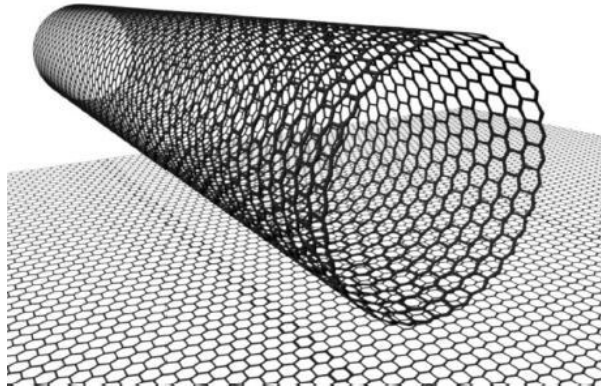


Figura 23: Esquema ilustrativo de um nanotubo de carbono, formado a partir de uma camada composta por anéis aromáticos, que se enrola entre si dando origem a uma estrutura tubular.

(FERREIRA E RANGEL, 2009)

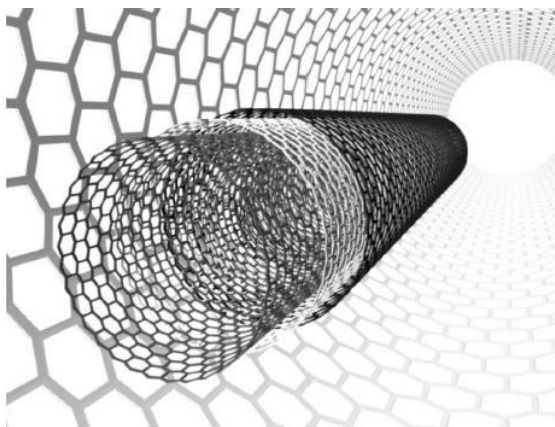


Figura 24: Esquema ilustrativo para nanotubo de parede múltipla.

(FERREIRA E RANGEL, 2009)

Os nanotubos de parede simples possuem diâmetro variado entre 0,5 e 5 nm e comprimento da ordem de micrometros (Figura 25a). Os nanotubos de paredes múltiplas possuem uma estrutura tubular semelhante á dos SWCNT, mas é formado por vários cilindros concêntricos, cujo espaçamento é de, aproximadamente 0,34 nm (Figura 25b). Nas extremidades dos nanotubos,

geralmente verificam-se hemisferas denominadas *end caps*, que são arranjos pentagonais de carbono (WONG e AKINWANDE, 2011).

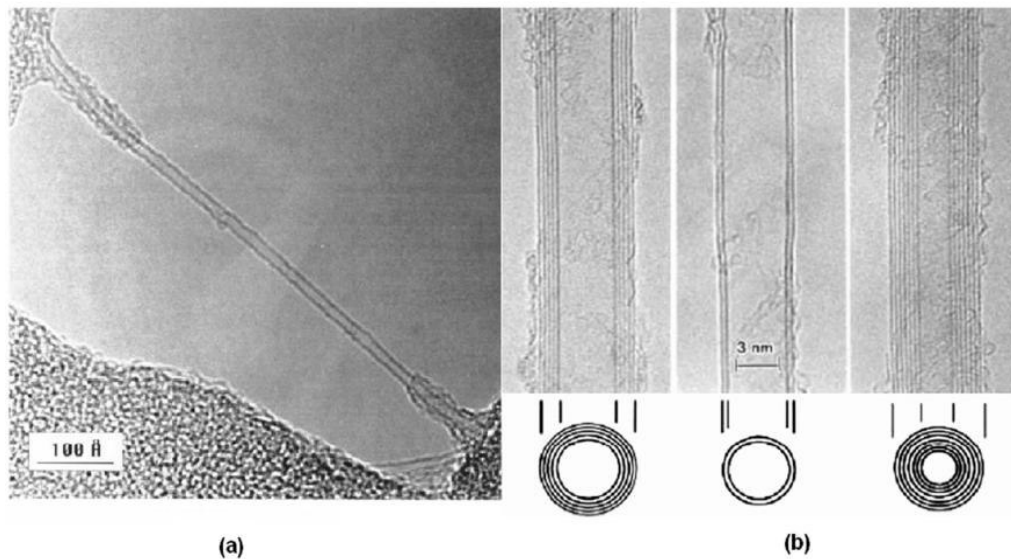


Figura 25: Diferentes tipos de nanotubos de carbono
(a) Nanotubo de parede simples. (BETHUNE *et al.*, 1993, adaptado)
(b) Nanotubos de paredes múltiplas. (IJIMA, 1991, adaptado)

3.3.4.2 Aplicações

Ao combinarem propriedades como alta resistência mecânica, alta condutividade térmica e alta condutividade elétrica, os nanotubos de carbono podem desenvolver funções estruturais e funcionais simultaneamente (KANG *et al.*, 2006). Por conseguinte, essas estruturas já possuem uma considerável variedade de aplicações, além de boas perspectivas para aplicações futuras, que dependem de novos conhecimentos a cerca do assunto. De Volder *et al.* (2013) citam aplicações como em armazenamento de energia, componentes automotivos, material esportivo e eletrônicos, dentre outras.

É comentado por Lau e Hui (2002) que a utilização de pequenas quantidades de CNT (1% de peso da matriz polimérica), podem ocasionar aumentos no módulo de elasticidade e tensão de ruptura de material compósito, em cerca de 42 e 25%, respectivamente. Esses valores são suficientes para indicar a importância dos nanotubos para a aplicação em compósitos. Segundo De Volder *et al.* (2013), resinas com CNT reforçam compósitos de fibra, incluindo pás de turbinas eólicas e cascos para barcos, que são fabricados por compósitos reforçados com fibra de carbono

contendo resina com CNT. Além disso, MWCNT podem ser utilizados como aditivo retardador de chama em polímeros, devido à mudanças na reologia dos materiais com a adição dos nanotubos. Aditivos de CNT podem substituir halogenados retardadores de chama, uma vez que esses possuem restrições ambientais.

Uma aplicação que se relaciona ao presente trabalho é a utilização de CNT em adesivo estrutural. Srivastava (2011) comenta que a utilização de CNT em adesivo epóxi, para união de juntas coladas, melhora a capacidade de carga da junta. Em seu trabalho, Srivastava (2011) reportou aumento entre 5 e 12%. Srivastava também menciona a participação do CNT como um contribuinte à resistência na propagação de falha do adesivo, afirmando que o CNT atua como uma barreira. Essa conclusão teve por base a análise microscópica de juntas coladas, após ensaio mecânico.

Hsiao *et al.* (2003) utilizaram MWCNT em adesivo epóxi para unirem compósitos poliméricos reforçados com fibra de grafite. Os pesquisadores testaram, em juntas *single-lap*, as concentrações de 1 e 5% em peso, de CNT. Hsiao *et al.* (2003) obtiveram aumento na resistência média ao cisalhamento do adesivo de 31,2 e 45,6%, para as concentrações de 1 e 5% em proporções em peso (p/p), respectivamente. De acordo com os autores, o ganho no sistema epóxi do adesivo foi significativo. Esse ganho é explicado pelos mesmos, devido ao desvio da propagação da carga, do adesivo, para o compósito, com a presença dos nanotubos.

Para a união de aderentes de alumínio, Yu *et al.* (2010) testaram, além da capacidade de carga, a resistividade, o peso em função da temperatura e a resistência à fratura em meio aquoso do adesivo modificado. Os pesquisadores observaram melhoras em termos de propriedades elétricas, térmicas e mecânicas das juntas, pela adição do CNT. A resistividade observada se mostrou menor, com o aumento da concentração de CNT. A temperatura de degradação aumentou com a adição de CNT. A resistência mecânica ao cisalhamento se mostrou superior, com alguma concentração de CNT. Contudo, para esses aspectos avaliados, a melhora evidenciada para a junta não se mostrou constante ao aumento da porcentagem de CNT. As melhorias foram evidenciadas para as concentrações de até 1% p/p, sendo pior ou pouco melhor para concentrações superiores a essa. Portanto, para o estudo de Yu *et al.* (2010), ocorreu melhora nas junções com CNT, contudo a melhora não se deu de forma linear com a concentração desse CNT.

Sydlik *et al.* (2013) prepararam três diferentes tipos de MWCNT funcionalizado com epóxi, por meio de métodos de funcionalização covalente, para uso em adesivos para juntas de sobreposição simples. Os autores testaram concentrações de CNT de 0,5 até 10% p/p. Da mesma forma que foi mostrado por Yu *et al.* (2010), para o trabalho de Sydlik *et al.* (2013), a adição de

CNT alterou a resistência ao cisalhamento da junta, contudo, a melhora não ocorreu de modo linear com o aumento da concentração p/p. O melhor resultado, do trabalho de Sydlik *et al.*(2013) foi para a concentração de 1% p/p de CNT. A melhora evidenciada para a concentração de 1% p/p, em relação ao adesivo epóxi puro, foi de 36%.

De acordo com o trabalho de Wemik e Meguid (2014), há um ponto crítico, relacionado à quantidade de CNT capaz de melhorar o desempenho do adesivo epóxi para a junta adesivada. Em seu estudo, Wemik e Meguid (2014), investigaram experimentalmente propriedades mecânicas de adesivos epóxi reforçados com CNT. As investigações experimentais levaram os pesquisadores a considerarem uma concentração crítica de CNT em torno de 1% p/p CNT. Com quantidades crescentes de CNT até a concentração considerada crítica, o adesivo apresentava maior resistência ao rompimento por cisalhamento e, com concentrações superiores a essa, sua resistência decrescia, com casos inclusive inferiores ao adesivo puro. Uma representação desse conceito de concentração crítica pode ser observada na Figura 26, onde é apresentado o traçado da variação da taxa de liberação de energia de deformação em função da concentração de nanoestruturas, utilizadas pelos autores.

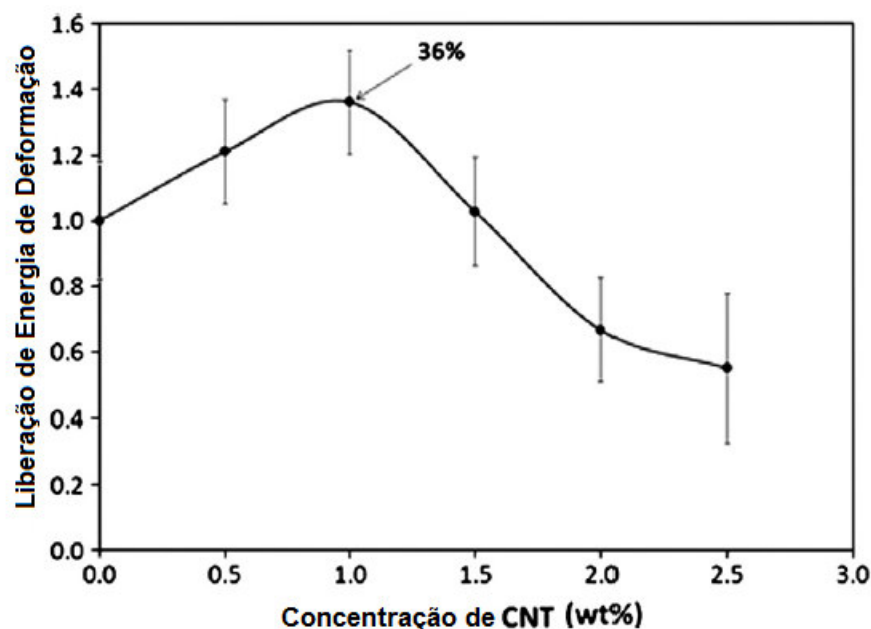


Figura 26: Efeito da concentração de CNT na taxa de liberação de energia de deformação em adesivo reforçado com CNT.
(WEMIK E MEGUID, 2014)

A Figura 26 mostra a existência de um ponto de máximo/saturação a partir do qual a liberação de energia decresce (WEMIK E MEGUID, 2014). Hsiao *et al.* (2003), Yu *et al.* (2010), Sydlik *et al.* (2013) e Wemik e Meguid (2014) conduziram experimentos visando aplicar nanoestruturas em adesivo estrutural para estudo de propriedades mecânicas em juntas adesivadas. Os pesquisadores citados observaram melhora na capacidade de carga das juntas ensaiadas, com a presença das nanoestruturas. Contudo, a melhora não ocorreu de forma linear com a concentração de nanoestruturas, existindo concentrações a partir das quais o CNT não aumenta essa capacidade de carga. Wemik e Meguid (2014) explicam essa concentração crítica com base na formação de aglomerações, que se formam com o excesso de CNT. As aglomerações foram evidenciadas por microscopia eletrônica e avaliações reológicas e foram consideradas resultado da elevação da viscosidade da resina, com conseqüente resistência à dispersão das nanoestruturas. São mostradas, na Figura 27, as aglomerações observadas por microscopia eletrônica no trabalho de Wemik e Meguid (2014).

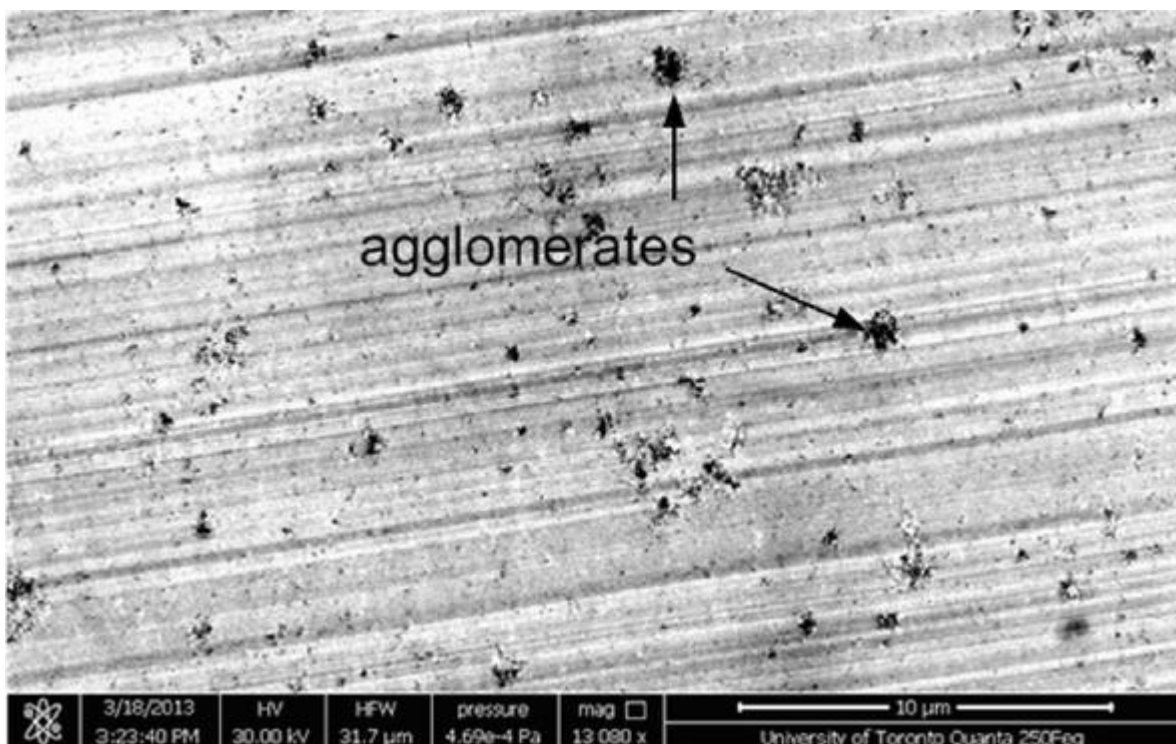


Figura 27: Micrografia Eletrônica de Transmissão de adesivo reforçado com 2% em peso de CNT.

São destacadas regiões contendo aglomerados (*agglomerates*, em inglês).

(WEMIK E MEGUID, 2014)

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais e equipamentos

4.1.1 Materiais

Como o objetivo da presente pesquisa envolve avaliação de desempenho de adesivo estrutural, optou-se por um aderente do tipo isotrópico (Alumínio 6063-T5). Esse tipo de alumínio é de fácil obtenção no mercado e possui limite de resistência de 140N/mm^2 . A espessura do aderente, de 2,35mm, foi determinada com base na teoria descrita por Hart-Smith (1983). As barras de alumínio foram cortadas e fresadas para que a espessura inicial de 3,175mm fosse ajustada para 2,35mm. O fresamento ocorreu, inclusive, no sentido da espessura, ou seja, nas laterais.

Como adesivo, foi utilizado o sistema epóxi de cura a frio para laminação, de resina AR-300 e endurecedor AH-30/150, da Barracuda Advanced Composites. A proporção utilizada na mistura de resina para endurecedor foi de, respectivamente, 100 partes para 33 partes, por peso, como recomendado pelo fabricante. A proporção de 100 para 33, segundo o fabricante, confere a mistura uma viscosidade que está aproximadamente entre 350 e 900 *centipoises* (*cP*), ou seja, 0,35 e 0,9Pa's. O tempo de cura foi de 24 horas a 25 °C e pós-cura de 6 horas a 80 °C, em estufa, como estabelecido pelo fabricante. A Tabela 3 apresenta propriedades típicas do sistema de resina epóxi empregado após mistura a 25 °C.

Tabela 3: Dados típicos Sistema epóxi resina AR-300 com endurecedores AH-30 e AH-150.
(BARRACUDA, 2015)

Endurecedor	AH-30	AH-150
Aspecto	Líquido claro	Líquido claro
<i>Gel-time</i>	30 min	300 min
Proporção da mistura por volume	100 : 33	100 : 33
Viscosidade	900 <i>cP</i>	350 <i>cP</i>

Foram utilizadas, como nanoestruturas, nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT), sintetizados pelo método de deposição química de vapor (CVD) e fornecidos pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O diâmetro médio dos nanotubos de carbono empregados, segundo fornecedor, é de 35 nm (FERLAUTO *et al.*, 2006).

Como fixador mecânico, são utilizados rebites de repuxo, como os descritos mais detalhadamente no item sobre dimensionamento da fixação mecânica na revisão bibliográfica. Os rebites de repuxo escolhidos para a aplicação possuem diâmetro de 4 mm e comprimento de 10 mm, de modo a estarem em conformidade com os cálculos estipulados para a sua aplicação.

4.1.2 Equipamentos

O procedimento de dispersão das nanopartículas se deu pelo processo de ultrassom, com o uso de uma lavadora ultrassônica digital fabricada pela empresa Kondortech, modelo CD-4820 (KONDORTECH, 2016). O processo de dispersão dos nanotubos se deu segundo procedimento proposto por Avila *et al.* (2010), ou seja, uma hora de dispersão por ultrassom a 42 kHz.

Duas balanças eletrônicas foram utilizadas. Para as resinas foi utilizada uma balança da marca Ohaus, linha *Adventurer* modelo ARA520 com capacidade de 1.500g e incremento de 0,01g. Já para a pesagem das nanopartículas, foi utilizada uma balança da mesma linha, contudo de modelo diferente, AR3130, com capacidade de 310g e incremento de 0,001g (PHCIENTIFICA, 2015).

Para a execução da colagem dos CPs, foram utilizados os dispositivos para colagem e formação de junta colada (Figura 28), projetados e fabricados no Laboratório de Compósitos da UFMG, em trabalho realizado por Silva Neto (2011). Tais dispositivos atuam como moldes para posicionamento das juntas e manutenção da posição das mesmas durante o processo de cura do adesivo.

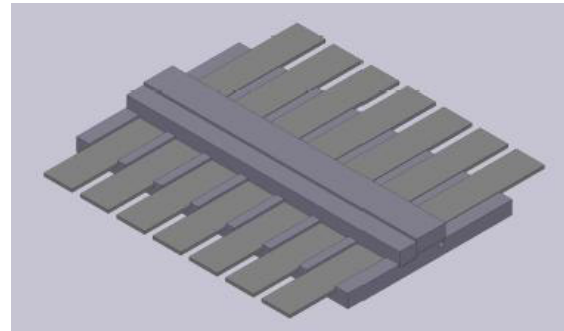
Os dispositivos de colagem foram fabricados de tal modo que, após o posicionamento dos aderentes superior e inferior, em seus respectivos *slots*⁴, o dispositivo é fechado e parafusado na

⁴ *Slot* é o termo em inglês, para designar um espaço, ranhura, abertura ou mesmo fresta. Aqui empregado para se referir aos espaços nos quais são encaixados os aderentes nos dispositivos de colagem empregados.

região de sobreposição das juntas, para garantir o posicionamento de tal região. Contudo, o procedimento de aparafusar o dispositivo, mesmo com o auxílio de torquímetro, não foi capaz de garantir uma espessura uniforme da camada adesiva para as juntas. Portanto, uma alternativa para realizar a montagem do dispositivo, com o devido posicionamento das juntas, e ainda garantir pressão constante ao longo de todos os CPs envolvidos, foi submeter o conjunto montado à pressão por uma prensa hidráulica, presente no Laboratório de Compósitos da UFMG.



(a)



(b)

Figura 28: Dispositivo utilizado na montagem e colagem dos corpos de prova.

(a) Dispositivo; (b) Projeto em programa 3D (SILVA NETO, 2011).

Ainda na etapa de colagem dos corpos de prova, foram utilizados grampos C, apertados manualmente (Figura 29). Estes foram necessários para colar os *tabs* nas extremidades dos CPs. Os *tabs* são necessários para o correto alinhamento quando da fixação dos CPs na máquina de ensaio para resistência ao cisalhamento.



(a)



(b)

Figura 29: Colagem dos *Tabs*:

(a) Grampo C;

(b) Posicionamento para colagem.

Para observação e medição de propriedades relacionadas à região de colagem, tanto antes quanto depois dos ensaios, foi utilizado um microscópio USB da marca Veho, modelo VMS-004 *Deluxe* USB, com ampliação de 400 vezes e ilustrado com maiores detalhes no sítio eletrônico do fabricante (VEHO WORLD, 2015). Com o auxílio do microscópio, foi possível medir a espessura da camada adesiva aplicada às juntas, na lateral da região de sobreposição. Além disso, posteriormente aos ensaios de resistência aparente, foram fotografados os modos de falha apresentados para cada corpo de prova.

Para o processo de furação dos corpos de prova que receberiam rebites, foi utilizado um centro de usinagem disponibilizado pelo SENAI-MG, tendo em vista a precisão, de $\pm 0,03\text{mm}$, associada ao processo de usinagem realizado no equipamento. O centro de usinagem em questão é da marca ROMI, modelo Discovery 560, com informações disponíveis em ROMI (2016).

Para a confecção dos corpos de prova rebitados e híbridos, os rebites de repuxo foram inseridos, por meio da utilização de um rebitador manual profissional, da marca Stanley, modelo 69800. O furo central com diâmetro de 4,1mm foi adotado, pois as áreas remanescentes atendiam os requisitos descritos pela Figura 17 e Equação Eq. 14. Outro motivo foi a razão de áreas. Com mais rebites, como 2 ou 4, pouco espaço da região de sobreposição seria destinado à camada adesiva.

Uma máquina universal de ensaio da empresa EMIC, linha DL, modelo 10.000, foi empregada para os ensaios de resistência aparente ao cisalhamento por tração, segundo Norma ASTM D1002 - 10 (2010). De acordo com Hart-Smith (1983), o procedimento de teste baseado nesta norma da ASTM é reconhecido como uma forma eficiente e pouco dispendiosa de avaliação do cisalhamento aparente em juntas coladas. A célula de carga utilizada foi de 100kN, com resolução de leitura de 10N, para medição de força e o deslocamento medido foi o do cabeçote da máquina.

4.2 Procedimento Experimental

4.2.1 Preparação das juntas de sobreposição simples

É importante salientar que o dispositivo construído por Silva Neto (2011) foi projetado para uma espessura de aderente de 2,5mm. Se a espessura do aderente adotada, utilizando as especificações de Hart-Smith (1983), foi de 2,35mm, isso resulta em uma espessura de adesivo de 0,15mm. Essa espessura de adesivo é compatível com a espessura sugerida por Da Silva *et al.* (2006), com relação aos melhores valores para filmes de camada adesiva em juntas coladas.

Essa etapa do experimento consistiu na colagem dos corpos de prova de alumínio. Obtenção de todos os segmentos ou pequenas barras que constituiriam as juntas a serem preparadas, ou seja, corte da barra chata de alumínio e posterior usinagem da espessura, de modo a reunir os aderentes necessários à confecção das juntas *single-lap*. Foram cortados com a serra segmentos de chapa de alumínio, além de *tabs* e posterior trabalho de acabamento com o auxílio de limas e lixas de granulações variáveis.

As dimensões dos aderentes foram de 101,6mm de comprimento, 25,4mm de largura e 2,35mm de espessura, ou seja, todos os CPs foram confeccionados de modo a possuírem as mesmas dimensões. Os *tabs* utilizados foram quadrados com lado de 25,4mm. A Figura 30 ilustra a junta *single-lap* colada retratada no presente estudo, com as medidas representadas em milímetros. Já a Figura 31 ilustra esboço da junta rebitada, onde o rebite se encontra no centro da área colada de uma polegada quadrada, ou seja, centralizado tanto em relação ao comprimento da região de sobreposição quanto em relação à largura desta.

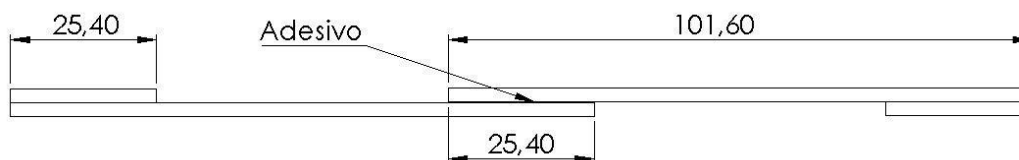


Figura 30: Modelo de junta adesiva utilizada, com dimensões em milímetros.

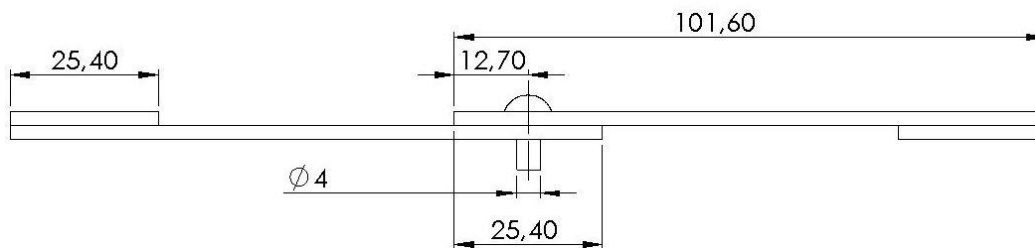


Figura 31: Modelo de junta rebitada (e híbrida), com dimensões em milímetros.

A primeira ação relacionada à colagem dos CPs de alumínio foi a pesagem das quantidades apropriadas de resina, endurecedor e nanoestruturas (quando aplicáveis). A resina foi mantida em vácuo por aproximadamente uma hora, antes de ser misturada ao endurecedor. Tal medida foi tomada com o intuito de minimizar a ocorrência de bolhas no sistema epóxi.

Com a utilização da lavadora ultrassônica digital, foi realizado o processo de dispersão das nanoestruturas, durante o tempo de uma hora, na resina. As concentrações de nanoestruturas se deram conforme ilustrado na Tabela 4. A concentração máxima foi definida como 2%, pois segundo Wemik e Meguid (2014), concentrações superiores apresentam aumento substancial da viscosidade da mistura resina-nanoestruturas e, com isso, o processo de dispersão e espalhamento do adesivo em grandes áreas é dificultado.

Tabela 4: Concentração de nanoestruturas nos corpos de prova.

Junta	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
	CNT [wt.%]*	CNT [wt.%]*	CNT [wt.%]*	CNT [wt.%]*
Colada	0,0	0,5	1,0	2,0
Híbrida	0,0	0,5	1,0	2,0
Rebitada	-	-	-	-

*wt. é referente à porcentagem em peso (do inglês *weight percent*).

No momento de mistura e posterior aplicação dos adesivos estruturais nos aderentes, é importante registrar as condições ambientais do local, como temperatura e umidade relativa do ar. Tal observação é válida, pois, segundo Adams *et al.* (1997), condições extremas de temperatura e

umidade podem afetar o desempenho do adesivo. Portanto, na Tabela 5, é registrada a condição ambiente para o momento da colagem de cada grupo específico.

Tabela 5: Condição ambiente na colagem dos CPs.

Junta	%CNT	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Colada	0,0	25,9	69
	0,5	25,4	63
	1,0	24,9	74
	2,0	25	65
Híbrida	0,0	25	65
	0,5	24,8	61
	1,0	25,3	64
	2,0	25,1	68

Para fabricação das juntas híbridas, inicialmente foi realizado o processo de colagem e, posteriormente, furação e inserção do rebite. Cada corpo de prova foi furado separadamente, mantendo-se alinhado por meio de gabarito, de modo a garantir o alinhamento do furo e prevenir microtrincas. O procedimento de colagem das juntas híbridas foi o mesmo adotado para aquelas exclusivamente coladas (sem rebite). Uma vez findada a cura e pós-cura dos corpos de prova, as juntas foram submetidas à furação, com a utilização de um centro de usinagem, como descrito em subseção de equipamentos. O centro de usinagem foi escolhido para a furação, devido à alta precisão relacionada ao processo de furação ($\pm 0,03\text{mm}$), além da facilidade de posicionamento das juntas para o processo. Uma vez furadas, as juntas receberam o rebite, inserido com o rebitador manual.

Com o intuito de melhor identificar cada corpo de prova, um sistema alfanumérico foi criado. O sistema consiste no uso de 3 à 5 caracteres. O primeiro caractere discerne se a junta é colada, rebitada ou híbrida. Seguem-se dois números para representar a porcentagem de nanoestruturas, quando para junta colada ou híbrida. Já o penúltimo caractere, identifica a posição da junta no dispositivo de colagem durante o processo de cura (ou ordem em que a junta é ensaiada, para as rebitadas). Por fim, o último caractere está relacionado à barra aderente componente da junta, distinguindo entre a barra que fica por baixo (inferior) e a que é posicionada por cima (superior), no dispositivo de colagem, para o processo de cura, ou ao ser rebitada. A Tabela 6 auxilia no entendimento do sistema comentado. Foram ensaiados ao menos seis CPs para cada caso.

Tabela 6: Exemplo de sistema alfanumérico adotado para identificação dos CPs.

Junta	Caractere			
	1°	2° e 3°	4°	5°
Colada	C	00		
		05		i
Híbrida	H	10	1; 2; 3; 4; 5; 6	
		20		
Rebitada	R	-		s

Como mencionado por Uehara e Sakurai (2002), a rugosidade da superfície de colagem é um dos parâmetros que interferem na qualidade da adesão. Portanto, antes da colagem, de posse de todos os aderentes metálicos já em suas dimensões finais, as rugosidades para a região de colagem foram sistematicamente avaliadas com o rugosímetro e, com o auxílio de lixas, fixadas para um valor de aproximadamente de 5µm em todos os aderentes. Dessa forma, grandes variações de rugosidade não ocorreriam como fator comprometedor do processo de união das juntas.

Para o momento de colagem dos aderentes, as juntas foram limpas com acetona e o adesivo aplicado com uma espátula de madeira, os CPs foram colocados em espaços delimitados dos dispositivos metálicos desenvolvidos no Laboratório de Compósitos (conforme ilustrado na Figura 32). O dispositivo metálico foi posicionado na prensa, para que pressão uniforme fosse exercida nas regiões de sobreposição das juntas, durante tempo destinado à cura do adesivo. Por fim, estes foram levados à estufa, após cura à temperatura ambiente, para que ocorresse a pós-cura do adesivo, conforme comentado anteriormente, de acordo com recomendação do fabricante.



Figura 32: Posicionamento dos CPs com a utilização dos dispositivos de colagem do Laboratório de Compósitos da UFMG.

Com o término do tempo destinado à pós-cura das juntas, foram colados os *tabs* de alinhamento nas extremidades e as juntas foram dispostas, com auxílio dos grampos C (Figura 29), para cura do processo de colagem dos *tabs*. Após os CPs estarem preparados, inclusive já com os *tabs* para encaixe na máquina de tração, foram removidos excessos de adesivo, localizados fora da área de colagem, chamados de *tapering*⁵ ou *taper*. Para a remoção do *tapering*, usou-se um bisturi e diferentes estiletos. A Figura 33 mostra um exemplo do grupo colado com 1,0% CNT, antes e depois da remoção do excesso de adesivo.



Figura 33: CP antes e depois da remoção do *tapering*.

⁵ Segundo Da Silva e Öchsner (2008) o *tapering* representa quantidade de adesivo além da região de sobreposição. Esse pode se apresentar como excesso de adesivo decorrente do processo de colagem, ou mesmo pode ser mantido como requisito de projeto da união adesivada.

4.2.2 Investigação da espessura da camada adesiva

Para a medição da espessura das camadas de adesivo, primeiramente foi utilizado o microscópio de aumento de 400 vezes para fotografia da região lateral das juntas, de modo a ser visualizada a região da espessura do adesivo. Em seguida, as medidas foram realizadas com o auxílio do programa de tratamento de imagens e de distribuição livre, chamado ImageJ e citado no trabalho de Silva Neto (2011). A calibração ocorreu com a definição de uma medida conhecida sendo discriminada na imagem, para geração da escala mm por pixels. Cinco medidas foram realizadas, em pontos distintos, partindo das extremidades, por concentrarem tensão, segundo Hart-Smith (1973), sendo pontos importantes. O valor para a espessura considerado foi a média simples das medições (Eq. 18). A Figura 34 e a equação 16 auxiliam no entendimento do processo adotado. Os pontos considerados para as medidas foram, 1º e 5º pontos nas extremidades, 2º e 4º pontos nas distâncias médias entre extremidades e centro (6,35mm) e 3º ponto no centro, ou seja, à 12,70mm de ambas extremidades.

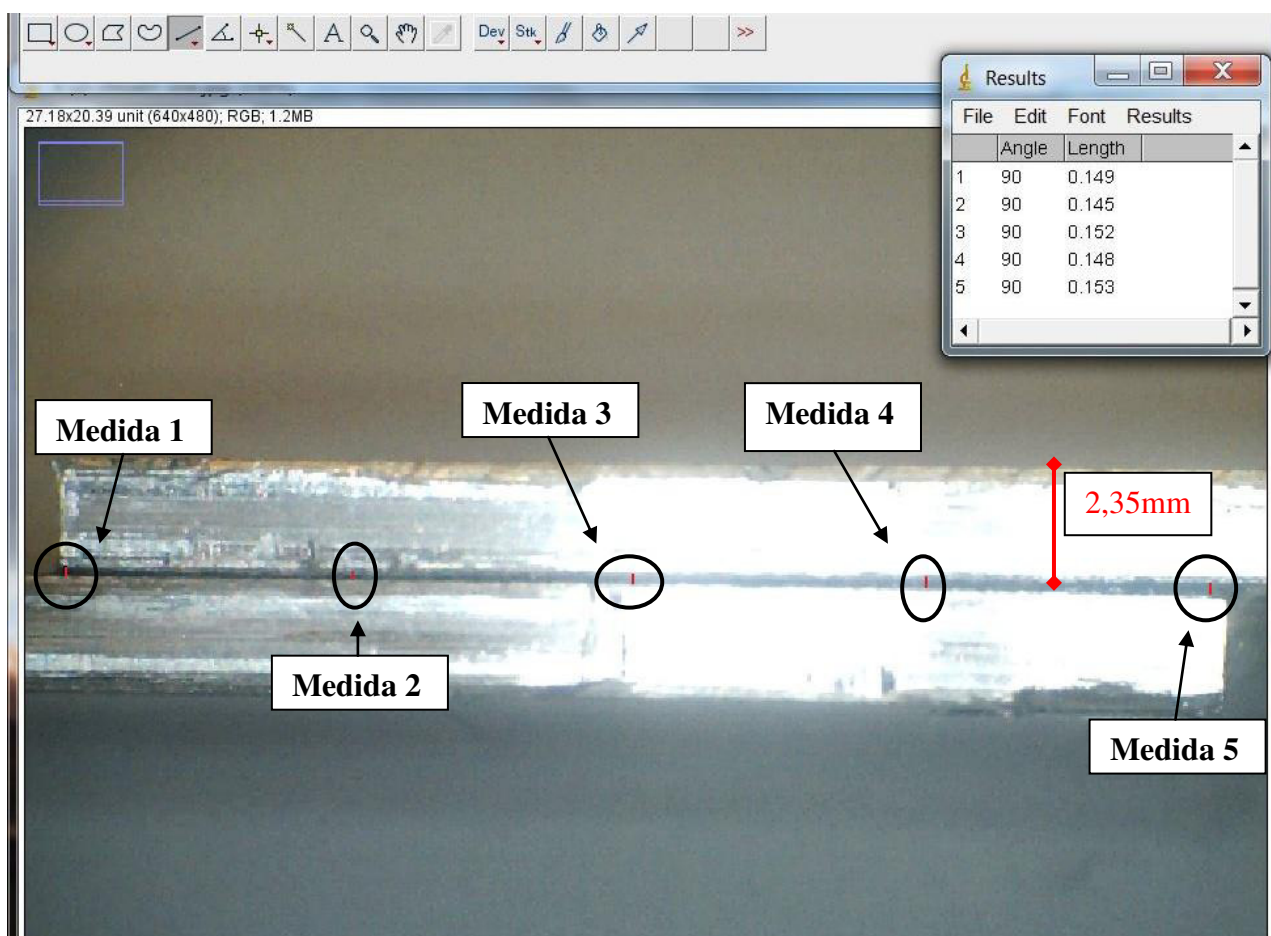


Figura 34: Cálculo da espessura da camada adesiva, com auxílio do programa ImageJ.

$$\text{Espessura do adesivo} = \frac{\text{Med. 1} + \text{Med. 2} + \text{Med. 3} + \text{Med. 4} + \text{Med. 5}}{5} \quad \text{Eq. 18}$$

4.2.3 Ensaio dos Corpos de Prova

A máquina de ensaios universal foi utilizada para os ensaios de resistência aparente ao cisalhamento por tração. A célula de carga utilizada (Figura 35) possui capacidade máxima de 100 kN e o deslocamento medido foi o referente ao cabeçote. A velocidade de deslocamento do cabeçote da máquina foi de 1,3 mm/min. Foram realizados pelo menos seis ensaios como previsto pela norma ASTM D1002 (2010). Esse número foi satisfatório, uma vez que a norma de referência recomenda cinco. O posicionamento das juntas híbridas e rebitadas foi tal que a “cabeça” do rebite estaria à direita, em um posicionamento conforme o ilustrado na Figura 35, ou seja, voltada ao aderente que é deslocado pela garra da máquina.

Para verificar as variações medidas quanto a serem estatisticamente significativas ou não, foi realizada a análise de variância ANOVA, com nível de significância $\alpha = 0,05$. Além disso, também foi utilizado o teste de Tukey para realização de comparação entre as médias.



Figura 35: Corpo de prova posicionado para ensaio na Máquina de ensaios universal.

Como comentado em seção de revisão bibliográfica, Hart-Smith (1983) menciona quanto à previsão do modo de falha para o uso de um adesivo frágil, a partir das dimensões dos aderentes da junta colada simples de sobreposição. O caso comentado por Hart-Smith envolve aderentes de alumínio, sendo assim pertinente ao presente trabalho, uma vez que essa é a matéria prima dos aderentes aqui utilizados. A Figura 36 ilustra o Gráfico apresentado na pesquisa de Hart-Smith. As curvas do gráfico são discriminadas pela razão entre o comprimento de sobreposição e espessura do aderente. A parte da Figura 36 marcada (com um círculo) representa a região correspondente às dimensões dos corpos de prova utilizados no presente trabalho.

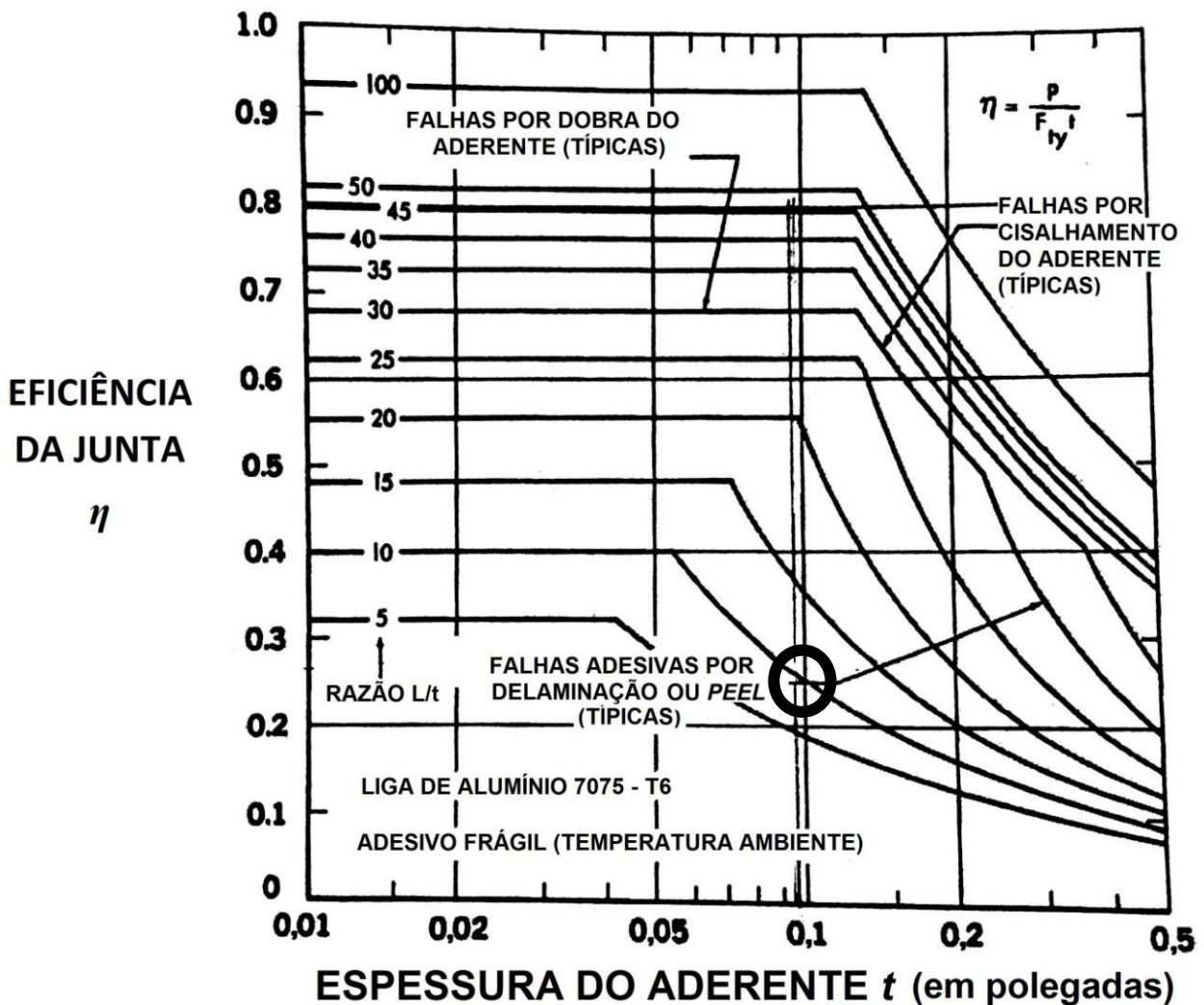


Figura 36: Previsão do modo de falha a partir das dimensões dos aderentes.

(HART-SMITH, 1983)

Como é observado pela região delimitada no Gráfico de Hart-Smith (1983), o tipo de falha esperado para as juntas coladas utilizadas neste trabalho deverá ser na sua maioria adesiva. Além disso, é esperada falha relacionada à tensão de *peel*. Essa expectativa, baseada em trabalho de Hart-Smith, será testada e confrontada com outros fatores, como a concentração de CNT, em sessão seguinte, relativa aos resultados.

4.2.4 Análise dos modos de falha

De maneira similar ao procedimento para medição da espessura da camada adesiva, o programa de tratamento de imagens de distribuição livre, ImageJ, foi utilizado para medição dos modos de falha. É possível visualizar, por exemplo, o caso observado para o CP do grupo 3 das juntas híbridas, na Figura 37. A figura ilustra o processo de medição da área para distinção dos modos de falha. É medida a área relacionada à falha coesiva e, posteriormente, esta área é comparada à área total, com o intuito de se obterem as proporções de falha adesiva e coesiva.

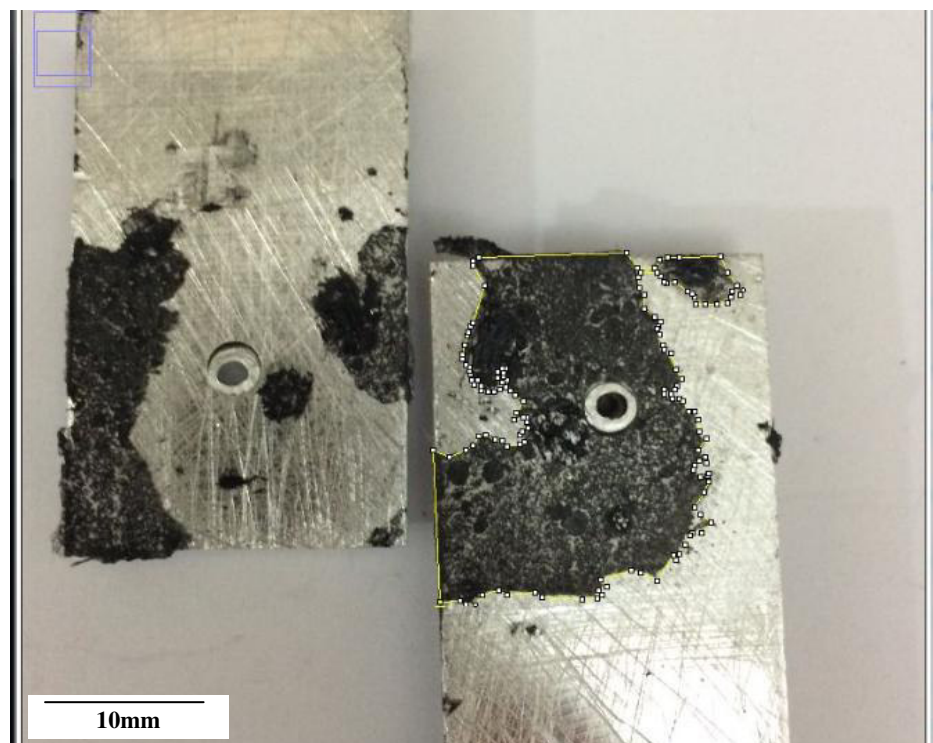


Figura 37: Medição e caracterização do modo de falha para o CP 3 - junta híbrida 1% p/p CNT.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como forma de avaliar características de juntas coladas, o ensaio de caracterização mecânica foi conduzido segundo a norma ASTM D1002-10 (2010). O procedimento, para junta *single-lap* permitiu, entre outras análises, avaliar a resistência aparente ao cisalhamento do adesivo. A partir dos resultados obtidos, foi possível comparar o efeito das concentrações de nanoestruturas para o adesivo utilizado neste trabalho, além de compará-lo a outras variáveis, como modo de falha e espessura do adesivo. Informações relativas a ensaios mecânicos de caracterização, modos de falha, espessura do adesivo, concentração de nanoestruturas e tipo de junta são discutidos a fim de investigar o comportamento das amostras testadas neste trabalho. Os resultados para cada configuração de junta colada (Tabela 4) são descritos como se segue e esses resultados são comentados por meio de comparações entre os grupos testados.

A carga máxima é um dos critérios considerados para a avaliação das juntas. Os resultados para as curvas de força em função do deslocamento, dos grupos de juntas *single-lap* exclusivamente coladas, são mostrados nas Figura 38, Figura 40, Figura 42 e Figura 44. Posteriormente, na Figura 48, são reunidos valores máximos para capacidade de carga, das juntas coladas, relativos a cada concentração de CNT. Uma comparação é discutida, juntamente com a apresentação dos resultados obtidos.

5.1 Juntas coladas

5.1.1 Junta colada sem adição de CNT

Antes de serem realizados os ensaios de resistência aparente ao cisalhamento, foram registrados os valores médios para a espessura da camada adesiva das juntas coladas de cada grupo avaliado. A Tabela 7 apresenta os valores medidos por meio de imagens das laterais das juntas, processados pelo programa ImageJ, conforme representado na Figura 34.

Tabela 7: Espessuras de camada adesiva – juntas sem CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1465	0,012510
2	0,1495	0,040355
3	0,1377	0,024869
4	0,1246	0,030689
5	0,1367	0,026289
6	0,1248	0,026136

DP = Desvio Padrão

A Figura 38 e a Tabela 8 mostram as curvas características e os resultados obtidos para os ensaios das juntas coladas, respectivamente. Além disso, os modos de falha para cada corpo de prova podem ser visualizados na Figura 39, na qual os círculos pretos indicam a região de falha coesiva.

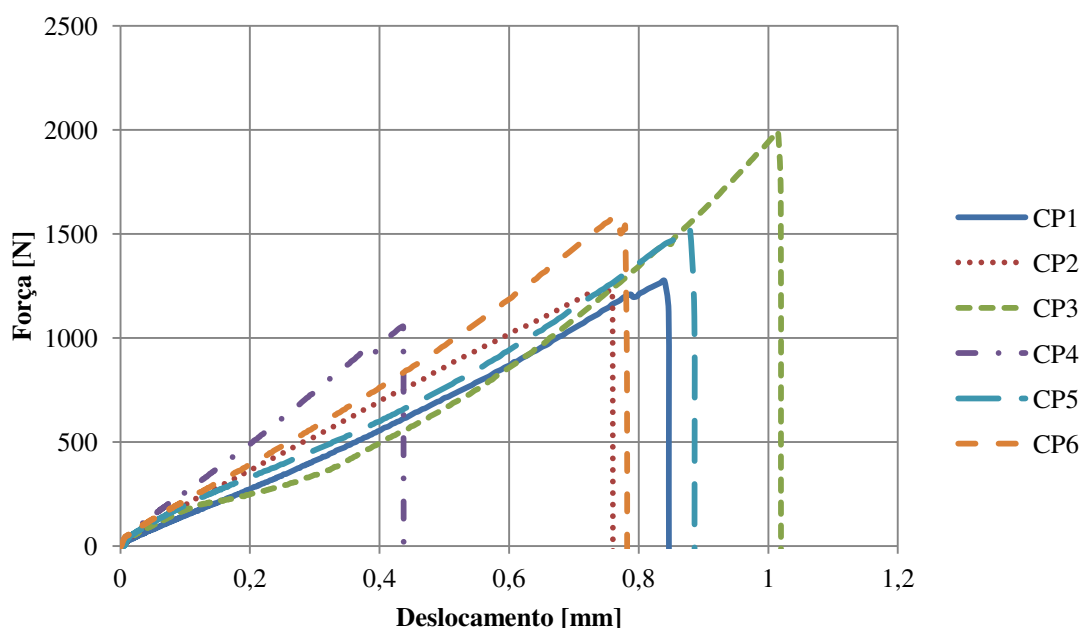


Figura 38: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 1 (0,0% CNT) – juntas coladas.

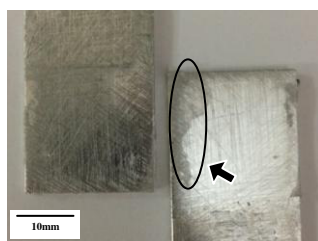
A partir do deslocamento de 0,2mm, é possível perceber diferença na rigidez das juntas. Os CPs 4 e 3, de menor e maior capacidade de carga, respectivamente, se destacam em relação aos demais. O CP4 apresenta elevada rigidez, evidenciada pela grande inclinação da curva força em

função do deslocamento. Já o CP3, apresenta maior capacidade de carga e deslocamento, associados à baixa rigidez, evidenciada por sua curva. Os modos de falha para esses dois corpos de prova mostram falha mista, contudo, de proporções distintas. O CP3, que suportou maior carga, apresenta falha com maior proporção coesiva, quando comparado ao CP4, de menor capacidade de carga. Essa diferença nos modos de falha pode estar associada à distribuição de tensões ao longo da região colada.

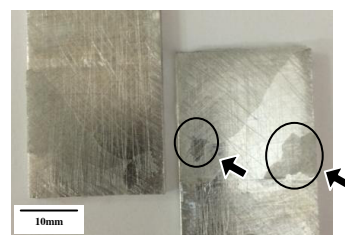
Tabela 8: Resultados dos ensaios das juntas coladas sem adição de CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1272,7	1,97	0,8477	ADH-COH (75-25)
2	1230,8	1,91	0,7610	ADH-COH (70-30)
3	1991,2	3,09	1,0203	ADH-COH (65-35)
4	1053,6	1,63	0,4382	ADH-COH (90-10)
5	1524,0	2,36	0,8870	ADH-COH (85-15)
6	1582	2,45	0,7829	ADH-COH (80-20)
Média	1442,4	2,24	0,7895	
Máximo	1991,2	3,09	1,0203	
DP	332,3	0,52	0,1952	
CV (%)	23,04	23,04	24,72	

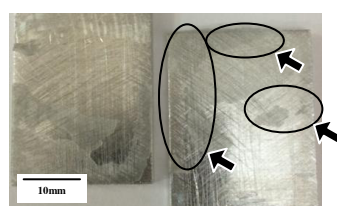
F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.



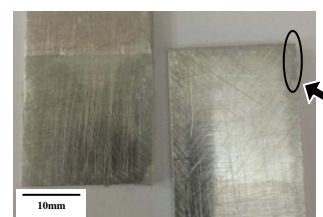
(a) CP-1



(b) CP-2



(c) CP-3



(d) CP-4

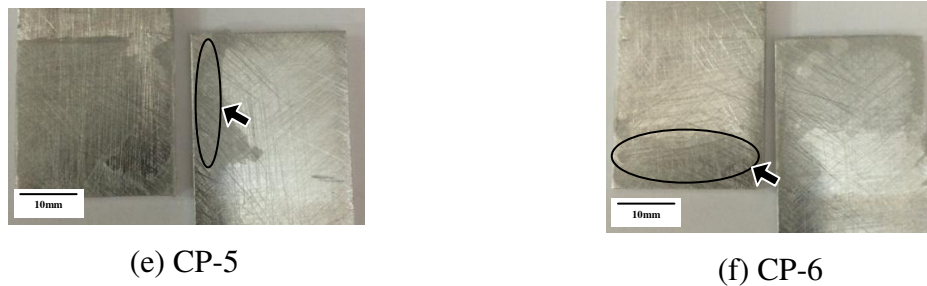


Figura 39: Modos de falha das juntas coladas sem adição de CNT.

5.1.2 Junta colada com 0,5% CNT

São apresentados os valores para a espessura média da região de sobreposição de todos os corpos de prova ensaiados para o grupo com 0,5% de CNT. Os desvios padrões são inferiores a 5%, sendo esses valores, portanto, aceitáveis por apresentarem baixa variação.

Tabela 9: Espessuras de camada adesiva – juntas com 0,5% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1509	0,04186
2	0,1757	0,03288
3	0,1512	0,03226
4	0,1671	0,03539
5	0,1467	0,03620
6	0,182	0,04556
7	0,1725	0,03414

DP = Desvio Padrão

Com a adição de CNT, é evidenciado pelos gráficos da Figura 40, que as inclinações das curvas para os CPs sofrem aumento, em relação ao grupo 1, o que indica um aumento da rigidez aparente. No entanto, o aumento da rigidez trouxe como consequência uma redução do deslocamento na falha e um aumento na tensão de falha/ruptura. Uma hipótese para o aumento da rigidez, associado à mudança na capacidade de carga, está relacionada aos efeitos do nanotubo no adesivo. Os CNT interagem com cadeias poliméricas do adesivo, formando estruturas mecânicas, capazes de dificultar a propagação de trincas no adesivo. Isso faz com que a energia dissipada (área compreendida abaixo da curva) seja maior. Outro fator é que os nanotubos "interagem" com a

superfície do substrato, formando regiões de ancoragem (setas amarelas na Figura 41) entre o adesivo e as rugosidades da superfície do aderente.

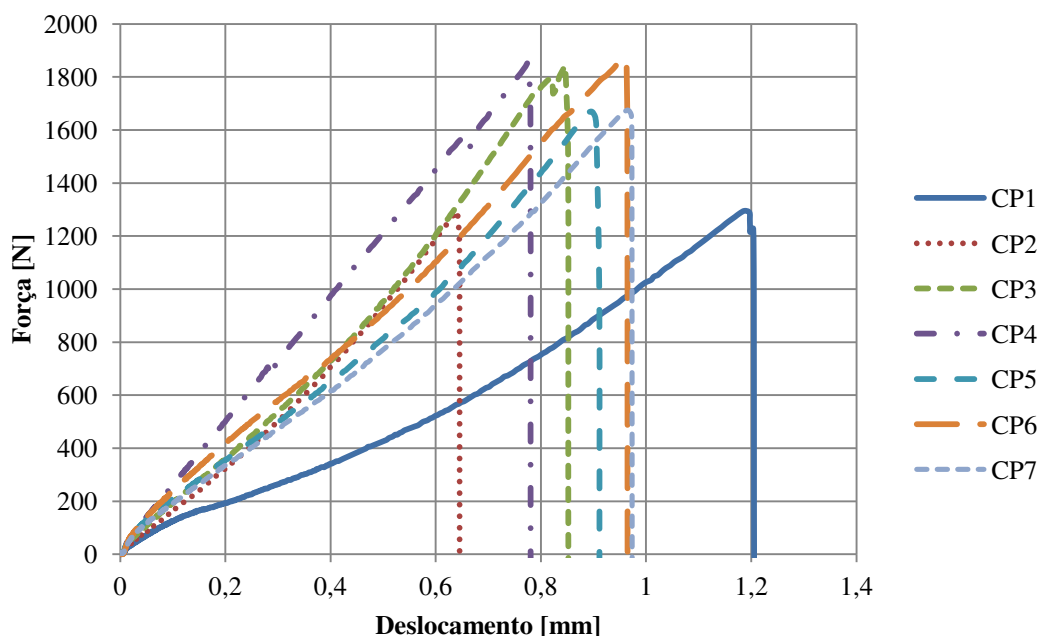


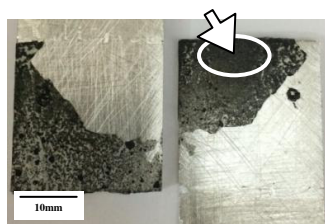
Figura 40: Curvas de juntas coladas, para corpos de prova do grupo 2 (0,5% CNT).

Os resultados para os ensaios e os modos de falha são mostrados na Tabela 10 e Figura 41, respectivamente. Analisando os resultados apresentados, é possível reforçar a suposição para explicar o aumento da capacidade de carga das juntas com MWCNT: a interação das cadeias poliméricas na mistura, que pode ter sido responsável por representar uma barreira à propagação de trincas. Contudo, apesar desse benefício no comportamento da junta, associado à adição do nanotubo, essa nanoestrutura pode apresentar aglomerações. A presença de aglomerados de CNT, representados por pontos escuros concentrados nos modos de falha (Figura 41, região envolta por círculo branco e apontado por seta de mesma cor), pode representar concentradores de tensão. Portanto, essas aglomerações poderiam ser responsáveis pelo comportamento desigual observado nas curvas para força x deslocamento (Figura 40), onde é possível perceber as variações de rigidez entre corpos de prova distintos, pelas curvas para cada CP.

Tabela 10: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 0,5% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1295,3	2,01	1,2058	ADH-COH (75-25)
2	1295,3	2,01	0,6452	ADH-COH (95-05)
3	1839,8	2,85	0,8528	ADH-COH (85-15)
4	1852,7	2,87	0,7809	ADH-COH (70-30)
5	1669,0	2,59	0,9117	ADH-COH (90-10)
6	1868,8	2,90	0,9658	ADH-COH (60-40)
7	1675,5	2,60	0,9744	ADH-COH (90-10)
Média	1642,3	2,54	0,9052	
Máximo	1868,8	2,90	1,2058	
DP	250,7	0,39	0,1754	
CV (%)	15,27	15,32	19,38	

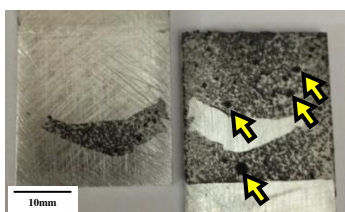
F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.



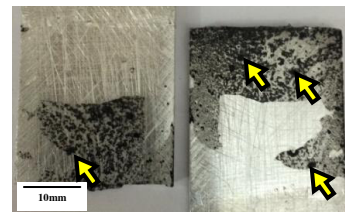
(a) CP-1



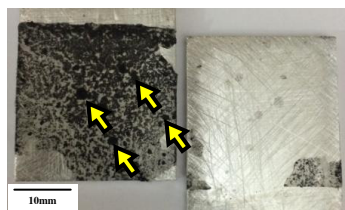
(b) CP-2



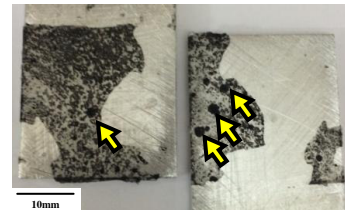
(c) CP-3



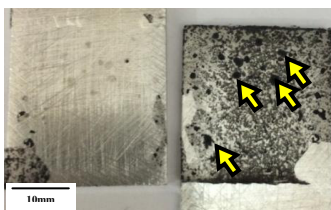
(d) CP-4



(e) CP-5



(e) CP-6



(f) CP-7

Figura 41: Modos de falha das juntas coladas com 0,5% CNT.

5.1.3 Junta colada com 1,0% CNT

As espessuras para a camada adesiva são apresentadas na Tabela 11. Alguma variação é observada entre corpos de prova distintos, sendo observada espessura pouco superior àquela observada para os grupos previamente comentados (0 e 0,5 % CNT). O aumento da espessura se deve, provavelmente, à elevação da viscosidade da mistura, decorrente da maior concentração de CNT. Contudo, a variação ainda é baixa, o que confirma a eficiência do método de controle relacionado à utilização da prensa, como comentado em seção anterior.

Tabela 11: Espessuras de camada adesiva – juntas com 1,0% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1728	0,04289
2	0,1681	0,04432
3	0,1697	0,03043
4	0,1870	0,05009
5	0,1624	0,02463
6	0,1854	0,01788

DP = Desvio Padrão

Analisando o aspecto das curvas mostradas (Figura 42) e os valores apresentados na Tabela 12, é observado comportamento que se destaca da média para a curva do CP1. Esse corpo de prova apresentou deslocamento máximo cerca de 30% superior ao segundo CP com maior deslocamento e 36% superior ao deslocamento máximo médio para os CPs. Além disso, o CP1 apresentou maior capacidade de carga, dentre os seis corpos de prova ensaiados. Quando são analisados os modos de falha (Figura 43), constata-se melhor dispersão de nanotubos para o CP1, o que pode ter contribuído

com o aumento da capacidade de carga para esse CP. Em contrapartida o CP4 apresenta concentração de aglomerados (setas e círculos brancos na Figura 43d), caracterizados por menor uniformidade na dispersão de nanotubos. Portanto, apesar dos CPs 1 e 4 apresentarem modos de falha mistos (a componente coesiva da falha é indicada por círculos e setas pretos na Figura 43) com porcentagens similares de falha adesiva e coesiva, a dispersão dos nanotubos pode ser determinante no comportamento da falha, distribuição de tensões na interface e capacidade de carga da junta.

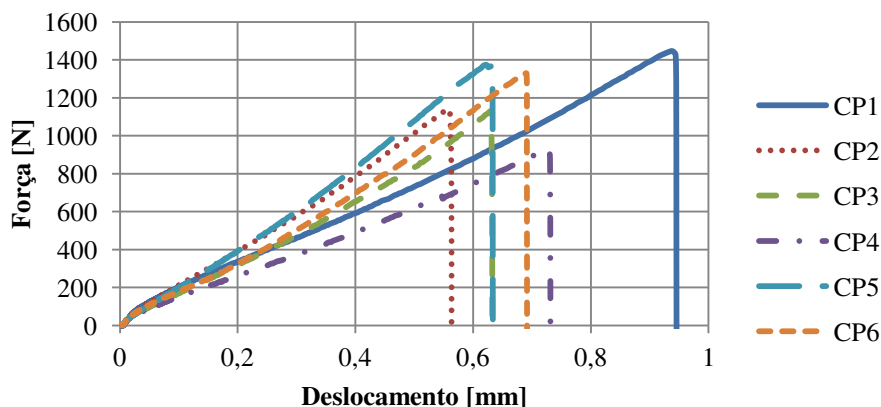


Figura 42: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 3 (1,0% CNT) – juntas coladas.

Tabela 12: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 1,0% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1446,7	2,24	0,9468	ADH-COH (95-05)
2	1140,6	1,77	0,5639	ADH-COH (90-10)
3	1127,7	1,75	0,6332	ADH-COH (85-15)
4	928,0	1,44	0,7320	ADH-COH (95-05)
5	1372,6	2,13	0,6346	ADH-COH (90-10)
6	1327,5	2,06	0,6925	ADH-COH (70-30)
Média	1223,8	1,90	0,7005	
Máximo	1446,7	2,24	0,9468	
DP	193,0	0,30	0,1336	
CV (%)	15,77	15,77	19,07	

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

Apesar do aumento da concentração de CNT, o grupo 3 apresentou resultados inferiores aos demais. Esse fenômeno foi investigado em relação aos modos de falha para o grupo, bem como em relação à camada adesiva. O aumento da concentração de CNT pode ter facilitado a ocorrência de aglomerados, perceptíveis, em maior número, nos modos de falha (Figura 43d). Além disso, com o aumento da concentração de nanoestruturas, aumentou-se a viscosidade da camada adesiva, o que dificultou o espalhamento do adesivo na área colada.

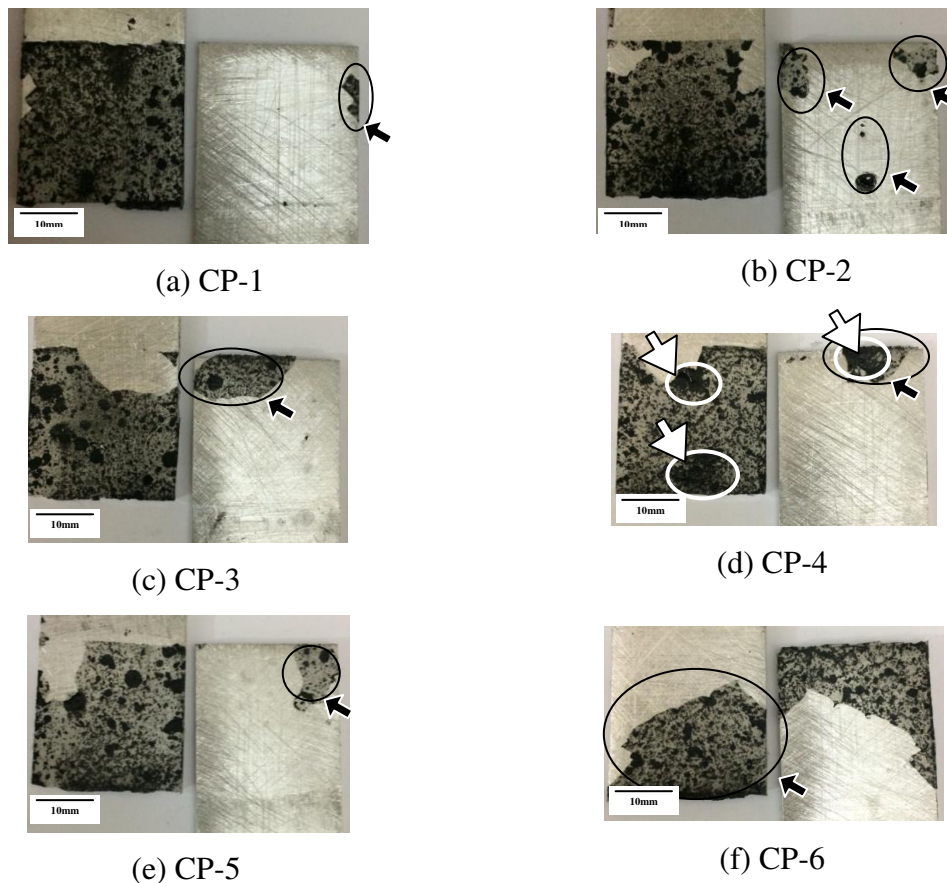


Figura 43: Modos de falha das juntas coladas com 1,0% CNT.

5.1.4 Junta colada com 2,0% CNT

Novamente as espessuras médias foram medidas e registradas para os CPs. Os valores obtidos são registrados na Tabela 13. É possível notar um pequeno aumento na espessura da camada adesiva.

Tabela 13: Espessuras de camada adesiva – juntas com 2,0% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1769	0,05031
2	0,1848	0,04741
3	0,1986	0,04583
4	0,1822	0,04517
5	0,2304	0,04103
6	0,1892	0,03282

DP = Desvio Padrão

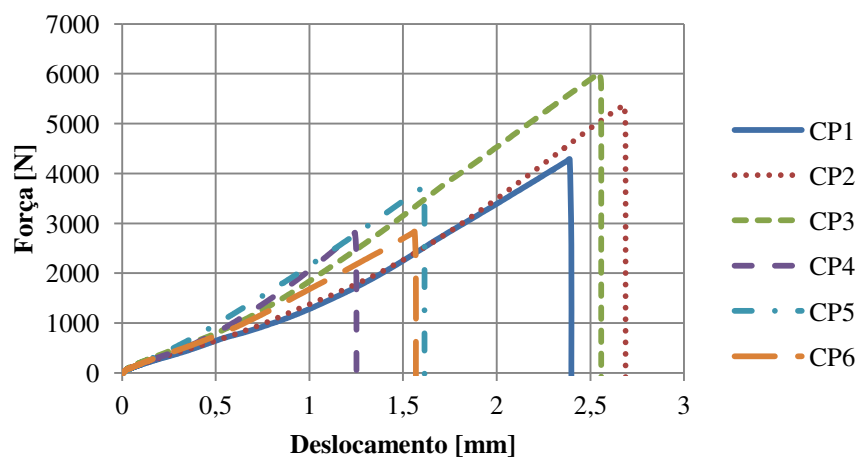


Figura 44: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 4 (2,0% CNT), para juntas coladas.

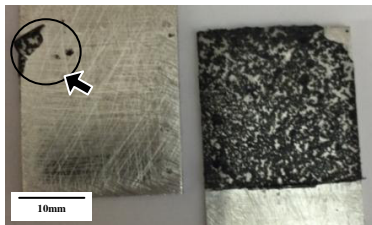
A partir da observação das curvas para o grupo 4 (Figura 44), é possível perceber certa variação no aspecto das curvas para os seis corpos de prova. A proximidade entre as curvas é interrompida já para um valor de deslocamento próximo a 0,5mm. A partir desse ponto, algumas apresentam forças mais elevadas do que as demais, além de distintos deslocamentos. Essa variação entre corpos de prova do mesmo grupo é evidenciada pelo coeficiente de variação (CV) apresentado na Tabela 14. Comparando-se o resultado para a força máxima média do grupo 4 com o grupo 2, que vinha apresentando o maior resultado, é possível notar que o grupo 4 supera o 2 em 150%. Ao se observar o CP3 da Figura 45, pode-se perceber uma distribuição de nanoestruturas de nanotubos

de carbono quase homogênea e uniforme. Tal fato pode ter contribuído para o aumento da resistência mecânica / capacidade de carga.

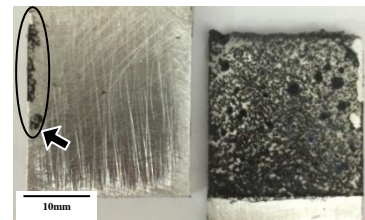
Tabela 14: Resultados dos ensaios das juntas coladas com 2,0% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	4285,4	6,64	2,3995	ADH-COH (95-05)
2	5371,2	8,33	2,6885	ADH-COH (95-05)
3	6012,4	9,32	2,5581	ADH-COH (95-05)
4	2806,4	4,35	1,2513	ADH-COH (80-20)
5	3718,3	5,76	1,6158	ADH-COH (90-10)
6	2829,0	4,38	1,5683	ADH-COH (95-05)
Média	4170,5	6,46	2,0136	
Máximo	6012,4	9,32	2,6885	
DP	1320,0	2,05	0,6064	
CV (%)	31,65	31,65	30,11	

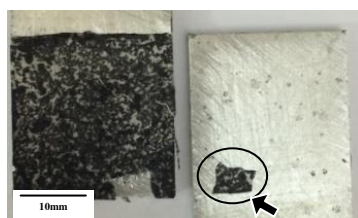
F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.



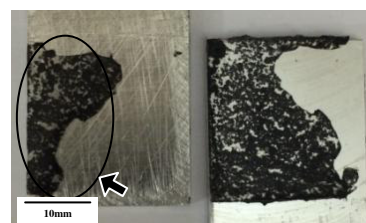
(a) CP-1



(b) CP-2



(c) CP-3



(d) CP-4



Figura 45: Modos de falha das juntas coladas com 2,0% CNT.

Outro aspecto que chama a atenção é o elevado aumento da capacidade de carga apresentado por esse grupo, em relação ao grupo 1 (0,0% CNT). O aumento da capacidade de carga é de 189%, em relação ao grupo 1, ao passo que o grupo 2 apresentou melhora de 13,5% quando comparado ao mesmo grupo. Como forma de análise desse aumento excessivo da capacidade de carga, é possível discriminar, pela Figura 44, dois subgrupos dentre os seis corpos de prova ensaiados. Há aqueles com apresentação de força média em torno de 3118 N (CPs 4,5 e 6) e outros com média de 5222 N (CPs 1, 2 e 3). Esses grupos são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Subgrupos do grupo 4.

Subgrupo	CPs Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]
4.1	1, 2 e 3	5223,0	8,10	2,5487
4.2	4, 5 e 6	3117,9	4,83	1,47785

F = Força máxima média; T = Tensão máxima média; d = deslocamento máximo médio.

Como forma de entender o que teria ocasionado o comportamento distinto em termos da capacidade de carga e deslocamento entre CPs para o grupo 4, em dois subgrupos, a região lateral de sobreposição das juntas coladas foi analisada. A Figura 46 apresenta a lateral dos CPs para cada subgrupo. A partir da análise das imagens apresentadas, foi observada a presença de *tapering* nas extremidades dos CPs, sobretudo naqueles do subgrupo 4.1, de maior capacidade de carga e deslocamento. A fim de mensurar a influência da presença de *tapering*⁶, esse foi medido nos CPs, em termos de sua área lateral, conforme procedimento mostrado na Figura 47. A medição foi realizada com o auxílio do programa ImageJ.

⁶ Por uma falha na preparação dos CPs nem todos os *Taperings* foram removidos.

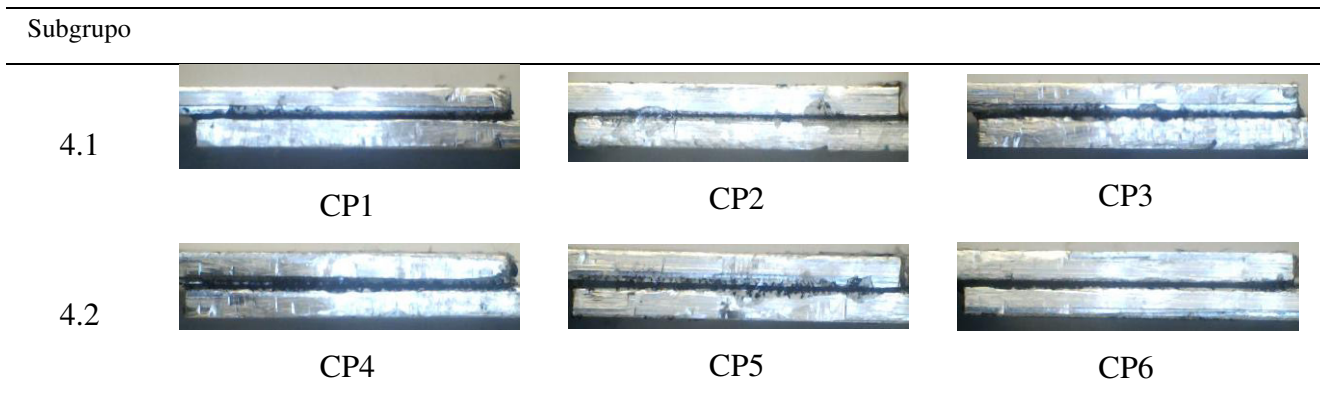


Figura 46: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas coladas do grupo 4.

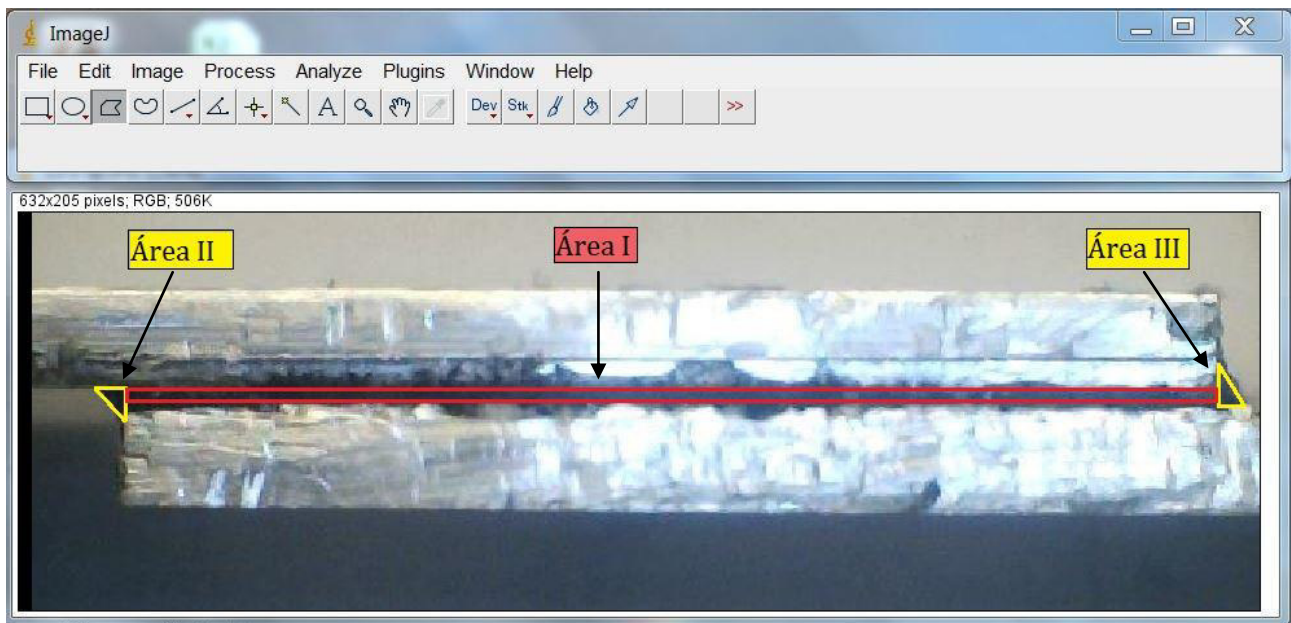


Figura 47: Representação de medição da área correspondente à presença de *tapering*.

Uma vez avaliadas as imagens laterais da região de sobreposição dos CPs do grupo 4, antes de serem ensaiados, foram obtidos os valores apresentados na Tabela 16 para as áreas I, II e III médias entre os CPs. Uma vez que houve pouco ou nenhum *tapering* remanescente nos CPs do subgrupo 4.2, as áreas II e III para esse subgrupo são apresentadas como nulas, na tabela. Já o item relativo à área adicional (Tabela 16), foi obtido pela razão da soma das áreas médias II e III pelo

valor da área média I. Com isso, foi possível inferir a porcentagem adicional de área, relativa a presença de *tapering*.

Tabela 16: Áreas em milímetros quadrados.

Subgrupo	Área I	Área II	Área III	Área adicional
4.1	4,8542	0,2694	0,3080	11%
4.2	4,9148	–	–	–

A partir da análise realizada, foram discriminados dois subgrupos, 4.1 e 4.2, do grupo 4. O primeiro, contendo adesivo remanescente nas extremidades, ou seja, *tapering*. Já para o segundo, a presença de *tapering* é nula ou desprezível. Essa distinção entre subgrupos permitiu que fosse estimada a influência do *tapering* em relação ao desempenho mecânico das juntas coladas testadas. Ao se comparar a capacidade de carga entre os subgrupos 4.1 e 4.2, o primeiro apresentou valor cerca de 67,5% superior ao segundo. Além disso, a área adicional de adesivo nanomodificado na forma de *tapering* nas extremidades foi constatada como 11%. Portanto, a razão para o melhor desempenho está associada à melhor dispersão do CNT e à presença do *tapering*.

5.1.5 Comparação geral do grupo de juntas coladas

Como forma de melhor comparar os resultados de capacidade de carga entre as juntas coladas, dentre diferentes composições de nanoestruturas, a Tabela 17 e a Figura 48 são apresentadas. Os grupos 1, 2, 3 e 4 são representados, na Tabela 17, pelas suas concentrações de CNT, na 1ª coluna. Forças, tensões e deslocamentos médios para cada grupo são comparados, bem como os respectivos coeficientes de variação (Tabela 17) e desvios padrão (Figura 48).

Tabela 17: Resultados dos ensaios das juntas coladas.

% CNT	F [N]		T [MPa]		d [mm]	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
0,0	1442,38	23,04	2,24	23,04	0,7895	24,7213
0,5	1636,82	16,75	2,55	16,75	0,8937	21,1745
1,0	1223,84	15,77	1,90	15,77	0,7005	19,0708
2,0	4170,45	31,65	6,46	31,65	2,0136	30,1148

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

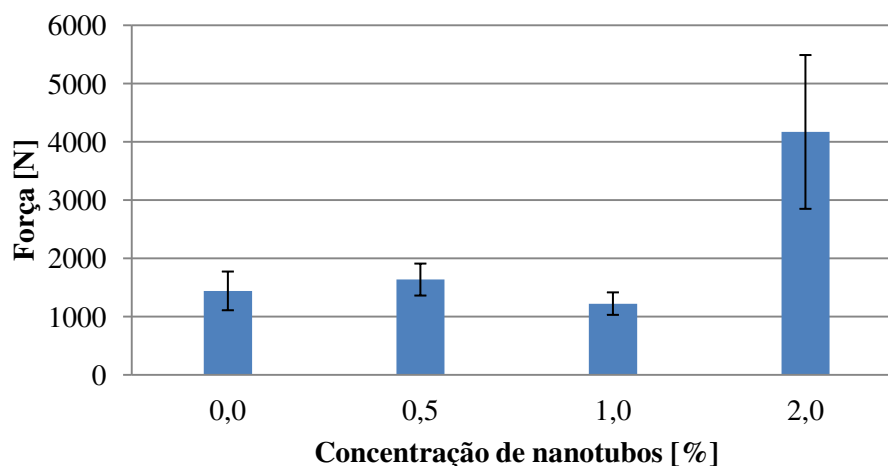


Figura 48: Resultados de força para juntas coladas – Carga máxima.

A partir da análise de forças para as concentrações de nanoestruturas, percebe-se que a força máxima para o adesivo foi obtida para uma concentração de 2% CNT. Estudos anteriores de Da Cruz (2013) e Oliva (2015) também mostraram essa tendência. Uma razão para o grupo 4 (2% CNT) apresentar a maior capacidade de carga provavelmente está relacionada a dispersão dos nanotubos, evidenciada em seus modos de falha, além da presença de *tapering*. Quando os modos de falha do grupo 4 são comparados aos do grupo 3 (1% CNT), percebe-se a melhor dispersão do CNT. Além disso, o grupo 3 apresenta a maior concentração de aglomerações, associada a má dispersão do nanotubo ao longo da sua região de sobreposição, o que teria propiciado o comportamento pior do que o esperado para essa concentração de nanoestruturas.

Por meio da análise estatística do teste de Tukey, foi observada a variação das médias de força (Figura 49), além de deslocamento para a força máxima (Figura 50). O teste, com nível de significância de 5%, evidenciou que as concentrações de 0,5% e 1% não são estatisticamente diferentes da nula (0%) e, por outro lado, a concentração de 2% é estatisticamente diferente de todas as demais. 1% se mostrou estatisticamente diferente de 0,5% e da nula. Tais resultados são mostrados na Tabela 18 e, segundo Figura 48 e Tabela 17, o aumento da carga máxima para a adição de CNT foi de 189%, para o caso das juntas coladas.

Tabela 18: Análise ANOVA com teste de Tukey para resultados de força máxima e deslocamento na força máxima para juntas coladas.

Análise comparativa entre as médias		
	Força máxima	Deslocamento
0,5% - 0,0%	Não significativa	Não significativa
1,0% - 0,0%	Não significativa	Não significativa
2,0% - 0,0%	Significante	Significante
1,0% - 0,5%	Significante	Significante
2,0% - 0,5%	Significante	Significante
2,0% - 1,0%	Significante	Significante

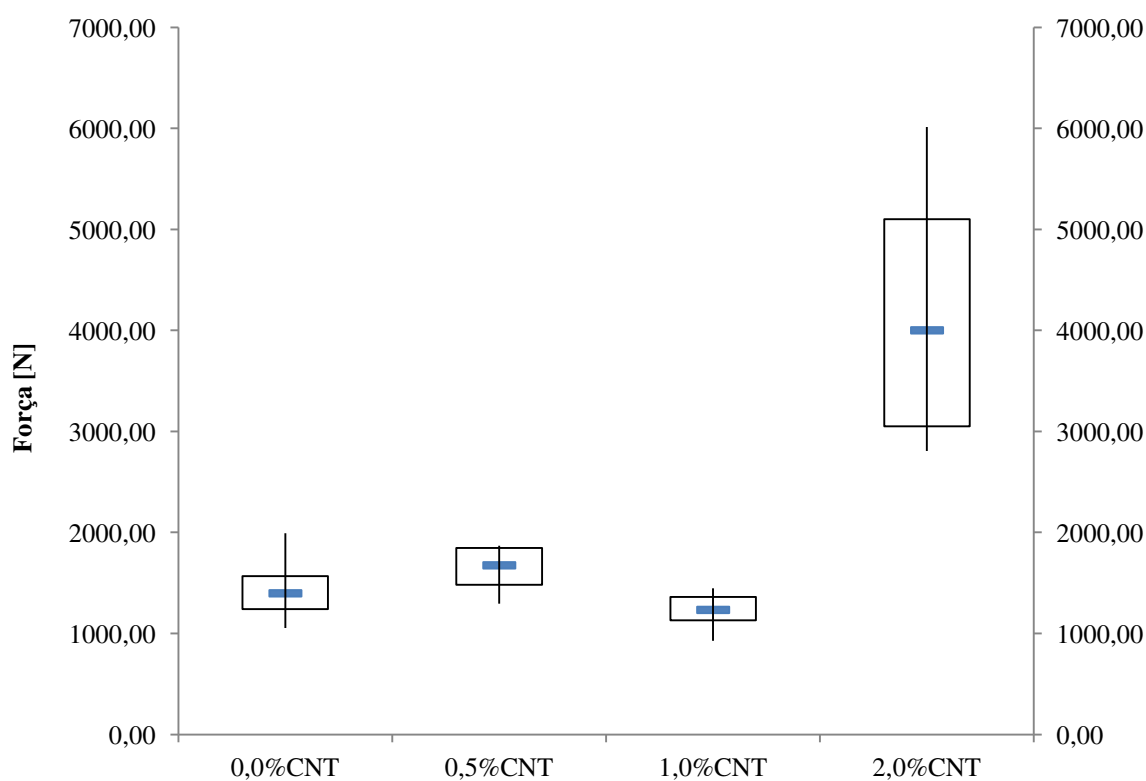


Figura 49: Box Plot dos dados de força máxima em corpos de prova de juntas coladas.

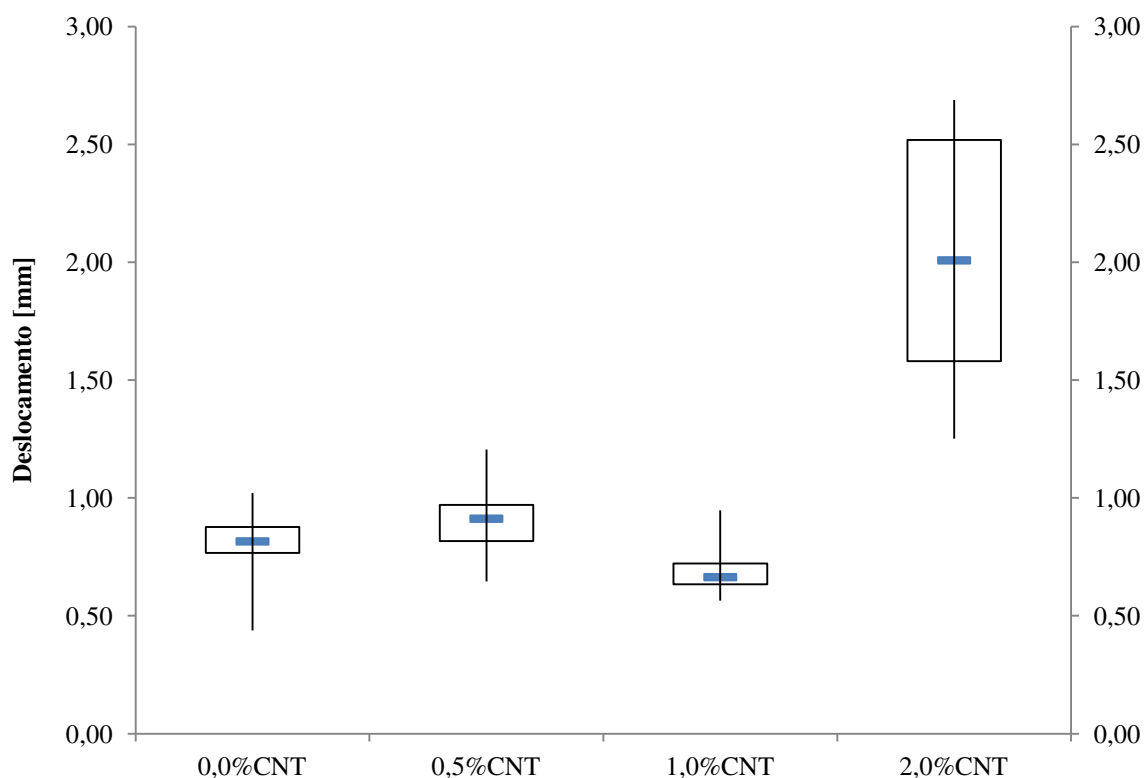


Figura 50: *Box Plot* dos dados de deslocamento na força máxima para corpos de prova de juntas coladas.

5.2 Juntas Rebitadas

5.2.1 Ensaio de cisalhamento aparente

Como representantes das juntas unidas por fixação mecânica, foram ensaiados seis corpos de prova para as juntas puramente rebitadas. As curvas apresentadas na Figura 51 ilustram o escoamento do rebite de alumínio. Esse comportamento ocorre conforme o esperado e é característico do ensaio de tração para metais. Além disso, quando as curvas são comparadas entre si, é notada diferença acentuada para o corpo de prova 5. Já no início do ensaio de tração, o CP5 apresenta maior deslocamento para uma mesma carga, quando comparado aos demais, ou seja, apresenta maior ductilidade. Além dessa diferença para os primeiros instantes do procedimento de ensaio, o CP5 é o que apresenta maior capacidade de carga, podendo ser apontado como detentor de maiores tensões (Tabela 19) de escoamento e de ruptura. As diferenças nos aspectos das curvas

apresentadas (Figura 51) são decorrentes do processo de conformação do rebite, que gera alteração no gradiente de tensões.

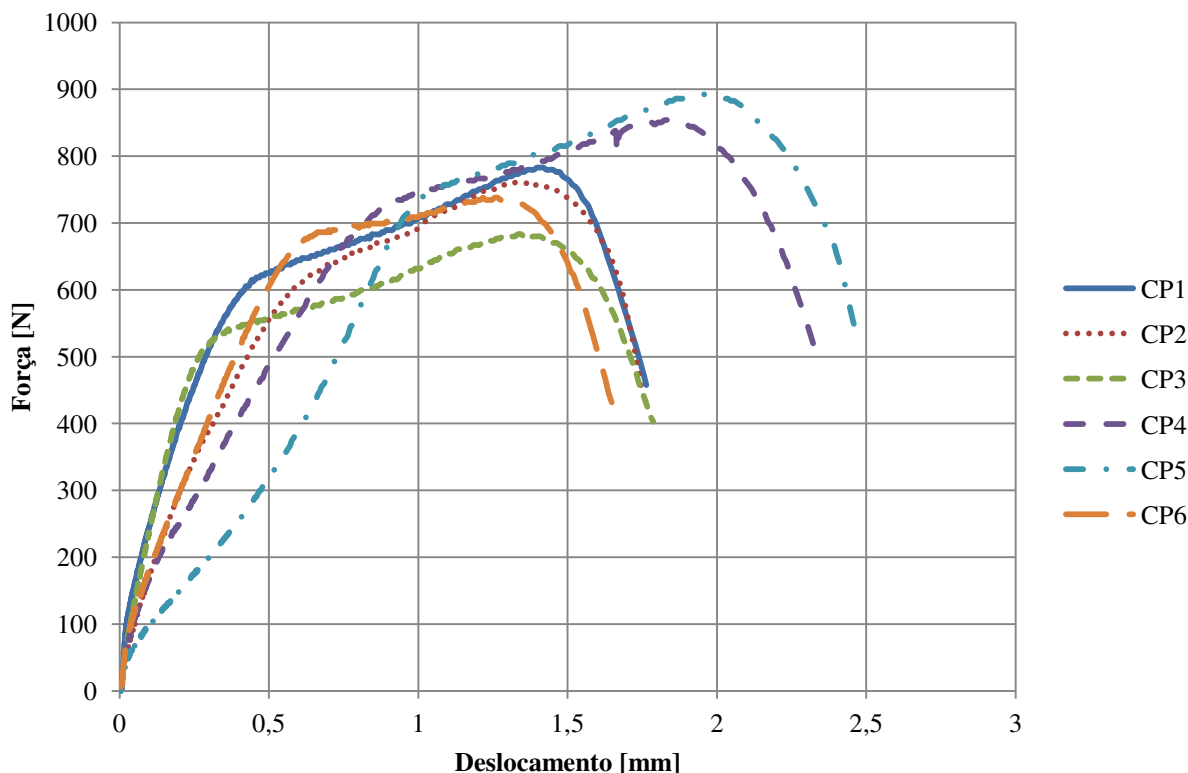


Figura 51: Curvas de força por deslocamento para corpos de prova de juntas rebitadas.

A Tabela 19 mostra que o valor máximo obtido para a capacidade de carga dos CPs ensaiados (valor obtido para o CP5) é 14% superior à média de todos os CPs. O CP4 também apresenta elevada capacidade de carga, quando comparado seu valor à média, sendo este 9% superior. Contudo o CP4 apresenta sua curva de força por deslocamento próxima à dos demais CPs, sem grande variação em termos do aspecto da curva, diferentemente do CP5. Uma possível explicação para o ocorrido é que o rebite se conformou de maneira mais uniforme, em sua aplicação. O deslocamento do rebite para o CP5, visualizado nos modos de falha (Figura 52), mostra que a distribuição de tensões prevaleceu no sentido longitudinal, resistindo na direção de aplicação da força durante ensaio de resistência aparente ao cisalhamento. Já para o CP3, o mesmo fenômeno não ocorre, havendo uma distribuição desuniforme de tensões.

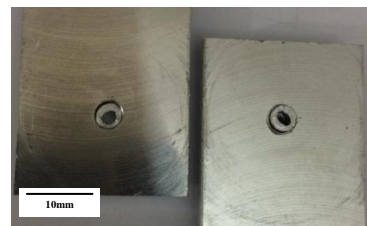
Tabela 19: Resultados dos ensaios das juntas rebitadas.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]
1	783,0	48,94	1,7632
2	760,4	47,53	1,7489
3	683,1	42,69	1,7874
4	853,9	53,37	2,3324
5	892,5	55,78	2,4739
6	737,86	46,12	1,6473
Média	785,1	49,07	1,9589
Máximo	892,5	55,78	2,4739
DP	76,8	4,80	0,3503
CV (%)	9,79	9,79	17,88

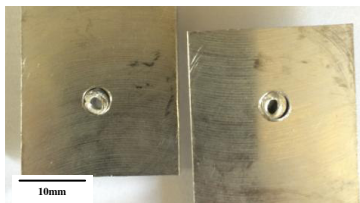
F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.



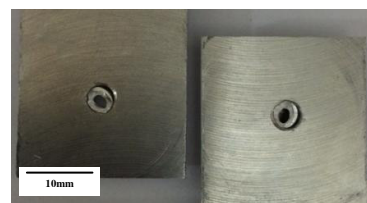
(a) CP-1



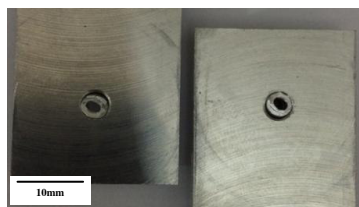
(b) CP-2



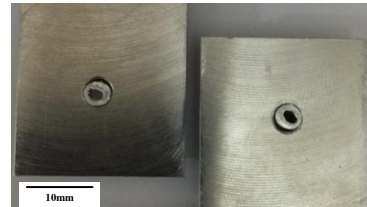
(c) CP-3



(d) CP-4



(e) CP-5



(f) CP-6

Figura 52: Modos de falha – juntas rebitadas.

Para todas as falhas de rebite, ilustradas na Figura 52, percebe-se falha por cisalhamento completo do mesmo. O tipo de falha evidenciado é também conhecido como fratura “de pescoço” (do inglês, *neck fracture*) e ocorreu com pouca deformação plástica do fixador mecânico. A deformação plástica do rebite se deve à estrição sofrida pelo mesmo, ao ser solicitado no ensaio. Além disso, os aderentes se mantiveram praticamente intactos, sem perceptível evidência de esmagamento ou considerável cisalhamento da seção a nível macroscópico.

É compreensível que a junta rebitada tenha falhado pelo rompimento do rebite em lugar do aderente, pois apesar de ambos serem feitos do mesmo metal (alumínio), a massa do aderente é maior, além do rebite ser tubular, apresentando assim, menor resistência. O rebite é um elemento fixador com região oca em seu interior, o que o confere baixa densidade e menor quantidade de material para resistir à carga aplicada. Portanto, os resultados de forças para os ensaios de juntas rebitadas, correspondem à capacidade de carga suportada pelos rebites.

5.2.2 Comparação – junta colada e junta rebitada

Para as juntas puramente rebitadas, não é levada em consideração a análise da influência das nanoestruturas, devido ao fato de essas juntas não conterem adesivo. Portanto, para efeito de comparação, a Figura 53 mostra resultados de capacidade de carga para as juntas rebitadas em relação às juntas coladas, sem a adição de CNT. Para comparação, na Figura 53, foram escolhidas curvas com valores intermediários para força e deslocamento, dentro dos respectivos grupos escolhidos. As curvas para juntas rebitada e colada ilustradas são curvas representativas, dentre os CPs ensaiados para cada tipo (CP3 do grupo das rebitadas e CP5 do grupo das coladas, por apresentarem resultados mais próximos aos médios dos grupos).

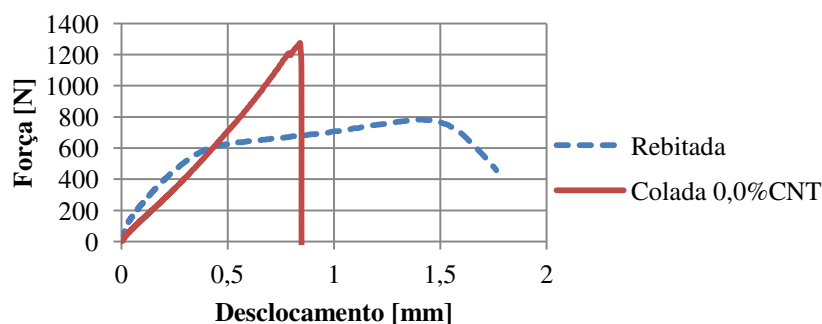


Figura 53: Comparação de CPs para junta rebitada e junta colada sem CNT. CP3 do grupo das rebitadas e CP5 do grupo das coladas.

A partir da observação das forças, percebe-se que a carga máxima foi obtida para a junta colada. Em contrapartida, a junta rebitada apresentou maior deslocamento, com característica dúctil, o que pode ser importante por permitir melhor previsão do momento de falha. Com isso, os dois tipos de junta apresentam vantagens distintas, podendo ser, portanto, aplicadas em diferentes situações.

5.3 Juntas Híbridas

5.3.1 Junta híbrida sem adição de CNT

Seguindo o padrão adotado para condução dos ensaios dos tipos de junta já comentados, foram ensaiados seis corpos de prova para as juntas unidas por adesivo estrutural e fixador mecânico, juntos, ou seja, as juntas híbridas. Os resultados são apresentados para cada concentração de CNT e, por fim, comparados entre si. A primeira análise é representada para as juntas contendo adesivo puro, nas Tabela 20, Figura 54, Tabela 21 e Figura 55.

Tabela 20: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas sem CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,17405	0,020834
2	0,12805	0,020692
3	0,12900	0,023242
4	0,15990	0,017378
5	0,13295	0,014699
6	0,15230	0,021844

DP = Desvio Padrão

Os valores para a espessura registrados (Tabela 20) foram medidos antes da inserção do rebite. Além disso, esses valores mostram uma variação pequena, sendo, portanto considerada aceitável.

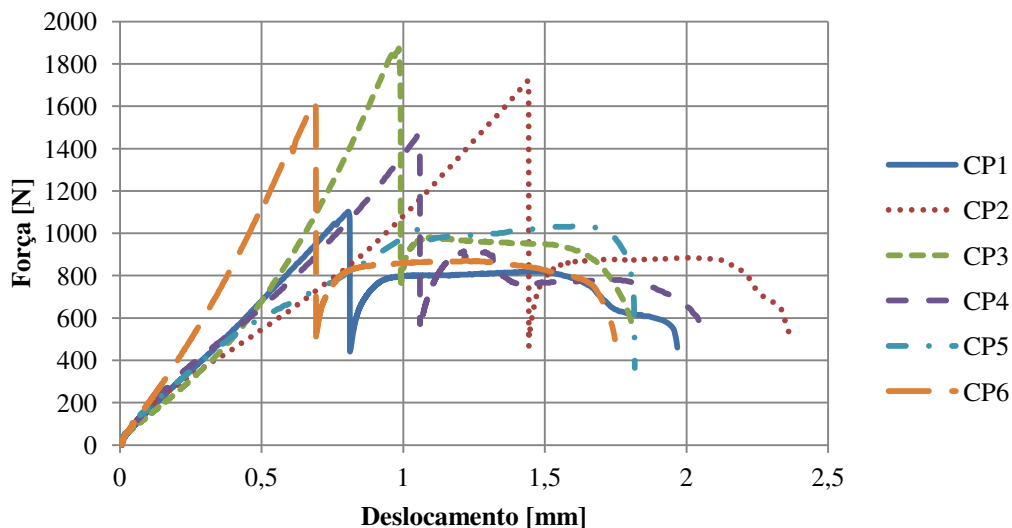


Figura 54: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 1 (0,0% CNT), para juntas híbridas.

As curvas apresentadas para os corpos de prova das juntas híbridas apresentam um comportamento interessante. Apesar das diferenças em termos dos valores das forças máximas e distâncias nas quais estas ocorrem, os CPs apresentam comportamento similar: o pico de força, seguido da segunda elevação desta medida, antes de finalmente falhar. As variações observadas no comportamento das curvas se devem a diferenças na distribuição de tensões, relacionadas à presença do rebite em combinação com o adesivo.

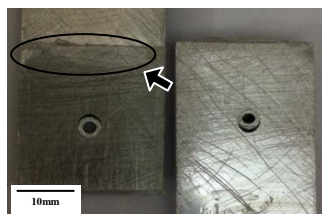
Dentre os CPs, o que apresentou maior divergência no comportamento mencionado foi o CP5, com baixa força máxima (Tabela 21). Esse CP apresenta, em seu modo de falha, falha mista com prevalência da componente adesiva (Figura 55, na qual os círculos pretos indicam a região de falha coesiva). A componente da força relacionada ao adesivo mostra uma falha prematura, por ser muito inferior a seus pares. Essa falha prematura da camada adesiva pode ter ocorrido devido a uma falha no preparo da superfície de colagem, uma vez que o adesivo não se mostra tão bem espalhado. O mesmo ocorre para o CP1. Com um mau espalhamento da camada adesiva, é comprometida a distribuição de tensões ao longo da área colada. Em relação ao rebite, o comportamento é similar para todos os CPs, mostrando que esse componente respondeu às tensões subsequentes à falha do adesivo de forma muito parecida para os CPs, como pode ser observado em seus modos de falha (Figura 55).

Tabela 21: Resultados dos ensaios das juntas híbridas sem adição de CNT.

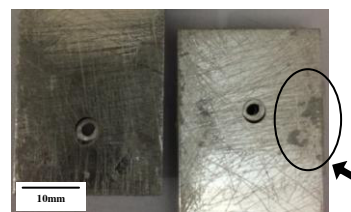
CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1102,0	1,71	1,9679	ADH-COH (95-05)
2	1717,4	2,66	2,3642	ADH-COH (90-10)
3	1872,0	2,90	1,8079	ADH-COH (85-15)
4	1462,8	2,27	2,0798	ADH-COH (95-05)
5	1034,3	1,60	1,8176	ADH-COH (90-10)
6	1607,8	2,49	1,74726	ADH-COH (80-20)
Média	1466,1	2,27	1,9641	
Máximo	1872,0	2,90	2,3642	
DP	336,8	0,52	0,2308	
CV (%)	22,97	22,97	11,75	

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

Pela análise dos valores da Tabela 21, é possível concluir que o deslocamento máximo para as junta híbridas supera o observado para as juntas coladas. Esse deslocamento está mais próximo daquele relacionado às juntas rebitadas. Além disso, os valores para força máxima são superiores àqueles das juntas rebitadas, sendo comparáveis aos das juntas coladas, inclusive superando-os, em média, para os CPs ensaiados. O aumento na força máxima para as juntas híbridas em relação às coladas foi de 2%. Juntas híbridas se mostram interessantes por associarem qualidades observadas tanto em juntas coladas quanto rebitadas. Em todos os CPs, a tensão inicial suportada pelo adesivo, é então transferida para o rebite. Por isso, para casos como o do CP2, em que o adesivo se comporta de forma mais dúctil, a falha adesiva ocorre para um maior deslocamento, resultando em um deslocamento total muito superior, por ainda contar com a tensão suportada pelo rebite.



(a) CP-1



(b) CP-2

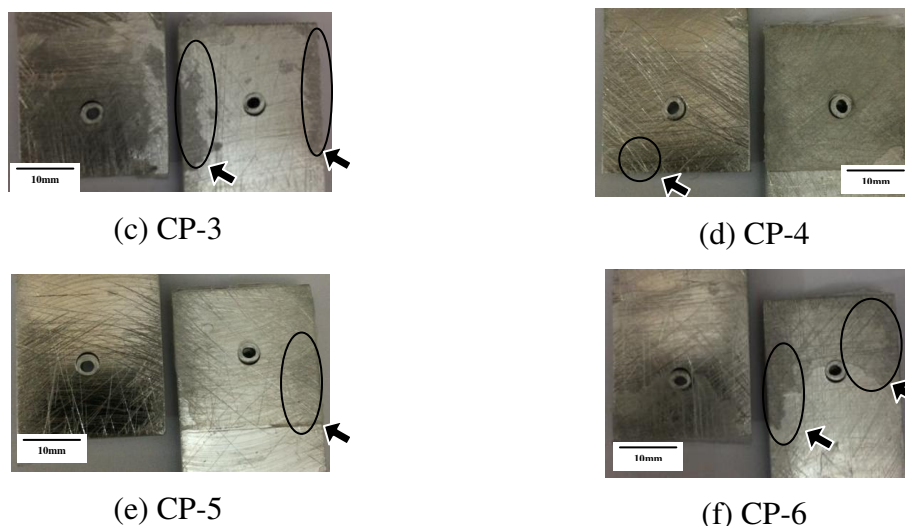


Figura 55: Modos de falha – juntas híbridas sem adição de CNT.

5.3.2 Junta híbrida com 0,5% CNT

Novamente, as espessuras para a camada adesiva foram registradas e são mostradas na Tabela 22. A variação dos valores foi pequena para o método de colagem utilizado. Foi repetido o procedimento realizado para as juntas coladas e, para as juntas híbridas, também foi adicionada quantidade de nanoestruturas. As quantidades de nanoestruturas foram as mesmas descritas em metodologia e apresentadas para as juntas coladas. A Figura 56 apresenta as curvas dos ensaios de cisalhamento aparente para as juntas híbridas contendo 0,5% de CNT (grupo 2).

Tabela 22: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 0,5% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1424	0,020780
2	0,1805	0,038397
3	0,1749	0,039876
4	0,1633	0,036386
5	0,1626	0,020702
6	0,1727	0,031801

DP = Desvio Padrão

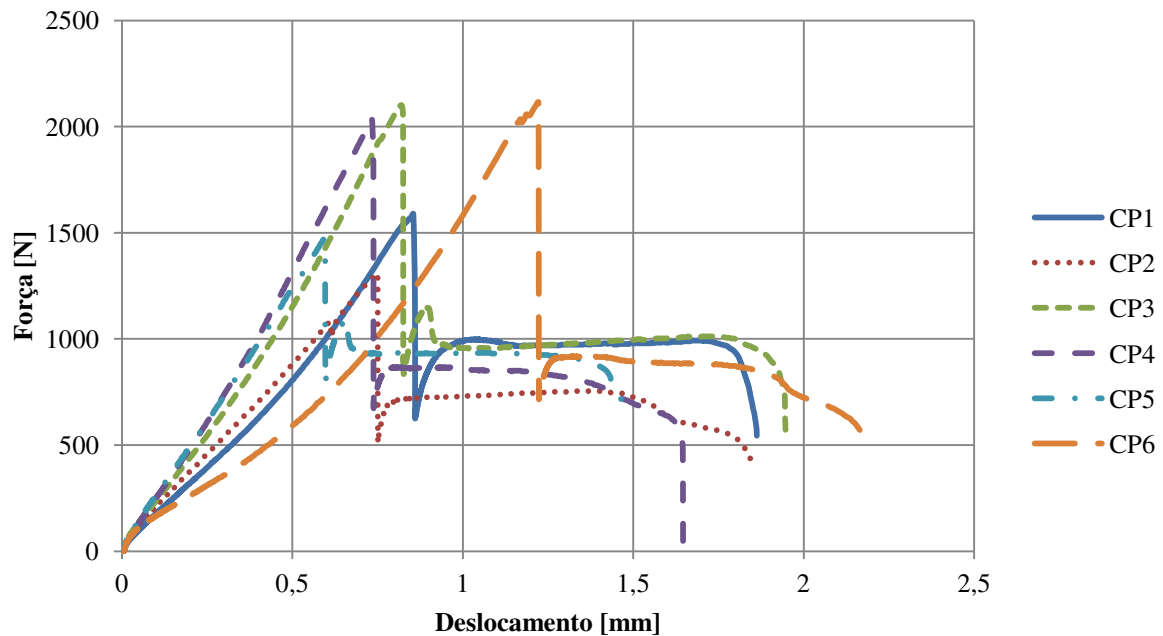


Figura 56: Curvas de força por deslocamento para corpos de prova do grupo 2 (0,5% CNT), para juntas híbridas.

As curvas para os corpos de prova do grupo 2 apresentam o mesmo aspecto das do grupo 1. Com exceção da curva relativa ao CP6, de maneira geral, o comportamento em resposta ao ensaio de cisalhamento aparente foi mais uniforme, entre os CPs do grupo 2, do que entre os CPs do grupo 1. O CP6 apresenta seu pico de força em um deslocamento que difere muito daquele dos demais corpos de prova. Além disso, o CP6 é o que apresenta maior capacidade de carga, tensão e deslocamento máximo, como é possível constatar pela Tabela 23. Analisando a Figura 57 (na qual as setas e círculos pretos indicam a componente coesiva da falha) é possível constatar que ocorre melhor dispersão dos nanotubos no CP6, quando esse é comparado aos demais.

Tabela 23: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 0,5% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1588,5	2,46	1,8624	ADH-COH (60-40)
2	1308,2	2,03	1,8432	ADH
3	2100,8	3,26	1,9468	ADH-COH (70-30)
4	2039,6	3,16	1,6462	ADH-COH (60-40)
5	1469,3	2,28	1,4901	ADH-COH (70-30)
6	2116,9	3,28	2,1727	ADH-COH (80-20)
Média	1770,6	2,74	1,8269	
Máximo	2116,9	3,28	2,1728	
DP	357,5	0,55	0,2373	
CV (%)	20,19	20,19	12,99	

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

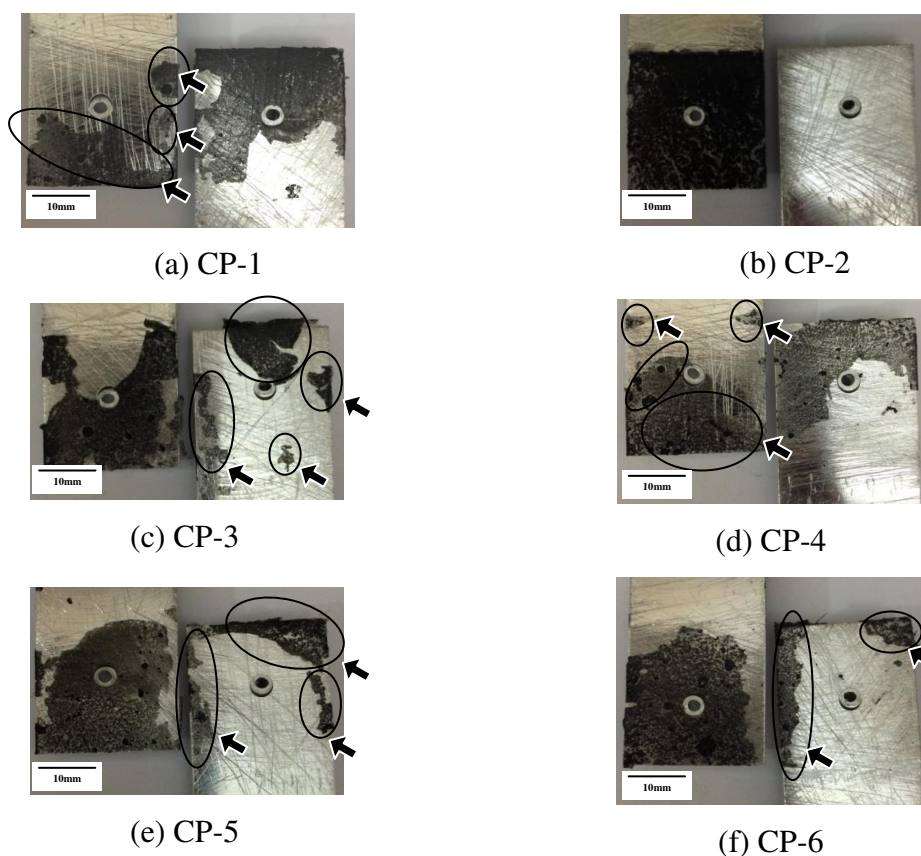


Figura 57: Modos de falha – juntas híbridas com 0,5% CNT.

Por fim, foi evidenciado um aumento na capacidade de carga devido à adição de nanoestruturas. Os corpos de prova do grupo 2 das juntas híbridas possuem força média máxima superior aos do mesmo grupo para juntas coladas. O aumento da carga máxima relativo à adição de 0,5% CNT foi de 13%. Essa melhora pode estar relacionada à interação do CNT com a resina epóxi, criando barreiras à propagação da trinca que poderia ser originada da região envolvida pelo rebite. Com isso, o CNT pode ter amenizado o dano causado ao adesivo no processo de furação e inserção do rebite na junta.

5.3.3 Junta híbrida com 1,0% CNT

Mais uma vez foram registradas as espessuras medidas para a camada adesiva (Tabela 24). As espessuras apresentaram baixa variação.

Tabela 24: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 1,0% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1593	0,034076
2	0,1563	0,031575
3	0,1629	0,031559
4	0,1453	0,030716
5	0,1571	0,024151
6	0,1691	0,044692

DP = Desvio Padrão

Dando sequencia ao estudo da variação da concentração de nanoestruturas nas juntas simples de sobreposição, a próxima concentração de CNT testada foi de 1%. As curvas para os seis corpos de prova ensaiados são apresentadas na Figura 58, bem como resultados na Tabela 25 e os modos de falha na Figura 59 (novamente com setas e círculos pretos indicando a falha coesiva).

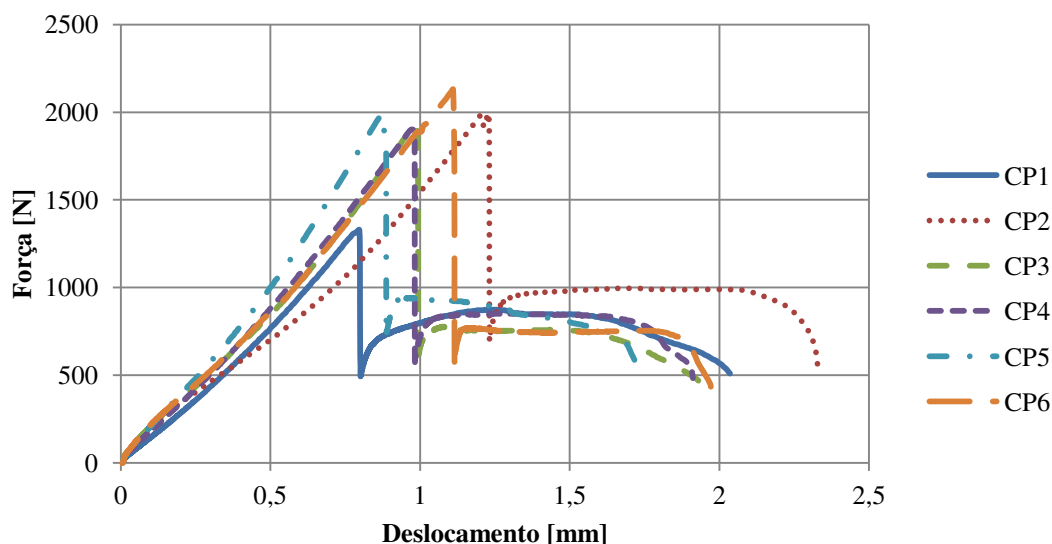


Figura 58: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 3 (1,0% CNT), para juntas híbridas.

Tabela 25: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 1,0% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1327,5	2,06	2,0354	ADH-COH (85-15)
2	1994,5	3,09	2,3282	ADH-COH (70-30)
3	1939,7	3,01	1,9342	ADH-COH (70-30)
4	1901,0	2,95	1,9118	ADH-COH (75-25)
5	1991,2	3,09	1,7255	ADH-COH (75-25)
6	2129,8	3,30	1,97176	ADH-COH (80-20)
Média	1880,6	2,91	1,9845	
Máximo	2129,8	3,30	2,3282	
DP	281,8	0,44	0,1979	
CV (%)	14,99	14,99	9,97	

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

Em relação às diferenças apresentadas entre curvas para o mesmo grupo, o grupo 3 é o que se mostra mais uniforme em relação à rigidez. Essa uniformidade é evidenciada pelos valores de coeficiente de variação, mostrados na Tabela 25. Os valores do CV são menores do que aqueles

observados para os grupos 1 e 2. Além disso, o grupo 3 é o que apresenta maior capacidade de carga, dentre os grupos de junta híbrida comentados. Tal evidência confirma a tendência de que o aumento da concentração de CNT melhora o desempenho do adesivo estrutural, tendo o nanotubo como obstáculo à propagação da falha. A força máxima supera àquela obtida pelo mesmo grupo das juntas coladas, confirmando a vantagem esperada em se utilizar juntas híbridas, com a soma das tensões resistidas pelo adesivo e pelo rebite.

Analisando os corpos de prova na Figura 58 e Tabela 25, é notado resultado inferior de resistência (capacidade de carga), para o CP1. Ao avaliar os modos de falha (Figura 59), é possível associar o resultado do CP1 à sua falha prevalentemente adesiva e desigual (segmentada ao longo da lateral da região de sobreposição), em relação aos demais CPs. Para os CPs, com exceção do CP1, foi obtida boa uniformidade para os resultados de força e deslocamento.

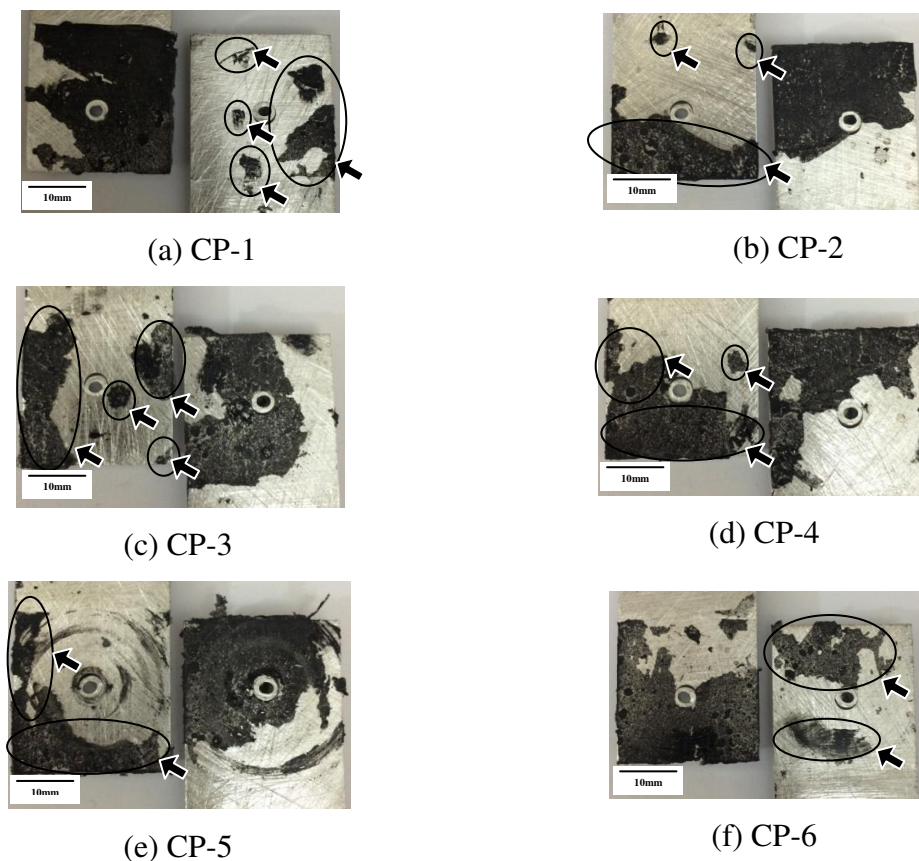


Figura 59: Modos de falha – juntas híbridas com 1,0% CNT.

5.3.4 Junta híbrida com 2,0% CNT

A Tabela 26 apresenta os valores medidos para a espessura da camada adesiva de cada corpo de prova para o grupo 4. É notada variação das medidas, atribuída ao aumento da viscosidade do adesivo com a quantidade de nanoestruturas, que teria dificultado o espalhamento do adesivo na área colada.

Tabela 26: Espessuras de camada adesiva – juntas híbridas com 2,0% CNT.

CP Id	Espessura média [mm]	DP [mm]
1	0,1755	0,04245
2	0,1712	0,03841
3	0,1652	0,04013
4	0,1967	0,04728
5	0,1718	0,07052
6	0,1408	0,06706

DP = Desvio Padrão

Como último grupo a ser investigado, o grupo 4 das juntas híbridas corresponde à adição de 2% de CNT no adesivo estrutural dessas juntas. O gráfico da Figura 60 mostra o comportamento de cada corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento aparente.

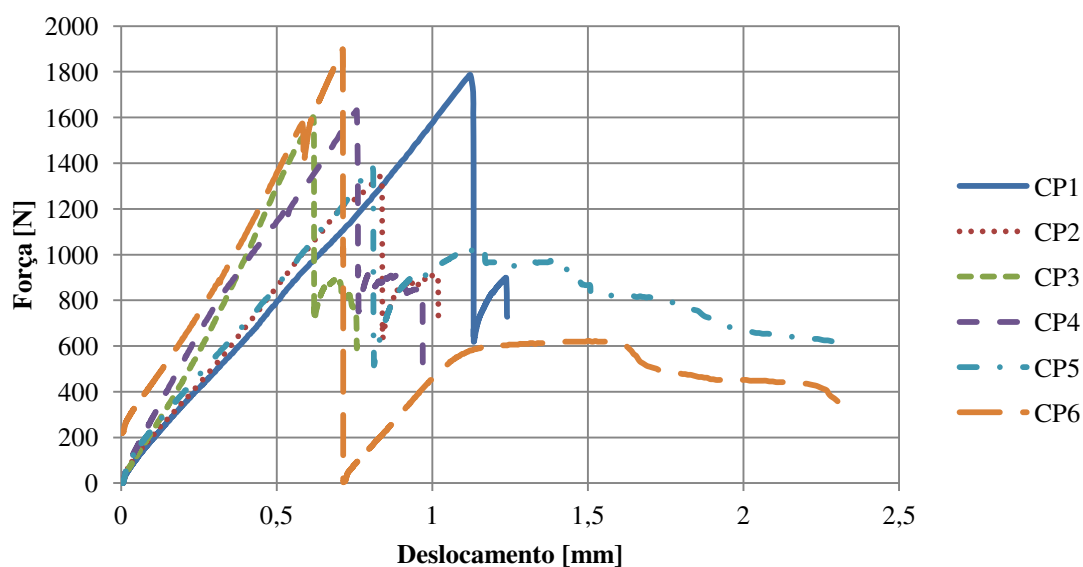


Figura 60: Curvas força por deslocamento para corpos de prova do grupo 4 (2,0% CNT), para juntas híbridas.

Por meio da análise das curvas apresentadas para os CPs do grupo 4, são constatadas algumas variações nos comportamentos de cada CP: Primeiro, os picos de carga ocorrem para deslocamentos distintos, além de variarem sua magnitude. Segundo, os CPs apresentam grande variação entre seus valores para deslocamento máximo. Essas diferenças observadas nas curvas são representadas pelos valores mostrados na Tabela 27, sobretudo para o coeficiente de variação elevado, relativo ao deslocamento.

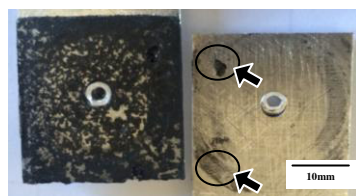
Tabela 27: Resultados dos ensaios – juntas híbridas com 2,0% CNT.

CP Id	F [N]	T [MPa]	d [mm]	Modo de Falha
1	1785,0	2,77	1,2410	ADH-COH (95-05)
2	1343,6	2,08	1,0199	ADH
3	1601,4	2,48	0,7584	ADH-COH (95-05)
4	1630,4	2,53	0,9698	ADH
5	1391,9	2,16	2,2913	ADH-COH (95-05)
6	1897,8	2,94	2,3022	ADH
Média	1608,4	2,49	1,4304	
Máximo	1897,8	2,94	2,3022	
DP	215,6	0,33	0,6884	
CV (%)	13,41	13,41	48,12	

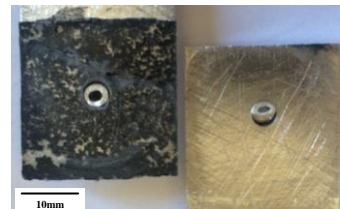
F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

São comentadas algumas hipóteses para explicar o comportamento inconstante apresentado pelas juntas do grupo 4. Uma possibilidade é um aumento da viscosidade da mistura resina-nanotubo, comentada por Wemik e Meguid (2014), para elevadas concentrações de nanoestruturas. O aumento da viscosidade implica em dificuldade de dispersão e espalhamento do adesivo em grandes áreas, o que poderia ter comprometido a repetibilidade do processo de aplicação. Portanto, diferenças em termos da área do adesivo, durante aplicação, podem estar relacionadas às diferenças no comportamento das curvas. Outra possibilidade seria a ocorrência de aglomerados, comentados anteriormente e conhecidos como *clusters*, que poderiam ter crescido e coalescido, favorecendo a propagação de trincas, comprometendo a resistência mecânica de alguns dos CPs. A propagação das

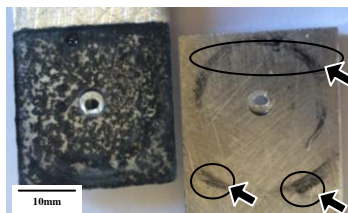
trincas pode ter sido favorecida com a furação da região de sobreposição uma vez que a furação ocorreu após a colagem. Além disso, há a deformação do rebite aplicado somando como mais um fator a comprometer a região adesivada. Os modos de falha (Figura 61, com setas e círculos representando falha coesiva) apresentaram prevalência da falha do tipo adesiva, mesmo para os modos mistos, cuja porcentagem do tipo de falha adesiva foi de 95%. Esse tipo de falha mostra uma deficiência na interação aderente-adesivo, que pode ter sido favorecida pela alta incidência de aglomerados.



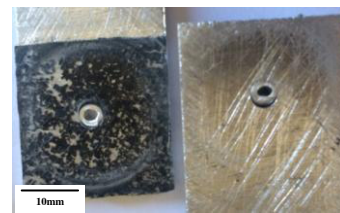
(a) CP-1



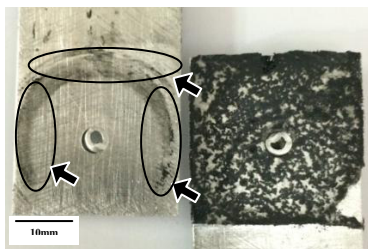
(b) CP-2



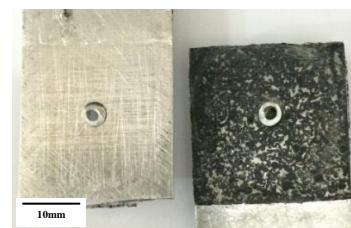
(c) CP-3



(d) CP-4



(e) CP-5



(f) CP-6

Figura 61: Modos de falha – juntas híbridas com 2,0% CNT.

5.3.5 Comparação geral do grupo de juntas híbridas

A Tabela 28 e a Figura 62 mostram o comportamento das diversas juntas híbridas testadas. Novamente é evidenciado aumento de força relacionado à adição de CNT. Contudo, diferentemente do caso observado para as uniões puramente coladas, a concentração de 1% de CNT mostra um resultado melhor do que a de 2%. Essa situação provavelmente está relacionada à presença de aglomerados no grupo 4, como comentado anteriormente.

Da Silva (2006) comenta que vazios estão geralmente associados às maiores espessuras. Portanto, a baixa capacidade de carga para a junta híbrida com 2,0% CNT pode ser explicada, em parte, pela possibilidade de ocorrência de vazios e microfissuras, associados à sua alta espessura da camada adesiva, juntamente com *clusters* associados à grande concentração de nanoestruturas, que podem não ter sido bem distribuídas. Essa hipótese é baseada nas observações das fotos dos modos de falha dos corpos de prova testados.

Tabela 28: Resultados dos ensaios das juntas híbridas.

% CNT	F [N]		T [MPa]		d [mm]	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)	Média	CV(%)
0,0	1466,05	22,97	2,27	22,97	1,9641	11,7516
0,5	1770,55	20,19	2,74	20,19	1,8269	12,9905
1,0	1880,62	14,99	2,91	14,99	1,9845	9,9712
2,0	1608,35	13,41	2,49	13,41	1,4304	48,1232

F = Força máxima; T = Tensão máxima; d = deslocamento máximo.

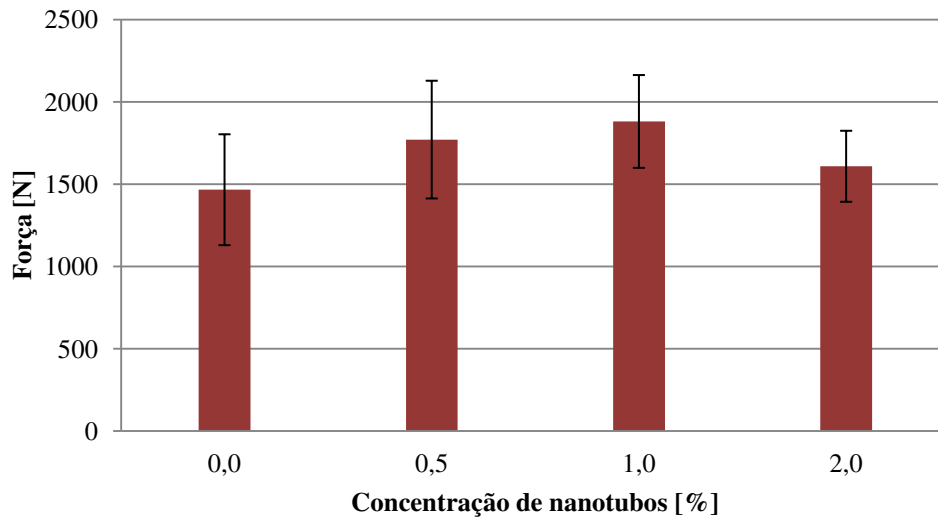


Figura 62: Resultados de força para juntas híbridas – Carga máxima.

Diferente do que foi observado para as curvas das juntas exclusivamente coladas ou unicamente rebitadas, a junta híbrida apresenta um leve aumento de força antes de falhar completamente, mesmo após queda súbita de resistência, ou seja, a junta híbrida falha em duas etapas. Essa característica já foi observada no trabalho de Sun *et al.* (2005), para o uso de parafuso em complemento ao adesivo estrutural. Sun *et al.* (2005) comentam que a primeira falha ocorre como uma falha total do adesivo, similar à observada para a junta colada, seguida por falha que se assemelha àquela observada para a junta fixada mecanicamente. Apesar de o presente trabalho utilizar rebites e não parafusos, o comportamento apresentado pela curva força em função do deslocamento aqui exibida é similar. As duas etapas da falha estão discriminadas na Figura 63.

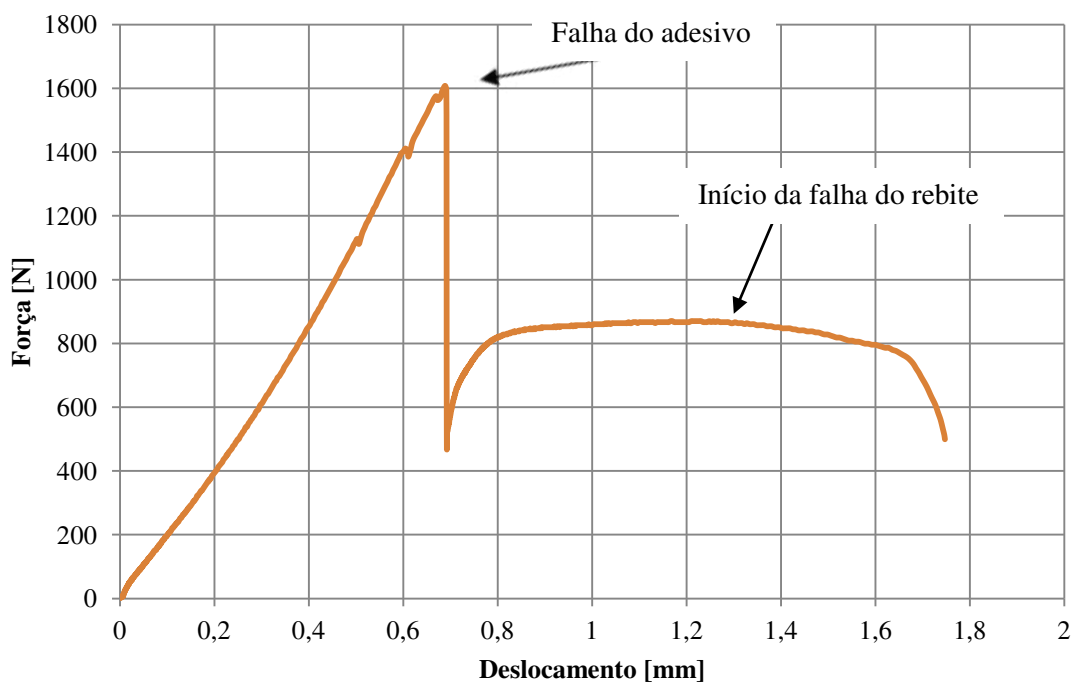


Figura 63: Curva força-deslocamento para junta híbrida do grupo 1 (CP6).

Uma vantagem que pode ser percebida, pela observação das curvas para juntas híbridas, é o fato de, mesmo a capacidade de carga sendo similar à da junta colada, a utilização do elemento de fixação mecânica atua proporcionando redundância. Deste modo a junta resiste por mais tempo. Esse fenômeno pode ser de grande valia em aplicações de engenharia, visto que o tempo extra, ganho antes da ruptura, pode permitir tomada de precauções ou mesmo propiciar um aviso prévio da falha, no momento em que é evidenciado o ponto de falha do adesivo.

Foi realizada análise ANOVA, com teste de Tukey, para resultados de força máxima e deslocamento na força máxima para juntas híbridas. Foi observada a variação das médias de força (Figura 64), além de deslocamento para a força máxima (Figura 65). Contudo, diferentemente do caso para as juntas coladas, as híbridas não apresentaram diferença significativa entre as médias. O grupo 3 (1% CNT) foi o que apresentou melhores resultados para força, tensão e deslocamentos médios máximos, sendo sua capacidade de carga 28% superior à da junta híbrida sem nanotubos. O grupo 4 (2% CNT), diferentemente do que era esperado, não superou o grupo 3, devido a presença de aglomerados de nanotubo, perceptíveis em seus modos de falha, que podem ter contribuído com a concentração de tensões e propagação de falhas.

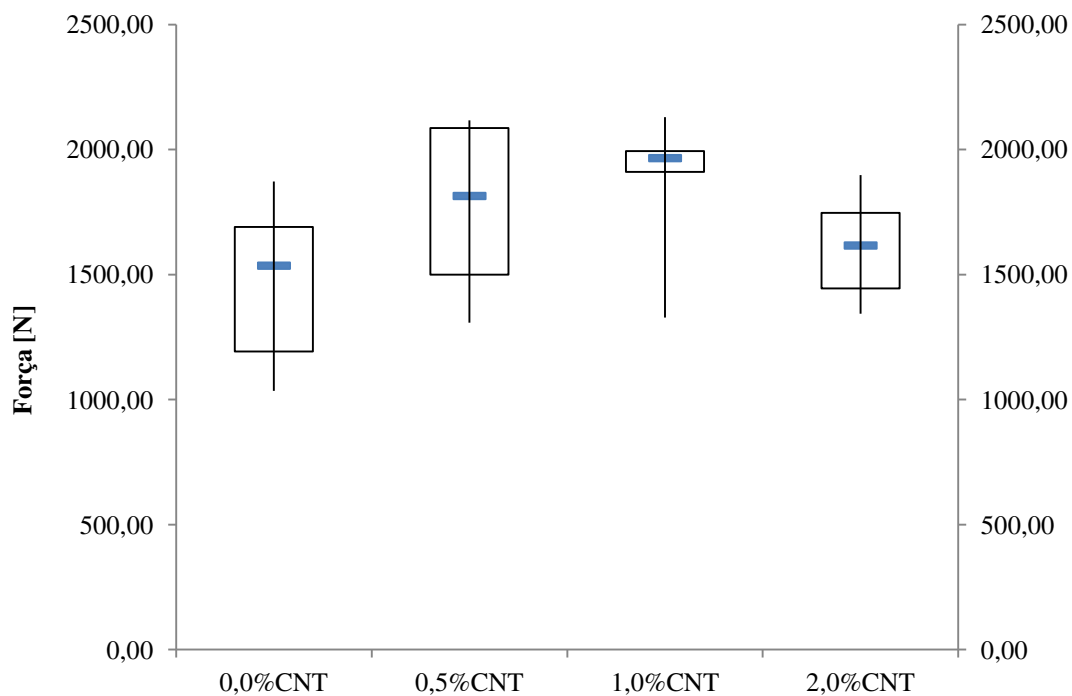


Figura 64: *Box Plot* dos dados de força máxima em corpos de prova de juntas híbridas.

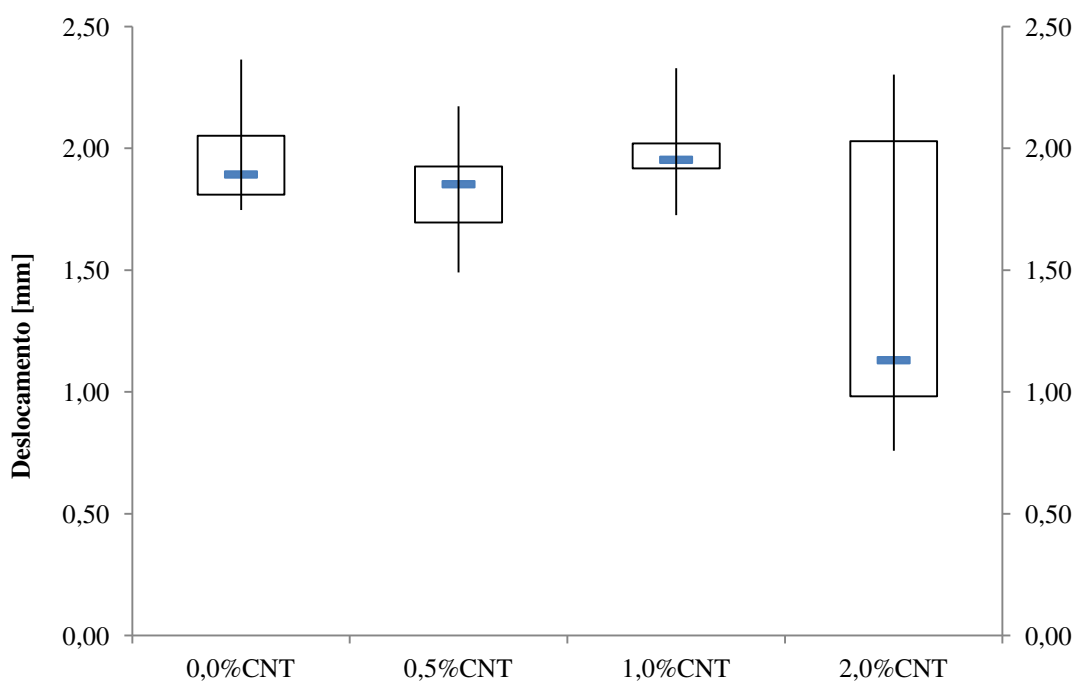


Figura 65: *Box Plot* dos dados de deslocamento na força máxima para corpos de prova de juntas híbridas.

5.4 Curvas de modelo analítico para tensões de *peel* e *shear*

Alguns modelos analíticos foram abordados em seção de revisão de literatura. O trabalho de Hart-Smith (1983) foi comentado como referência para a previsão do comportamento dos modos de falha apresentados pelas juntas envolvendo adesivo estrutural, ou seja, coladas e híbridas. Portanto, foram traçadas curvas para verificação do comportamento das tensões, para os corpos de prova utilizados no presente trabalho, segundo modelo analítico proposto por Hart-Smith (1973).

A Figura 66 apresenta as curvas para as tensões de *shear*, ou tensão cisalhante e tensão de *peel*, ou tensão de delaminação. No eixo das abscissas, tem-se o comprimento da região de sobreposição da junta colada. Essas curvas foram obtidas por meio da aplicação das equações, apresentadas em revisão de literatura, para o modelo analítico de Hart-Smith (1973). Além das dimensões do corpo de prova, foi considerada uma carga de 1,5 kN, carga média obtida nos ensaios experimentais no momento da ruptura, para obtenção das curvas apresentadas.

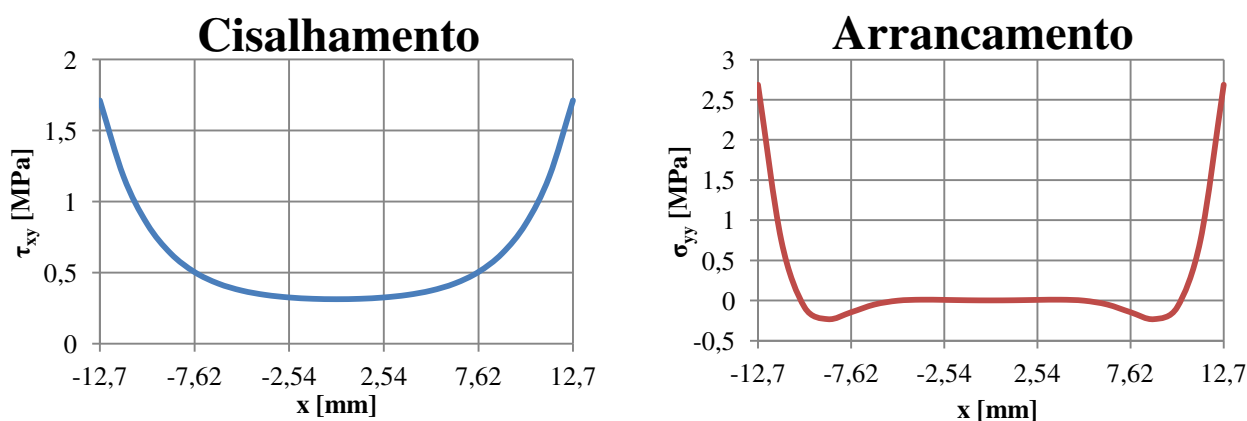


Figura 66: Distribuição de tensões de cisalhamento e arrancamento calculadas pelo modelo analítico de Hart-Smith (1973).

As curvas mostram a maior magnitude para a tensão do tipo *peel*. Mais uma vez, esse resultado se mostra alinhado ao comentado por Hart-Smith (1983) em seu trabalho, sobre previsão do comportamento de juntas coladas em função das dimensões dos aderentes. O diagrama utilizado no trabalho de Hart-Smith (1983), presente na Figura 36, mostra isso. A região do diagrama, referente às juntas trabalhadas neste trabalho, corresponde ao descrito no diagrama como falha adesiva por *peel*.

É possível correlacionar os resultados do presente estudo com as curvas de modelo analítico no entendimento da ocorrência das tensões ao longo da área colada. Como é observado para os gráficos da Figura 66, a região crítica (com maior tensão de *peel* e *shear*) está localizada nas extremidades da junta colada. Portanto, os corpos de prova com presença de *tapering* podem ter respondido melhor ao ensaio mecânico, por apresentar camada adicional de adesivo em região de maior sollicitação. Com isso, o aumento substancial de 189% na capacidade de carga do grupo 4 pode ser devido a dois fatores: a adição de nanotubo de carbono e presença de *tapering* nos corpos de prova. De acordo com Da Silva e Öchsner (2008) a presença de *tapering* na extremidade da junta colada espalha a transferência de carga por uma área maior, além de contribuir com maior uniformidade na distribuição de tensões (Figura 67). A Figura 67 ilustra a transferência de carga para uma junta sem *tapering* (1), com *tapering* (2) e com geometria “chanfrada” (3).

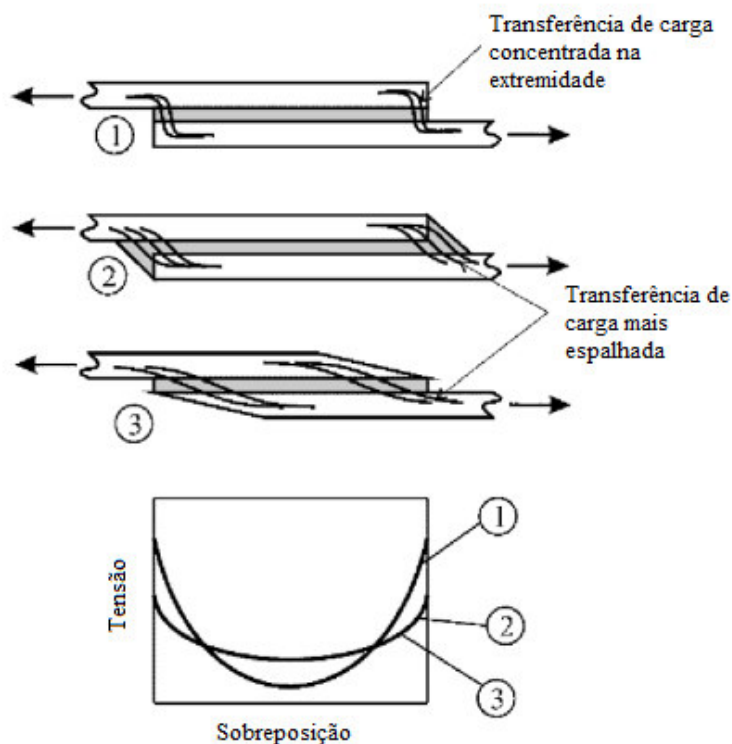


Figura 67: Transferência de carga e distribuição de tensão para juntas coladas.

(DA SILVA E ÖCHSNER, 2008)

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho contemplou a realização de um estudo comparativo e experimental, entre três tipos de juntas simples de sobreposição, a saber: junta colada, rebitada e híbrida. Nesse estudo foi avaliado não somente o desempenho mecânico da junta híbrida, em oposição às juntas colada e rebitada, mas também o comportamento das juntas em função da concentração de nanoestruturas de nanotubo de carbono.

As principais conclusões desse trabalho podem ser listadas como:

- As juntas híbridas, com a utilização do adesivo estrutural de base epóxi (sem adição de CNT), somado ao uso do fixador mecânico, representado pelo rebite, apresentaram carga de ruptura, em média, 87% superiores quando comparadas às juntas rebitadas e 2% superiores às coladas. Além disso, o deslocamento suportado pelas juntas híbridas antes de seu rompimento foi, em média, 150% superior ao evidenciado para as juntas coladas e, aproximadamente, equivalente àquele observado para as juntas rebitadas. Esses dados mostram a superposição dos mecanismos de falha, apresentado pela junta híbrida, combinando qualidades de ambas as juntas colada e rebitada.
- A concentração de nanotubo de carbono foi responsável por aumentar a capacidade de carga das juntas colada e híbrida. Para as juntas coladas, a concentração de 0,5% em peso apresentou melhora de 13,5 % na carga de ruptura e, para 2,0% em peso de CNT, a elevação foi de 189%, quando comparada à junta colada sem nanoestruturas. O grande aumento para o grupo de 2,0% ocorreu devido à presença de *tapering* em alguns CPs (subgrupo 4.1). Além da substancial melhora com a presença de *tapering*, as juntas do grupo 4 sem *tapering* (subgrupo 4.2) se mostraram superiores às dos demais grupos, tendo resistência 116% superiores à do grupo 1, em média. Com relação às juntas híbridas, com 1,0% de CNT, o aumento da capacidade de carga foi de 28%, em relação à junta contendo adesivo puro. Além disso, a adição de nanoestruturas pouco alterou a vantagem evidenciada para o uso do rebite: Somente para a concentração de 2,0% CNT, na junta híbrida, foi observada pequena diminuição do deslocamento referente à solicitação do elemento de fixação mecânica.

- Os modos de falha foram registrados e analisados, inclusive em comparação com previsão proposta por Hart-Smith (1983). Ocorreu, tanto para as juntas coladas quanto híbridas, falha mista, ou seja, adesiva e coesiva, com predomínio da adesiva, havendo casos de falhas exclusivamente desse tipo. Esses modos de falha estiveram de acordo com o trabalho de Hart-Smith (1983) que previa predomínio de falha adesiva com efeito de tensões normais positivas (*peel*). Com o intuito de verificar quanto a influência das tensões de *peel* e *shear* (tensões normais positivas e cisalhantes) na região de sobreposição, foi utilizado o modelo analítico proposto por Hart-Smith (1973). Pelos gráficos dessas tensões, foi percebida maior magnitude para a tensão de *peel*, provando o que foi mencionado por Hart-Smith (1983). Além disso, foi evidenciada concentração de tensões para a região compreendida pelas extremidades da região de sobreposição das juntas.
- A partir dos resultados obtidos, foi percebido que a adição de nanotubos de carbono melhorou a resistência da interface na ligação adesivo-aderente. A melhoria observada foi mais evidente para os conjuntos com melhor dispersão e distribuição do CNT, em seus modos de falha (como exemplo, o grupo 4 das juntas coladas, na Figura 45). Por outro lado, a adição de CNT em grande quantidade, com uma dispersão deficiente, ocasionou concentração de tensões, pela presença de aglomerados (grupo 3 das juntas coladas, na Figura 43).

A partir do estudo desenvolvido e dos resultados obtidos, são propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Análise com diferentes composições de nanoestruturas;
- Análise do adesivo modificado, por microscopia eletrônica;
- Simulação numérica do adesivo estrutural e tipos de junta estudados;
- Avaliação da influência da umidade, juntamente com as nanoestruturas;
- Aplicação de outros tipos de adesivo estrutural, com propriedades distintas;
- Quantificar a influência do *tapering* no aumento da capacidade de carga das juntas coladas;
- Avaliação de outros tipos de juntas de sobreposição, como por exemplo, juntas chanfrada, de ressalto ou dupla.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. D.; COMYN, J.; WAKE, W. C. *Structural adhesive joints in engineering*, 2nd Edition, Springer Science & Business Media, 1997.

ADAMS, R. D.; PEPPIATT, N. A. *Stress Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 9 (3), p. 185-196, 1974.

AJAYAN, P. M.; SCHADLER, L. S.; BRAUN, P. V. *Nanocomposite science and technology*. John Wiley & Sons, 2006. 230p.

ALBEE, N. *Adhesives for Structural Applications*. Advanced Composites, November/December 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D1002-10. *Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)*. ASTM Standards, Vol. 15, No. 6, pp.1-6, USA, 2010. Disponível em: < <http://www.astm.org/Standards/D1002>>

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D5573-99. *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. ASTM Standards, Vol. 5, No.2, pp.1-3, USA, 2012. Disponível em: <<http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5573-99.htm>>

AVILA, A. F.; BUENO, P. de O. *Stress Analysis on a Wavy-Lap Bonded Joint for Composites*, International Journal of Adhesion & Adhesives, v. 24, n. 5 p. 407-414, 2004.

AVILA, A. F.; DIAS, E. C.; DA CRUZ, D. T. L.; YOSHIDA, M. I.; BRACARENSE, A. Q., CARVALHO, M. G. R.; AVILA JUNIOR, J. D.. *An investigation on graphene and nanoclay effects on hybrid nanocomposites post fire dynamic behavior*. Materials Research, v. 13, n. 2, p. 143-150, 2010.

BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M. *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Journal of Materials Design and Applications, v. 223, p. 1–18, 2009.

BARRACUDA COMPOSITES, Acessado em 10 de Outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.barracudacomposites.com.br/>>

BETHUNE, D. S.; KLANG, C. H.; DE VRIES, M. S.; GORMAN, G.; SAVOY, R.; VAZQUEZ, J.; BEYERS, R. *Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls*. Nature. V. 363, p. 605-607, 1993.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8th ed., McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. London, UK, 1060 p. 2011.

BUENO, P. de O.. *Análise comparativa entre juntas "single-lap" e "wavy-lap" de compósito unidas por adesivos*. Setembro de 2002. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2002.

CARVALHO, M. G. R., *Desenvolvimento e Caracterização de Nanocompósitos Híbridos Modificados com Estruturas de Grafeno*. 2011. 148 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2011.

CHAKHERLOU, T. N. ; VOGWELL, J. *The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes*. Engineering Failure Analysis, v.10, n. 1, p. 13-24, 2003.

CHUTO, G.; CHAUMET-RIFFAUD, P. *Les nanoparticules*. Medicine Nucléaire, v. 34, n. 6, p. 370-376, 2010.

DA CRUZ, D. T. L.; *Efeito da Exposição à Luz Ultravioleta em Adesivo Nanomodificado por Grafeno*. Julho de 2013. 78 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2013.

DA CRUZ, D. T. L.; NETO, A. S.; AVILA, A. F. *Nano-modified adhesives by graphene: the ageing investigation*. In: Structures, Structural Dynamics, and Materials and Co-located

Conferences, 2013, Boston. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Boston, MA: AIAA, 2013.

DA SILVA, L. F. M.; CRITCHLOW, G. W.; FIGUEIREDO, M. A. V. *Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by Tauguchi Method*. Journal of Adhesion Science and Technology, v. 22, n. 13, p. 1477-1494, 2008.

DA SILVA, L. F. M.; DAS NEVES, P. J. C.; ADAMS, R. D. and SPELT, J. K. *Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 29, n. 3, p. 319-330, 2009.

DA SILVA, L. F. M.; ÖCHSNER, A. (Ed.). *Modeling of adhesively bonded joints*. Berlin: Springer, 335 p. 2008.

DA SILVA, L. F. M.; RODRIGUES, T. N. S. S.; FIGUEIREDO, M. A. V.; DE MOURA, M. F. S. F.; CHOUSAL, J. A. G. *Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. The Journal of Adhesion v. 82, n. 11, p. 1091-1115, 2006.

DE SOUSA, F. S. M. *Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais*. 2010. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Portugal, 2010.

DE VOLDER, M. F. L.; TAWFICK, S. H.; BAUGHMAN, R. H.; HART, A. J. *Carbon nanotubes: present and future commercial applications*. science, v. 339, n. 6119, p. 535-539, 2013.

DEWOLF, A. *How to Perform na Adhesive Lap Joint Shear Strength Test – ASTM D1002*. ADMET. ADMET, 2010. Acessado em 17 de Março de 2016. Disponível em:

<<http://www.admet.com/how-to-perform-an-adhesive-lap-joint-shear-strength-test-astm-1002/>>

DISMA FERRAMENTAS, Acessado em 10 de Fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://www.dismaferramentas.com.br/site2011/catalogo/default.asp?busca=&marca=DISMA&categoria=10&pagina=13.pdf>>.

EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, A. H. *Adhesives Technology Handbook*. Second Edition. Ed. 13 Eaton Avenue, Norwich, NY 13815, USA: William Andrew Inc., 387 p., 2008.

ESSEL - Eletromecânica Ltda. Elementos de máquinas. Acessado em 20 de Dezembro de 2015. Disponível em: <<http://www.essel.com.br/cursos/material/01/ElementosMaquinas/04elem.pdf>>.

FALLAHNEZHAD, K.; STEELE, A.; OSKOU EI, R. H. *Failure Mode Analysis of Aluminum Alloy 2024-T3 in Double-Lap Bolted Joints with Single and Double Fasteners; A Numerical and Experimental Study*. *Materials*, v. 8, n. 6, p. 3195-3209, 2015.

FERLAUTO, A. S.; DE FLORIO, D. Z.; FONSECA, F. C.; ESPOSIO, V.; MUCCILLO, R.; TRAVERSA, E.; LADEIRA, L. O. *Chemical vapor deposition of multi-walled carbon nanotubes from nickel/yttria-stabilized zirconia catalysts*. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, v. 84, p. 271-276, 2006.

FERREIRA, H. S.; RANGEL, M. C. *Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise*. *Química Nova*, v. 32, n. 7, p. 1860-1870, 2009.

GAY, D.; HOA, S. V. and TSAI, S.W. *Composite Materials – Design and Applications*. 1st. ed. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431: CRC Press, 523 p. 2003

GOMES, J. F. S.; VAZ, M. A. P. *Análise experimental de tensões*. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2004.

GOLAND, M.; REISSNER, E. *The stress in cemented joints*, *Trans. ASME*, v. 66, p. A17-A27, 1944.

HART-SMITH, L. J. 1973, *Adhesive-bonded single lap joints*, NASA CR-112236, NASA Langley Research Center, Haptom, Virginia, USA *apud* TONG, L. and STEVEN, G. P., 1999, *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Boston, Kluwer Academic Publishers.

HART-SMITH, L. J. *Designing to minimize peel stresses in adhesive-bonded joints*. In: *Delamination and debonding of materials*. ASTM International, 1983.

HUSSAIN, F.; OKAMOTO, M.; GORGA, R. S. *Review article: Polymer matrix nanocomposites, processing manufacturing, and application: an overview*. Journal of Composite Materials, v. 40, n. 17, p. 1511-1575, 2006.

HSIAO, KT; ALMS, J.; ADVANI, S. G. *Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites*. Nanotechnology, v. 14, n. 7, p. 791, 2003.

IJIMA, S. *Helical microtubules of graphitic carbon*. Nature. v. 354, n.6348, p. 56-58, 1991.

IREMAN, T.; RANVIK, T.; ERIKSSON, I. *On damage development in mechanically fastened composite laminates*. Composite Structures, v. 49, n. 2, p. 151-171, 2000.

KANG, I.; HEUNG, Y. Y.; KIM, J. H.; LEE, J. W.; GALLAPUDI, R.; SUBRAMANIAM, S.; NARASIMHADEVARA, S.; HURD, D.; KIRIKERA, G. R.; SHANOV, V.; SHULZ, M. J.; DONGLU, S.; BOERIO, J.; MALL, S.; RUGGLES-WREN, M. *Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials*. Composites Part B: Engineering, v. 37, n. 6, p. 382-394, 2006.

KAW, A. K. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. 6000 Broken Sound Parkway N.W., Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, USA: Taylor & Francis, 473 p. 2006.

KONDORTECH, Acessado em 11 de Fevereiro de 2016. Disponível em: <<http://kondentech.com.br/cd4820.html>>.

KOO, J. H. *Polymer Nanocomposites*. 1st. ed. Two Penn Plaza, New York, NY, 10121-2298, USA: McGraw-Hill, 272 p., 2006.

KULAK, G. L.; FISHER, J. W.; STRUIK, J. H. A. *Guide to design criteria for bolted and riveted joints*. 2nd Ed. Wiley-Interscience. Chicago: AISC, p. 333, 1987.

LAU, K-T; HUI, D. *The revolutionary creation of new advanced materials – carbon nanotube composites*. Composites Part B: Engineering, v. 33, n. 4, p. 263-277, 2002.

LI, H. *Synthesis and characterization of aqueous quantum dots for biomedical applications*. August 2008. 179 p. Tese (Doutorado) – Drexel University, 3141 Chestnut Street, Philadelphia, PA 19104, 215-895-2000, USA, 2008

MACROSUL. Acessado em 20 de Dezembro de 2015. Disponível em: <www.macrosul.com.br/download.php?f=CatalogoRebites_Macrosul.pdf>.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3ª Edição. Belo Horizonte. Editora UFMG, p. 17-18, 2009.

MARTIN-GALLEGO, M.; BERNAL, M. M.; HERNANDEZ, M.; VERDEJO, R.; LOPEZ-MANCHADO, M. A. *Comparison of filler percolation and mechanical properties in graphene and carbon nanotubes filled epoxy nanocomposites*. European Polymer Journal, v. 49, n. 6, p. 1347-1353, 2013.

MAZUMDAR, S. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. 1st. ed. 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431: CRC Press, 396 p. 2002.

MELCONIAN, S., *Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais*, 10ª ed. São Paulo/SP: Érica, 1999.

MELECHKO, A. V.; MERKULOV, V. I.; MCKNIGHT, T. E.; GUILLORN, M. A.; KLEIN, K. L.; LOWNDES, D. H.; SIMPSON, M. L. *Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: controlled synthesis and directed assembly*. Journal of applied physics. V. 97, n. 4, 40 p. 2005.

MOHAN, T. P.; KANNY, K.; VELMURUGAN, R. *Epoxy—clay nanocomposites—effect of curing temperature in mechanical properties*. International Journal of Plastics Technology, v. 13, n. 2, p. 123-132, 2009.

MORONI, F.; PIRONDI, A; KLEINER, F. *Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid structural joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 30, n. 5, p. 367-379, 2010.

NETO, A. S., *Desenvolvimento de um Adesivo Nanomodificado por Grafeno*. Junho de 2011. 80p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2011.

NETO, A. S.; DA CRUZ, D. T. L.; AVILA, A. F. *Nano-modified adhesive by graphene: the single lap-joint case*. *Materials Research*, v. 16, n. 3, p. 592-596, 2013.

OLIVA, H. N. P. *Estudo de Propriedades de Adesivo Nanomodificado com Grafeno e Nanotubo de Carbono*. Dezembro de 2014. 48 p. Monografia (bacharelado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2014.

OPLINGER, D. W., 1991, *A layered beam theory for single lap joints*, Army Materials Technology Laboratory Report MTL TR91-23 *apud* TONG, L. and STEVEN, G. P., 1999, *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Boston, Kluwer Academic Publishers.

PEREIRA, G. C. *Nanocompósitos híbridos modificados com nanotubo de carbono: síntese e caracterização*. Maio de 2013. 159 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2013.

PETRIE, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. New York, USA: McGraw-Hill, 896 p., 2000.

PHCIENTIFICA, Acessado em 24 de Outubro de 2015. Disponível em: <<http://www.phcientifica.com.br/balancas?gclid=C1jKz4WX3MgCFU2BkQod2RoNEg>>.

ROMI, Acessado em 29 de Janeiro de 2016. Disponível em: <<http://www.romi.com.br/>>.

SAAB AIRCRAFT. Acessado em 02 de Agosto de 2016. Disponível em: <<http://www.saabaircraftleasing.com/>>.

SOUSA, C. C. R. G. de. *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. Tese de Doutorado. 136 p. Instituto Superior de Engenharia do Porto. Departamento de Engenharia Mecânica. Porto, 2016.

SRIVASTAVA, V. K. *Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/C-SiC ceramic fibre composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 31, n. 6, p. 486-489, 2011.

STANKOVICH, S.; DIKIN, D. A.; PINER, R. D.; KOHLHAAS, K. A.; KLEINHAMMES, A.; JIA, Y.; WU, Y.; NGUYEN, S. T.; RUOFF, R. S. *Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide*. Carbon, v.45, n. 7, p. 1558-1565, 2007.

SYDLIK, S. A. ; LEE, J. H. ; WALISH, J. J. ; THOMAS, E. L. ; SWAGER, T. M. *Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives*. Carbon, v. 59, p. 109-120, 2013.

THOSTENSON, E. T.; LI, C.; CHOU, TW. *Nanocomposites in context*. Composites Science and Technology, v. 65, n. 3, p. 491-516, 2005.

TIDE, R. H. R.; KULAK, G. L.; TROUP, E. W. J. RESEARCH COUNCIL ON STRUCTURAL CONNECTIONS. *Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts*. c/o American Institute of Steel Construction, Inc. One East Wacker Drive, Suite 3100, Chicago, Illinois 60601-2001. 81 p., 2004.

TONG, L.; STEVEN, G. P. *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Univ. of Sydney, New South Wales (AU), 288 p., 1999.

TSAI, M. Y.; MORTON, J. *An evaluation of analytical and numerical solutions to the single-lap joint*. International Journal of Solids and Structures, v. 31, n. 18, p. 2537-2563, 1994.

UEHARA, K.; SAKURAI, M. *Bonding strength of adhesives and surface roughness of joined parts*. Journal of Materials Processing Technology, v. 127, n. 2, p. 178-181, 2002.

VEHO WORLD. Acessado em 25 de Outubro de 2015. Disponível em: < <http://www.veho-world.com/>>.

VOLKERSEN, O., 1938, *Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforsch, 15, 41-47 *apud* TONG, L. and STEVEN, G. P., 1999, *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Boston, Kluwer Academic Publishers.

WERNIK, J. M.; MEGUID, S. A. *On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives*. Materials & Design, v. 59, p. 19-32, 2014.

WONG, H. S. P.; AKINWANDE, D. *Carbon Nanotube and Graphene Devices Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 251 p., 2011.

YU, S.; TONG, M. N.; CRITCHLOW, G. *Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates*. Materials & Design, v. 31, p. S126-S129, 2010.

ZENG, QG. *A Study on Composite Adhesive Lap Joint*, PhD. Thesis, Purdue University, Purdue, IN. 124 p., 2001.

APÊNDICE A

Imagens laterais da região de sobreposição das juntas



Figura 68: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas coladas.

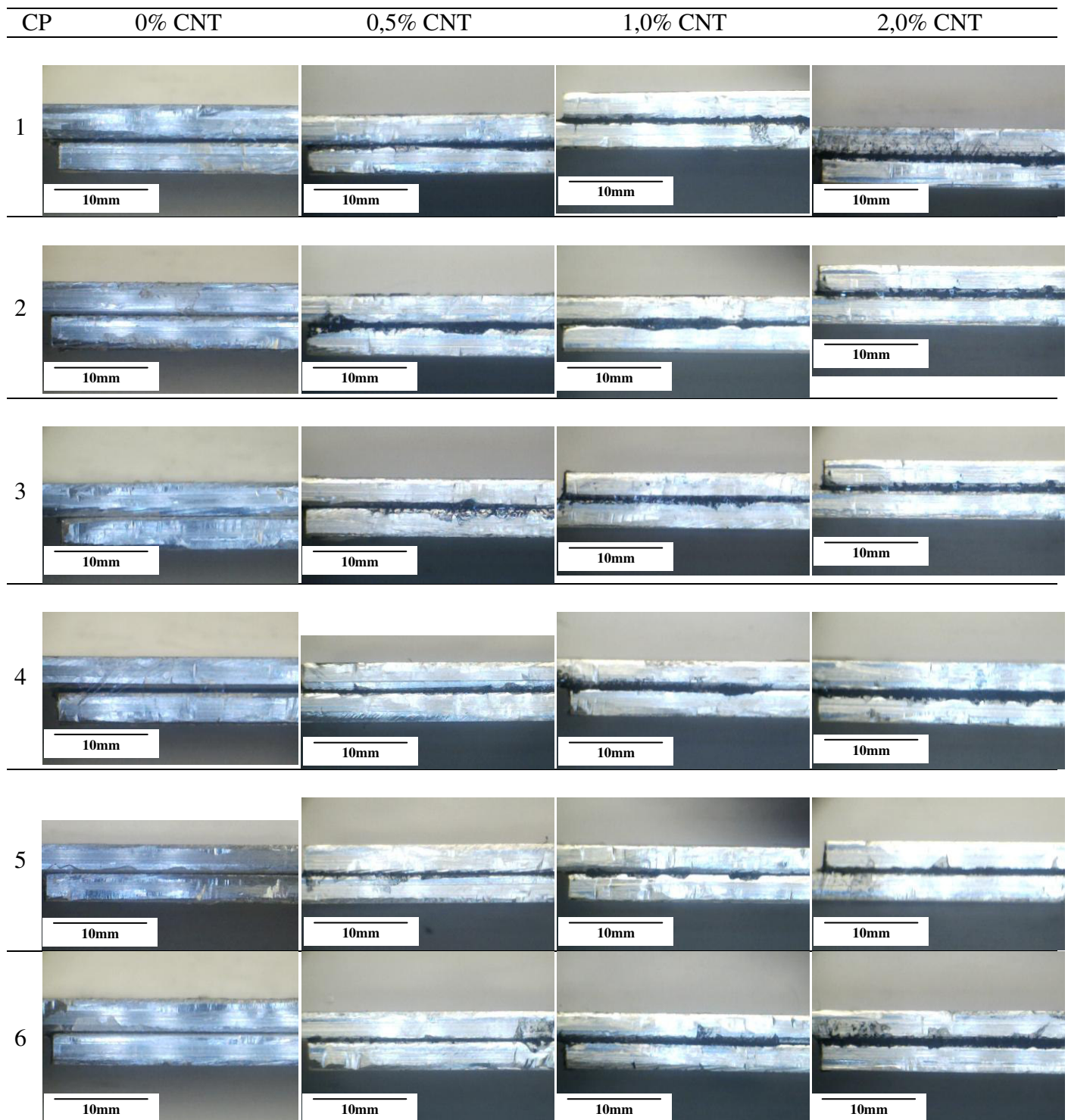


Figura 69: Imagens laterais da região de sobreposição das juntas Híbridas (antes de serem rebitadas).

APÊNDICE B

Imagens dos modos de falha

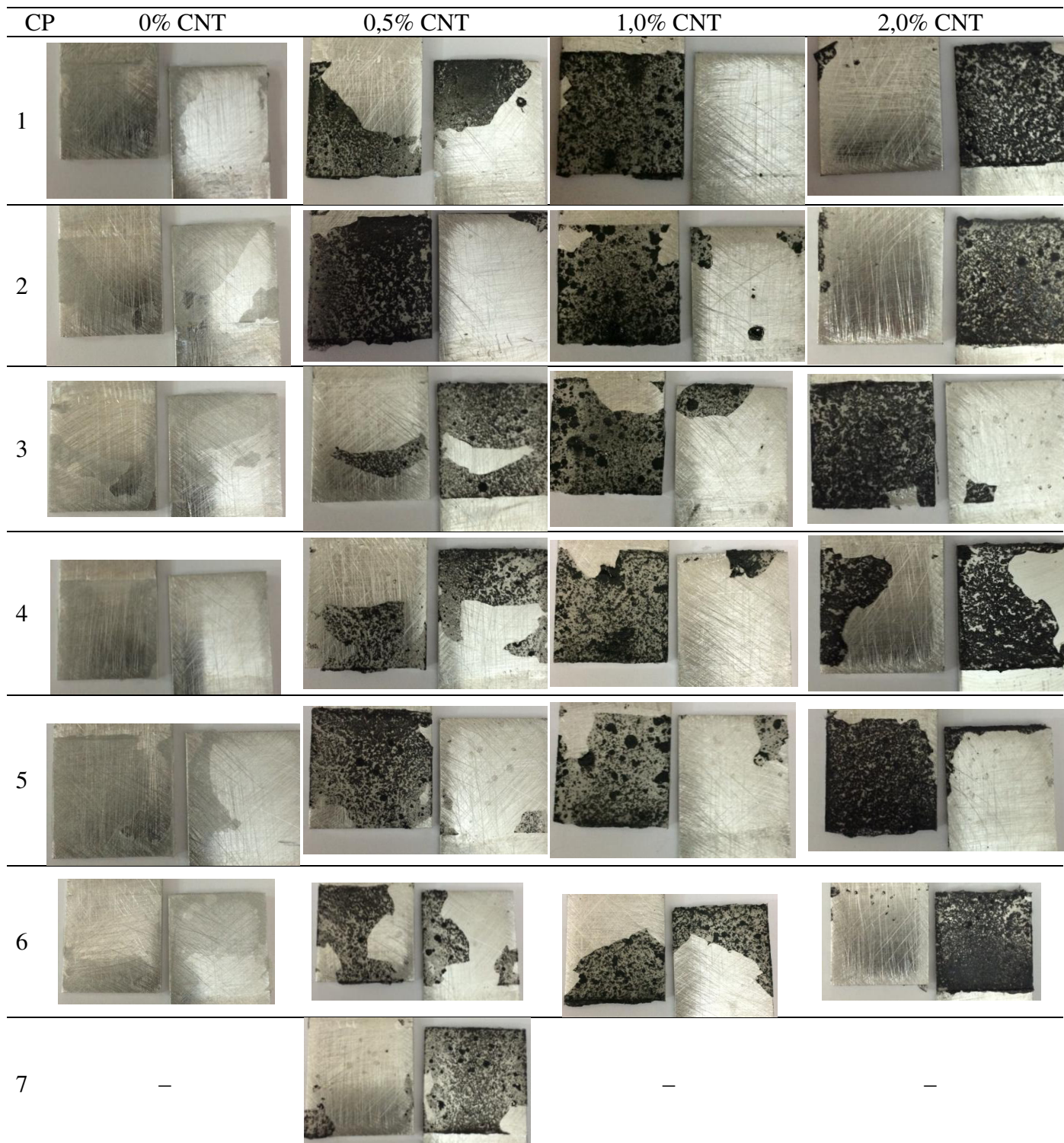


Figura 70: Modos de falha das juntas coladas.

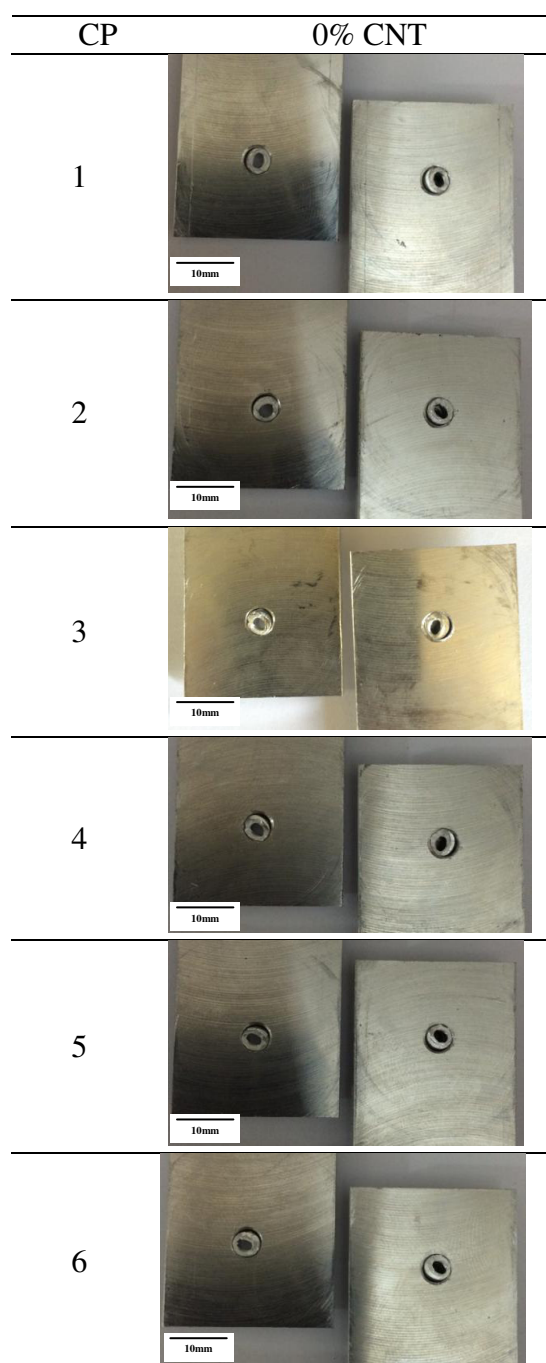


Figura 71: Modos de falha – juntas rebitadas.



Figura 72: Modos de falha – juntas híbridas.

APÊNDICE C

Análise estatística dos ensaios de cisalhamento aparente Juntas coladas – Força máxima

<i>Anova: fator único (25/03/2016 21:33:28)</i>						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0,0% CNT	6	8654,3	1442,383	110413,2		
0,5% CNT	6	9820,9	1636,817	75185,43		
1,0% CNT	6	7343,06	1223,843	37251,66		
2,0% CNT	6	25022,7	4170,45	1742471		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	34200371	3	11400124	23,20257	1,01E-06	3,098391
Dentro dos grupos	9826606	20	491330,3			
Total	44026977	23				

Figura 73: ANOVA dos dados de força de ruptura para juntas coladas.

Hipóteses:

H0: Todas as médias populacionais são iguais.

H1: Pelo menos uma das médias é diferente.

A estatística empregada para o teste é $F = \frac{\text{Variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$

Conclusão do teste:

- Se o valor de F (observado) for menor que o valor crítico (F crítico), não se pode rejeitar a hipótese H0.
- Caso contrário, se F for maior do que o valor crítico (F crítico), rejeita-se H0.

Comparativo entre médias

Teste de Tukey

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

Tabela 29: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – força máxima - Juntas coladas

	Média	Variância	Observações	Hipótese da diferença de média	gl	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
0,0%CNT	1442,383	110413,2	6	0	10	-1,1055	0,147415	1,812461	0,29483	2,228138842
0,5%CNT	1636,817	75185,43	6							
0,0%CNT	1442,383	110413,2	6	0	8	1,393054	0,100546	1,859548	0,201092	2,306004133
1,0%CNT	1223,843	37251,66	6							
0,0%CNT	1442,383	110413,2	6	0	6	-4,90915	0,001343	1,94318	0,002686	2,446911846
2,0%CNT	4170,45	1742471	6							
0,5%CNT	1636,817	75185,43	6	0	9	3,016774	0,007278	1,833113	0,014555	2,262157158
1,0%CNT	1223,843	37251,66	6							
0,5%CNT	1636,817	75185,43	6	0	5	-4,60324	0,002912	2,015048	0,005823	2,570581835
2,0%CNT	4170,45	1742471	6							
1,0%CNT	1223,843	37251,66	6	0	5	-5,4103	0,001459	2,015048	0,002918	2,570581835
2,0%CNT	4170,45	1742471	6							

Se P (T<=t) bi-caudal é menor ou igual a 0,05, indica que a diferença entre as médias são significativas em um nível de 5%.

Se P (T<=t) bi-caudal é maior do que 0,05, indica que a diferença entre as médias NÃO são significativas em um nível de 5%.

Juntas coladas – Deslocamento na força máxima

<i>Anova: fator único (26/03/2016 14:12:17)</i>						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0,0% CNT	6	4,73704	0,789507	0,038094		
0,5% CNT	6	5,36217	0,893695	0,03581		
1,0% CNT	6	4,20293	0,700488	0,017846		
2,0% CNT	6	12,0815	2,013583	0,367705		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	6,79926	3	2,26642	19,73137	3,43E-06	3,098391
Dentro dos grupos	2,297276	20	0,114864			
Total	9,096536	23				

Figura 74: ANOVA dos dados de deslocamento para juntas coladas

Hipóteses:

H0: Todas as médias populacionais são iguais.

H1: Pelo menos uma das médias é diferente.

A estatística empregada para o teste é $F = \frac{\text{Variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$

Conclusão do teste:

- Se o valor de F (observado) for menor que o valor crítico (F crítico), não se pode rejeitar a hipótese H0.
- Caso contrário, se F for maior do que o valor crítico (F crítico), rejeita-se H0.

Comparativo entre médias

Teste de Tukey

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

Tabela 30: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – deslocamento na força máxima - Juntas coladas

	Média	Variância	Observações	Hipótese da diferença de média	gl	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
0,0%<i>CNT</i>	0,789507	0,038094	6	0	10	-0,93877	0,184984	1,812461	0,369967	2,228139
0,5%<i>CNT</i>	0,893695	0,03581	6							
0,0%<i>CNT</i>	0,789507	0,038094	6	0	9	0,921924	0,190309	1,833113	0,380618	2,262157
1,0%<i>CNT</i>	0,700488	0,017846	6							
0,0%<i>CNT</i>	0,789507	0,038094	6	0	6	-4,70683	0,001651	1,94318	0,003303	2,446912
2,0%<i>CNT</i>	2,013583	0,367705	6							
0,5%<i>CNT</i>	0,893695	0,03581	6	0	9	2,043097	0,035703	1,833113	0,071407	2,262157
1,0%<i>CNT</i>	0,700488	0,017846	6							
0,5%<i>CNT</i>	0,893695	0,03581	6	0	6	-4,31837	0,002496	1,94318	0,004992	2,446912
2,0%<i>CNT</i>	2,013583	0,367705	6							
1,0%<i>CNT</i>	0,700488	0,017846	6	0	5	-5,18001	0,001763	2,015048	0,003525	2,570582
2,0%<i>CNT</i>	2,013583	0,367705	6							

Se P (T<=t) bi-caudal é menor ou igual a 0,05, indica que a diferença entre as médias são significativas em um nível de 5%.

Se P (T<=t) bi-caudal é maior do que 0,05, indica que a diferença entre as médias NÃO são significativas em um nível de 5%.

Juntas híbridas – Força máxima

<i>Anova: fator único (25/03/2016 21:42:15)</i>						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0,0 wt.% CNT	6	8796,3	1466,05	113403,3		
0,5 wt.% CNT	6	10623,3	1770,55	127814,5		
1,0 wt.% CNT	6	11283,7	1880,617	79426,96		
2,0 wt.% CNT	6	9650,1	1608,35	46492,84		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	596081,6	3	198693,9	2,164789	0,123972	3,098391
Dentro dos grupos	1835688	20	91784,39			
Total	2431769	23				

Figura 75: ANOVA dos dados de força de ruptura para juntas híbridas.

Hipóteses:

H0: Todas as médias populacionais são iguais.

H1: Pelo menos uma das médias é diferente.

A estatística empregada para o teste é $F = \frac{\text{Variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$

Conclusão do teste:

- Se o valor de F (observado) for menor que o valor crítico (F crítico), não se pode rejeitar a hipótese H0.
- Caso contrário, se F for maior do que o valor crítico (F crítico), rejeita-se H0.

Comparativo entre médias

Teste de Tukey

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

Tabela 31: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – Força máxima - Juntas híbridas

	Média	Variância	Observações	Hipótese da diferença de média	gl	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
0,0%<i>CNT</i>	1466,05	113403,263	6	0	10	1,51865	0,079906	1,812461	0,159813	2,228139
0,5%<i>CNT</i>	1770,55	127814,515	6							
0,0%<i>CNT</i>	1466,05	113403,263	6	0	10	-2,3125	0,021661	1,812461	0,043322	2,228139
1,0%<i>CNT</i>	1880,6167	79426,9577	6							
0,0%<i>CNT</i>	1466,05	113403,263	6	0	9	0,87169	0,203015	1,833113	0,406031	2,262157
2,0%<i>CNT</i>	1608,35	46492,839	6							
0,5%<i>CNT</i>	1770,55	127814,515	6	0	9	0,59223	0,284136	1,833113	0,568272	2,262157
1,0%<i>CNT</i>	1880,6167	79426,9577	6							
0,5%<i>CNT</i>	1770,55	127814,515	6	0	8	0,95163	0,184573	1,859548	0,369146	2,306004
2,0%<i>CNT</i>	1608,35	46492,839	6							
1,0%<i>CNT</i>	1880,6167	79426,9577	6	0	9	1,87942	0,046446	1,833113	0,092893	2,262157
2,0%<i>CNT</i>	1608,35	46492,839	6							

Se P (T<=t) bi-caudal é menor ou igual a 0,05, indica que a diferença entre as médias são significativas em um nível de 5%.

Se P (T<=t) bi-caudal é maior do que 0,05, indica que a diferença entre as médias NÃO são significativas em um nível de 5%.

Juntas híbridas – Deslocamento na força máxima

<i>Anova: fator único (28/03/2016 14:15:02)</i>						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
0,0% CNT	6	11,78464	1,964107	0,053275		
0,5% CNT	6	10,96145	1,826908	0,056323		
1,0% CNT	6	11,9069	1,984483	0,039156		
2,0% CNT	6	8,58258	1,43043	0,473851		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,189574	3	0,396525	2,547522	0,084799	3,098391
Dentro dos grupos	3,113023	20	0,155651			
Total	4,302597	23				

Figura 76: ANOVA dos dados de deslocamento para juntas coladas

Hipóteses:

H0: Todas as médias populacionais são iguais.

H1: Pelo menos uma das médias é diferente.

A estatística empregada para o teste é $F = \frac{\text{Variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$

Conclusão do teste:

- Se o valor de F (observado) for menor que o valor crítico (F crítico), não se pode rejeitar a hipótese H0.
- Caso contrário, se F for maior do que o valor crítico (F crítico), rejeita-se H0.

Comparativo entre médias

Comparativo entre médias

Teste de Tukey

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

Tabela 32: Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes – deslocamento na força máxima - Juntas híbridas

	Média	Variância	Observações	Hipótese da diferença de média	gl	Stat t	P(T<=t) uni-caudal	t crítico uni-caudal	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
0,0%CNT	1,9641067	0,05327	6	0	10	1,015134	0,166987	1,812461	0,333973	2,228139
0,5%CNT	1,8269083	0,05632	6							
0,0%CNT	1,9641067	0,05327	6	0	10	-0,16417	0,436433	1,812461	0,872866	2,228139
1,0%CNT	1,9844833	0,03916	6							
0,0%CNT	1,9641067	0,05327	6	0	6	1,800514	0,060933	1,94318	0,121866	2,446912
2,0%CNT	1,43043	0,47385	6							
0,5%CNT	1,8269083	0,05632	6	0	10	-1,24914	0,120032	1,812461	0,240063	2,228139
1,0%CNT	1,9844833	0,03916	6							
0,5%CNT	1,8269083	0,05632	6	0	6	1,333785	0,115335	1,94318	0,23067	2,446912
2,0%CNT	1,43043	0,47385	6							
1,0%CNT	1,9844833	0,03916	6	0	6	1,89481	0,053468	1,94318	0,106937	2,446912
2,0%CNT	1,43043	0,47385	6							

Se P (T<=t) bi-caudal é menor ou igual a 0,05, indica que a diferença entre as médias são significativas em um nível de 5%.

Se P (T<=t) bi-caudal é maior do que 0,05, indica que a diferença entre as médias NÃO são significativas em um nível de 5%.