

Almir Silva Neto

ESTUDO DE TENSÕES E MODOS DE FALHA NO DESENVOLVIMENTO DE ADESIVOS NANOMODIFICADOS E JUNTAS COLADAS

Belo Horizonte

2016

Almir Silva Neto

***Estudo de tensões e modos de falha no desenvolvimento
de adesivos nanomodificados e juntas coladas***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em engenharia mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientador:

Prof. Antônio Ferreira Ávila, PhD.

Belo Horizonte

2016

S586e

Silva Neto, Almir.

Estudo de tensões e modos de falhas no desenvolvimento de adesivos nanomodificados e juntas coladas [manuscrito] / Almir Silva Neto. - 2016. 131 f., enc.: il.

Orientador: Antônio Ferreira Ávila.

Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 110-131.

Bibliografia: f. 103-109.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Materiais compostos - Teses. 3. 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 TENSÕES E MODOS DE FALHA NO
DESENVOLVIMENTO DE ADESIVOS NANOMODIFICADOS E
JUNTAS COLADAS"**

ALMIR SILVA NETO

Tese 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 "**Doutor em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto Mecânico**".

Tese aprovada no dia 31 de maio de 2016.

Por:

Prof. Antônio Ferreira Ávila

Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Leandro Soares de Oliveira

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Haroldo Béria Campos

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Claysson Bruno Santos Vimieiro

Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Fernando Castro de Oliveira

Centro Federal de Educação Tecnológica de MG/CEFET

Prof. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Centro Federal de Educação Tecnológica de MG/CEFET

Dedico esse trabalho à minha esposa, Marina, e ao meu filho, Henrique.

Agradecimentos

Agradeço, sobretudo, à Deus.

Agradeço à Marina, minha companheira, pelo amor e pela compreensão, inestimáveis para a realização desse trabalho. Aos meus pais, por todo o suporte de sempre. À Rachel, pelo carinho que só minha irmã pode me dar.

Ao professor Ávila, agradeço pela paciência, boa vontade e, sobretudo, pela amizade construída ao longo desses anos. Em nome do professor, também agradeço a todos que passaram pelo LMC nesses anos, marcaram a minha história e, assim, fizeram diferença nesse trabalho.

Agradeço especialmente ao meu amigo Diego, por compartilhar e fazer mais divertidas algumas das horas de trabalho no Laboratório de Mecânica de Nanocompósitos. Ao meu aluno, Rafael de Alkmim Dias, pela confiança e companheirismo.

Agradeço, ainda, aos novos e valiosos colegas de CEFET-MG de Timóteo, Valmir e Erriston, que me ajudaram na conclusão desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, agradeço o aporte financeiro, sob o processo 143165/2011-9.

Às empresas REA Indústria e Comércio e Tudo Eletro Ltda. agradeço os recursos cedidos à esse trabalho.

Resumo

Até bem pouco tempo atrás, a utilização de materiais compósitos de alto desempenho estava restrita a poucas indústrias de alta tecnologia, principalmente por razões financeiras. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico dos processos de fabricação e a entrada definitiva dos robôs industriais nas fábricas, essa realidade está mudando. O uso de métodos convencionais para a união de materiais compósitos não é indicado. A natureza não isotrópica desses materiais potencializa os efeitos negativos introduzidos pelos concentradores de tensão oriundos de furos e cortes para a introdução de parafusos, rebites, entre outros. Pensando nesse problema é que as juntas coladas são estudadas para a aplicação em projetos de estruturas formadas pela união de suas partes. O presente trabalho relaciona as tensões nos adesivos nanomodificados de juntas *single-lap*, com e sem envelhecimento por UV, com as suas resistências. Os adesivos criados apresentaram um aumento de até 4,1% no módulo de elasticidade e 2,5% na dureza em relação ao adesivo não modificado. As juntas coladas com os novos adesivos tiveram um aumento de resistência de 6%. O efeito da degradação UV no adesivo foi avaliado via FTIR. Uma relação entre as tensões envolvidas em adesivos nanomodificados usados em juntas *single-lap* e a exposição à radiação ultravioleta foi estabelecida. Tal relação envolve a variação do gradiente de tensões na direção da espessura de adesivos com diferentes concentrações de grafeno (cujo aumento observado foi de até 16,7%) e os modos de falha oriundos dos ensaios destrutivos (que teve predominância de modos de falha misto com a prevalência de falhas coesivas). É proposta, então, um método de projeto que aumenta a capacidade de carga da junta colada pela combinação de duas técnicas já estabelecidas. A eficácia do método foi verificada por simulação numérica via elementos finitos. Um aumento na rigidez à rotação da junta, medido na redução do ângulo de rotação em 14,8%, leva à diminuição das tensões observadas no adesivo e ao consequente aumento de resistência.

Palavras-chave: Adesivos; Juntas coladas; Envelhecimento UV; Nanoindentação; Nanocompósitos.

Abstract

Until recently, the use of high performance composite materials was restricted to a few high-tech industries, mainly for financial reasons. However, with the technological development of manufacturing processes and the factories access to industrial robots, this reality is changing. The use of conventional methods for joining composite materials is not indicated. The non-isotropic nature of these materials enhances the negative effects introduced by stress concentrators derived by holes and cuts for using bolts, rivets, among others. To adequately tackle this problem, adhesive joints are studied for use in the design of structures that are assembled by joining parts. This work relates nanomodified adhesive stresses on single-lap joints, with and without UV aging, with their respective strengths. The newly made adhesives showed an increase of up to 4.1% in Young's module and 2.5% in hardness compared to the unmodified adhesive. Joints bonded with the modified adhesives had a 6% increase in resistance. UV degradation effects in the adhesive was evaluated by FTIR. A relationship between the stresses in the nanomodified adhesives used in single-lap joints and exposure to ultraviolet radiation was established. This relationship is established between the stress gradient variation in thickness direction of adhesives with different concentrations of graphene (the observed increase was up to 16.7%) and failure modes coming from destructive testing (which predominated mixed failure modes with the prevalence of cohesive failure). Therefore, a design method that increases joints load capacity by combining two established techniques was proposed. The efficacy of the method was verified by finite element analysis. An increase in the rotational stiffness of the joint, measured by the reduction of the rotation angle in 14.8%, leads to stress reliefs in the adhesive and the consequent increase in resistance.

Keywords: Adhesive; Adhesive joints; UV Aging; Nanoindentation; Nanocomposites.

Lista de Figuras

Figura 1. Aplicação de adesivo cianoacrilato no fechamento de corte superficial da pele humana (CHIVERS, 2011)	23
Figura 2. Exemplo de aplicação de adesivos na indústria automobilística. Adaptado de (BURCHARDT, 2011)	24
Figura 3. Operação de colagem do isolamento térmico de um tanque criogênico (HART-SMITH, 2011).....	25
Figura 4. Curva típica do ensaio de nanoindentação (OLIVER; PHARR, 1992)	28
Figura 5. Área considerada em diferentes geometrias de indentadores	28
Figura 6. Comparação entre tensões de falha de adesivos. Adaptado de (MOULDS, 2006)	29
Figura 7. Tipos de juntas: (a) <i>Single-lap</i> , (b) <i>Double-lap</i> , (c) de topo com um contraforte, e (c) de topo com dois contrafortes.....	30
Figura 8. Tipos de tensões em juntas sobrepostas simples (BUENO, 2002).....	31
Figura 9. Esquema de idealização da tensão cisalhante no adesivo para (a) aderente rígido, (b) adesivo rígido, e (c) comportamento combinado	33
Figura 10. Aplicação generalizada do método de Bigwood e Crocombe (CROCOMBE; ASHCROFT, 2008)	33
Figura 11. Cargas e tensões em um elemento de junta adesiva (DA SILVA; ÖCHSNER, 2008)	34
Figura 12. Condições de contorno para juntas sobrepostas simples carregadas axialmente (DA SILVA; ÖCHSNER, 2008).....	35
Figura 13. Formulação simplificada de Bigwood e Crocombe. Adaptado de (BIGWOOD; CROCOMBE, 1989)	36
Figura 14. Exemplos de malhas de simulações (a) 2D e (b) 3D de (c) um corpo de prova experimental. Adaptado de (SILVA NETO, 2011)	40
Figura 15. Exemplos de formas de aumento de resistência da junta <i>single-lap</i> por: (a) filete reto de adesivo; (b) chanfro externo do aderente; (c) filete convexo de adesivo; e (d) filete côncavo de adesivo.....	42

Figura 16. Comparação entre as principais propriedades de algumas fibras (NASSEH, 2000)	47
Figura 17. Manta de fibra de vidro (NASSEH, 2000).....	48
Figura 18. Comparação da resistência à tração de compósitos com diferentes configurações de fibras de reforço (NASSEH, 2000)	49
Figura 19. Mechas de fibra de (a) vidro e (b) carbono	49
Figura 20. Tipos de nanopartículas e suas relações de área superficial/volume. Adaptado de (THOSTENSON; LI; CHOU, 2005)	50
Figura 21. Níveis de análise dos reforços de milímetros a nanômetros: (da esquerda para a direita) tecido plano; uma única fibra com nanotubos de carbono crescidos na superfície; detalhe dos nanotubos; e a estrutura da parede de um nanotubo. Adaptado de (THOSTENSON; LI; CHOU, 2005).....	51
Figura 22. Imagens de microscopia eletrônica de nanotubos de carbono. Adaptado de (HARRIS, 2009)	52
Figura 23. Configurações de dispersão das nanopartículas. Adaptado de (HUSSAIN, 2006)	53
Figura 24. Tipos de falha de nanocompósitos de matriz polimérica e CNTs, sendo (a) o nanotubo intacto na matriz; (b) falha na adesão entre matriz e CNT; (c) colapso do CNT; (d) ruptura do CNT externo e (e) falha na adesão da parte cilíndrica do CNT (DANIEL; FENNER, 2011)	56
Figura 25. Fluxograma das rotinas de trabalho	57
Figura 26. Dimensões do corpo de prova em milímetros	60
Figura 27. Dispositivo em aço para fabricação de juntas sobrepostas simples.....	61
Figura 28. Esquema de fabricação dos CPs DCB: (a) Plano de colagem e corte; (b) Esquema de CP pronto com dimensões	62
Figura 29. Montagem de um CP de ensaio DCB e, em detalhe, o dispositivo fabricado	63
Figura 30. Tela de trabalho do software ImageJ com a identificação ferramentas utilizadas	64
Figura 31. Exemplo de malha para simulação de junta sobreposta simples e, ao fundo, ampliação de região mostrando zonas de transição	65

Figura 32. Fabricação do Spew-Fillet em curva	67
Figura 33. Desenho esquemático do reforço combinado proposto	68
Figura 34. Esquema da lâmina de reforço e suas proporções volumétricas	68
Figura 35. Condições de contorno	68
Figura 36. Curvas dos ensaios de Nanoindentação para adesivos (a) sem adição de nanopartículas e com (b) 1% e (c) 2% de adição de nanopartículas	69
Figura 37. Resultados da Nanoindentação dos adesivos AR300 e AR300G	70
Figura 38. Detalhe da região de sobreposição dos CPs SLJ FV AR300G1	71
Figura 39. Resultados ensaios SLJ – Compósitos Fibra de Carbono	72
Figura 40. Carregamento no tempo de todo o ensaio DCB	72
Figura 41. Gráfico de força por deslocamento do ensaio DCB com o detalhe dos pontos de início da não linearidade e de pico	73
Figura 42. Curva R do ensaio DCB	74
Figura 43. Detalhe da região de falha do CP no ensaio DCB	74
Figura 44. Diferentes formas de localização espacial dos modos de falha das juntas de laminados de fibra de carbono tais como: (a) LFT transversal nas extremidades; (b) LFT longitudinal central; (c) LFT transversal superior; (d) LFT diagonal; (e) LFT dispersa em bolsões de adesivo; (f) LFT dispersa à direita; (g) LFT dispersa inferior; e (h) LFT dispersa superior e inferior	76
Figura 45. Detalhe da parte esquerda da região de sobreposição (Aderente em FV e adesivo sem nanopartículas) – Tensões de von-Mises.....	77
Figura 46. Tensões no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição – aderente de Fibra de Vidro.....	78
Figura 47. Tensões no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição – aderente de Fibra de Carbono	78
Figura 48. Tensões de delaminação ao longo da espessura do adesivo em junta <i>single-lap</i> de fibra de carbono	79
Figura 49. Tensões de cisalhamento ao longo da espessura do adesivo em junta <i>single-lap</i> de fibra de carbono	79

Figura 50. Tensões de delaminação no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Vidro.....	80
Figura 51. Tensões de cisalhamento no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Vidro.....	80
Figura 52. Tensões de delaminação no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Carbono	81
Figura 53. Tensões de cisalhamento no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Carbono	81
Figura 54. Curvas carregamento e descarregamento das nanoindentações	85
Figura 55. Espectro de absorção molecular por FTIR para adesivo AR300 sem grafeno	87
Figura 56. Espectro de absorção molecular por FTIR para AR300G1	87
Figura 57. Espectro de absorção molecular por FTIR para AR300G2	88
Figura 58. Resistência de juntas SLJ para diferentes concentrações de nanopartículas e diferentes tempos de exposição UV	88
Figura 59. Fratografias dos CPs 1% 100h de envelhecimento na ordem de identificação	90
Figura 60. Comparação das tensões ao longo da sobreposição com e sem pré trincas	91
Figura 61. Tensões ao longo da espessura para adesivo com pré-trinca na interface e no meio	92
Figura 62. Referências para medições do gradiente das tensões de delaminação para CP de FC e adesivo AR3002G com pré trinca	92
Figura 63. Referências para medições do gradiente das tensões de cisalhamento para CP de FC e adesivo AR3002G com pré trinca	93
Figura 64. Gradiente das tensões de delaminação para CP de FC e adesivos com pré trinca	93
Figura 65. Gradiente das tensões de cisalhamento para CP de FC e adesivos com pré trinca	94

Figura 66. Comparação entre as distribuições das tensões para adesivo AR300G2 em CPs de FC com e sem reforço em compósito	95
Figura 67. Medição do ângulo de rotação da junta (a) com filete com raio de 10 mm e (b) com reforço de compósito e filete de 55 mm de raio.	96
Figura 68. Forma de idealização do arco de filete de Lang e Mallick (1998), onde “ta” é a espessura do adesivo e “ts” do substrato.....	96
Figura 69. Comparação das tensões (a) de cisalhamento e (b) de delaminação para diferentes raios de curvatura do reforço.....	97
Figura 70. Comparação das tensões (a) de cisalhamento e (b) de delaminação para diferentes raios de curvatura do reforço.....	97
Figura 71. Detalhe da distribuição das tensões de von-Mises na junta sobreposta simples com reforço de compósito.....	98
Figura 72. Comparação das tensões ao longo da espessura da junta <i>single-lap</i> e da junta proposta, ambas de FC e AR300G2	99

Lista de Tabelas

Tabela 1. Modos de falha para materiais compósitos	41
Tabela 2. Propriedades mecânicas de CNTs. Adaptado de (PEREIRA, 2013).....	55
Tabela 3. Propriedades dos aderentes usadas nas simulações	65
Tabela 4. Plano de exposição UV	66
Tabela 5. Atribuição aproximada das principais bandas de absorção para o sistema epóxi.....	66
Tabela 6. Resultados ensaios SLJ – Compósitos Fibra de Vidro.....	70
Tabela 7. Valores calculados de G_{Ic} em N/m	73
Tabela 8. Resistência e modos de falha das medições das fractografias dos CPs SLJ de fibra de carbono	76
Tabela 9. Módulo dos gradientes de tensão ao longo da espessura dos adesivos ..	82
Tabela 10. Resultados do ensaio de nanoindentação.....	84
Tabela 11. Resultados do ensaio SLJ para o grupo de CPs com 2% de grafeno e 100 horas de exposição UV	89
Tabela 12. Resistência e modos de falha das medições das fractografias dos CPs SLJ envelhecidos por UV	90
Tabela 13. Módulo dos gradientes de tensão ao longo da espessura dos adesivos com pré trinca	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADH – Falha adesiva;

CC – Calibração pela Correção da Flexibilidade;

CNT – Nanotubo de Carbono;

COH – Falha Coesiva;

CP – Corpo de prova;

DCB – *Double Cantilever Beam*;

FC – Fibra de Carbono;

FT – Falha de Rompimento da Fibra;

FTIR – Espectroscopia na Região do Infravermelho Médio por Transformada de Fourier;

FV – Fibra de Vidro;

LFT – Falha de Rompimento Leve de Fibra;

Max – Valor de Pico de Força;

MBT – Calibração pela Teoria de Vigas Modificada;

MCC – Calibração pela Correção da Flexibilidade Modificada;

MDF – Método das Diferenças Finitas;

MEC – Método dos Elementos de Contorno;

MEF – Método dos Elementos Finitos;

MF – Modo de Falha;

NL – Não Linearidade;

PVC – Policloreto de Vinila;

RMN – Ressonância Magnética Nuclear;

SB – Falha na Haste do Aderente;

SLJ – *Single-lap Joint*;

TLC – Falha Coesiva de Fina Camada;

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

UV – Ultravioleta;

Lista de Símbolos

A – Área;

ν – Coeficiente de Poisson;

K – Constantes de equações diferenciais;

γ – Deformação ao cisalhamento;

ε – Deformação normal;

h – Deslocamento;

u – Deslocamento axial;

v – Deslocamento transversal;

V – Esforço cortante;

t – Espessura;

η – Espessura do adesivo;

β – Fator de conformidade à delaminação;

α – Fator de conformidade ao cisalhamento;

P – Força;

∇ – Gradiente;

T – Momento torçor;

M – Momento fletor;

S – Inclinação da curva de descarregamento;

\mathbf{K} – Matriz de rigidez estrutural;

E – Módulo de elasticidade;

G – Módulo de elasticidade ao cisalhamento;

E_r – Módulo de elasticidade reduzido;

I – Momento de inércia de área;

τ, S_{XY} – Tensão de cisalhamento;

S_Y – Tensão de delaminação;

σ – Tensão normal;

δ – Vetor campo de deslocamentos;

\mathbf{F} – Vetor de cargas conhecidas;

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Objetivos	19
2. Revisão de Literatura	20
2.1. Adesivos	21
2.1.1. O uso dos adesivos	21
2.1.2. Caracterização de propriedades mecânicas dos adesivos	25
2.1.3. Projeto de juntas adesivas.....	28
2.2. Compósitos.....	44
2.2.1. Classificação.....	45
2.2.2. Nanocompósitos poliméricos	49
3. Metodologia	57
3.1. Fabricação do adesivo nanomodificado AR 300G	57
3.2. Caracterização via Nanoindentação	58
3.3. Laminação de compósitos de tecidos planos de fibra: fabricação do aderente	59
3.4. Caracterização da resistência via ensaio de juntas <i>Single-lap</i> com o AR300G	60
3.5. Caracterização da resistência à fratura via ensaio DCB.....	61
3.6. Quantificação das áreas por tipo de falha via ImageJ	63
3.7. Simulações numéricas dos ensaios de juntas <i>Single-lap</i>	64
3.8. Envelhecimento via exposição à raios UV	65
3.9. Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier	66
3.10. Proposta de solução para aumento de resistência e proteção UV	66
4. Resultados e Discussões	69
4.1. Propriedades mecânicas dos adesivos.....	69
4.1.1. Nanoindentações	69
4.1.2. Ensaios da juntas <i>single-lap</i>	70
4.1.3. Ensaio <i>double cantilever beam</i>	71
4.2. Análise do comportamento da junta – tensões e modos de falha.....	75
4.2.1. Classificação e quantificação dos modos de falha.....	75
4.2.2. Resultados das simulações – distribuição de tensões no adesivo	76

4.2.3. <i>Relação dos gradientes de tensão com os modos de falha</i>	82
4.3. Envelhecimento por UV	83
4.3.1. <i>Nanoindentações</i>	83
4.3.2. <i>Espectroscopia em infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR</i> ...	85
4.3.3. <i>Ensaio das juntas single-lap envelhecidas</i>	86
4.3.4. <i>Classificação e quantificação dos modos de falha</i>	89
4.3.5. <i>Simulações do efeito do envelhecimento do adesivo na distribuição de tensões</i>	89
4.4. Proposta de uma nova junta	94
5. Conclusões	100
6. Sugestões para trabalhos futuros	102

1. Introdução

Os métodos de projeto de estruturas são limitados pela escolha da técnica de união dos seus componentes. As pessoas têm um conceito de montagens robustas e seguras oriundo das respectivas experiências de vida. No entanto, tais conceitos são muito mais irracionais do que propriamente demonstram a eficiência dos métodos de união. Pensando nessa eficiência é que as juntas coladas são estudadas para a aplicação em projetos e fabricações de estruturas e máquinas em um futuro próximo. Os novos materiais desenvolvidos para otimizar os recursos utilizados pelo homem demandam formas igualmente inovadoras para fazer as uniões necessárias sem prejudicar a utilização de novos materiais como os compósitos reforçados com fibras. Assim, surgem outros materiais compósitos para superar esse desafio. Na verdade, esses novos adesivos vêm acompanhados das pequenas estruturas que possuem o maior potencial científico da atualidade, as nanopartículas. E, para se conseguir uma abordagem adequada dos problemas encontrados no desenvolvimento dessas tecnologias, processos modernos também precisam ser desenvolvidos e utilizados. Como é o caso da nanoindentação¹ e das simulações numéricas por elementos finitos. No entanto, qualquer abordagem que não preserve as condições finais de utilização das juntas levam um estudo à sua inutilidade tecnológica. É com essa visão que essa investigação foi desenvolvida. A seguir estão descritos os principais conteúdos dispostos na estrutura da tese.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre adesivos, juntas coladas e materiais compósitos, definindo conceitos importantes e classificando esses materiais. A teoria envolvida no dimensionamento de uniões adesivas é discutida. São mostradas vantagens e desvantagens da utilização das mesmas, informações relevantes ao projeto dessas juntas, formas de análise de tensões, os seus mecanismos de falha e métodos já desenvolvidos para o aumento da resistência das juntas coladas. Os nanocompósitos poliméricos são abordados em destaque pois os adesivos utilizados no estudo são desse tipo. O capítulo 3 descreve os materiais, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados nesse estudo e que segue a seguinte linha: fabrica-

¹ É um teste de indentação instrumentada em dimensões nanométricas.

ção do adesivo nanomodificado AR300G, caracterização do adesivo via Nanoindentação, fabricação das juntas SLJ e ensaio mecânico das mesmas, classificação e quantificação dos modos de falha existentes e simulação numérica dos estados de tensão no adesivo para os ensaios realizados. A mesma linha se repete para o estudo do efeito da exposição de juntas *single-lap* à radiação ultravioleta, porém, nesse caso, uma análise por espectroscopia em infravermelho por transformada de Fourier é adicionada para se analisar o efeito da radiação UV nos adesivos. Por fim, é sugerida uma solução de aumento de resistência da junta levando em conta as aplicações estudadas. O capítulo 4 vai apresentar e discutir os resultados obtidos nas nanoindentações e na espectroscopia em infravermelho por Transformada de Fourier para avaliar os adesivos e sua degradação. Apresenta também os ensaios e as análises da resistência de juntas *single-lap*, bem como as fractografias e medições dos modos de falha. E, por fim, propõe e avalia a eficácia de uma solução para aumento da resistência e durabilidade de juntas *single-lap*. Já o capítulo 5 trará as conclusões finais deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como principal objetivo relacionar as tensões nos adesivos nanomodificados de juntas *single-lap* com as respectivas resistências em situação de uso, para, então, propor um método de projeto que aumente a capacidade de carga das juntas. Para tanto é necessário:

- Avaliar as propriedades mecânicas dos novos adesivos, bem como avaliar o processo de fabricação dos mesmos.
- Estudar o comportamento das juntas com diferentes composições de adesivos nanomodificados quanto à respectiva resistência, tensões as quais está submetida e o desenvolvimento das fraturas e dos modos de falha.
- Investigar os efeitos do processo de envelhecimento por exposição à radiação ultravioleta nos adesivos e as consequências para a junta.
- Elaborar e verificar a eficácia de um método de projeto de junta que, aliando duas técnicas conhecidas da literatura, aumente a resistência da junta e atue como uma proteção ao envelhecimento por UV.

2. Revisão de Literatura

A “arte” de criar estruturas é limitada pela escolha da técnica de união dos seus componentes. Todas as pessoas têm um conceito de montagens robustas e seguras oriundo das nossas experiências de vida. Mas será que um carro com soldas a ponto ou aeronaves com as asas cobertas de rebites são realmente montagens mais eficientes (MOULDS, 2006)? O avanço da ciência e da tecnologia de uniões adesivas têm quebrado alguns paradigmas a esse respeito e respondido que não, nem sempre os métodos convencionais são os melhores. Paralelo a isso, a busca por estruturas de baixo peso específico é uma realidade em praticamente todas as indústrias. Um exemplo disso é que, mesmo em equipamentos dos quais a estrutura principal necessita ter uma grande densidade, outros componentes secundários certamente otimizam o processo tendo seu peso reduzido. É importante notar que, até bem pouco tempo atrás, a utilização de materiais compósitos de alto desempenho estava restrita a poucas indústrias de alta tecnologia, principalmente por razões financeiras. No entanto, com o desenvolvimento tecnológico dos processos de fabricação, essa realidade está mudando. Assim sendo, materiais compósitos como plásticos reforçados com fibra de carbono estão, pouco a pouco, fazendo parte do cotidiano das mais diversas indústrias e empresas.

O uso de métodos convencionais para a união de materiais compósitos não é indicado. A natureza não isotrópica desses materiais potencializa os efeitos negativos introduzidos pelos concentradores de tensão oriundos de furos e cortes para a introdução de parafusos e rebites, entre outros. No entanto, os benefícios trazidos pela tecnologia dos compósitos superam esse entrave, de forma que a união adesiva dos mesmos torna-se a opção mais adequada.

Um adesivo deve executar duas tarefas ao ser aplicado às superfícies a serem coladas: (i) garantir o contato das superfícies, seja por molhamento ou qualquer outra interação física; e (ii) deve então endurecer formando um sólido de alta resistência mecânica e coeso (COMYN, 2006). Dessa maneira, espera-se que o adesivo promova a transmissão de esforços estáticos e dinâmicos por um período considerável de tempo sem causar nenhuma fragilidade na capacidade de carga da estrutura.

Contudo, deve-se ter atenção a um ponto importante: juntas originalmente projetadas para a utilização de outros métodos que não união adesiva devem ser reprojatadas para aproveitar as vantagens e contornar as limitações das uniões adesivas. Banea e da Silva (2009) citam que vantagens tais como a diminuição de peso da estrutura, a flexibilidade de projeto e a facilidade de fabricação fez com que indústrias de alta tecnologia (e.g. aeronáutica, aeroespacial, eletrônica e automotiva) optassem por utilizar uniões adesivas em diversas aplicações. Silva Neto (2011) ainda cita como vantagens da utilização das juntas coladas:

- união adequada de materiais finos e espessos de quaisquer formas;
- a confecção de juntas com contornos suaves e aerodinâmicos;
- proporciona uma boa relação resistência/peso;
- é frequentemente mais rápido e mais barato que as fixações mecânicas convencionais;
- resistência à fadiga; e
- quando comparado à solda, a união adesiva não causa redução na resistência do aderente, pois o calor liberado na cura do adesivo não eleva significativamente a temperatura do sistema.

Dentre as limitações do processo de união adesiva, é possível citar:

- dificuldade no reparo de juntas defeituosas ou deficientes;
- longos tempos de cura, particularmente quando temperaturas de cura acima de 70 °C não são ou não podem ser usadas;
- preparação adequada das superfícies do aderente a serem coladas para se obter uniões mais resistentes e duráveis; e
- comportamento mecânico susceptível às condições do ambiente de trabalho da junta, principalmente em relação a umidade, temperatura e incidência de raios UV.

2.1. Adesivos

2.1.1. O uso dos adesivos

Os adesivos, nas suas mais diversas formas, são utilizados em diversas aplicações. É difícil pensar em um produto atual que não use adesivos e/ou selantes de alguma

maneira. Dentre as formas cotidianas de uso dos adesivos, estão a fita/filme adesiva(o), cola de papel de escritório, tintas e silicone para vedações de calhas, montagens de aquários e janelas. Outro uso comum são as colas rápidas, muito usadas em reparos gerais por sua diversa compatibilidade de materiais e, é claro, rapidez de uso. Esse tipo de adesivo, ou cianoacrilatos, ficou muito conhecido pela marca Super Bonder® da fabricante Henckel. A confiança na utilização desses adesivos está relacionada à finalidade do mesmo. Ou seja, existe uma grande diferença entre unir as peças de um vaso ornamental que quebrou ou colar uma tábua quebrada que compõe um degrau de uma escada. As aplicações são distintas e apresentam diferentes níveis de responsabilidade.

Para que seja possível “separar” as diferentes classes de adesivos, Papon (2011) propôs diferentes classificações que podem ser reunidas da seguinte forma:

- de uso geral;
- estruturais;
- de proteção/pintura; ou
- selantes.

Esses adesivos ainda podem ser usados tanto para fabricação de peças, conjuntos ou estruturas, quanto para reparo das mesmas (SANCAKTAR, 2011). O contrário também é válido, classificando-se primeiro o adesivo quanto a sua finalidade seguida da sua aplicação.

Além dessas aplicações mais comuns, o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas aos adesivos agrega valor a esses produtos nas mais diversas finalidades. Uma das tecnologias com grande potencial é a incorporação de nanopartículas aos adesivos com o objetivo de modificar algumas de suas propriedades. Lâminas do mineral Montmorilonita dispersas em matriz epóxi podem, por exemplo, dobrar a rigidez de adesivos com a adição de 10% m/m (TAYLOR, 2011). Silva Neto (2011) observou um aumento de até 57% na resistência de juntas sobrepostas simples pela dispersão de nanoestruturas de grafeno com a adição de apenas 2% m/m. As mais diversas áreas apresentam aplicações de adesivos. A seguir, uma introdução de tais aplicações é feita.

Na área biológica, novas aplicações de adesivos chamam a atenção. As diversas formas de adesão na natureza servem como fonte tanto de material para fabricação de adesivos quanto de inspiração para mecanismos de adesão ou outras funções. São exemplos do primeiro caso a borracha natural (látex), adesivos de amido, adesivos derivados de pele de bacalhau, entre outros. Do segundo caso, temos os estudos dos mecanismos de fixação de sementes por intertravamento, mecanismos de sucção em morcegos, mecanismo de fixação a seco das lagartixas, mecanismos *self-healing* e muitos mais (SUÁREZ, 2011).

Na medicina, os adesivos necessitam ser biocompatíveis, i.e., sua função é desempenhada com o mínimo de reações alérgicas, inflamatórias e/ou tóxicas quando em contato com tecidos vivos e fluidos orgânicos. São utilizados, principalmente, como alternativa às fixações mecânicas como suturas, por exemplo. Para uso interno, os principais adesivos adotados são aqueles à base de fibrina, gelatina e polietilenoglicol. Sua função é selar tecidos suturados para potencializar o processo de cicatrização. Os cianoacrilatos têm a mesma função, mas são utilizados somente em áreas externas da pele, como mostrado na Figura 1 (CHIVERS, 2011).



Figura 1. Aplicação de adesivo cianoacrilato no fechamento de corte superficial da pele humana (CHIVERS, 2011)

Na construção civil, pedras eram assentadas com argila de 3000 AC. Em 50 AC, já se utilizava uma argamassa de boa qualidade à base de cimento e cal. Hoje em dia, os adesivos não estão presentes só no assentamento de tijolos e acabamentos de cerâmica. Estão também na fabricação de laminados de madeira usados em componentes

estruturais, em elementos de fixação estruturais (e.g., sistemas de âncora em amarrações de concreto armado), em reforços estruturais e em juntas concreto-aço (HARTUNG; BOEHM, 2011).

A alta taxa de produção na indústria automobilística e a baixa lucratividade por produto dificultam a utilização de adesivos estruturais nas linhas de produção. Esses adesivos necessitam de metodologias específicas antes e depois da sua aplicação. Isso é traduzido em perda de tempo e, conseqüentemente, de dinheiro para os grandes fabricantes de automóveis. Atualmente, o uso dessa tecnologia na indústria automobilística se dá principalmente na montagem dos capôs, portas e para-brisas, normalmente em complemento a outra forma de fixação, e.g., solda a ponto (BURCHARDT, 2011). Uma aplicação típica de adesivos na indústria automobilística é ilustrada na Figura 2.

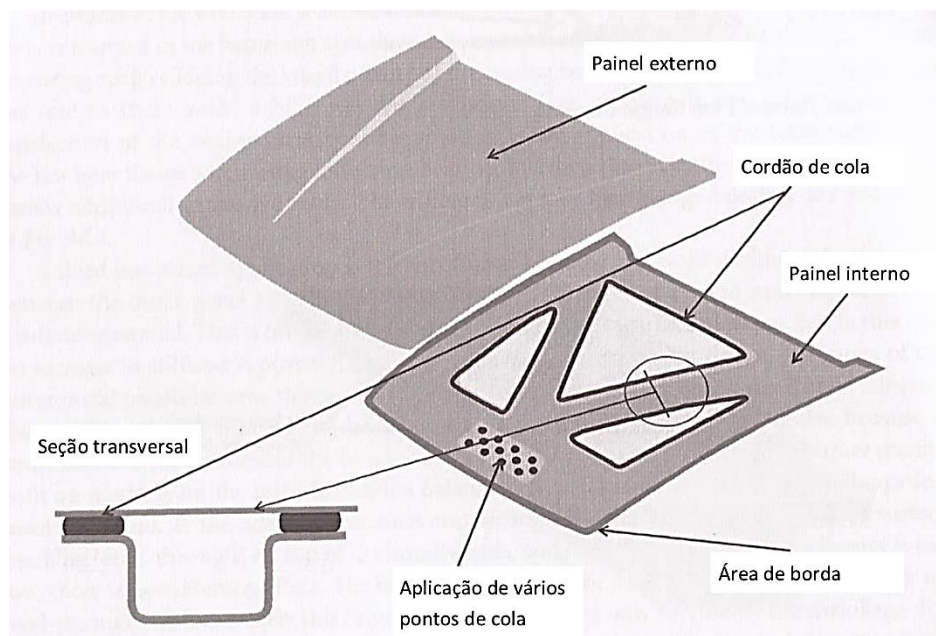


Figura 2. Exemplo de aplicação de adesivos na indústria automobilística. Adaptado de (BURCHARDT, 2011)

Na indústria naval, a agressividade do ambiente marítimo sobre os materiais é um fator relevante. Nesse sentido, os adesivos são a melhor opção, pois a resistência destes à corrosão nesse ambiente é muito boa. Além disso, pelo mesmo motivo, o uso de estruturas de material compósito, e.g., resinas epóxi reforçadas com fibras de carbono, vem aumentando nessa indústria. E esse tipo de estrutura é sensível às concentrações de tensão, fazendo com que a escolha de adesivos para a união das partes seja a melhor opção (DAVIES, 2011).

A indústria aeroespacial é, talvez, aquela que mais busca por redução de peso das estruturas. Em aeronaves essa redução pode ser traduzida em autonomia de voo e redução de ruído. Em equipamentos espaciais pode representar, além da economia de combustível, a viabilidade técnica e financeira. Dessa maneira, materiais com maior relação resistência-peso já são largamente utilizados por essa indústria. Aqui, novamente, os adesivos são tidos como a melhor forma de união desses materiais, por não incluírem concentradores de tensão prejudiciais ao aderente. Na Figura 3, mostra-se a operação de colagem do isolamento térmico de um tanque criogênico. Os maiores entraves dos adesivos são:

- Na aeronáutica, o fato de a tecnologia atual não conseguir prever, com o nível de segurança exigido, quando uma junta irá falhar.
- Na espacial, as diferentes condições de temperatura e ambiente na qual o adesivo deve manter suas propriedades.



Figura 3. Operação de colagem do isolamento térmico de um tanque criogênico (HART-SMITH, 2011)

2.1.2. Caracterização de propriedades mecânicas dos adesivos

Os ensaios de caracterização dos adesivos podem ser divididos em dois tipos: um com a atuação do adesivo maciço; e outro com a atuação do adesivo como tal. Já existem vários desses ensaios normalizados por sistemas internacionais como ASTM e ISO. A seguir, tem-se uma breve descrição dos ensaios mais comuns.

Para o ensaio de tração do adesivo no estado maciço, a norma ASTM D638-10 (2010b) separa os plásticos rígidos e semirrígidos dos não rígidos e dos reforçados (compósitos). Os corpos de prova (CPs) apresentam uma geometria parecida com uma gravata, ou de um osso de cachorro, para que a falha se localize na região central de interesse. São medidas força e deformação para uma taxa constante de deslocamento do cabeçote da máquina universal de ensaios. E podem ser obtidos os valores de resistência, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, dependendo dos recursos disponíveis na máquina. A resistência do adesivo à tração pode ser medida pela fabricação de aderentes com superfície plana a ser colada. Os aderentes são, então, montados na máquina e tracionados até a ruptura. A norma ASTM D897-08 (2008b) é uma das que regulamentam esse tipo de ensaio.

A verificação da resistência à compressão de adesivos não é um ensaio comum de se realizar. Mas as propriedades à compressão do material maciço podem ser medidas por um cilindro ou barra quadrada que é comprimida por placas paralelas montadas em uma máquina de ensaios universal. Para materiais poliméricos, a norma ASTM D695-10 (2010c) regulamenta esse ensaio. A resistência ao cisalhamento de adesivos pode ser obtida por corpos de prova espessos (ensaio conhecido como TAST), usados e colados nas extremidades, e tracionados até a ruptura (ASTM, 2007). Já as propriedades ao cisalhamento em CPs maciços já demandam dispositivos mais complexos e, por isso, são menos utilizados. O ensaio de torção é outra opção, mas também pouco utilizado (BANEIA; DA SILVA, 2009).

O ensaio de corpos de prova de juntas *single-lap* (SLJ) (ASTM, 2008a, 2010a) é, de certa forma, uma variação do ensaio TAST. No entanto, o corpo de prova não é reforçado, simulando uma situação real de utilização de uma junta. Tal variação faz com que o estado de tensões no adesivo quando a junta é solicitada seja mais complexo. O ensaio *double cantilever beam* (DCB) consiste em barras coladas paralelamente com um inserto colocado em uma das extremidades para criar uma pré trinca. O CP é, então, tracionado pelo lado do inserto de modo a abrir as barras. A trinca deve se propagar lentamente e são monitoradas a carga aplicada, a abertura da extremidade do CP e o comprimento da trinca. Com isso, pode-se obter as propriedades do adesivo

à fratura pelo modo I (ASTM, 2012). E, além desses, vários outros ensaios são utilizados e outros estão em desenvolvimento para estudar o comportamento dos adesivos e suas juntas à outros tipos de fratura, ao impacto, à delaminação, entre outros.

A nanoindentação é uma opção interessante para essa finalidade. Com ela pode ser determinada a dureza do material e o módulo de elasticidade do mesmo. A atratividade desta técnica vem do fato de que essas propriedades mecânicas podem ser determinadas diretamente pela medição da carga e do deslocamento da indentação sem a necessidade de se ter uma imagem da impressão. Além disso, as medições podem ser feitas nos próprios filmes finos de adesivos e, como o ensaio é realizado em vários locais de muito pequena área, pode-se ter uma ideia da dispersão, ou melhor, de uma eventual não dispersão de reforços particulados. Por outro lado, efeitos superficiais que não contribuem para o comportamento global do material podem ter elevada relevância nos resultados de nanoindentação. Com os equipamentos a cada dia mais modernos e precisos pode-se medir propriedades de materiais em escala micro e nanométrica dos mais diversos tipos de materiais (CRUZ, 2013; KRUZIC *et al.*, 2009; LI, HUI *et al.*, 2013; OYEN; COOK, 2009).

O ensaio consiste no carregamento e descarregamento de um nanoindentador sobre uma superfície, na aquisição dos dados e na plotagem da curva de força por deslocamento. Uma curva típica está ilustrada na Figura 4. O método de Oliver-Pharr determina o módulo de elasticidade reduzido - E_r por meio de uma correlação entre a reta tangente da curva de descarregamento no ponto de força máxima e a área indentada (OLIVER; PHARR, 2004). A equação (1) mostra essa relação, em que S é a inclinação do início da curva de descarregamento, P é a força aplicada ao nanoindentador, h o deslocamento do mesmo e A a respectiva área projetada. Tal área varia com a geometria do nanoindentador e com h .

$$S = \frac{dP}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A} \quad (1)$$

Alguns exemplos para o cálculo da área de geometrias comuns dos nanoindentadores podem ser vistos na Figura 5. O módulo de elasticidade do material pode ser obtido pela equação (2) em que E , ν , E_i e ν_i são os módulos de elasticidade e coeficiente de

Poisson do material e do nanoindentador, respectivamente. A dureza, H , é calculada pela definição normal, dada pela equação (3).

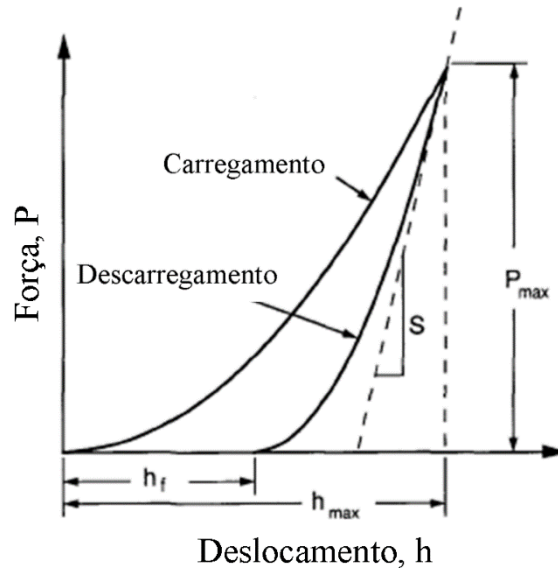


Figura 4. Curva típica do ensaio de nanoindentação (OLIVER; PHARR, 1992)

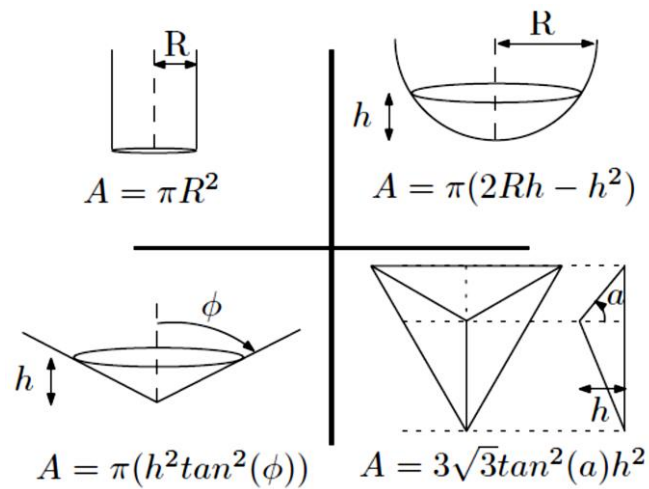


Figura 5. Área considerada em diferentes geometrias de indentadores

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (2)$$

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

2.1.3. Projeto de juntas adesivas

Existem várias configurações geométricas possíveis para uma junta adesiva. A junta ideal será aquela em que, sob todas as condições práticas de esforços, o adesivo seja solicitado no sentido que apresenta maior resistência. Moulds (2006) mostra na Figura 6 que esse sentido é o de compressão.

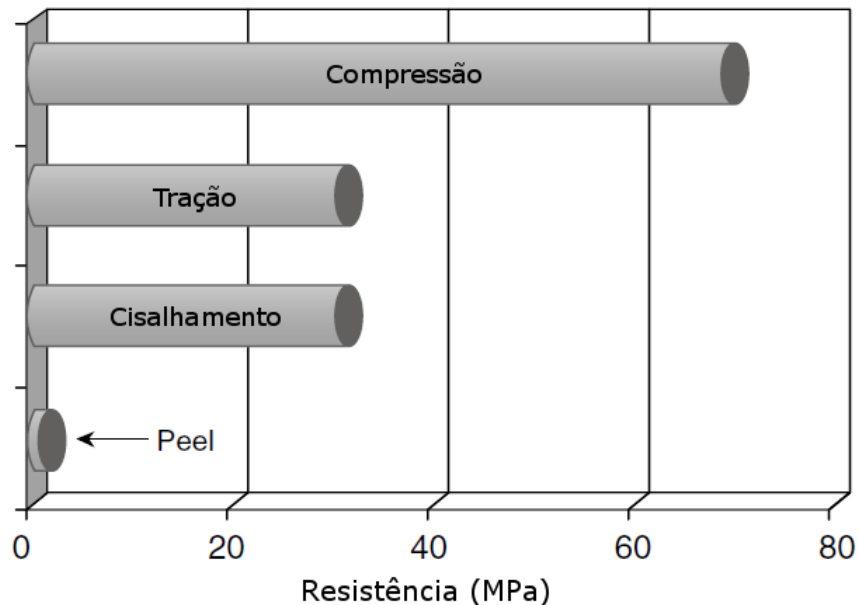


Figura 6. Comparação entre tensões de falha de adesivos. Adaptado de (MOULDS, 2006)

Entre as diversas geometrias utilizadas em uniões adesivas, podemos citar como principais as juntas *single-lap*, *double-lap* e de topo. Esta última com ou sem contrafortes, de um ou ambos os lados (Figura 7). Algumas técnicas foram desenvolvidas com o intuito de aumentar a capacidade de carga das juntas coladas, compreendendo desde mudanças nas propriedades dos aderentes até a mudança na geometria do adesivo.

2.1.3.1. Análise de tensões

De acordo com da Siva e Campilho (2012), a falta de metodologias confiáveis de projeto levam a um “superdimensionamento” de juntas adesivas. Quando a integridade dessas ainda envolve a segurança de vidas, é comum o uso de elementos mecânicos (e.g. parafusos, rebites, grampos) paralelamente ao adesivo. Mas essa prática pode aumentar o peso da estrutura e torná-la mais cara, além de introduzir zonas de concentração de tensão. Para contornar esse problema, é importante o desenvolvimento de modelos e critérios de falha que traduzam o comportamento das juntas. Dessa

maneira, é necessário determinar os campos de tensão e deformação no adesivo e nos aderentes para que possam ser apontados os prováveis locais de falha.

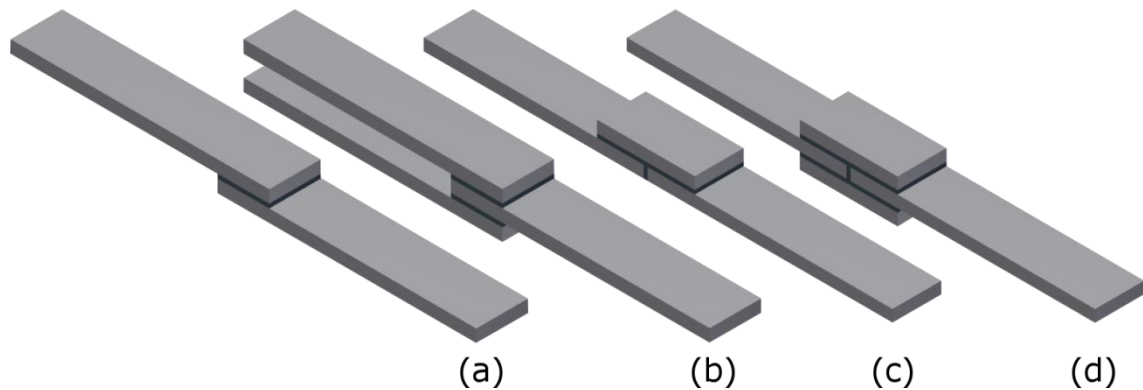


Figura 7. Tipos de juntas: (a) *Single-lap*, (b) *Double-lap*, (c) de topo com um contraforte, e (d) de topo com dois contrafortes.

A junta *single-lap* é a mais utilizada no estudo de uniões adesivas. Ela é eficiente, fácil de ser fabricada e de baixo custo. Sua assimetria, no entanto, gera uma distribuição de tensão complexa. Essa distribuição se dá com a combinação das várias formas ilustradas na Figura 8. De acordo com Bueno (2002), as tensões envolvidas em juntas sobrepostas simples podem ser definidas das seguintes maneiras:

Compressão: uma junta unida por adesivo submetida a um esforço de compressão será provavelmente a última a falhar em comparação às outras juntas submetidas a diferentes tipos de esforços. No entanto, esforços semelhantes a este raramente ocorrem na prática.

Tração: sobre tração pura, teoricamente, as tensões na superfície do aderente e do adesivo são uniformemente distribuídas. Na realidade, deslocamentos na junta, flexão dos aderentes, e outras complicações podem causar uma distribuição de tensões não linear, levando ao aparecimento de tensões de delaminação ou clivagem.

Cisalhamento: é o tipo mais comum de esforço encontrado em juntas adesivamente coladas. Em cisalhamento puro, o esforço é paralelo ao plano da junta e tenta separar os elementos da junta pelo deslizamento de um deles sobre o outro. Com o cisalhamento puro, tem-se a vantagem de se impor uma tensão uniforme

através da área inteira colada e, desse modo, usa-se toda a área da junta para suportar o esforço aplicado.

Delaminação ou *peel*: esforço responsável pela delaminação (*peel*) situado fora do plano da junta e tenta abrir a junta não uniformemente, frequentemente em uma de suas extremidades. Para esse tipo de esforço ocorrer, um ou ambos os aderentes devem ser flexíveis e devem poder fletir. Quando isto ocorre, um alto nível de tensão é desenvolvido localmente na interface adesivo-aderente o que gera a delaminação.

Clivagem: similar à delaminação, exceto que os aderentes devem ser rígidos e as extremidades são forçadas de forma a separar o adesivo. A clivagem ocorre quando uma força de tração deslocada ou um momento é aplicado, causando uma distribuição de tensões não uniforme. O esforço de clivagem também deve ser evitado quando possível.

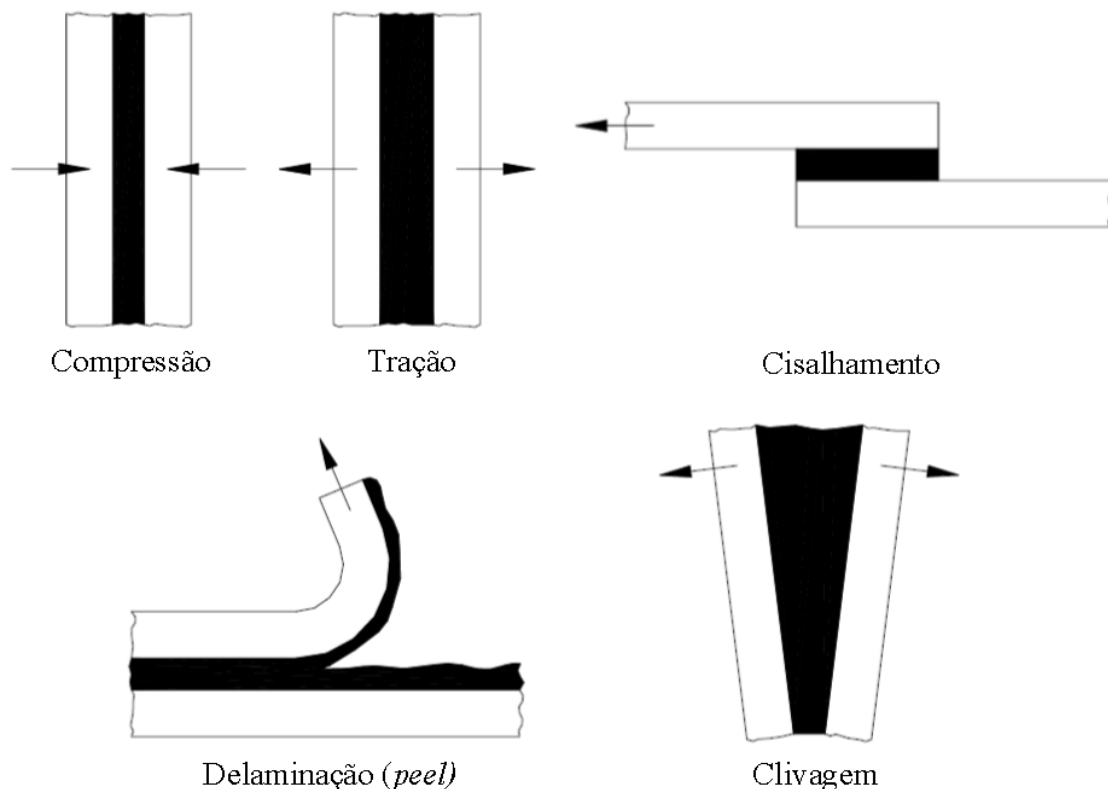


Figura 8. Tipos de tensões em juntas sobrepostas simples (BUENO, 2002)

A abordagem mais simples para a análise de tensões considera o aderente muito rígido de modo que a deformação no aderente seja nula em relação ao adesivo. Dessa

maneira, a carga é transferida de um substrato para o outro somente por uma tensão cisalhante uniforme. Mas os aderentes não têm essa rigidez e a deformação destes é maior do lado no qual a carga é aplicada (DA SILVA; ÖCHSNER, 2008). Uma forma de visualização dessa tensão cisalhante é mostrada na Figura 9.

Essa análise que considera somente carregamentos cisalhantes no adesivo foi feita por Volkersen em 1938 (como ilustrado na Figura 9.c). Ela não leva em conta que as forças aplicadas nos aderentes não são colineares e geram momentos fora do plano. Além do mais, essa análise conduz a valores de tensão cisalhante máxima nas extremidades que, na verdade, deveriam ser nulas por estarem livres. No entanto, ela ainda é usada para mostrar, de maneira didática, o comportamento de juntas *single-lap* à carregamentos axiais dos aderentes. Moulds (2006) é um dos pesquisadores que utiliza essa análise para fazer comparações dos diferentes estados de tensão em adesivos. Ele compara a união de substratos com diferentes espessuras, materiais, áreas de colagem, além da variação da espessura e do material do adesivo.

O modelo de Goland e Reissner foi o primeiro a considerar a assimetria da junta sobreposta simples (ou junta *single-lap*), i.e., que há um deslocamento entre as linhas de ação das forças aplicadas em cada lado da junta. Essa condição causa uma rotação da mesma e, conseqüentemente, o aparecimento das tensões de delaminação ou clivagem (BUENO, 2002).

Bigwood e Crocombe (1989) desenvolveram um método generalizado baseado na metodologia de Goland e Reissner. Neste, um carregamento arbitrário qualquer pode ser aplicado às extremidades. Dessa maneira, não somente uma junta *single-lap* pode ser analisada, mas várias outras configurações, como mostrado na Figura 10. E na Figura 11 está representado o diagrama de corpo livre de um elemento da junta.

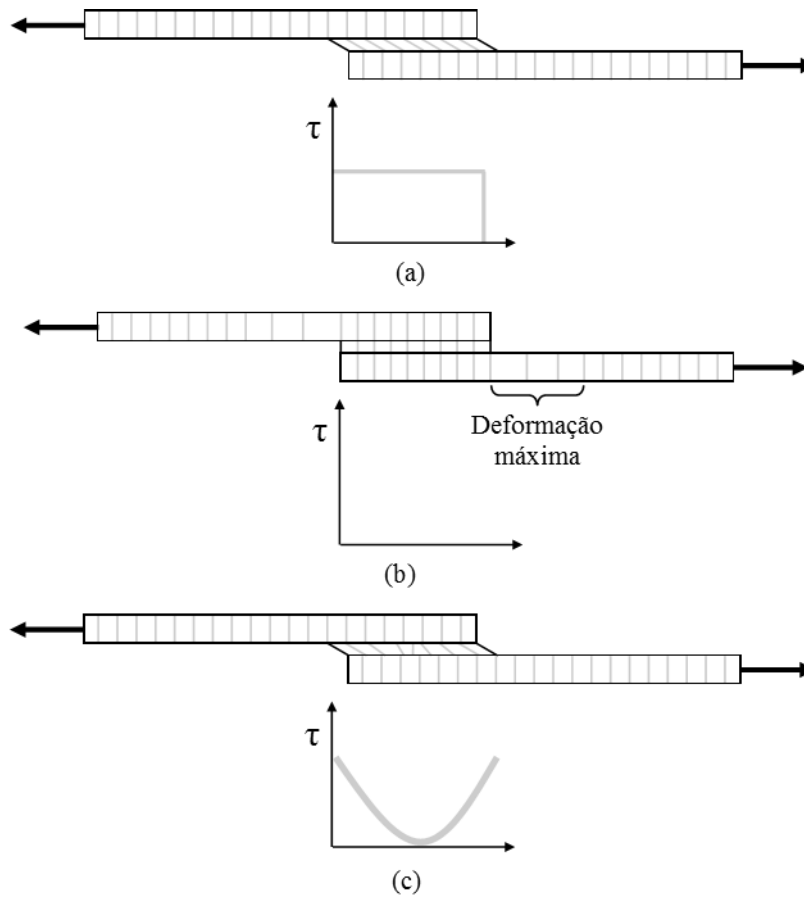


Figura 9. Esquema de idealização da tensão cisalhante no adesivo para (a) aderente rígido, (b) adesivo rígido, e (c) comportamento combinado

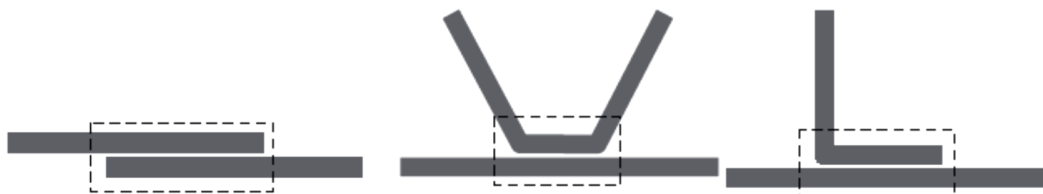


Figura 10. Aplicação generalizada do método de Bigwood e Crocombe (CROCOMBE; ASHCROFT, 2008)

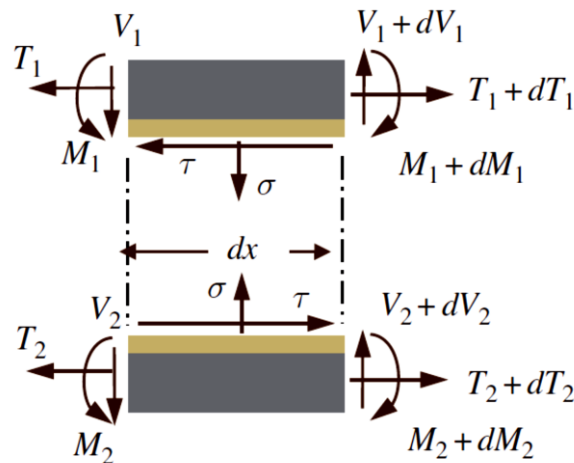


Figura 11. Cargas e tensões em um elemento de junta adesiva (DA SILVA; ÖCHSNER, 2008)

As equações de equilíbrio de força e momento para a junta podem então ser definidas como na equação (4).

$$\frac{dT_i}{dx} = \tau; \quad \frac{dV_i}{dx} = \sigma; \quad \frac{dM_i}{dx} - V_i + \tau \frac{t_i}{2} = 0 \quad (4)$$

Em que $i = 1$ ou 2 representa a parte superior e inferior da junta, respectivamente. Todos os demais termos estão definidos na Figura 11.

Os deslocamentos axial e transversal (u_i e v_i) podem ser expressos com relação à deformação da face do aderente e dos momentos, conforme a equação (5).

$$\frac{du_i}{dx} = \frac{(1 - \nu_i^2)}{E_i t_i} \left(P_i + \frac{M_i t_i^2}{2I_i} \right); \quad \frac{d^2 v_i}{dx^2} = - \frac{(1 - \nu_i^2) M_i}{E_i I_i} \quad (5)$$

Em que ν_i e I_i são, respectivamente, o coeficiente de Poisson e o momento de inércia de área do aderente i .

Finalmente as expressões das tensões transversal e de cisalhamento no adesivo podem ser definidas em relação às deformações do adesivo, ou ainda, pelos deslocamentos dos aderentes, como mostra a equação (6).

$$\tau = G\gamma = G \frac{(u_1 - u_2)}{\eta}; \quad \sigma = E\varepsilon = E \frac{(v_1 - v_2)}{\eta} \quad (6)$$

Em que η é a espessura do adesivo.

A equação (6) pode ser diferenciada tantas vezes quantas forem necessárias para a substituição na equação (5). Os resultados são expressões que podem ser novamente diferenciadas e substituídas na equação (4) para, então, chegar nas equações diferenciais que regem a distribuição de tensões na junta – equação (7).

$$\begin{aligned} \frac{d^7\tau}{dx^7} - K_1 \frac{d^5\tau}{dx^5} + K_3 \frac{d^3\tau}{dx^3} - K_5 \frac{d\tau}{dx} &= 0 \\ \frac{d^6\sigma}{dx^6} - K_1 \frac{d^4\sigma}{dx^4} + K_3 \frac{d^2\sigma}{dx^2} - K_5\sigma &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Essas expressões podem, agora, ser resolvidas com as condições de contorno apropriadas. Para casos gerais, como os mostrados na Figura 10, a solução analítica pode não ser encontrada pela complexidade da solução analítica. No entanto, a solução numérica é facilmente obtida com os recursos computacionais existentes. Já para o caso de juntas sobrepostas simples carregadas axialmente, as doze incógnitas de carregamento mostradas na Figura 11 são reduzidas às seis mostradas na Figura 12. A solução analítica dessa configuração foi obtida por Goland e Reissner e foi repassada e comentada por da Silva e Öchsner (2008).



Figura 12. Condições de contorno para juntas sobrepostas simples carregadas axialmente (DA SILVA; ÖCHSNER, 2008)

As equações a serem utilizadas no dimensionamento da junta podem então ser obtidas, conforme mostrado na Figura 13.

The diagram illustrates the simplified formulation of Bigwood and Crocombe for a three-layer adhesive joint. It shows three cases: tension (T), shear (V), and bending moment (M). Each case includes a schematic of the joint, a stress distribution diagram, and a corresponding equation.

For tension (T):

$$\tau_T = -\frac{\alpha_1 T}{2\sqrt{\alpha_1 + \alpha_2}}$$

For shear (V):

$$\sigma_V = -\frac{\sqrt{2}\beta_1 V}{(\beta_1 + \beta_2)^{0,75}}$$

$$\tau_V = \frac{3V}{4t_1}$$

For bending moment (M):

$$\sigma_M = -\frac{\beta_1 M}{\sqrt{\beta_1 + \beta_2}}$$

$$\tau_M = \frac{3\alpha_1 M}{t_1\sqrt{\alpha_1 + \alpha_2}}$$

Figura 13. Formulação simplificada de Bigwood e Crocombe. Adaptado de (BIGWOOD; CROCOMBE, 1989)

Na formulação simplificada de Bigwood e Crocombe (1989), α e β são os fatores de conformidade ao cisalhamento e à delaminação, respectivamente. Esses fatores são conforme a equação (8).

$$\alpha_i = G \frac{1 - \nu_i^2}{E_i t_i \eta}; \quad \beta_i = 12E \frac{1 - \nu_i^2}{E_i t_i^3 \eta} \quad (8)$$

No entanto, essas equações são válidas somente para aderentes idênticos, i.e., $t_1 = t_2 = t$. Por fim, as equações de projeto podem ser simplificadas, conforme as equações (9). Exemplos de programas para o cálculo dessas e de outras teorias analíticas foram publicados por van Ingen e Vlot (1993) e estão disponíveis no Anexo 1.

Outro modo de análise das tensões envolvidas em juntas adesivas e seu dimensionamento é por meio dos métodos numéricos. Equações diferenciais são obtidas de princípios físicos como conservação de massa, quantidade de movimento ou energia. Tais equações ditam o comportamento cinemático e mecânico de corpos em geral. Se o problema pode ser reduzido a uma equação(ões) simples e viável(is) de ser(em) resolvida(s) analiticamente, tem-se o caso visto anteriormente. No entanto, análises

complexas em juntas adesivas, e.g., com aderentes em compósito, deformação plástica dos adesivos e/ou escorrimento de excesso de adesivo para as bordas da sobreposição, levam a um conjunto de equações diferenciais de alta complexidade. Os métodos numéricos são capazes de realizar esses cálculos e viabilizam análises antes consideradas muito complexas. Tal tecnologia se tornou (e se torna cada vez mais) viável com o aumento da capacidade de processamento dos computadores (DA SILVA; CAMPILHO, 2012).

$$\begin{aligned}
 \sigma_V &= -V \left(\frac{\beta}{2}\right)^{0,25} & \tau_T &= -T \frac{\sqrt{\alpha/2}}{2} \\
 \sigma_M &= -M \left(\frac{\beta}{2}\right)^{0,5} & \tau_V &= \frac{3V}{4t} \\
 & & \tau_M &= M \frac{3\sqrt{\alpha/2}}{t}
 \end{aligned} \tag{9}$$

De acordo com da Silva e Campilho (2012), o método dos elementos finitos (MEF), dos elementos de contorno (MEC) e das diferenças finitas (MDF) são os principais métodos numéricos de solução de equações diferenciais parciais utilizados na ciência e nas engenharias. O MEF é, de longe, o mais utilizado nas análises de juntas coladas. Ele é baseado na ideia de se dividir um objeto com geometria complexa em vários blocos/partes de geometria simplificada. Para atingir esse objetivo, vários métodos de discretização foram, ao longo dos anos, propostos por matemáticos e engenheiros. Todos eles apresentam um resultado aproximado em que se espera que o erro em relação a solução analítica diminua com o aumento do número de elementos (ZIENKIEWICZ; TAYLOR, 2000). O primeiro a utilizar o termo “Elementos Finitos” foi Ray William Clough em 1960 e foi um dos criadores do método juntamente com Turner e seus colaboradores em 1956. Mas foi em 1967 que Zienkiewicz e Cheung descreveram um método generalizado para ser aplicado em qualquer campo de aplicação. E somente na década de 80 que começaram a surgir os primeiros softwares para aplicação geral do método que funcionavam em grandes e poucos computadores (DA SILVA; CAMPILHO, 2012).

Atualmente, o MEF é usado em praticamente todos os campos da engenharia, e.g., projeto e análise de estruturas, análise de escoamento de fluidos, distribuição de temperaturas, eletromagnetismo, projeto de equipamentos eletromecânicos (máquinas, transformadores, contadores), etc. Devido à utilidade e interesse para diversas áreas técnicas, o MEF é objeto de vários artigos e livros publicados nos últimos 30 anos, sendo também incluído como disciplina nos currículos de grande parte das instituições de ensino superior do Brasil. O desenvolvimento dos *softwares*, principalmente a interface com os usuários, viabiliza a disseminação da tecnologia para os profissionais das mais diversas áreas. No geral, todos adotam o mesmo fluxo de trabalho que consiste nas etapas descritas a seguir:

- Pré-processamento:
 - definição do problema e do domínio; e
 - discretização do domínio em elementos (geração da malha).
- Processamento: cálculos computacionais.
- Pós-processamento:
 - determinação de variáveis secundárias; e
 - apresentação dos resultados (visualização gráfica e obtenção de valores).

De forma simplificada, a etapa de processamento pode ser definida como a resolução do sistema de equações definido pela equação matricial (10).

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{F} \quad (10)$$

Em que $\boldsymbol{\delta}$ é um vetor com os valores do campo de variável nos nós dos elementos (dos deslocamentos, por exemplo), \mathbf{F} é um vetor de cargas conhecidas (e.g., força nos problemas de elasticidade) e \mathbf{K} é a matriz de constantes que representa a propriedade dos elementos que relaciona a carga à variável (nos problemas de elasticidade, \mathbf{K} é a matriz de rigidez). Com os valores de $\boldsymbol{\delta}$ e \mathbf{F} os valores de tensão e deformação podem ser calculados para toda a estrutura em análise (DA SILVA; CAMPILHO, 2012).

A matriz de rigidez \mathbf{K} da equação (10) apresenta integrais na sua formação que, normalmente, são impossíveis de serem resolvidas algebricamente. Para tanto, usa-se

um método de integração numérico, i.e., Quadratura de Gauss. Esse método usa uma certa quantidade de pontos e multiplica o valor neles encontrado por um fator de ponderação. Quanto maior for a quantidade desses pontos Gaussianos usados, menor será o erro do resultado encontrado. No entanto, usar muitos pontos Gaussianos aumenta a demanda de recursos computacionais e, dependendo do caso, pode não melhorar os resultados da simulação (DA SILVA; CAMPILHO, 2012).

De acordo com Ashcroft e Mubashar (2011), o MEF é usado com sucesso na análise de várias configurações de juntas adesivas sob condições de carregamento complexas e com resultados detalhados dos campos de tensão aos quais a junta é submetida. Porém, alguns são os desafios para se conseguir simular, de forma apropriada, juntas *single-lap*. Um deles é o tratamento das concentrações de tensão. Estas tendem a aparecer nas terminações das sobreposições e é necessário um refinamento da malha nessas regiões. A espessura da camada de adesivo é pequena comparada à espessura do aderente. Dessa maneira, a malha nessa região também deve ser refinada para uma boa análise da distribuição de tensões no interior da mesma. Há, ainda, na maioria das configurações de juntas, pontos de singularidade de tensão (e.g., arestas nos aderentes e adesivos). Nesses pontos, o refinamento da malha tende a aumentar indefinidamente seus valores de tensão. Os *softwares* comerciais atuais ajudam muito nessa tarefa, pois apresentam a capacidade de gerar malhas com regiões de transição entre regiões de malha refinada e grosseira, como exemplificado na Figura 14.

Para da Silva e Campilho (2012), além desses desafios, os *softwares* comerciais de elementos finitos são capazes de realizar trabalhos com domínios em duas ou três dimensões (2D e 3D, respectivamente). Apesar de efeitos como a deformação lateral e a curvatura anticlástica² só poderem ser observados em análises 3D, os resultados das simulações 2D de juntas sobrepostas simples já foram comprovados e aceitos pela comunidade científica. Elementos 2D isoparamétricos quadráticos (quadrilaterais ou triangulares) no estado plano de deformações (i.e., cuja largura é bem maior do que a espessura) são os mais usados nas simulações de juntas adesivas.

² Curvaturas anticlásticas são aquelas em que as duas curvaturas principais de uma superfície são côncavas em direções opostas.

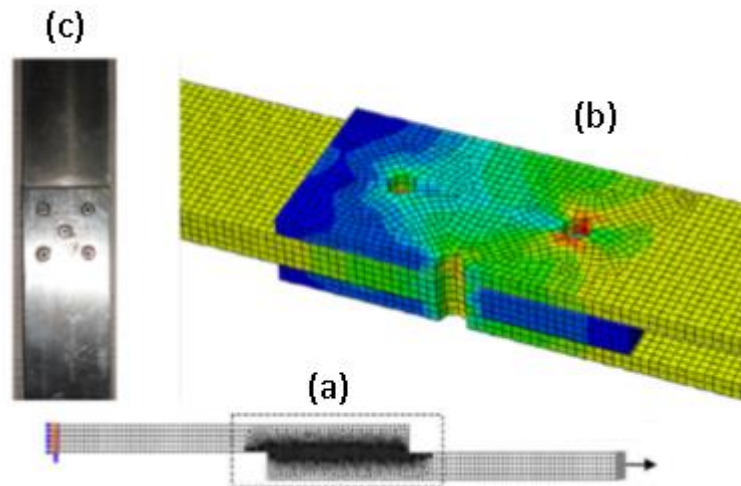


Figura 14. Exemplos de malhas de simulações (a) 2D e (b) 3D de (c) um corpo de prova experimental. Adaptado de (SILVA NETO, 2011)

Os adesivos, em sua maioria, apresentam comportamento plástico, i.e., modelos não lineares de propriedades do material devem ser utilizados nas simulações quando a análise for feita para o carregamento até a falha. Em alguns casos, o comportamento plástico do material do aderente também deve ser levado em consideração (ASHCROFT; MUBASHAR, 2011).

2.1.3.2. Mecanismos de falha de adesivos

Existem diferentes mecanismos pelos quais uma junta colada pode vir a falhar. Os dois mecanismos predominantes de falhas em juntas adesivamente unidas são a falha coesiva e a falha adesiva e, portanto, envolvem conceitos de adesão³ e coesão⁴. A falha adesiva é a falha interfacial entre o adesivo em um dos aderentes e tende a indicar a existência de uma interface adesivo/aderente fraca, frequentemente advinda de uma preparação imprópria. A falha coesiva, por sua vez, ocorre quando a fratura resulta numa camada de adesivo que permanece unida em ambas as superfícies dos aderentes, ou mais raramente, quando o aderente falha antes do adesivo, com a fratura totalmente contida no aderente. Este último mecanismo é conhecido como falha coesiva do aderente (BUENO, 2002).

³ Adesão é o estado no qual as duas superfícies de diferentes materiais são mantidas juntas por forças químicas e/ou físicas, de modo tal que é necessário fazer algum trabalho para separá-los.

⁴ Coesão é o estado no qual as partículas de uma única substância são mantidas juntas por forças químicas primárias ou secundárias.

No entanto, a ASTM International, por meio da norma D5573-99 (2005), estabelece sete tipos de falhas, sendo seis principais e uma que pode ser a combinação das outras, em juntas do tipo *single-lap*. Na Tabela 1, esses seis modos de falha são definidos e exemplificados.

Tabela 1. Modos de falha para materiais compósitos

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.	

2.1.3.3. Métodos e técnicas para aumentar a resistência de juntas sobrepostas simples

Dentre os fatores que afetam a resistência de juntas adesivas, deve-se levar em consideração as propriedades do adesivo e do aderente, fatores geométricos (i.e., espessuras do adesivo e do aderente além do tamanho da sobreposição) e tensões internas (e.g., tensões devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais). Como a distribuição de tensões no adesivo não é uniforme, os mecanismos de aumento da resistência de juntas adesivas dá-se pela redução dos picos de tensão gerados nas extremidades da sobreposição (DA SILVA, 2011). Em linhas gerais, isso é possível:

- com o uso de um adesivo de baixo módulo de elasticidade e comportamento dúctil;
- com o uso de aderentes iguais ou, quando não possível, pelo balanceamento de suas rigidezes;
- com a diminuição da espessura da camada de adesivo; e
- com o aumento da área de adesivamento.

Da Silva (2011) mostra que um chanfro fabricado pelo escorrimento do excesso de adesivo na região de sobreposição atua como um redutor da concentração de tensão provocada pelos cantos vivos da junta *single-lap* comum. Na verdade, há uma transferência de carga ao longo da área do chanfro que deixa mais uniforme a distribuição de tensão de cisalhamento. A redução nas tensões principais máximas podem chegar a 40% para filetes triangulares comparados às terminações perpendiculares das juntas sobrepostas comuns. Tal redução é maior para adesivos com baixo módulo de elasticidade e maior espessura. A resistência da junta pode aumentar em até 54% para juntas de alumínio com adesivo epóxi. Além disso, as regiões de concentração de tensão apresentam menores intensidades.

Lang e Mallick (1998) fizeram simulações para comparar diferentes geometrias de filete: triangular (parcial e completo), circular (parcial e completo), circular com filete secundário, oval e com arco circunferencial, como algumas ilustradas na Figura 15. O modelamento dos filetes com arcos circunferenciais apresenta melhores resultados, com redução dos picos em 60% e 87% para as tensões de cisalhamento e delaminação, respectivamente. Os filetes, no entanto, não são benéficos em todas as situações. Juntas com filetes tendem a apresentar maiores tensões devido a variações térmicas.

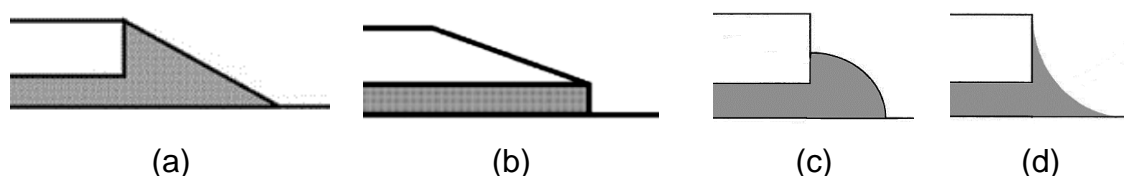


Figura 15. Exemplos de formas de aumento de resistência da junta *single-lap* por: (a) filete reto de adesivo; (b) chanfro externo do aderente; (c) filete convexo de adesivo; e (d) filete côncavo de adesivo

A geometria do aderente é outra fonte importante de soluções para aumento da resistência das juntas *single-lap*. Tanto o arredondamento quanto o chanfro da aresta interna eliminam/aliviam o ponto de concentração de tensão nessa região gerando resultados significativos. Adesivos com elevado módulo de elasticidade apresentam melhores resultados a esses métodos do que adesivos de baixo módulo. Para adesivos rígidos (i.e., de alto módulo), o aumento da resistência da junta chega a 40% para o primeiro caso e é proporcional ao raio de arredondamento. Já o efeito dos chanfros varia com o respectivo ângulo e posição (i.e., interna ou externamente à sobreposição) (DA SILVA, 2011).

Ávila e Bueno (2004) propuseram uma junta alinhada com uma geometria ondulada na região de sobreposição, a junta *wavy-lap*. Com isso, a carga suportada pela junta aumentou em 41%. Fessel et al. (2007) propuseram uma melhoria nos parâmetros de construção da junta *wavy-lap* que, por meio da análise de elementos finitos, teve os picos de tensão de delaminação e cisalhamento reduzidos em 4 e 2 vezes, respectivamente. Porém, a junta *wavy-lap* é muito difícil de ser fabricada. Haghpanah et al. (2014), em uma tentativa similar, modificaram a região de sobreposição pela usinagem de reentrâncias triangulares de sentidos opostos nas extremidades da junta. Os resultados mostram distribuições complexas de tensões na região do adesivo e do aderente sem, no entanto, aumento significativo de resistência da junta. Isso se dá, principalmente, pelo aumento do efeito de rotação da junta.

A utilização de componentes extras, além dos aderentes e adesivos em juntas *single-lap*, não é incomum. Também conhecidas como juntas híbridas, essas, além de coladas, podem ser parafusadas, rebitadas e até soldadas para aumentar as respectivas resistências (DA SILVA, 2011). No entanto, pontos de concentração de tensão são adicionados à junta e podem prejudicar o rendimento do aderente, especialmente se este for de material compósito. Turaga e Sun (2008) criaram um reforço diferente com a função de desviar o caminho do carregamento, mas mantendo a ideia de minimizar os picos de tensão. Este consiste em camadas de material compósito laminadas por cima das extremidades da região de sobreposição. O aumento da resistência da junta com essa técnica chega a 60%.

Pode-se perceber que o comportamento do material a ser unido tem influência direta na transferência de carga e, conseqüentemente, no comportamento geral da junta e

do adesivo. Os aderentes de materiais compósitos são especialmente susceptíveis a falhas por concentradores de tensão. Por isso, são igualmente beneficiados por junções coladas ao invés de parafusadas e/ou rebitadas. Nesse caso, faz-se necessário entender melhor esses materiais.

2.2. Compósitos

É importante que se tenha uma definição formal de materiais compósitos. Callister Jr. (2001) os definiu como quaisquer materiais multifásicos produzidos artificialmente que apresentam propriedades melhores do que aquelas apresentadas pelos constituintes separadamente. Uma das fases é um material descontínuo, mais rígido e resistente, denominado reforço. A fase contínua, com menores rigidez e resistência, recebe o nome de matriz. Às vezes, por causa de interações químicas e/ou efeitos de processamento, uma fase adicional aparece entre a matriz e o reforço. Basicamente, a matriz fornece proteção e suporte para os reforços e transfere os esforços locais de um reforço ao outro. Já a interface, embora menor em tamanho, desempenha um papel importante no controle dos mecanismos de falha, na resistência à fratura e no comportamento geral das tensões/deformações do material compósito (DANIEL; ISHAI, 1994). A matriz de um compósito pode ser polimérica, metálica, cerâmica e de carbono. No entanto, a primeira é considerada mais comum entre os compósitos avançados (KAW, 2006) e será enfatizada neste texto.

Quando projetados adequadamente, os compósitos podem exibir combinações de diferentes características mecânicas, como resistência, rigidez, resistência à fadiga, dureza, condutividade térmica e elétrica e baixa densidade (GAY; HOA; TSAI, 2003; JONES, 1999), que são difíceis de serem encontradas em materiais convencionais. As propriedades de um compósito dependem, portanto:

- Das características de cada um de seus constituintes, isto é, da geometria, da orientação, do comportamento mecânico e afinidades químicas, que afetarão a anisotropia do material (DANIEL; ISHAI, 1994; GAY; HOA; TSAI, 2003).
- Da proporção entre matriz e reforço existente no compósito. É usualmente medida com relação ao volume ou à massa dos constituintes e tem significativa importância para o projeto de estruturas e/ou componentes em compósito (DANIEL; ISHAI, 1994; MENDONÇA, 2005).

- Do processo de fabricação, pois a maneira como as fases estão distribuídas no compósito terá grande influência no comportamento do material. Quanto mais heterogênea for essa distribuição, maior a probabilidade de falha do material (CARVALHO, 2009; DANIEL; ISHAI, 1994).

Dentre as vantagens e desvantagens da utilização de um material compósito de matriz polimérica na fabricação de componentes e/ou estruturas, Mazumdar (2001), Gay et al. (2003) e Kaw (2006) destacam as que se seguem.

➤ Vantagens:

1. boa estabilidade química e excelente resistência à corrosão em atmosferas marítimas ou em meios aquosos com materiais orgânicos e materiais em suspensão;
2. resistência à fadiga;
3. flexibilidade de design e conseqüente redução de partes/componentes;
4. ótima capacidade de integração de partes;
5. capacidade de incorporar sensores para fabricar materiais “inteligentes”;
6. bom isolante acústico;
7. boas propriedades dinâmicas; e
8. baixo investimento em maquinário.

➤ Desvantagens:

1. alta absorção de umidade;
2. baixa estabilidade térmica;
3. alto custo de material e de mão-de-obra especializada;
4. processos de fabricação, em geral, de baixa escala;
5. média à baixa resistência ao impacto;
6. boa resistência ao fogo, mas a queima emite substâncias tóxicas; e
7. baixa reciclabilidade.

2.2.1. Classificação

Além da classificação devido ao tipo de matriz que constitui o compósito, diferentes tipos de reforços também auxiliam na classificação desses materiais. De acordo com Mendonça (2005), os compósitos de matriz polimérica podem ter duas classes, descritas a seguir:

- Os compósitos fibrosos são reforçados por fibras, que podem ser curtas ou longas e podem estar distribuídas aleatoriamente ou orientadas. Essas últimas podem ser unidirecionais, bidimensionais ou até multidimensionais formando, ou não, um tecido.
- Compósitos particulados são reforçados por partículas dispersas aleatoriamente na matriz com tamanhos e formas diversos.

Sabe-se que a rigidez e a resistência à tração de um material, quando em forma de fibra, são algumas ordens de grandeza maiores que os experimentados no mesmo material quando este está na forma monolítica. Apesar disso, as fibras geralmente não podem ser usadas sozinhas por apresentarem baixa resistência à compressão e a carregamentos cisalhantes (MENDONÇA, 2005). Nesse sentido, a resistência da fibra será tanto maior quanto maior for a relação entre comprimento/diâmetro da mesma. Os gráficos exibidos na Figura 16 comparam as principais propriedades de diferentes fibras⁵. O diâmetro das fibras também é importante pois, como regra geral, quanto menor o diâmetro, melhor será a adesão entre elas e a matriz, melhorando assim a compactação (maior relação volumétrica entre fibra e resina no laminado) e diminuindo o índice de porosidade. O compósito final terá, dessa maneira, uma maior resistência (NASSEH, 2007).

Os compósitos de fibras curtas são formados por pequenas fibras ou por whiskers dispersos de modo orientado ou aleatório na matriz. Ainda que consideradas curtas, estas fibras apresentam elevada relação comprimento/diâmetro e, quando dispersas de modo orientado, o material tende a ser transversalmente isotrópico ou ortotrópico; por outro lado, considerando-se a disposição aleatória, o material tende a ser quase isotrópico (BUENO, 2002). Tais compósitos podem ser fabricados em larga escala. Dentre os processos de fabricação para esse nível de produção, podem-se mencionar: moldagem por injeção e compressão, extrusão, pultrusão e *spray-up*. Com a produção em larga escala, os custos são reduzidos consideravelmente e seus produtos

⁵ As fibras de vidro do tipo E foram desenvolvidas originalmente para isolamento elétrico, sendo a menos resistente e mais econômica das fibras de vidro comerciais. As fibras de vidro do tipo S foram desenvolvidas para a indústria aeroespacial e possuem menor diâmetro e maior resistência mecânica. Kevlar® é uma marca registrada pela DuPont para a fibra sintética de aramida, sendo o Kevlar 49 um produto comercializado para fabricação de cabos e cordas que tem alto módulo de elasticidade.

conquistam mercados de maior volume de vendas, e.g., as indústrias automobilística e de eletroeletrônicos (MAZUMDAR, 2001).

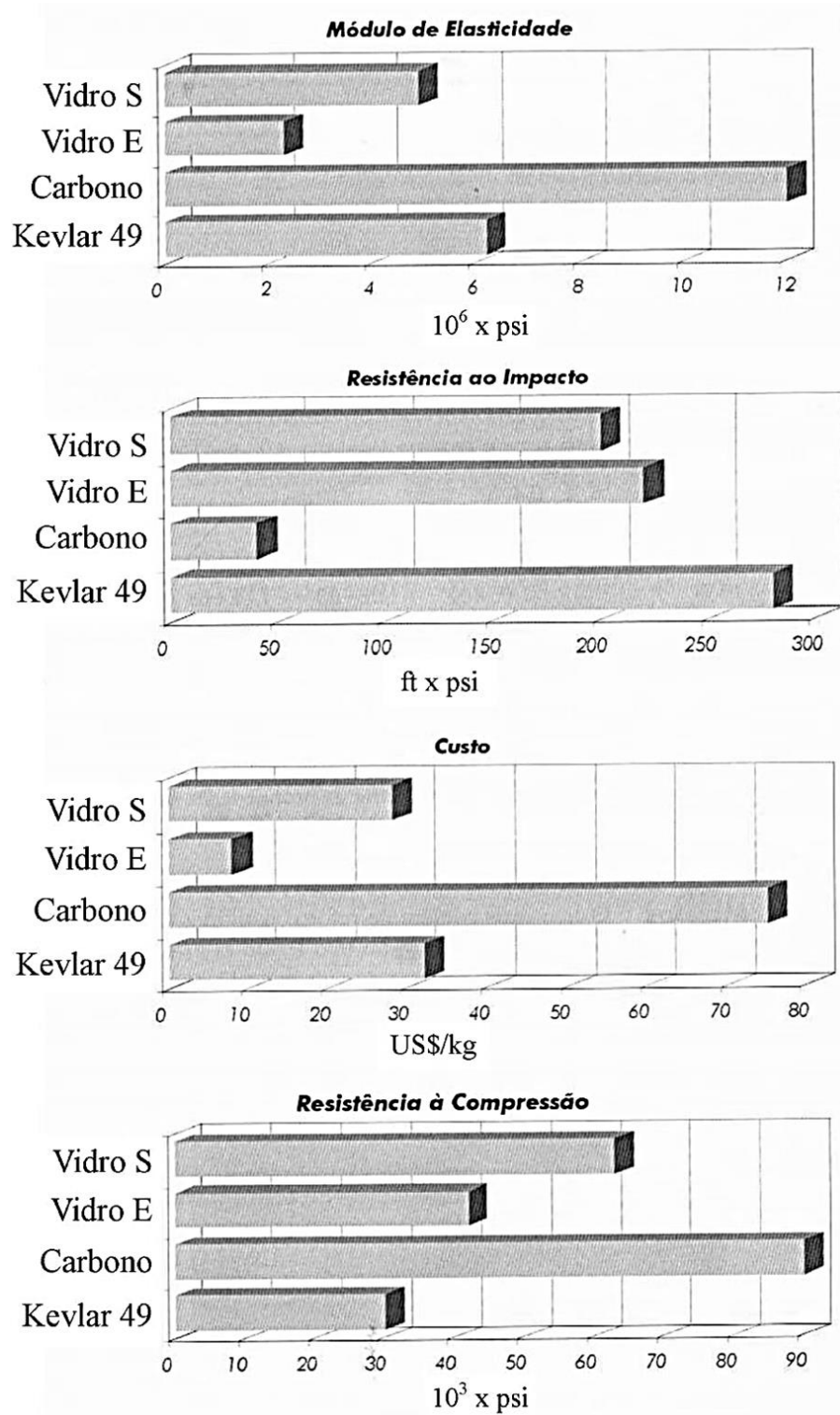


Figura 16. Comparação entre as principais propriedades de algumas fibras (NASSEH, 2000)

O comportamento dos compósitos de fibras longas sem direcionamento será similar ao de fibras curtas também aleatoriamente dispersas, mas com uma resistência um pouco maior. Em geral, essas fibras são de vidro e fornecidas em mantas emaranhadas (mostrada na Figura 17) e a fabricação do compósito é normalmente feita por laminação manual. A resistência deste está muito abaixo das dos compósitos com fibras orientadas, mas a grande vantagem do mesmo é o baixo custo (NASSEH, 2007). No gráfico mostrado na Figura 18, compara-se a resistência à tração de compósitos de diferentes configurações de fibras de reforço. As mechas de fibras mostradas na Figura 19 dão origem às demais formas. Elas são formadas por uma coleção de filamentos bobinados juntos de forma contínua e paralela ou levemente torcida, formando os fios. E além da fabricação das mantas e tecidos, as mechas são empregadas diretamente em produtos obtidos por bobinamento (*filament winding*) ou pultrusão. Os tecidos de fibras são mantas estruturadas similares às dos tecidos têxteis simples e são especificados pela razão peso/área. Tais tecidos são de fácil uso e manipulação, porém, sofrem de uma deficiência: apresentar baixa rigidez. Isso porque as ondulações nas mechas, durante a aplicação de uma carga axial, primeiro tendem a se “endireitar” antes de começar a suportar o carregamento. Tramas do tipo sarja buscam minimizar esse efeito bem como os tecidos que utilizam fios bem mais finos na transversal somente para manter as fibras unidas (MENDONÇA, 2005). A forma mais rígida possível é conseguida por mechas paralelas em uma só direção, mas esse formato só é conseguido com as fibras pré-impregnadas.



Figura 17. Manta de fibra de vidro (NASSEH, 2000)

Nos compósitos particulados, os reforços não apresentam dimensão predominante, como nas fibras, e, geralmente, a presença das partículas não é tão efetiva na melhoria da resistência do compósito. Partículas muito rígidas em matrizes frágeis causam concentradores de tensão no material reduzindo sua resistência. O uso destas visa o incremento de outras propriedades tais como condutividade ou isolamento térmico e elétrico, resistência ao desgaste superficial (aumento da dureza superficial), redução de atrito, redução de custos, dentre outras (MENDONÇA, 2005).

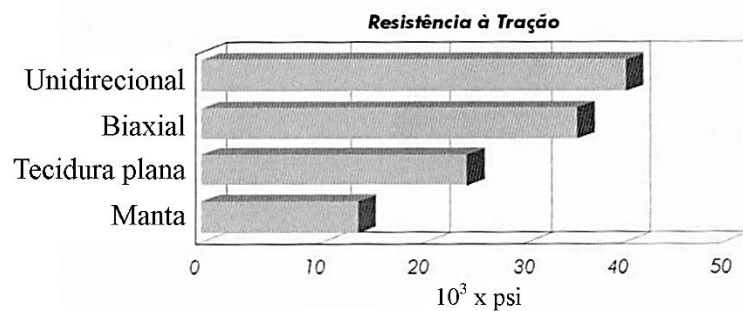


Figura 18. Comparação da resistência à tração de compósitos com diferentes configurações de fibras de reforço (NASSEH, 2000)

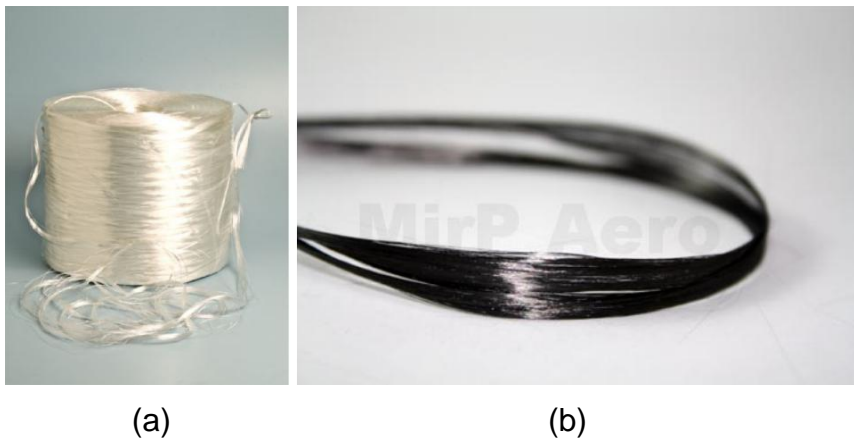


Figura 19. Mechas de fibra de (a) vidro e (b) carbono

Nesse ambiente, Kaw (2006) e Carvalho (2009) destacam a importância de um diferente tipo de compósito cuja matriz polimérica é reforçada por partículas nanométricas dispersas em seu meio: os nanocompósitos. A altíssima área superficial das nanopartículas faz com que a interação matriz/nanopartícula seja muito maior.

2.2.2. Nanocompósitos poliméricos

Nanocompósitos poliméricos são 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 (MAI; YU, 2006; VELMURUGAN; MOHAN, 2008). A combinação da matriz polimérica com tais reforços pode melhorar as propriedades mecânicas do material, tais como rigidez, resistência mecânica, resistência ao impacto e tenacidade, mantendo a processabilidade e baixa densidade da resina. Mas pode, também, permitir uma combinação de propriedades adicionais, como a redução do coeficiente de expansão térmica, melhoria da condutividade elétrica e a redução da permeabilidade a gases. Este fenômeno em que há combinação de propriedades é denominado multifuncionalidade (KOO, 2006).

Nanotubos de carbono (CNTs), agrupamentos de folhas de grafeno, nanocerâmicas, nanopartículas de prata, ouro e sílica coloidais estão entre as nanopartículas mais utilizadas na síntese de materiais nanoestruturados. Na Figura 20, são mostrados os diferentes tipos de estruturas que as nanopartículas podem apresentar e as suas respectivas áreas superficiais específicas. A redução da escala dos reforços, portanto, partindo de metros (tecidos), micrometros (diâmetro das fibras) e submicrometros (interface entre a matriz e a fibra) para nanometros (diâmetro das nanopartículas), é uma importante oportunidade de inovação nas áreas de desenvolvimento, processamento, caracterização e análise de uma nova geração de materiais compósitos (THOSTENSON et al., 2005) e está ilustrada na Figura 21.

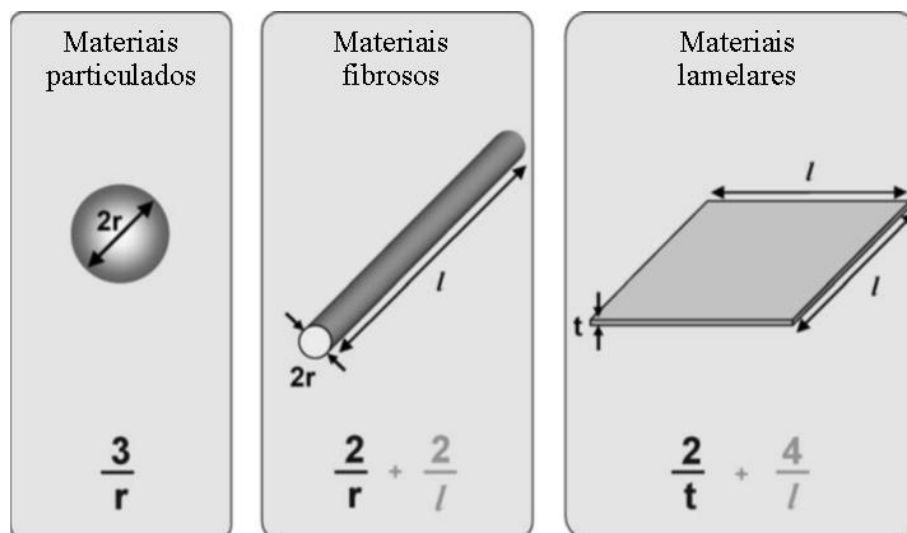


Figura 20. Tipos de nanopartículas e suas relações de área superficial/volume. Adaptado de (THOSTENSON; LI; CHOU, 2005)

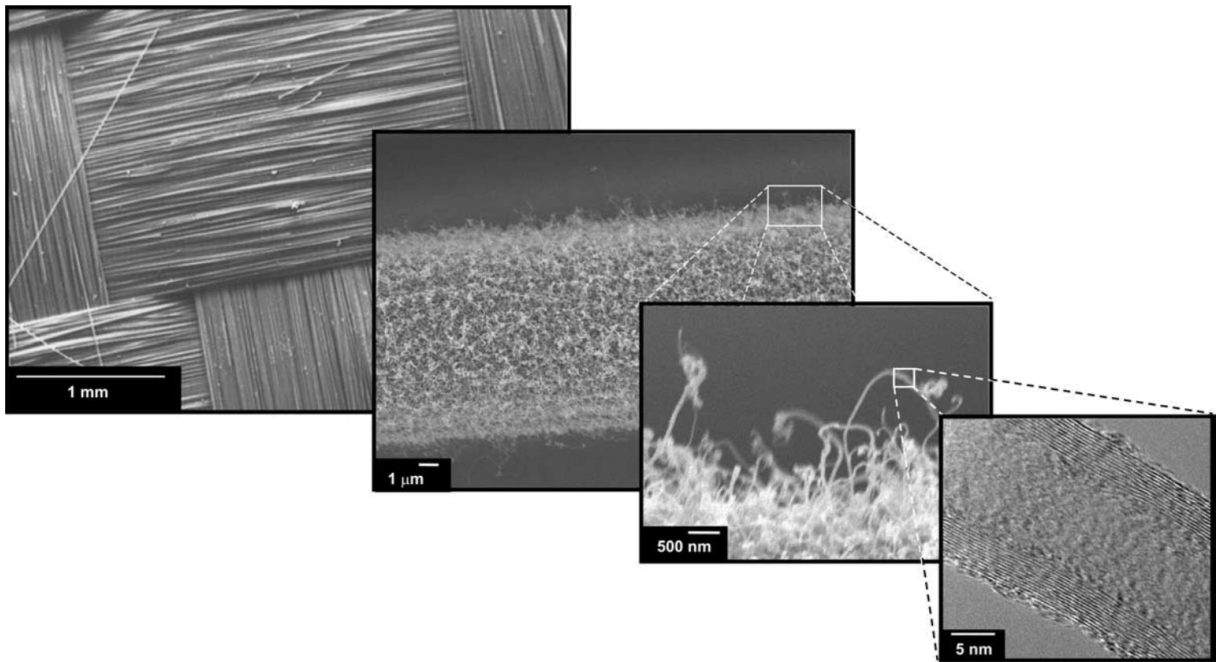


Figura 21. Níveis de análise dos reforços de milímetros a nanômetros: (da esquerda para a direita) tecido plano; uma única fibra com nanotubos de carbono crescidos na superfície; detalhe dos nanotubos; e a estrutura da parede de um nanotubo. Adaptado de (THOSTENSON; LI; CHOU, 2005)

As partículas fibrosas se apresentam como estruturas alongadas e os nanotubos de carbono são os principais representantes desta categoria. Para Ávila e Lacerda (2008) e Ávila et al. (2011), o nanotubo de carbono é considerado o material mais rígido conhecido pelo homem (veja essas estruturas na Figura 22). Além da rigidez, de aproximadamente 1,0 TPa, esse material, com diâmetro em torno de 1,0 nm e comprimento aproximado de 1 mm, exibe excelentes propriedades térmicas e elétricas. Outro modo de síntese de materiais nanoestruturados é por meio da dispersão de nanopartículas lamelares.

As nanopartículas lamelares são caracterizadas pela estrutura em forma de folha com espessura da ordem de 1 nm. As principais nanopartículas que formam essa classe são os silicatos lamelares e as nanofolhas de grafeno. Já os materiais particulados, e.g., a sílica, o ouro e a prata, são relativamente equiaxiais com dimensões na ordem dos 100 nm. O princípio básico da formação de nanocompósitos a partir de uma matriz polimérica e de nanopartículas lamelares, tais como o nanografite e a montmorilonita, é que as cadeias poliméricas podem entrar nas galerias entre as lâminas separando-as (MAI; YU, 2006). De acordo com a Figura 23, três configurações de dispersão podem ser obtidas: aglomerada, intercalada e esfoliada.

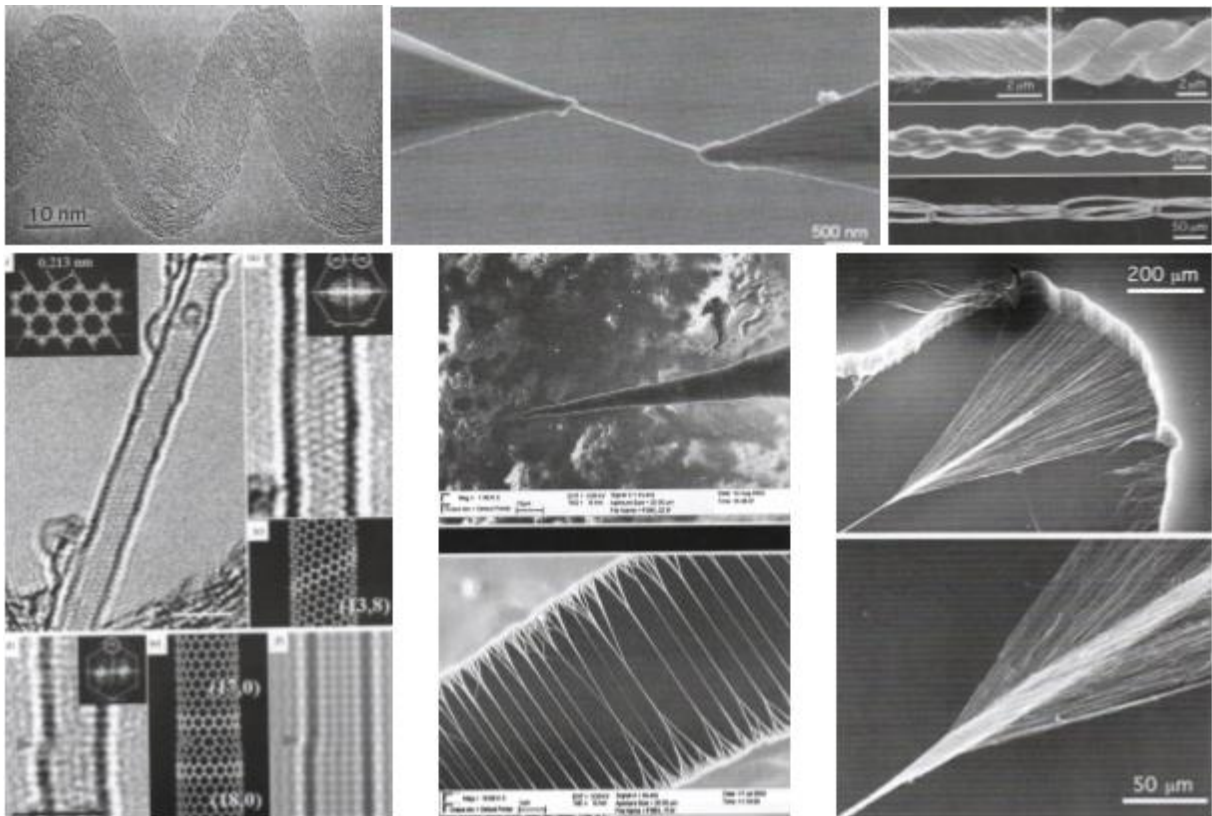


Figura 22. Imagens de microscopia eletrônica de nanotubos de carbono. Adaptado de (HARRIS, 2009)

Em geral, para uma mesma concentração de nanopartículas, os nanocompósitos com morfologia esfoliada exibem melhores propriedades que os compósitos com morfologia intercalada. Este fato se deve à interação individual das lâminas com a matriz, e a uma maior superfície específica, que estão diretamente relacionadas às propriedades mecânicas, térmicas e elétricas dos materiais (STANKOVICH *et al.*, 2007). Sem uma dispersão adequada das nanopartículas, o potencial destes materiais para formar uma elevada área de interface com o polímero diminui.

O uso de nanopartículas de base carbono, em especial os nanografites e grafenos, é cada vez mais frequente. As folhas de grafeno têm sido consideradas uma interessante opção aos nanotubos de carbono para produção de nanocompósitos com aplicações de engenharia (DEBELAK; LAFDI, 2007; KOTOV, 2006; LI, JING *et al.*, 2007; YASMIN; DANIEL, 2004; YASMIN; LUO; DANIEL, 2006). Isso porque o nanografite associa o baixo custo e a estrutura lamelar das nanocerâmicas às excelentes e já conhecidas propriedades mecânicas, estruturais, térmicas e elétricas do grafite

(KALAITZIDOU; FUKUSHIMA; DRZAL, 2007; STANKOVICH *et al.*, 2007). Quando totalmente dispersas, as lâminas nanométricas de grafite podem apresentar espessura de 1 nm, alta razão de aspecto, entre 200 e 1500, elevado módulo de elasticidade, de aproximadamente 1 TPa (STANKOVICH *et al.*, 2007), superfície específica superior a 2600 m²/g (VICULIS *et al.*, 2005) e condutividade elétrica de 104 S/cm (DEBELAK; LAFDI, 2007).

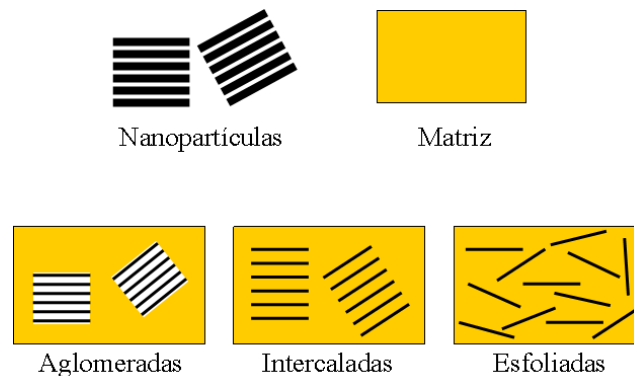


Figura 23. Configurações de dispersão das nanopartículas. Adaptado de (HUSSAIN, 2006)

Kalaitzidou *et al.* (2007) avaliaram os efeitos da adição de diferentes concentrações, em peso, de agrupamentos de folhas de grafeno nas propriedades mecânicas do polipropileno. Ainda, verificaram um aumento significativo da resistência à flexão, módulo de flexão e resistência ao impacto, quando comparado ao polipropileno puro. O aumento substancial da rigidez do nanocompósito foi relacionado não só à rigidez do nanografite, como também a uma dispersão homogênea das nanopartículas no polímero e a uma boa interação entre a matriz e o reforço. Outra característica importante das nanoestruturas de grafeno formadas durante o processo de dispersão em matrizes poliméricas é a melhoria da estabilidade térmica. Ávila *et al.* (2010) demonstraram que a adição de nanofolhas de grafeno em laminados de fibra de carbono fez com que houvesse uma melhoria na capacidade de resistência a chama destes laminados. Mais ainda, a resistência a flexão residual de laminados de fibra de carbono, nos quais agrupamentos de nanofolhas de grafeno foram dispersas, apresentou melhoria significativa quando comparada com aquela de laminados sem a presença do grafeno. Finalmente, a resistência ao impacto de baixa velocidade foi, também, significativamente aumentada com a presença de pequena quantidade de nanopartículas (ÁVILA; CARVALHO; *et al.*, 2010).

No entanto, a esfoliação do nanografite em lâminas de grafeno não é facilmente obtida devido à forte interação entre os átomos de carbono que formam essas lâminas. A maioria dos estudos relata a formação de estruturas intercaladas, ou seja, as nanolâminas de grafite, unidas por ligações de van der Waals, e separadas em unidades menores, com cerca de 30 nm de espessura. Em cada uma dessas unidades, entretanto, centenas de finas lâminas de grafeno se mantêm unidas (CHEN *et al.*, 2003; STANKOVICH *et al.*, 2007; WEI *et al.*, 2009; YASMIN; LUO; DANIEL, 2006). Uma ideia para se buscar uma melhor dispersão é utilizar matrizes poliméricas de menor viscosidade para facilitar o processo de mistura (SILVA NETO, 2011).

Desde o descobrimento em 1991, por Iijima (1991), os nanotubos de carbono têm sido a grande promessa de desenvolvimento de materiais multifuncionais que se adequem às mais diversas utilizações. Melhorias das propriedades térmicas e elétricas de materiais compósitos com o reforço dessas nanopartículas já foram e são investigadas e relatadas na literatura (ZARE, 2015). As propriedades mecânicas dos CNTs possibilitam a melhoria de matrizes poliméricas, uma vez que estes apresentam relação entre resistência na direção axial e peso 4 vezes maior que das fibras de carbono e com deformação máxima superior a 10%. A presença dos CNTs, mesmo em pequenas quantidades (1% em peso da matriz polimérica), possibilita o aumento da rigidez em até 42% e da tensão de ruptura em torno de 25% (PEREIRA, 2013). Qian *et al.* (2000) obtiveram bons resultados ao alinhar nanotubos de carbono em uma posição perpendicular ao plano de propagação de uma trinca, melhorando a resistência à fratura desses materiais.

Usando compósitos à base de epóxi com diferentes quantidades e tipos de CNTs, Gojny *et al.* (2005) reportou um aumento de aproximadamente 15% nos valores de módulo de elasticidade, de 8% na resistência à tração e de 43% na resistência à fratura de compósitos epóxi com 0,5% em peso de CNTs, quando comparados aos de epóxi puro. Um resultado muito semelhante foi apresentado por Fiedler *et al.* (2006), que reportaram um aumento de 45% para a resistência a fratura com a adição de 0,3% de CNTs de parede dupla. No entanto, a variação desta propriedade com o aumento da concentração de 0,3 para 0,5% foi irrisória.

Pereira (2013) sintetizou a faixa de valores medidos disponíveis na literatura para as propriedades mecânicas dos nanotubos de carbono, conforme listado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas de CNTs. Adaptado de (PEREIRA, 2013)

Propriedade	Faixa de valores	Valor mais usado
t [nm]	0,066 – 0,69	0,34
E [TPa]	0,27 – 5,50	1,00
G [TPa]	0,20 – 0,50	0,50
ν	0,12 – 0,28	---
σ_{rup} [GPa]	11 – 300	$11 < \sigma_{rup} < 63$
ε [mm/mm]	0,12 – 0,30	$\varepsilon > 0,10$

A elevada rigidez dos nanotubos de carbono, apesar de ser interessante do ponto de vista mecânico, torna-se um entrave na sua aplicação em nanocompósitos. Quando estes são submetidos a esforços mecânicos, a diferença de rigidez entre matriz e reforço leva a elevadas tensões entre as superfícies dos materiais constituintes do compósito. Isso pode levar ao rompimento entre os CNTs e a matriz polimérica, seja por falha na adesão ou rompimento dos próprios nanotubos (ZHU *et al.*, 2007), como mostrado na Figura 24. Modelos dessa adesão são buscados para que seja possível prever o comportamento final dos nanocompósitos CNT/matriz polimérica (ZARE; GARMABI, 2014; ZARE, 2014; ZARE *et al.*, 2014). E, por ter elevada razão de aspecto, os CNTs estão sujeitos à flambagem quando carregados à compressão. Tal comportamento é especialmente prejudicial aos nanocompósitos com nanotubos de carbono alinhados (STEIN; WARDLE, 2016).

As juntas coladas são uma tendência nos projetos e fabricações de estruturas e máquinas. Os novos materiais desenvolvidos para otimizar os recursos utilizados pelo homem demandam formas igualmente inovadoras para fazer as uniões cada vez mais eficientes. O aumento dessa eficiência passa pelo desenvolvimento dos aderentes de compósitos, de novos projetos de juntas e de novos adesivos. Na verdade, esses novos adesivos vêm acompanhados das pequenas estruturas que apresentam o maior potencial científico da atualidade, as nanopartículas. Embora juntas coladas reforçadas com nanoestruturas proporcionem grandes vantagens, as principais dificuldades encontradas são a determinação das características mecânicas destas juntas, a confiabilidade e reprodutibilidade das mesmas (ASCIONE, 2016; GÜLTEKIN *et al.*, 2016). E, para se conseguir uma abordagem adequada dos problemas encontrados no de-

envolvimento dessas tecnologias, processos modernos também precisam ser desenvolvidos e utilizados. É o caso da nanoindentação e das simulações numéricas por elementos finitos. No entanto, qualquer abordagem que não preserve as condições finais de utilização das juntas levam um estudo tecnológico à inutilidade.

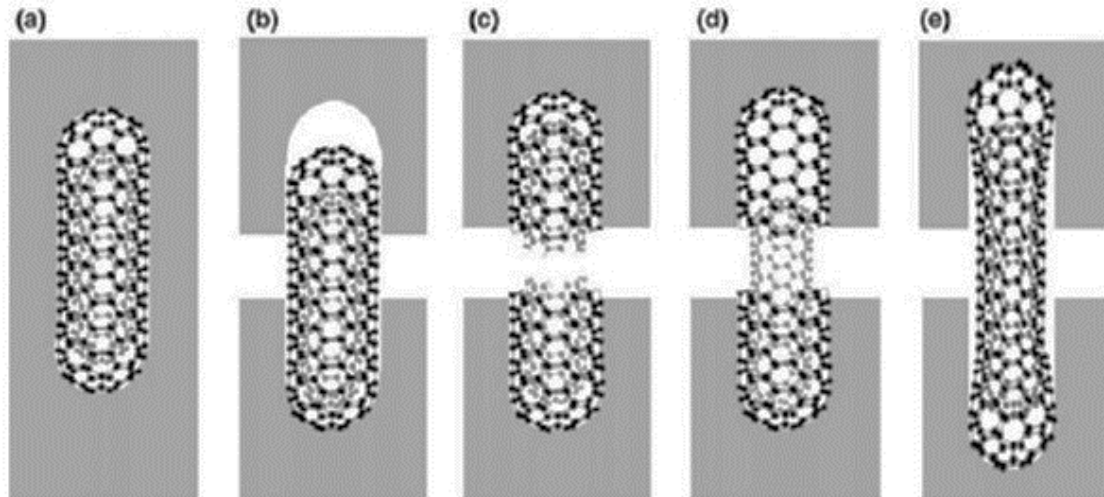


Figura 24. Tipos de falha de nanocompósitos de matriz polimérica e CNTs, sendo (a) o nanotubo intacto na matriz; (b) falha na adesão entre matriz e CNT; (c) colapso do CNT; (d) ruptura do CNT externo e (e) falha na adesão da parte cilíndrica do CNT (DANIEL; FENNER, 2011)

3. Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho segue a seguinte linha: fabricação do adesivo nanomodificado AR300G e respectiva caracterização via Nanoindentação, fabricação das juntas SLJ e ensaio mecânico destas, classificação e quantificação dos modos de falha existentes e simulação numérica dos estados de tensão no adesivo para os ensaios realizados. A mesma linha se repete para o estudo do efeito da exposição de juntas *single-lap* à radiação ultravioleta, porém, nesse caso, uma análise por espectroscopia em infravermelho por transformada de Fourier é adicionada para se analisar o efeito da radiação UV nos adesivos. De modo geral, pode-se representar as rotinas de trabalho de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 25. Por fim, é sugerida uma solução de aumento de resistência da junta levando em conta as aplicações estudadas. A seguir estão descritas em detalhes cada uma dessas etapas.

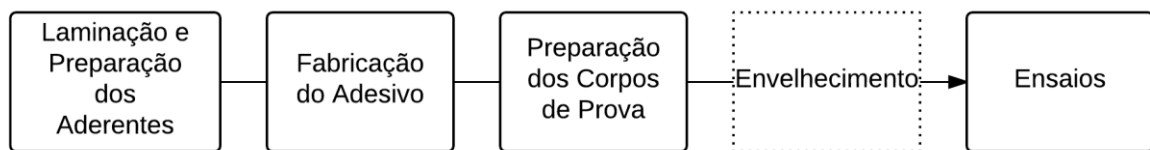


Figura 25. Fluxograma das rotinas de trabalho

3.1. Fabricação do adesivo nanomodificado AR 300G

O sistema epóxi utilizado como adesivo e matriz do nanocompósito é feito de polímero de epícloridrina e bisfenol-A com éter de alquil glicidil (C12 – C14). Fornecido pela empresa Barracuda, tem o nome comercial de AR 300. O endurecedor, à base de amina, é a mistura de 90% de AH 30 com 10% de AH 150, de modo a se obter um tempo de gel de 60 minutos à 25 °C. As duas partes são misturadas na proporção 100:33 e a viscosidade da mistura varia de 0,8 a 0,9 Pa · s. Os adesivos são fabricados a partir do sistema epóxi de laminação de baixa viscosidade (AR300). E nestes são misturadas as partículas com grafeno. Dessa maneira, os adesivos nanomodificados são denominados AR300G, de forma genérica, ou seguidos da indicação da proporção em peso de partícula adicionada, por exemplo, AR300G1 para a adição de 1% em peso de grafeno.

O grafite expandido processado para compor o reforço nanométrico foi fornecido pela Nacional Grafite Ltda. E balanças eletrônicas da marca Ohaus, linha Adventurer, foram utilizadas para a pesagem das resinas e partículas nas proporções desejadas. O grafite é primeiro misturado com a resina, manual e lentamente, para que algumas partículas não sejam projetadas ao ar. Em seguida, são misturados em misturador de alto cisalhamento, marca Ultra-Turrax® do fabricante IKA Works Inc., à 20.000 rpm por uma hora. Do misturador, resina e partículas seguem para o disruptor celular ultrassônico, do fabricante Unique, por mais uma hora em potência máxima. As concentrações de partículas, definidas em estudos anteriores do grupo de pesquisa do Laboratório de Mecânica de Nanocompósitos da UFMG, são 1% e 2% em peso. Os corpos de prova (CPs) de controle são feitos sem as nanopartículas e sem o processo de mistura.

Esse processo de mistura aquece a resina, sendo necessário o resfriamento contínuo por um sistema de recirculação de água. Se, ainda assim, a mistura sair do processo acima da temperatura ambiente o resfriamento desta se faz necessário antes da adição do endurecedor. Esse último é adicionado na proporção indicada pelo fornecedor do sistema epóxi e uma mistura manual é feita até se obter um líquido homogêneo. O processo de cura é realizado a 80 °C por 4 horas em estufa. Um posterior resfriamento lento é feito por 24 horas até a temperatura ambiente.

3.2. Caracterização via Nanoindentação

Para a fabricação de amostras para nanoindentação, o adesivo é espalhado sobre uma superfície plana de um material que possibilite posterior remoção do mesmo. O espalhamento é feito de forma a se obter uma camada fina e homogênea de adesivo. Os CPs podem então ser cortados em dimensões adequadas para o ensaio.

A nanoindentação é realizada por um nanoindentador, que é um acessório do Microscópio de Força Atômica (AFM) do Centro de Microscopia da UFMG. A constante de rigidez do nanoindentador foi calibrada pelo fabricante, a *Asylum Research* da *Oxford Instruments*. A calibração do sensor InvOLS (*Inverted Optical Lever Sensitivity*) é feita para converter o sinal do fotodiodo em medida de comprimento. Ela é feita por meio do levantamento da curva de força em um contato muito rígido. Ou seja, uma esfera de safira é pressionada sobre uma base plana de mesmo material e a diferença de

potencial lida pode ser considerada igual ao deslocamento do sensor no eixo do movimento. Feita a calibração, a ponta de safira é trocada pela ponta Berkovich de diamante e cola-se a amostra a ser ensaiada. A indentação é realizada com uma velocidade de penetração e retorno de 20 nm/s até uma profundidade de até 300 nm . Um único carregamento é realizado com retorno completo para cada indentação. Para cada amostra, são feitas 36 indentações em diferentes pontos da superfície.

Por fim, com as curvas de carregamento e descarregamento, são calculados os valores de dureza e rigidez de cada indentação. Média e desvio padrão dos resultados também são calculados para compor o resultado final e respectivas análises.

3.3. Laminação de compósitos de tecidos planos de fibra: fabricação do aderente

Para a fabricação dos corpos de prova (CPs) dos ensaios de juntas *single-lap* e *double cantilever beam* (DCB), é necessária a confecção de placas de compósito de matriz epóxi reforçadas com tecidos planos de fibra de vidro ou de fibra de carbono. Tais placas são feitas pelo processo de laminação manual.

Para a confecção dos aderentes de fibra de vidro, é adotada uma relação de 65% de fibra e 35% de resina-endurecedor. Sobre uma mesa com tampo de vidro, espalha-se uma camada de cera líquida de modo a preencher qualquer eventual imperfeição da superfície e diminuir a aderência entre a resina e o vidro. Coloca-se uma tira de tecido de poliéster visando a criação de uma superfície áspera no laminado, garantindo assim uma boa colagem dos CPs. Sobre esta tira, espalha-se, com a ajuda de uma espátula de plástico, uma camada uniforme de mistura epóxi. Posiciona-se uma camada da fibra de vidro sobre a camada de poliéster e esta é compactada com um rolo metálico para retirada de bolhas. Novamente, uma quantidade de resina é depositada e espalhada uniformemente e, da mesma maneira, o restante das 16 camadas é empilhado. Após a última camada da fibra de vidro ser impregnada com resina, uma nova camada de tecido poliéster é colocada e também tem as bolhas retiradas. A cura e pós cura são realizadas como citado anteriormente. Essa placa laminada de comprimento 368 mm e largura 315 mm é cortada e lixada para a obtenção das dimensões finais dos aderentes dos CPs.

O procedimento de laminação manual dos compósitos de fibra de carbono é similar ao de fibra de vidro, porém, a fração volumétrica das fibras é de 50% e foram necessárias apenas 10 camadas para se obter a espessura de 2,6 mm. Para obter as dimensões finais, os CPs são usinados em uma fresadora manual com fresa de três cortes, diâmetro 50 mm, velocidade de rotação 3400 rpm e avanço 200 mm/min. Assim, consegue-se um melhor acabamento e controle dimensional.

3.4. Caracterização da resistência via ensaio de juntas *Single-lap* com o AR300G

Os ensaios de juntas *single-lap* seguem os parâmetros estabelecidos na norma ASTM D5868 (2008a), com a exceção da espessura do adesivo, que é da ordem de 0,2 mm. Isso pois, por ser de muito baixa viscosidade, o adesivo tende a sair da região de sobreposição e gerar bolhas internas quando com espessuras na faixa de 0,76 mm, sugerida na referida norma. Os CPs, com dimensões definidas na Figura 26, antes de serem colados, são limpos com acetona, principalmente na região de sobreposição, para garantir uma boa adesão. Eles são colados com o auxílio do dispositivo mostrado na Figura 27. Tal aparato foi construído no Laboratório de Mecânica de Nanocompósitos da UFMG e garante o alinhamento, o comprimento de sobreposição e a pressão uniforme da região colada. O procedimento de cura é o mesmo definido anteriormente, sendo que todo o dispositivo e CPs passam pelo aquecimento e resfriamento previstos.

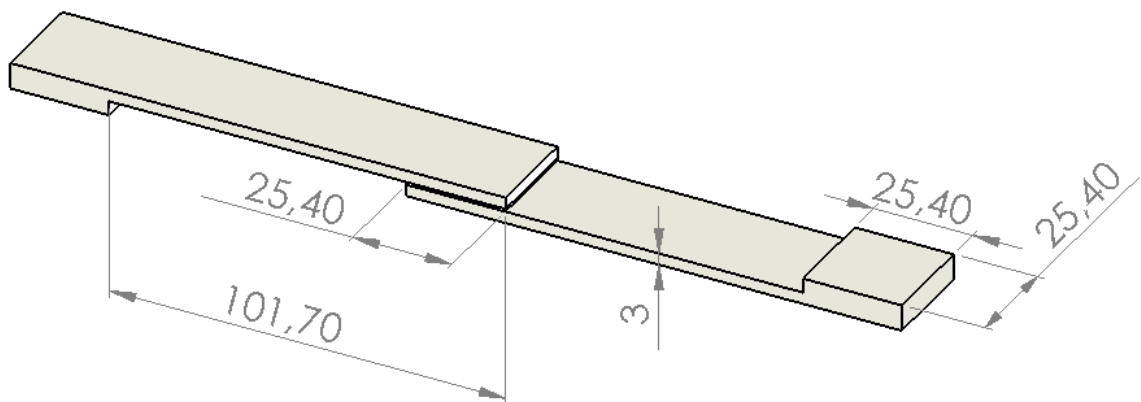


Figura 26. Dimensões do corpo de prova em milímetros

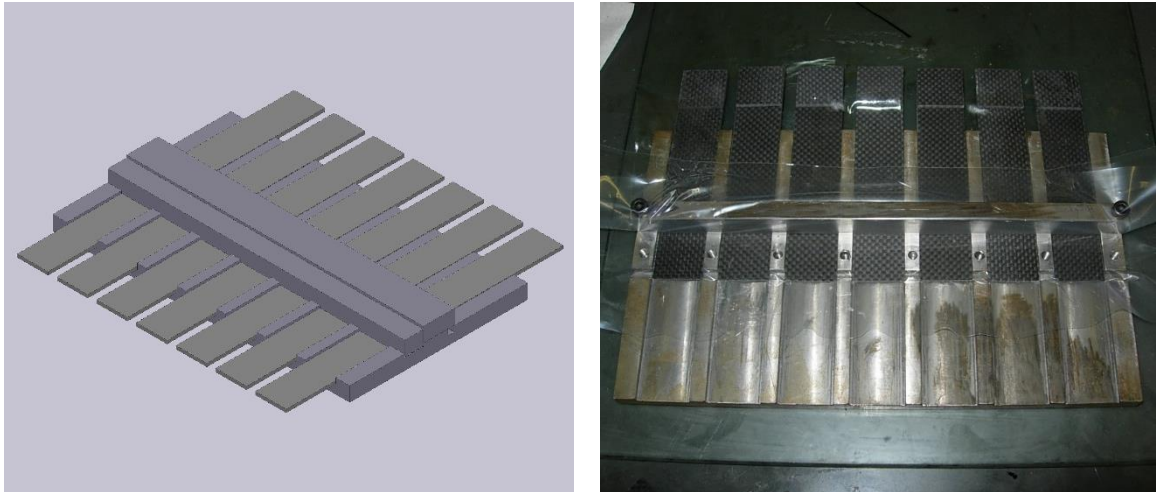


Figura 27. Dispositivo em aço para fabricação de juntas sobrepostas simples

Depois de colados e retirados do dispositivo, os corpos de prova são trabalhados para se retirar todo o excesso de adesivo que, porventura, tenha escorrido para as laterais. Os *tabs* de alinhamento (pequenos pedaços da mesma placa que originou os aderentes dos CPs) são colados nas extremidades opostas com adesivo de secagem rápida do tipo cianoacrilato. Assim, realiza-se as medições necessárias nos CPs e faz-se a montagem adequada e cuidadosa na máquina de ensaios universal, modelo EMIC DL-10000, com capacidade máxima de carga de até 100 *kN*. Os ensaios são conduzidos à uma velocidade constante do deslocamento do cabeçote de 13 *mm/min* até a ruptura da junta. As forças são medidas por uma célula de carga de 10000 *kgf* e o deslocamento medido pelo transdutor interno do equipamento.

3.5. Caracterização da resistência à fratura via ensaio DCB

O ensaio de fratura Double Cantilever Beam (DCB) é realizado com os aderentes de compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro e fibra de carbono. Os mesmos são cortados em placas de aproximadamente 120 *mm* x 260 *mm*, que são coladas em uma das faces do aderente. Antes do procedimento de colagem, no entanto, tais superfícies são limpas e são adicionadas fitas de teflon autoaderente nas extremidades de menor largura, como demonstrado na Figura 28 (a). Essas fitas, por não serem coladas pelo adesivo, funcionam como inserto para criação da trinca inicial. Elas garantem ainda um espaçamento igual entre as superfícies coladas das placas de compósito de maneira a buscar uma uniformidade da camada de adesivo. Após a realização do processo de cura do adesivo, as placas são cortadas por uma serra de fita

horizontal em dimensões próximas às finais, mostradas na Figura 28 (b). Em conjunto, então, os 8 (oito) CPs serão fresados para garantir a largura adequada bem como o paralelismo das laterais. Com o auxílio de um adesivo de cianoacrilato, os blocos de aplicação de carga são colados na extremidade em que estão os insertos. O corpo de prova é montado na máquina de ensaios universal com o auxílio de um dispositivo fabricado para mover os blocos por pinos passantes. A montagem final é mostrada na Figura 29. Na lateral do corpo de prova, é aplicada uma fina camada de corretivo líquido à base de água para auxiliar a visualização da trinca. Um microscópio óptico digital também é usado para o mesmo auxílio. São coladas escalas nas laterais dos corpos de prova ou feitas marcas para acompanhar o crescimento da trinca em diferentes comprimentos. Nesses instantes, o deslocamento do cabeçote da máquina é registrado para o posterior procedimento dos cálculos. Antes do ensaio, uma pré trinca é formada pela própria máquina à uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 1 mm/min . Quando essa atinge 5 mm , as garras retornam e verifica-se se há simetria entre as trincas observadas nas laterais do corpo de prova. Se não há diferença de mais de 2 mm entre as pontas das trincas, o ensaio pode prosseguir à mesma taxa de 1 mm/min .

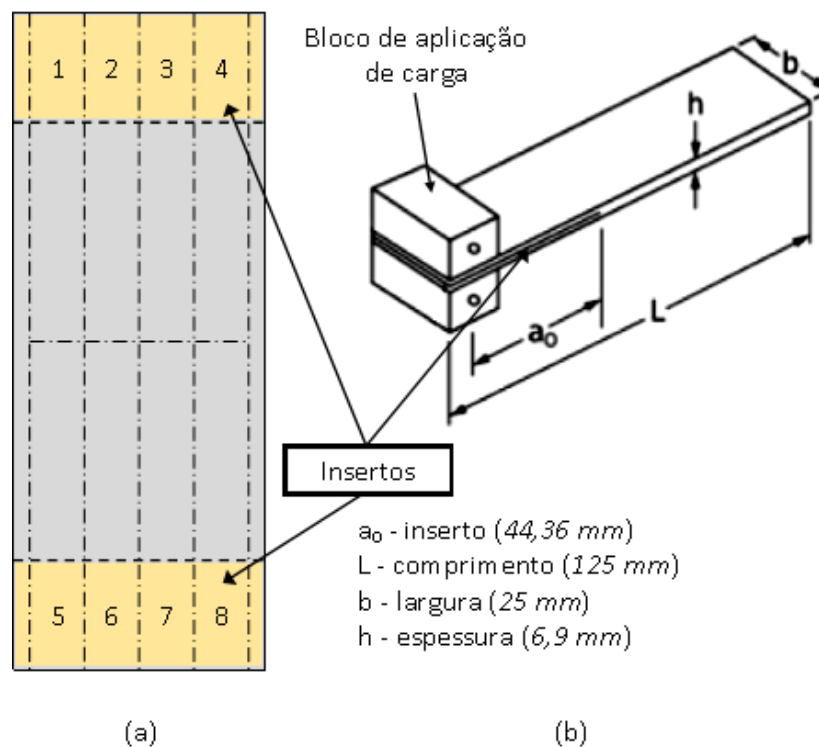


Figura 28. Esquema de fabricação dos CPs DCB: (a) Plano de colagem e corte; (b) Esquema de CP pronto com dimensões



Figura 29. Montagem de um CP de ensaio DCB e, em detalhe, o dispositivo fabricado

3.6. Quantificação das áreas por tipo de falha via ImageJ

As regiões de falha das juntas *single-lap* são fotografadas e suas imagens digitais (fratografias) são usadas para a quantificação da proporção da área classificada com um determinado tipo de dano em relação à área total colada. Para tanto, é usado um *software* aberto e livre de processamento de imagens, o ImageJ. As regiões com tipos de falha classificadas na fratografia do CP, seja por análise macro ou microscópica, são delimitadas pelo usuário por marcações de pontos na imagem. Dessa maneira, o sistema conta a quantidade de pixels presentes nas delimitações e, assim, consegue-se a relação de área definida anteriormente, como está exemplificado na Figura 30. Caso seja necessário, tendo um comprimento conhecido na imagem em análise, é possível transformar essas contagens de pixels em medições das áreas delimitadas.

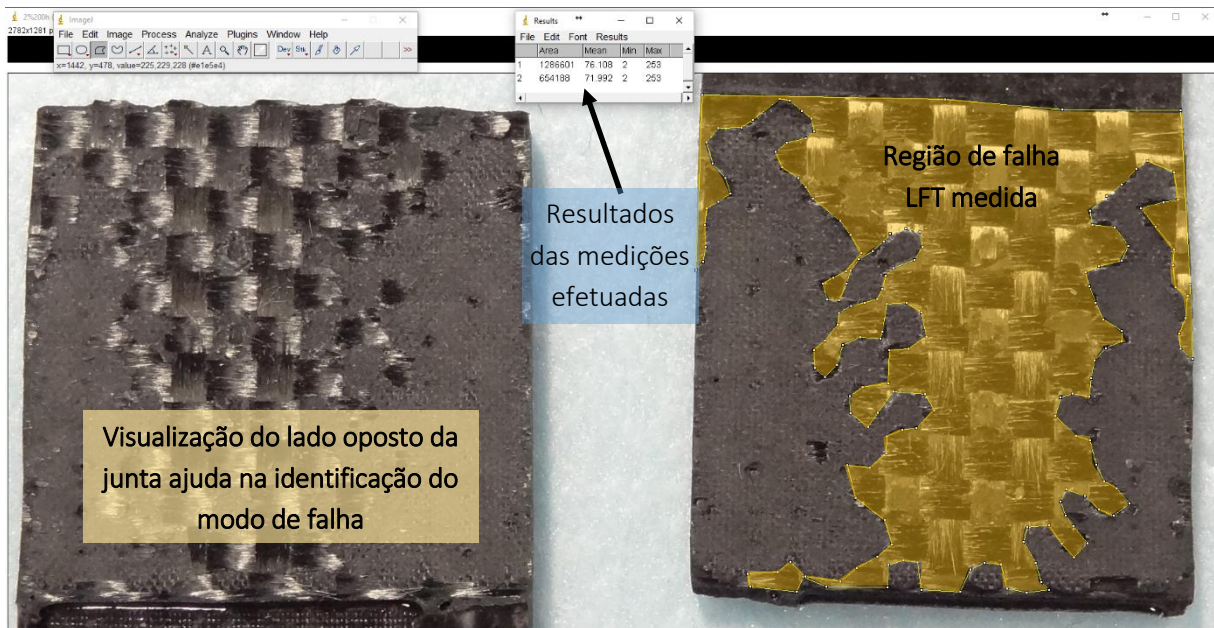


Figura 30. Tela de trabalho do software ImageJ com a identificação ferramentas utilizadas

3.7. Simulações numéricas dos ensaios de juntas *Single-lap*

As simulações são feitas baseadas nas características experimentais e recursos disponíveis no Laboratório de Mecânica de Materiais Nanoestruturados da UFMG. O mesmo dispõe de um dispositivo para fabricação de corpos de prova (CP) de juntas adesivas do tipo *single-lap*, como mostrado na Figura 27. As dimensões dos CPs feitos nesse dispositivo estão especificadas na Figura 26 e são aquelas utilizadas nas simulações. É importante salientar que o dispositivo permite variar a espessura da camada de adesivo. Nas simulações, uma camada uniforme de 0,1 mm foi utilizada.

As simulações são feitas no software comercial ANSYS® em duas dimensões (2D). Os elementos utilizados (PLANE82) são sólidos estruturais planos de segunda ordem. Em sua maioria, são quadriláterais com oito nós, mas podem ser triangulares com 6 nós nas zonas de transição, como pode ser visualizado na Figura 31. Todos eles na condição de estado plano de deformações.

As propriedades dos aderentes utilizadas na simulação são as dispostas na Tabela 3, obtidos em material fornecido pelo fabricante (HUNTSMAN, 2000) e de Kawai e Taniguchi (2006), Lomov e colaboradores (2009) (LOMOV *et al.*, 2009).

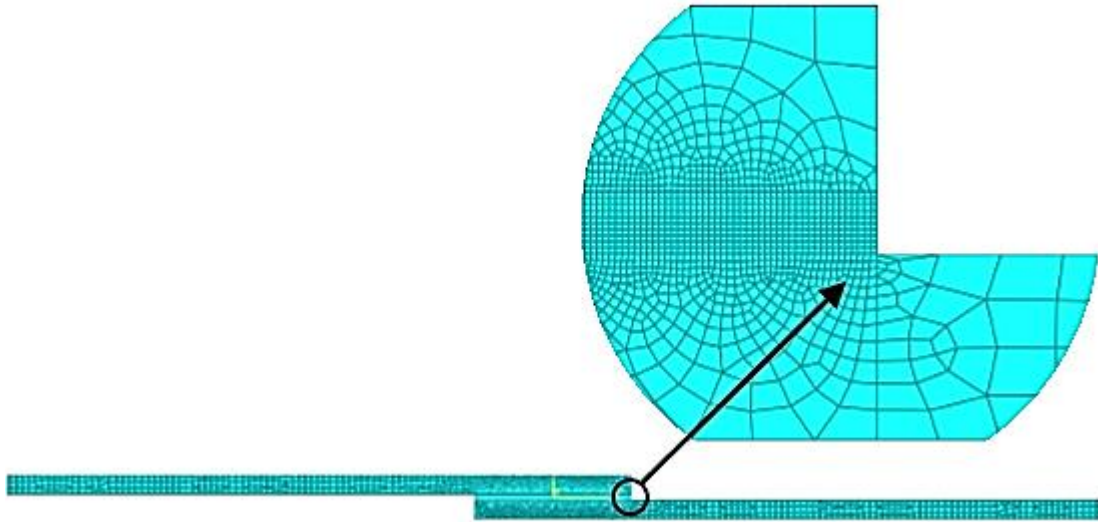


Figura 31. Exemplo de malha para simulação de junta sobreposta simples e, ao fundo, ampliação de região mostrando zonas de transição

Tabela 3. Propriedades dos aderentes usadas nas simulações

Materiais	Propriedades			
	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}
<i>Compósito de fibra de vidro</i>	26,0	17,0	12,2	0,20
<i>Compósito de fibra de carbono</i>	55,6	17,0	3,8	0,02


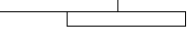
As propriedades do adesivo, material considerado isotrópico, são aquelas obtidas experimentalmente pela nanoindentação (módulo de elasticidade) e $\nu = 0,385$ obtido da literatura (WAHAB, 2014).

3.8. Envelhecimento via exposição à raios UV

Para reprodução da luz solar, são utilizadas duas lâmpadas UVA de 20 W de potência com comprimento de onda de 340 nm da fabricante Philips. Os CPs *single-lap* com aderentes em compósitos reforçados com fibra de carbono são colocados dentro de uma câmara fechada sob a incidência de luz UV por períodos de tempo determinados. As dimensões da câmara, construída em madeira no Laboratório de Mecânica de Nanocompósitos da UFMG, são 80 cm de comprimento, 50 cm de largura e 60 cm de altura. Na tabela 4 é mostrada a quantidade de nanopartícula utilizada, o tempo e a condição de exposição a radiação UV para cada grupo de corpos de prova. Também

são submetidas a radiação UV as camadas finas fabricadas para os ensaios de nanoindentação.

Tabela 4. Plano de exposição UV

Quantidade de nanopartícula (%)	Tempo de exposição (h)	Posição da amostra na câmara	Representação
0	0, 100, 200, 400 *		
1	0, 100, 200, 400	Normal	
2	0, 100, 200, 400		

* Grupo de CPs feito somente para ensaios de Nanoindentação e FTIR

3.9. Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier

Para os ensaios de espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier (FTIR) as amostras de resina são transformadas em um pó fino. Os espectros de infravermelho são adquiridos utilizando pastilhas compostas de pó do adesivo e de brometo de potássio (KBr). Os espectros são coletados para cada amostra no modo transmissão na faixa de 400 a 4000 cm^{-1} , adquiridos com 64 acumulações e sistematicamente ajustados, levando-se em conta as correções da linha de base. Uma atribuição aproximada das principais bandas de absorção do sistema epóxi estudado foi realizada com base no trabalho de Ngono e Maréchal (2000) e Mungroo et al. (2008) e está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Atribuição aproximada das principais bandas de absorção para o sistema epóxi

Banda (cm^{-1})	Designação
3406	Banda de Hidroxila (-OH) estiramento
2968-2850	Unidade Alquila (C-H) estiramento
1653	Grupo carbonila (C=O)
1612-1545-1512	Estiramento anel aromático
1297	Modo de torção dos grupos -CH ₂ -
1255	Éter aromático estiramento
1182	Estiramento C-C de dois grupos p-fenileno
1041	Estiramento das formas trans da cadeia de éter
823	Grupo funcional epóxi

3.10. Proposta de solução para aumento de resistência e proteção UV

A solução proposta é de forma a garantir a viabilidade de construção da junta para a possível realização de um ensaio experimental da sua resistência mecânica. Para tanto, a geometria curva do *spew-fillet* é de tal forma que tubos de policloreto de vinila (PVC) facilmente encontrados no comércio podem ser usados como molde. Como pode-se ver na Figura 32, para o método construtivo idealizado, o tubo de PVC apoia-se perpendicularmente ao aderente inferior.

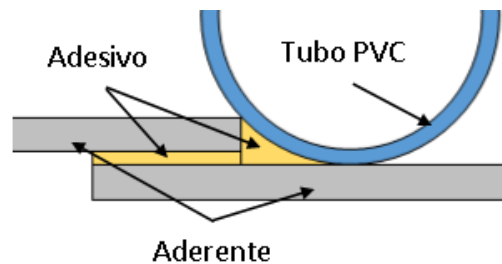


Figura 32. Fabricação do Spew-Fillet em curva

Lang e Mallick (1998) estudaram o efeito de diferentes geometrias de *spew-fillet* da distribuição de tensões em juntas *single-lap* e as de geometria de arco de círculo foram as que apresentaram maiores alívios nas tensões. No entanto, a condição de fabricação do arco não foi levada em conta. Dessa maneira, uma nova análise comparativa é feita para diferentes comprimentos de raio externo, i.e. 10, 20, 30 e 55 mm. Tais valores foram selecionados de acordo com modelos padronizados encontrados no mercado (“Amanco - Produtos - Predial”, 2013).

A solução de aumento de resistência proposta nesse trabalho passa pela fabricação do filete em arco, mas também tem uma camada de material compósito laminado que suportará uma maior parcela da carga. Esse laminado passa por toda a região de sobreposição em contato com o aderente e acompanha o filete em arco em contato com o adesivo, como mostra a Figura 33. Dessa maneira, a solução combina as técnicas de *spew-fillet* (particularmente a estudada por Lang e Mallick (1998), em arco) e de reforço por compósito, apresentada por Turaga e Sun (2008).

A modelagem da junta proposta segue as mesmas condições de contorno das simulações anteriores, alterando-se a geometria do adesivo e adicionando a camada de reforço. Essa camada, de material compósito, é considerada isotrópica para fins de avaliação da técnica. As propriedades são calculadas a partir da regra da mistura.

Mendonça (2005) sugere os seguintes valores para as propriedades da resina $E_{rs} = 3,5 \text{ GPa}$, $\nu_{rs} = 0,35$; da fibra de vidro $E_{fv} = 72,4 \text{ GPa}$, $\nu_{fv} = 0,2$. Considerando uma fibra de vidro de baixa gramatura (i.e., de aproximadamente 40 g/m^2) e a proporção volumétrica entre fibra e resina de 45/50 (conforme ilustrado na Figura 34), as propriedades da lâmina são obtidas através da equação (11).

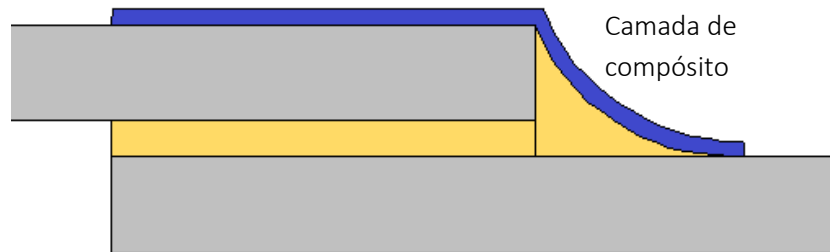


Figura 33. Desenho esquemático do reforço combinado proposto

$$E_{lm} = 0,45 \cdot E_{fv} + 0,50 \cdot E_{rs} = 34,33 \text{ GPa}$$

$$\nu_{lm} = 0,45 \cdot \nu_{fv} + 0,50 \cdot \nu_{rs} = 0,265$$
(11)



Figura 34. Esquema da lâmina de reforço e suas proporções volumétricas

As condições de contorno estão ilustradas na Figura 35 seguindo, também, os mesmos métodos das simulações anteriores.



Figura 35. Condições de contorno

4. Resultados e Discussões

4.1. Propriedades mecânicas dos adesivos

4.1.1. Nanoindentações

Os adesivos AR300 e AR300G foram submetidos à ensaios de nanoindentação e os resultados estão exibidos nas Figuras 36 e 37. Observa-se um pequeno aumento na rigidez do AR300G1 em relação ao adesivo sem adição de nanopartículas, mas há um aumento de 4,1% na rigidez do AR300G2. Este último com módulo de elasticidade de 3,81 *GPa*. O adesivo com 1% de grafeno teve uma pequena diminuição na dureza, indo de 403 *MPa* para 397 *MPa*. Mas com a adição de 2% de nanopartículas houve um aumento de 2,5% na dureza do adesivo, chegando a 413 *MPa*. Nessa amostra, também foi observado um elevado e discrepante desvio padrão do módulo de elasticidade. Tal resultado pode ser devido a uma superfície irregular da amostra preparada ou um indício do início de uma aglomeração de nanopartículas na matriz epoxidílica.

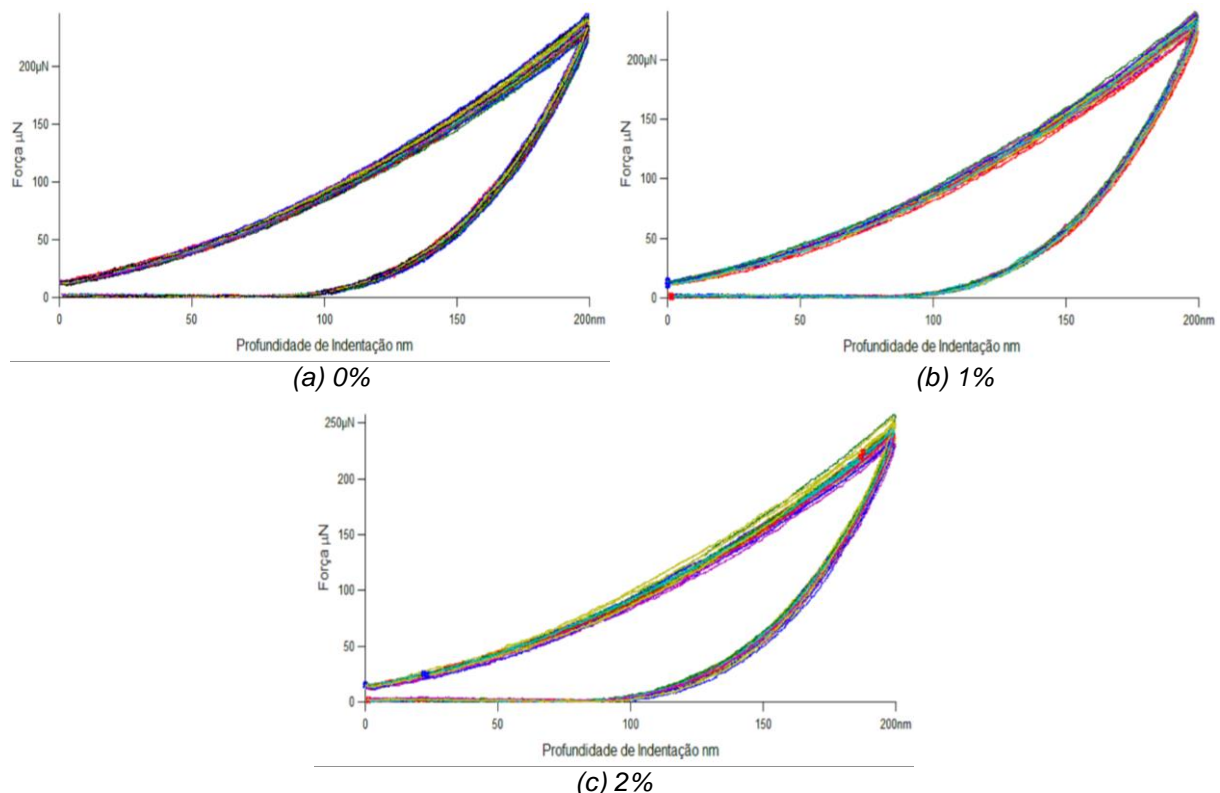


Figura 36. Curvas dos ensaios de Nanoindentação para adesivos (a) sem adição de nanopartículas e com (b) 1% e (c) 2% de adição de nanopartículas

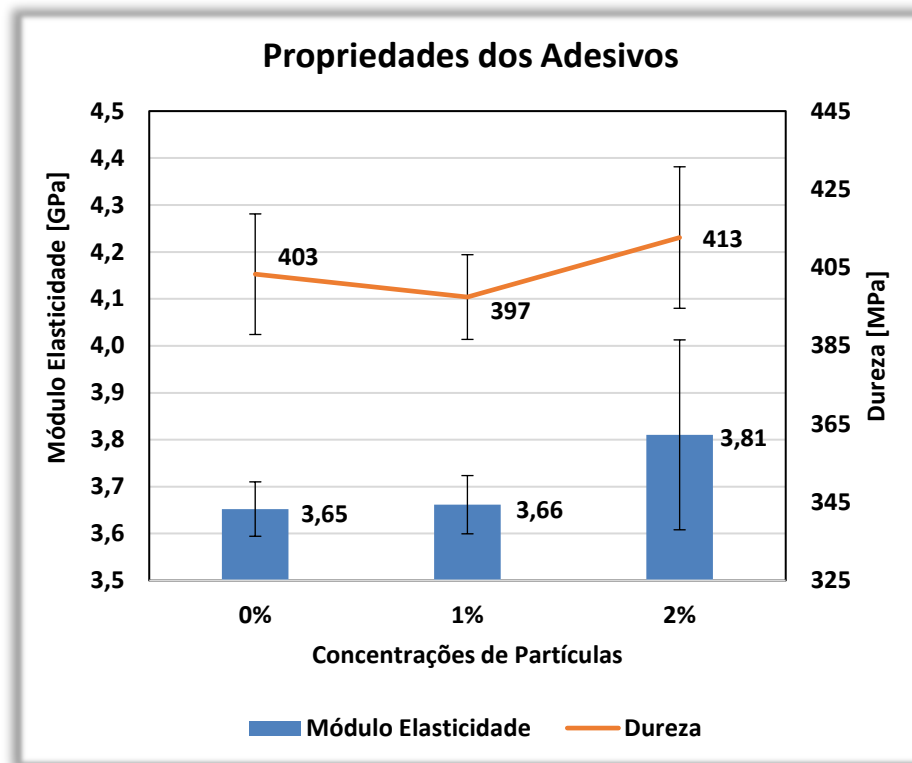


Figura 37. Resultados da Nanoindentação dos adesivos AR300 e AR300G

4.1.2. Ensaio da juntas *single-lap*

A resistência do adesivo, medida no ensaio de junta *single-lap*, apresentou os resultados mostrados na Tabela 6 para os corpos de prova com aderente em fibra de vidro. Observou-se um aumento da resistência com a adição de nanopartícula na ordem de 6%, com o conseqüente aumento do deslocamento em 4,2%. No entanto, como mostrado na Figura 38, o limite de resistência do aderente foi atingido com a adição de 1% de grafeno, isto é, o aumento de adesão do AR300G1 com o aderente promoveu a completa remoção da primeira camada de resina epóxi do compósito. Como a adesão das fibras de carbono à resina epóxi é maior, torna-se necessária a troca de materiais de compósito dos aderentes para que se possa avaliar o comportamento dos adesivos.

Tabela 6. Resultados ensaios SLJ – Compósitos Fibra de Vidro

Concentrações	Força máx [kN]	Deslocamento @Força max [mm]
0%	$5,347 \pm 0,732$	$3,09 \pm 0,48$
1%	$5,667 \pm 0,407$	$3,22 \pm 0,26$

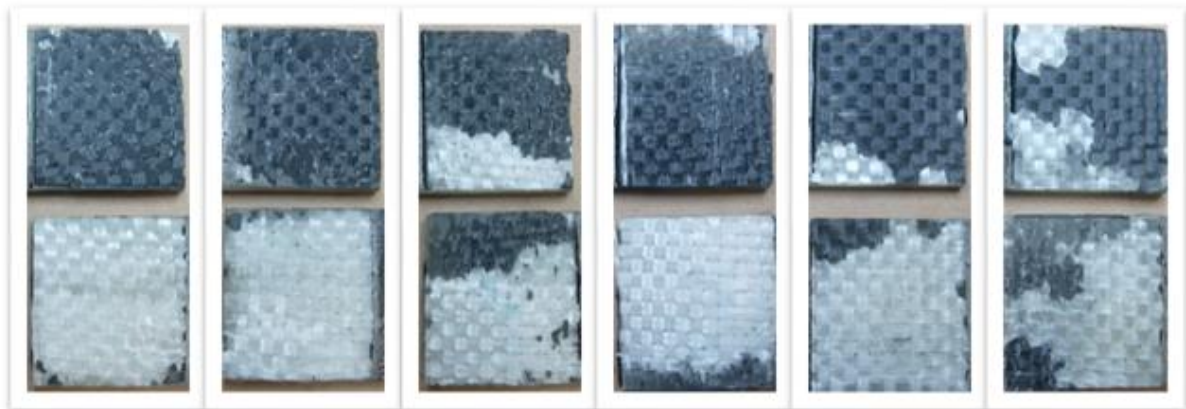


Figura 38. Detalhe da região de sobreposição dos CPs SLJ FV AR300G1

Com o aderente em compósito reforçado com fibras de carbono, os resultados da resistência do adesivo estão apresentados na Figura 39. Novamente, observou-se um aumento da resistência da junta com a adição de nanopartículas ao AR300. Esse aumento foi de aproximadamente 43% para o AR300G2, com o consequente aumento do deslocamento em 23%. Em tempo, não houve diferença estatisticamente significativa da resistência do adesivo com 1% de grafeno em relação àquele sem adição de nanopartículas. Como o AR300G2 obteve uma maior resistência, acredita-se que a dispersão dos dados de rigidez e dureza na nanoindentação tenham sido causados por uma superfície irregular, ao invés da hipótese de aglomeração de partículas. Ou ainda, que tal aglomeração, caso tenha ocorrido, não tenha sido em quantidade suficiente para que prejudicasse a atuação do nanocompósito como adesivo.

4.1.3. Ensaio double cantilever beam

O ensaio Double Cantilever Beam (DCB) foi realizado em duas etapas, sendo a primeira para a criação de uma pré trinca. Para que essa etapa fosse atendida, foi necessária a criação de um código para a realização do ensaio pela máquina de ensaios universal (vide Apêndice 2). Na Figura 40, mostra-se o gráfico de carregamento no tempo de ensaio, sendo que a parte inicial em azul enfatiza a etapa de geração dessa pré trinca. Do gráfico de força por deslocamento (mostrado na Figura 41), são extraídos os valores de início da não linearidade (NL) e de pico (Max) que, após feitos todos os demais cálculos, levam aos valores de G_{Ic} comumente utilizados em projetos. Os valores encontrados estão na Tabela 7, em que MBT, CC e MCC são os diferentes métodos de calibração do ensaio. Eles são, respectivamente, o método da Teoria de

Vigas Modificada, de Calibração da Flexibilidade e de Calibração da Flexibilidade Modificada.

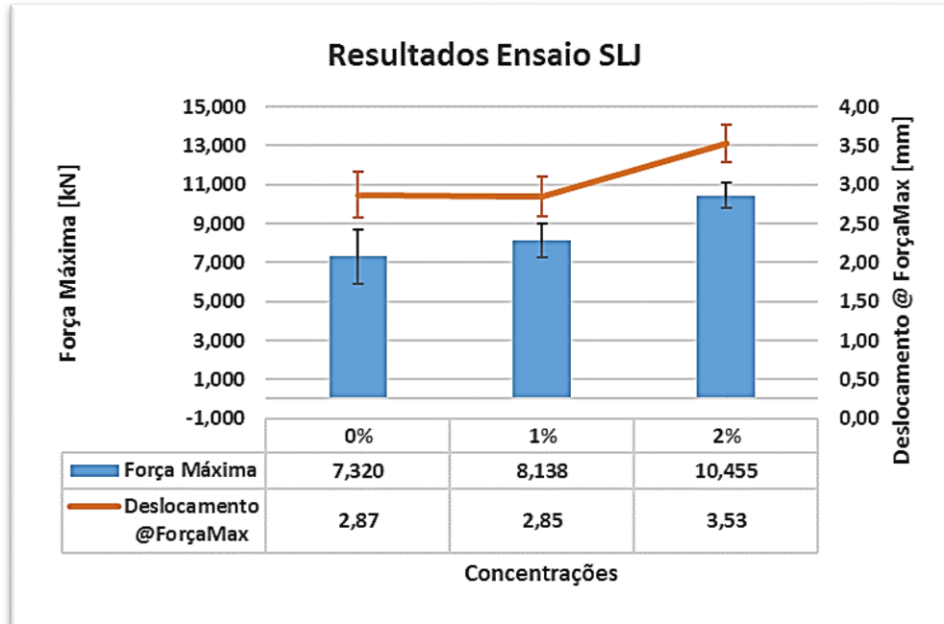


Figura 39. Resultados ensaios SLJ – Compósitos Fibra de Carbono

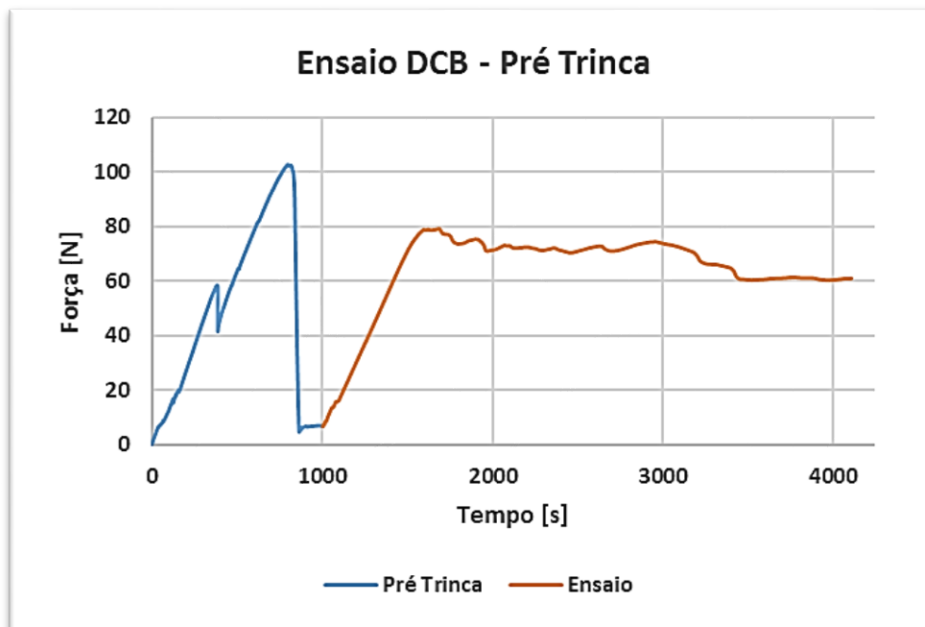


Figura 40. Carregamento no tempo de todo o ensaio DCB

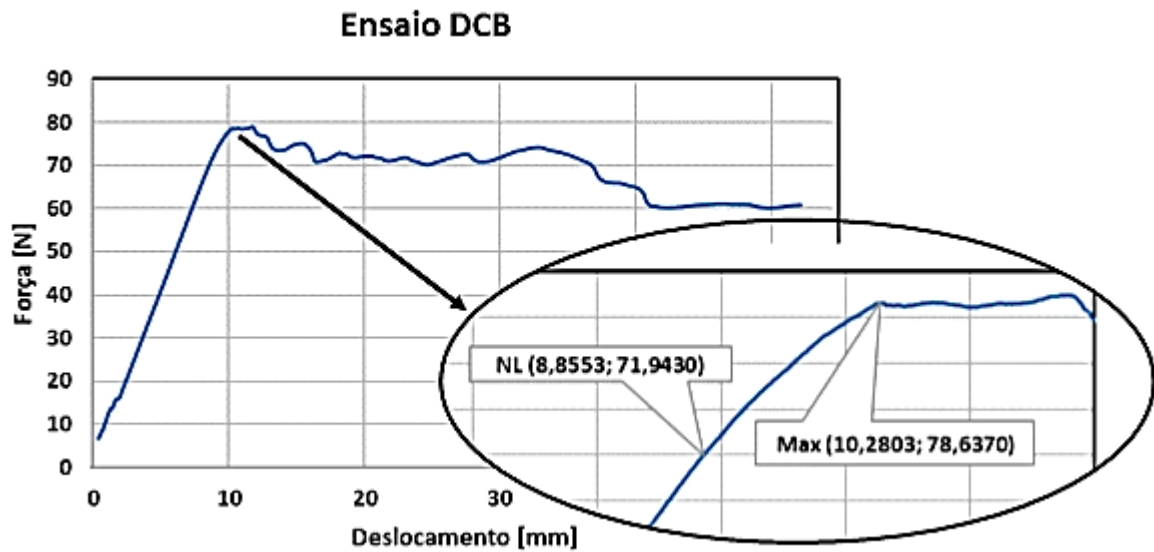


Figura 41. Gráfico de força por deslocamento do ensaio DCB com o detalhe dos pontos de início da não linearidade e de pico

Tabela 7. Valores calculados de G_{Ic} em N/m

	MBT	CC	MCC
NL	606,37	625,77	671,09
Max	774,02	798,78	837,34

N Figura 42, é mostrada a curva da resistência à fratura no decorrer do ensaio (curva R) para os pontos marcados no corpo de prova. O comportamento é ascendente e esparso, principalmente com o aumento do comprimento da trinca. Tal comportamento singular da curva R é esperado para aderente de material compósito reforçado por tecido. Isso se dá devido a diferença de rigidez encontrada nas regiões com maior concentração de resina. Em uma análise da região de falha do corpo de prova (Figura 43), pode-se observar que a propagação da trinca se deu na interface entre a resina epóxi do aderente e as fibras de reforço do mesmo. Isso mostra que o valor de G_{Ic} encontrado não é adequado ao comportamento de falhas adesiva e coesiva do adesivo. É importante ressaltar que a utilização do aderente de tecido de fibra de vidro foi por melhor representar a junta em estudo, mas os resultados inviabilizam uma abordagem comum do problema via elementos finitos com zonas de elementos coesivos.

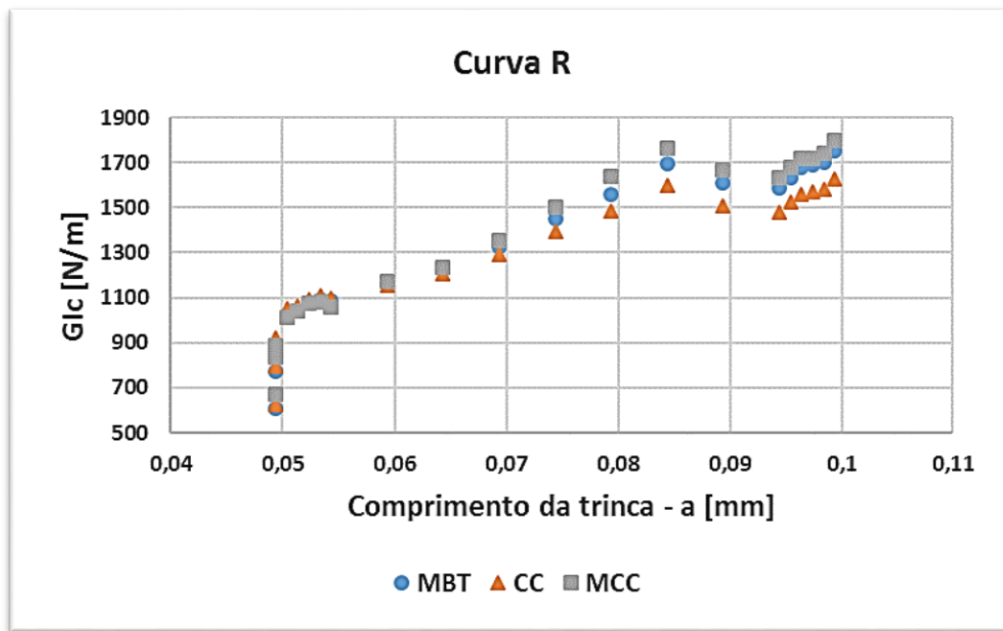


Figura 42. Curva R do ensaio DCB

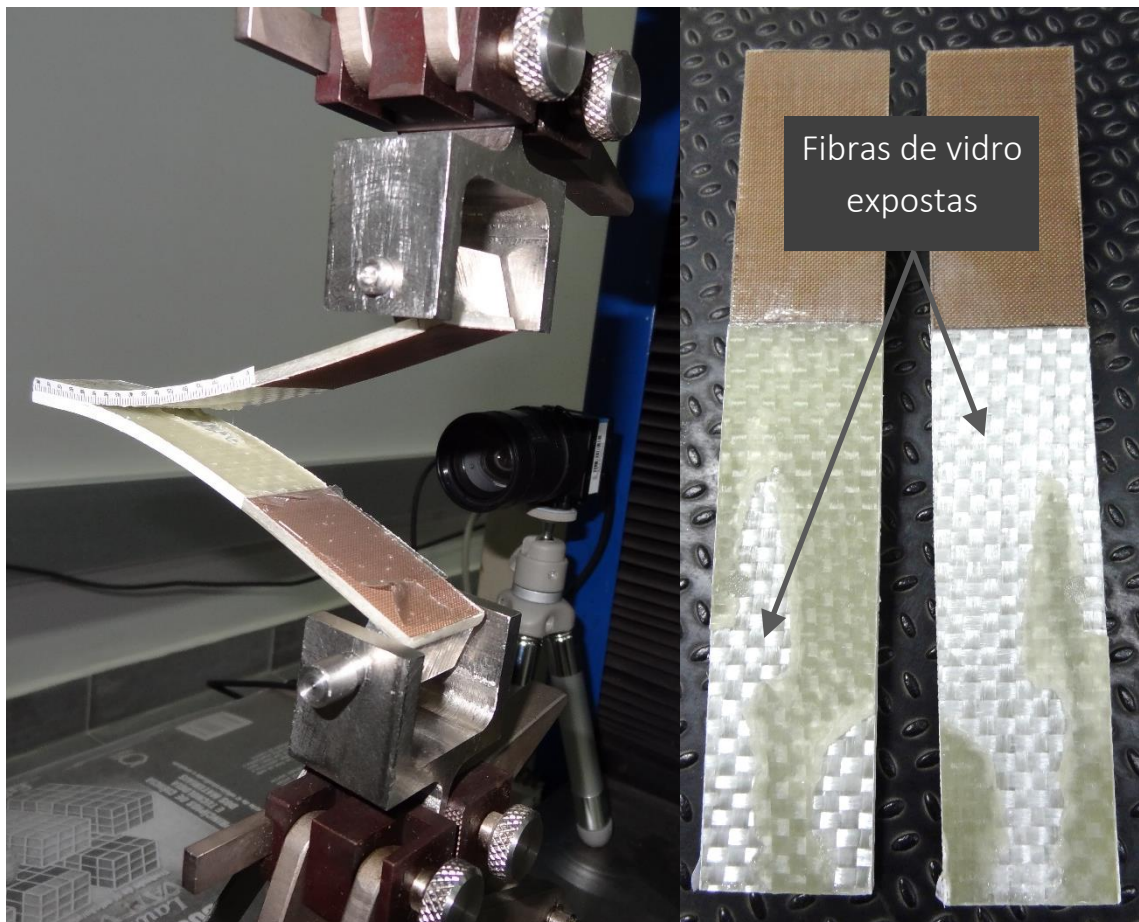


Figura 43. Detalhe da região de falha do CP no ensaio DCB

4.2. Análise do comportamento da junta – tensões e modos de falha

4.2.1. Classificação e quantificação dos modos de falha

As medições das fractografias via *software* ImageJ estão tabuladas na Tabela 8. Antes de fazer maiores análises dos resultados, é necessário ponderar alguns aspectos das medições de modos de falha:

- A identificação de modos de falha coesiva e adesiva pode ser difícil de se realizar, principalmente se ambos existirem na mesma fratura.
- A localização espacial do modo de falha pode ter efeito na resistência da junta. Na Figura 44, mostram-se alguns exemplos de variações observadas nas fractografias. No entanto, tais efeitos não são levados em consideração nesse estudo, sendo considerados variações normais dentro das amostras.
- Aderentes de tecido plano de fibras formam regiões de acúmulos de resina. Quando a falha ocorre arrancando a camada de resina que fica entre o adesivo e a primeira camada de fibras do aderente podem ser formadas “bolsas” de resina e adesivo circundadas de falhas LFT, como mostrado na Figura 44 (e). A quantificação da falha nessas regiões também é difícil e propensa a erros.

Pôde-se observar que a adição de grafeno influenciou uma mudança no modo de falha dos corpos de provas. Os CPs com 1% de nanopartículas tiveram predominância de falha coesiva (COH), enquanto os com AR300G2 tiveram predominância de falha de descolamento da primeira camada de resina do aderente (LFT). Analisando somente esses dois grupos, pode-se dizer que a falha coesiva é menos resistente do que a falha LFT. No entanto, os resultados dos adesivos sem grafeno apresentaram uma variação grande, tanto de valores de resistência, quanto de modos de falha. Parece que, não só o modo de falha, nem mesmo só as propriedades dos adesivos, estão, sozinhos, relacionados à resistência da junta. Sabe-se ainda que os níveis de tensão variam de acordo com as propriedades dos adesivos, mas as variações de tais gradientes necessitam de mais análises.

Tabela 8. Resistência e modos de falha das medições das fratoformas dos CPs SLJ de fibra de carbono

CP Id	0%		1%		2%	
	F [kN]	MF	F [kN]	MF	F [kN]	MF
1	6,969	LFT-COH (90-10)	8,068	COH	10,784	LFT
2	9,347	TLC-LFT (80-20)	8,162	COH-LFT (95-05)	9,647	LFT
3	5,494	LFT-COH (80-20)	9,592	LFT	11,371	LFT-COH (60-40)
4	7,050	COH-LFT (60-40)	7,549	COH	10,298	LFT-COH (90-10)
5	7,739	COH-LFT (80-20)	7,321	COH	10,175	LFT-COH (70-30)

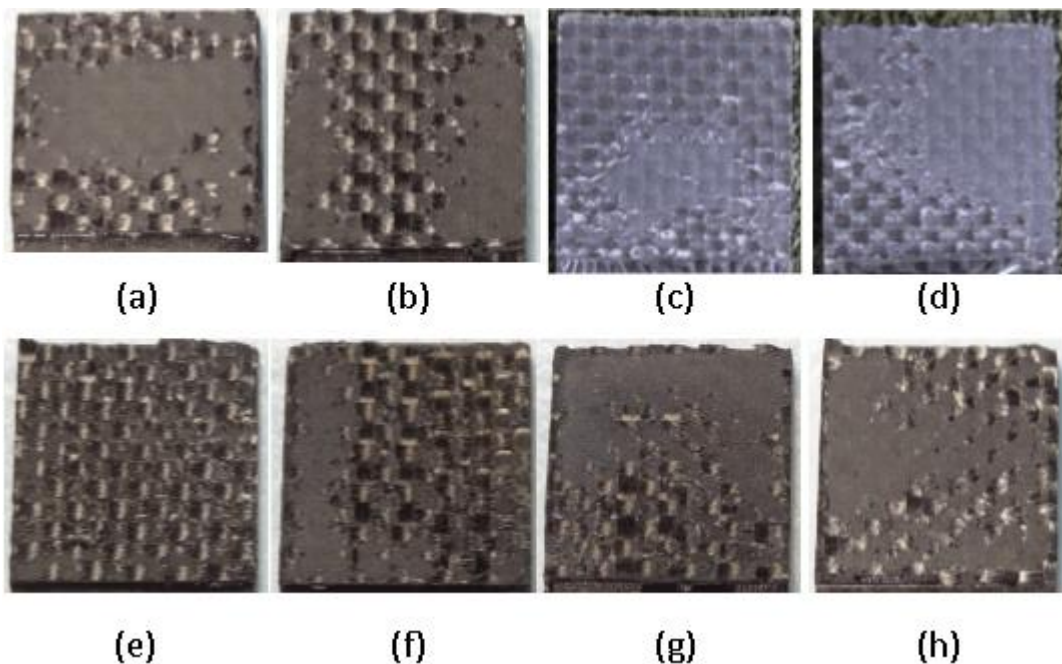


Figura 44. Diferentes formas de localização espacial dos modos de falha das juntas de laminados de fibra de carbono tais como: (a) LFT transversal nas extremidades; (b) LFT longitudinal central; (c) LFT transversal superior; (d) LFT diagonal; (e) LFT dispersa em bolsões de adesivo; (f) LFT dispersa à direita; (g) LFT dispersa inferior; e (h) LFT dispersa superior e inferior

4.2.2. Resultados das simulações – distribuição de tensões no adesivo

Simulando os ensaios para as máximas cargas suportadas pelos CPs nos ensaios SLJ pôde-se analisar a distribuição de tensões no adesivo como, por exemplo, as

tensões de von-Mises na Figura 45. Sabe-se que as duas principais tensões atuantes são a tensão de delaminação (S_Y), ou *peel*, e a tensão de cisalhamento (S_{XY}). Nas Figuras 46 e 47, são mostradas as distribuições dessas tensões ao longo do comprimento de sobreposição. Percebeu-se que as variações para a tensão de delaminação são muito pequenas e uma variação mais notória na tensão de cisalhamento, principalmente quando comparados os resultados do adesivo sem nanopartícula com o AR300G2 com fibra de carbono. No entanto, essas variações ocorreram em intensidades muito baixas e elas variaram quase que uniformemente, ou seja, o gradiente de tensões é, se não igual, muito próximo.

As variações das tensões ao longo da espessura do adesivo já mostraram um comportamento diferente. Como pôde ser observado nas Figuras 48 e 49, o gradiente de tensões foi maior e as intensidades mais significativas. Apesar de ser importante se medir o maior gradiente existente na direção da espessura, o gradiente aqui calculado está um pouco abaixo desse valor. Isso pois as máximas tensões são obtidas pelo *software* em um ponto de singularidade, que são pontos não muito bem trabalhados em simulações numéricas e podem trazer alguns erros. Assim sendo, nas Figuras 50 a 53 são mostrados os pontos em que tais gradientes foram calculados. É importante ressaltar que foi verificado que os gradientes medidos à esquerda do adesivo apresentam a mesma intensidade daqueles à direita e, por isso, só estão apresentados aqui os resultados à esquerda.

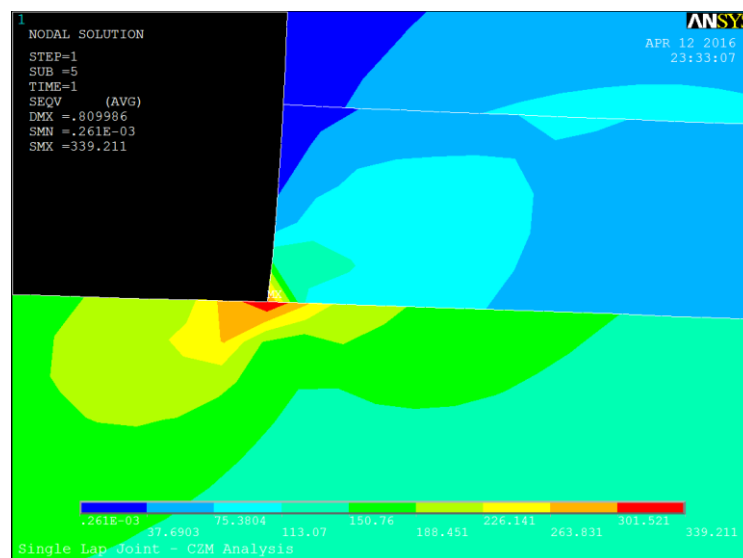


Figura 45. Detalhe da parte esquerda da região de sobreposição (Aderente em FV e adesivo sem nanopartículas) – Tensões de von-Mises

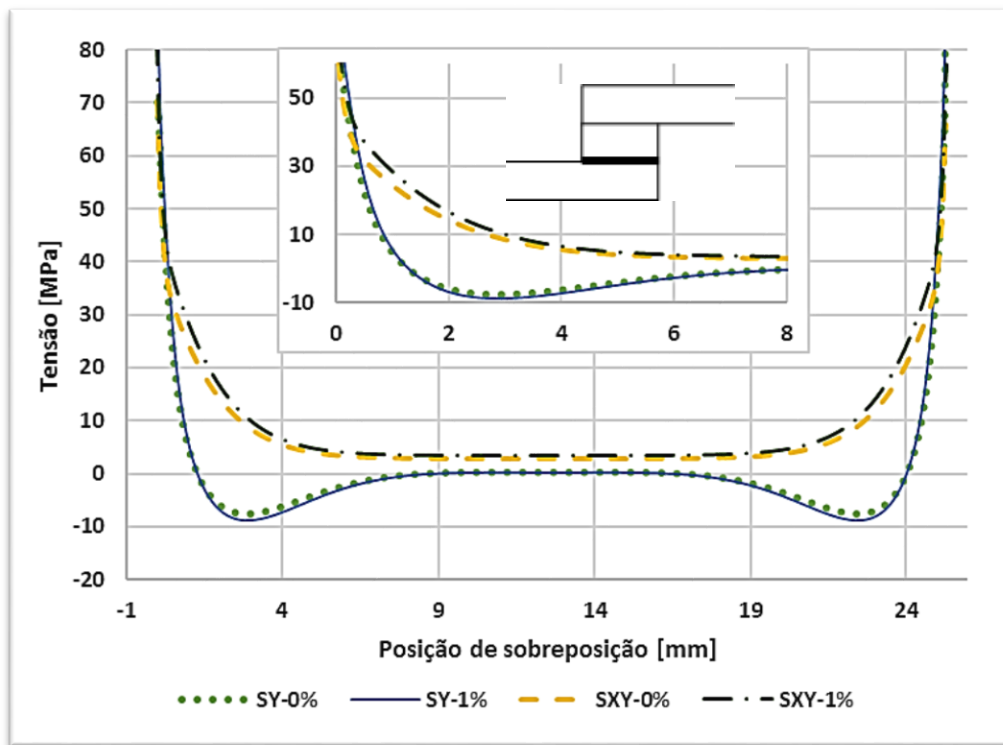


Figura 46. Tensões no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição – aderente de Fibra de Vidro

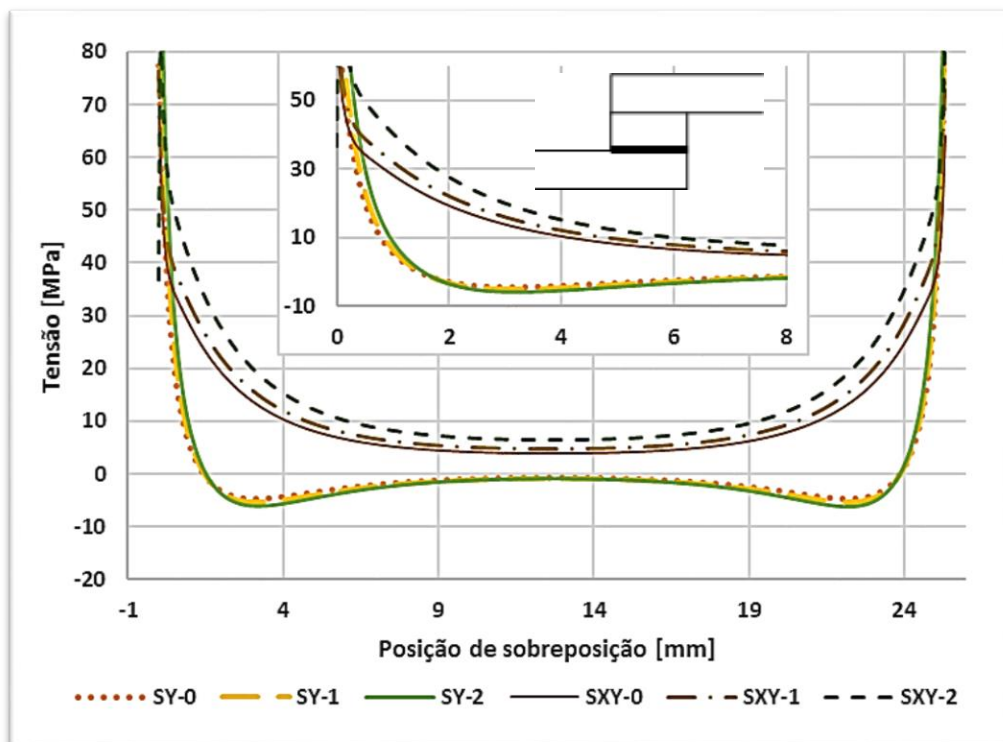


Figura 47. Tensões no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição – aderente de Fibra de Carbono

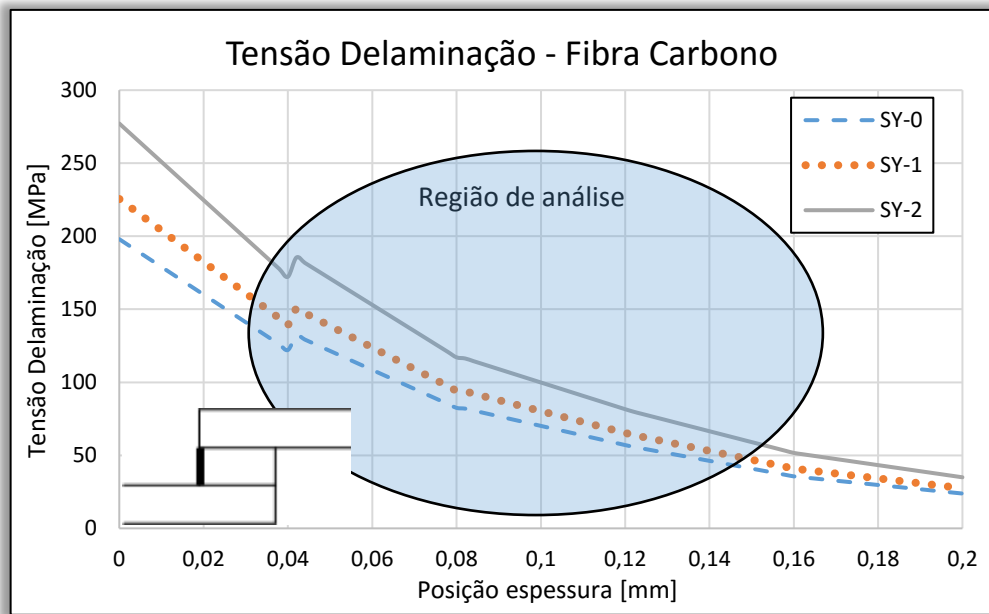


Figura 48. Tensões de delaminação ao longo da espessura do adesivo em junta *single-lap* de fibra de carbono

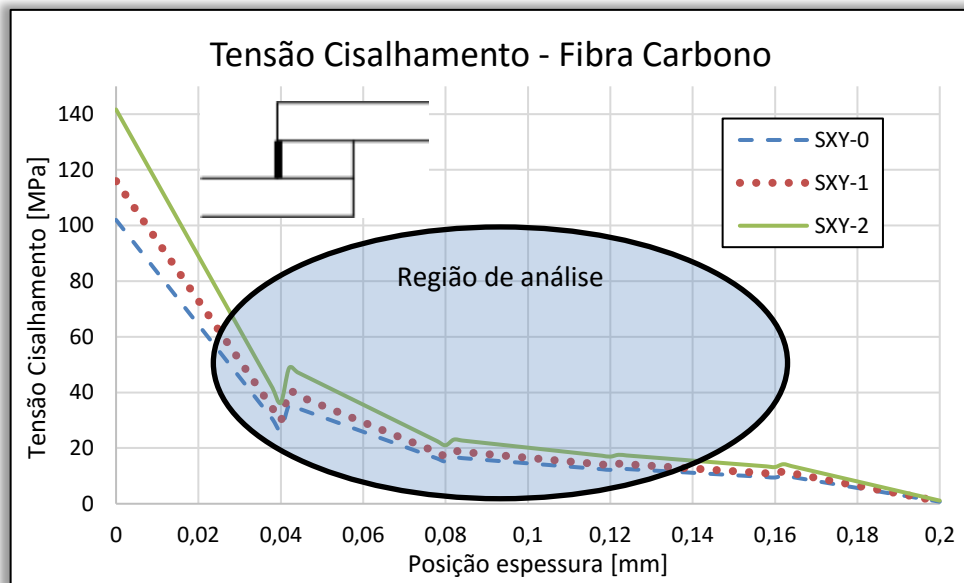


Figura 49. Tensões de cisalhamento ao longo da espessura do adesivo em junta *single-lap* de fibra de carbono

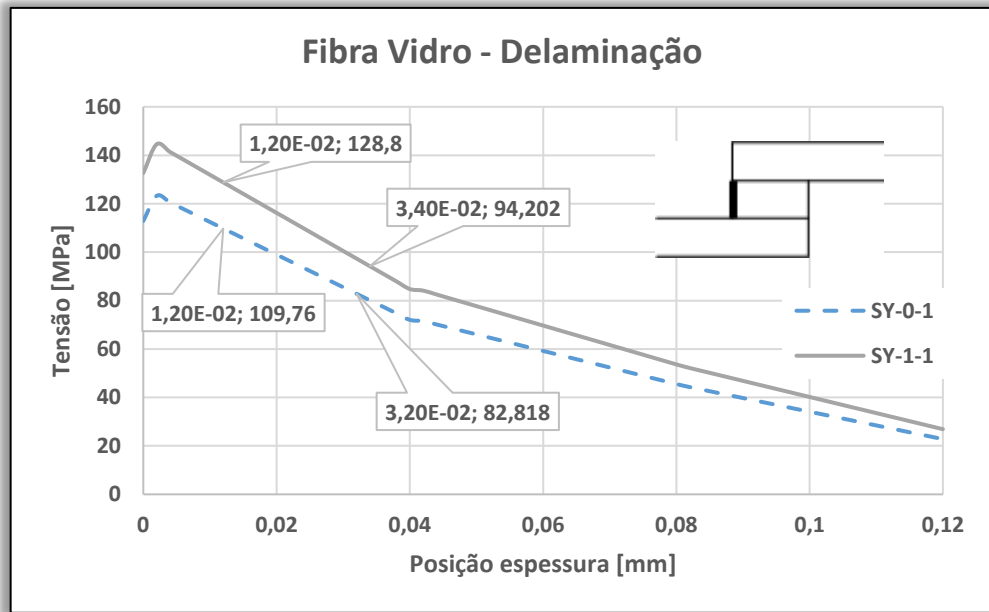


Figura 50. Tensões de delaminação no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Vidro

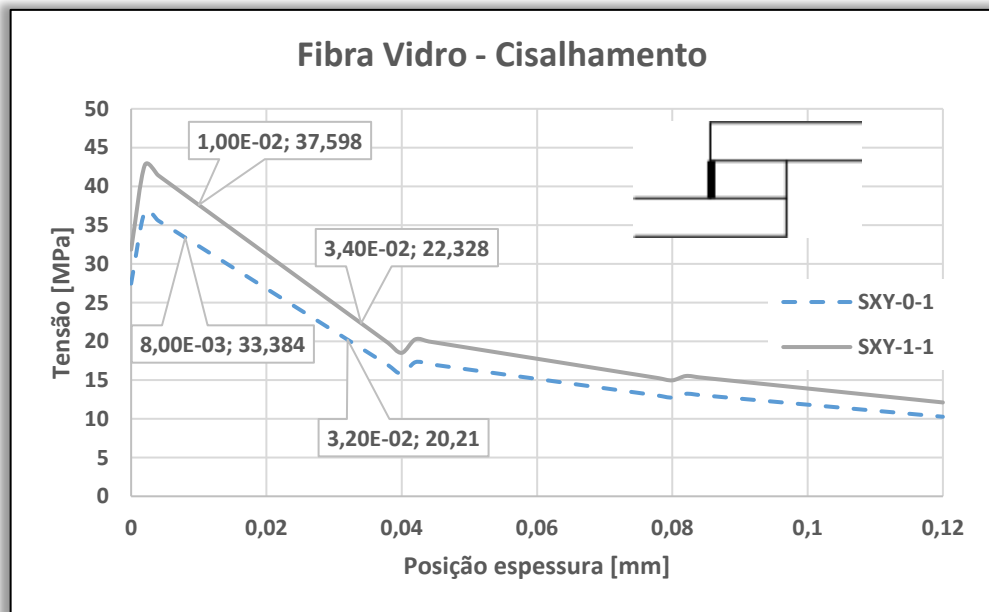


Figura 51. Tensões de cisalhamento no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Vidro

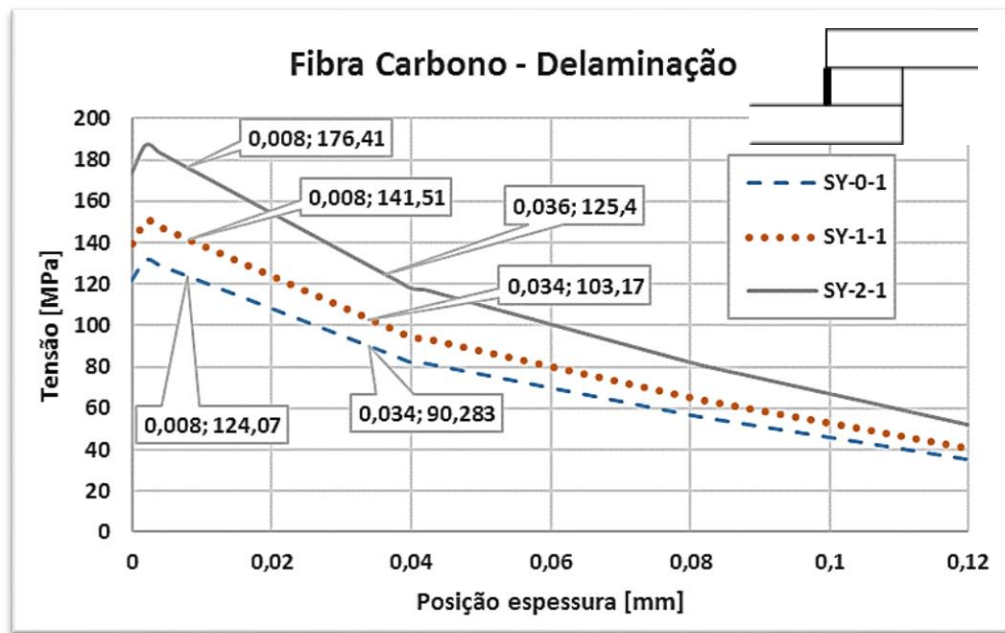


Figura 52. Tensões de delaminação no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Carbono

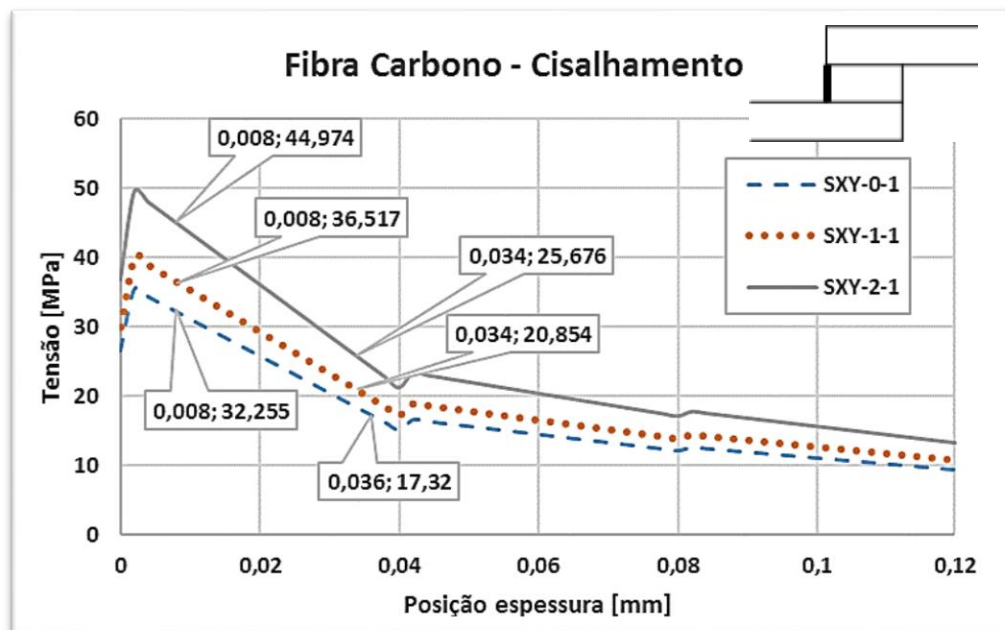


Figura 53. Tensões de cisalhamento no adesivo ao longo da espessura – aderente de Fibra de Carbono

Os resultados do cálculo dos gradientes estão na Tabela 9. A variação das tensões foi mais intensa nas tensões de delaminação. Os gradientes aumentaram com o acréscimo de grafeno no adesivo. Isso pode ser explicado pelo aumento do módulo de elasticidade, ou seja, com um adesivo mais rígido, o pico de tensão aumenta e se

intensifica o fluxo. Esse aumento chegou a 40,2% quando comparado o gradiente do AR300G2 com o do AR300 não modificado. Os gradientes das tensões de delaminação também foram maiores para os CPs de fibra de vidro, considerando os mesmos adesivos. Isso também pode ser devido à rigidez, mas, dessa vez, a rigidez do aderente e, conseqüentemente, da junta. Com aderentes de maior módulo de elasticidade (neste caso, a fibra de carbono) a rotação da junta é menor levando a menores níveis de tensão de delaminação no adesivo. Os resultados dos gradientes das tensões de cisalhamento corroboram essa análise, uma vez que esse tipo de tensão não é tão afetado pela rotação da junta e os valores calculados também não foram muito distintos entre os mesmos adesivos com diferentes aderentes.

Tabela 9. Módulo dos gradientes de tensão ao longo da espessura dos adesivos

		Módulo dos Gradientes [MPa/mm]			
		∇S_y	Diferença	∇S_{xy}	Diferença
FV	0%	1347,10	---	548,92	---
	1%	1562,74	225,54 (16,7%)	636,25	87,33 (15,9%)
FC	0%	1299,50	---	533,39	---
	1%	1474,62	175,12 (13,4%)	602,42	69,03 (12,9%)
	2%	1821,79	347,17 (23,5%)	742,23	139,81 (23,2%)

4.2.3. Relação dos gradientes de tensão com os modos de falha

A resistência do adesivo (mostrada na Tabela 6 e na Figura 39) para as juntas de fibra de carbono parece seguir o mesmo comportamento da variação da rigidez do adesivo observada na Figura 37. Isso pois, com um adesivo mais rígido observa-se uma menor rotação e, assim, menores níveis de tensão (principalmente de delaminação). Esse aumento do módulo de elasticidade também levou a um aumento dos gradientes de tensão mostrados na Tabela 9, nas Figuras 50 e 51 para laminados de FV e nas Figuras 52 e 53 para laminados de FC. Gradientes esses que foram afetados não só pela rigidez do adesivo, mas também do aderente. Como a rigidez da FV é menor do que a da FC, observa-se uma maior diferença entre os gradientes das tensões entre os adesivos sem grafeno e com adição de 1% de nanopartículas. Isso pode ser explicado pela maior rotação das juntas de FV. É interessante observar que o tecido de reforço do aderente promove uma variação localizada entre as diferentes regiões de passagem dos fios. Tais variações influenciam os gradientes de tensão no adesivo, mas não são contempladas na simulação. Isso pode levar a trinca, iniciada no ponto de singularidade, a se propagar em diferentes direções e de maneira não uniforme.

Tal comportamento pode ser o responsável por toda a diversidade de tipos de falha e distribuição das mesmas na região colada, como mostrado na Figura 44. Ainda, observa-se na Tabela 8⁶ que a adição de 1% grafeno pode ter reduzido a adesão entre o adesivo e o aderente, levando a uma maior ocorrência de falha COH (porém bem mais constante) com um pequeno aumento na resistência da junta. Tal aumento, de aproximadamente 11% em relação ao adesivo sem nanopartículas, parece ser devido ao também pequeno aumento da rigidez do adesivo. Já a adição de 2% de grafeno ao adesivo pareceu aumentar a adesão entre adesivo e aderente, levando à maior ocorrência de falhas do tipo LFT, também observada na Tabela 8. Dessa forma, a adição de grafeno parece atuar em dois sentidos:

- Aumentando a rigidez do adesivo leva a um aumento da capacidade de carga da junta, mas também aumenta o gradiente de tensões; tendendo a falha a ocorrer no modo LFT.
- Variando a adesão da camada de adesivo à resina do aderente, o efeito anterior promove a completa falha LFT e a resistência da junta fica limitada à resistência do material compósito do aderente. Parece haver um limite próximo à 2% de adição de grafeno para que isso ocorra.

4.3. Envelhecimento por UV

4.3.1. Nanoindentações

Todos os ensaios de nanoindentação foram realizados a uma profundidade menor do que os 60 μm que Mailhot et. al (2004) acharam produtos de fotodegradação em resinas epóxi. O objetivo do ensaio foi avaliar o efeito da adição de grafeno e da exposição a luz UV. Os resultados estão apresentados na Tabela 10 e as curvas de carregamento e descarregamento obtidas para os ensaios de nanoindentação são mostradas na Figura 54. Os resultados aqui mostrados para 0h são os mesmos apresentados anteriormente.

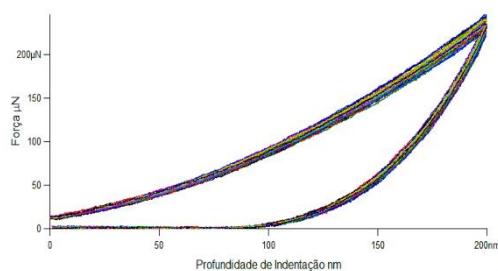
Para as amostras expostas à radiação UV e com adição de grafeno, as curvas apresentaram-se, em sua maioria, praticamente sobrepostas. Isso indica uma incidência

⁶ É importante enfatizar que os CPs da Tabela 8 tem aderentes de tecido plano em FC

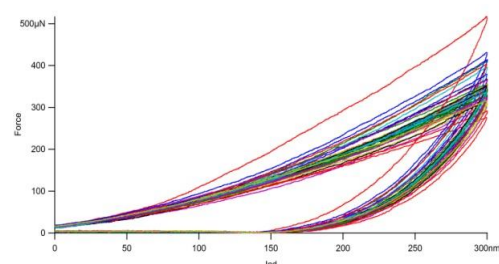
uniforme da radiação, mas também uma boa dispersão das nanopartículas. Foi verificado aumento de rigidez e dureza para os adesivos com a adição de 2% de grafeno. Observa-se uma redução de rigidez e dureza entre as amostras sem e com envelhecimento por UV. No entanto, entre as amostras envelhecidas, não houve padrão de variação do módulo de elasticidade quando se analisa CPs de mesmo adesivo. O adesivo AR300 teve um aumento na rigidez com o aumento do tempo de exposição de aproximadamente 5%. Os adesivos com adição de grafeno primeiro apresentaram um aumento no módulo de elasticidade com a exposição por 200h (9% para o AR300G1 e 2% para o AR300G2) e, em seguida, apresentaram diminuições na rigidez para 400h de exposição em relação aos expostos por 100h (-2% para o AR300G1 e -3% para o AR300G2). No entanto, observa-se uma redução da dureza com o avanço do tempo de exposição ao UV e tal diminuição aumenta com o aumento da proporção de grafeno do adesivo. A dureza reduziu 1,5% para o AR300, 4,1% para o AR300G1 e 7,8% para o AR300G2. Essa redução pode ser devido à formação de microtrincas na região superficial degradada pela radiação ultravioleta e dão, na nanoindentação, uma falsa sensação de atenuação da dureza. Tais resultados mostram que o grafeno tem influência no processo de degradação da matriz epoxidílica, bem como no comportamento mecânico do produto final.

Tabela 10. Resultados do ensaio de nanoindentação

	0h	100h	200h	400h
Módulo de Elasticidade [GPa]				
0%	$3,65 \pm 0,058$	$2,62 \pm 0,247$	$2,65 \pm 0,122$	$2,76 \pm 0,407$
1%	$3,66 \pm 0,062$	$2,71 \pm 0,060$	$3,01 \pm 0,090$	$2,66 \pm 0,049$
2%	$3,81 \pm 0,202$	$3,11 \pm 0,083$	$3,19 \pm 0,186$	$3,03 \pm 0,109$
Dureza [MPa]				
0%	$403,30 \pm 0,154$	$260,30 \pm 41,975$	$264,85 \pm 21,821$	$256,42 \pm 50,990$
1%	$397,47 \pm 0,108$	$236,16 \pm 12,366$	$224,15 \pm 21,785$	$226,51 \pm 5,848$
2%	$412,68 \pm 0,181$	$282,82 \pm 7,042$	$276,02 \pm 12,115$	$260,87 \pm 16,562$



(a) 0% 0h



(b) 0% 100h

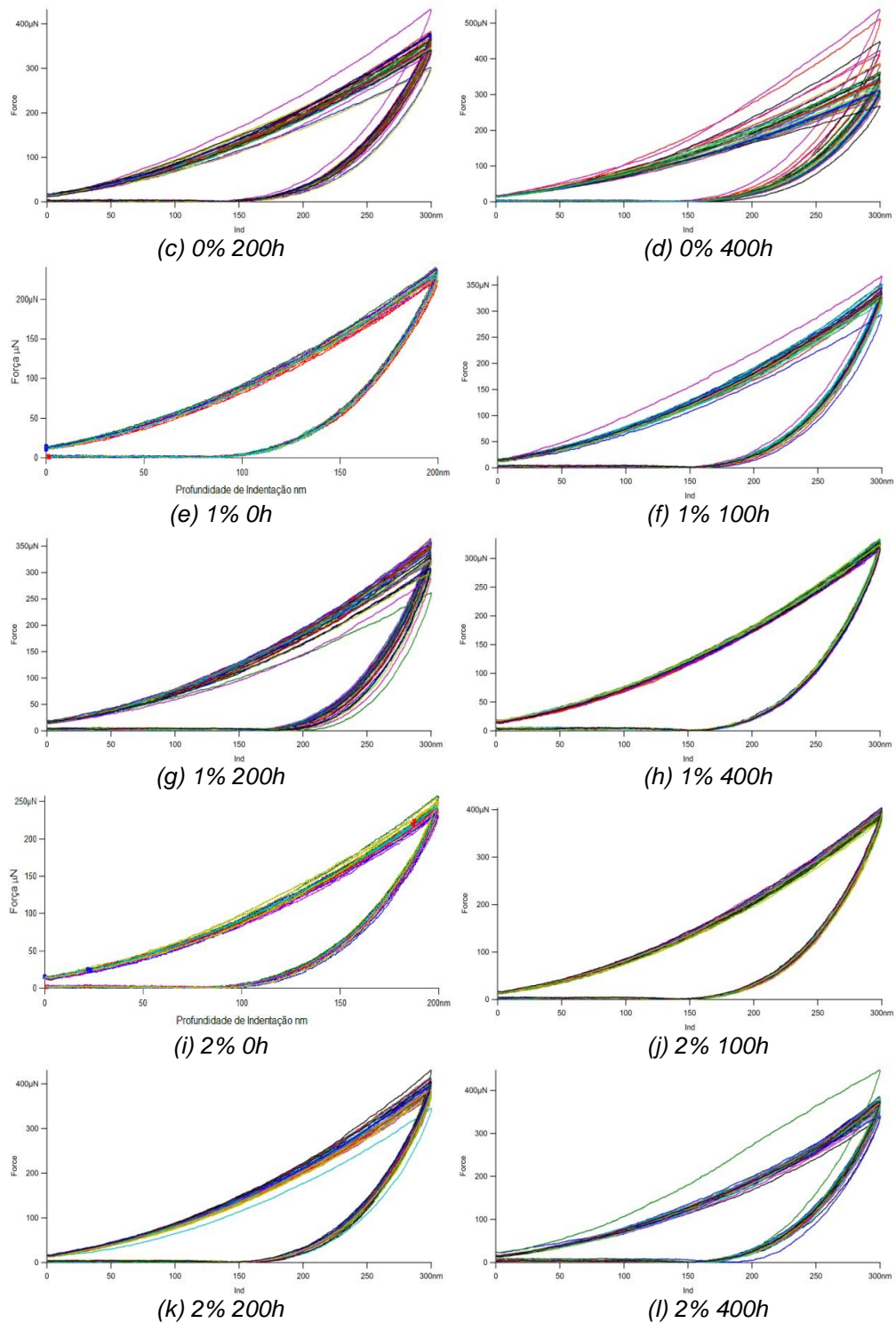


Figura 54. Curvas carregamento e descarregamento das nanoindentações

4.3.2. Espectroscopia em infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR

Nas Figuras 55, 56 e 57, são mostrados os espectros obtidos no ensaio FTIR no modo de transmissão para a identificação dos produtos da degradação. As bandas de estiramento do anel aromático ($1612; 1545; 1512 \text{ cm}^{-1}$) apresentaram comportamentos

diferentes entre os adesivos sem adição de nanopartículas para aqueles que foram nanomodificados. No primeiro caso observou-se uma diminuição ou inalteração das bandas com o aumento do tempo de exposição. Já nos espectros dos adesivos com grafeno tais bandas aumentam com o passar das horas de exposição à radiação ultravioleta. O aumento da banda relacionada ao grupo funcional epóxi (823 cm^{-1}), pode explicar a degradação do adesivo pela quebra das ligações cruzadas e o reaparecimento desse grupo funcional.

4.3.3. Ensaio das juntas *single-lap* envelhecidas

Os corpos de prova SLJ que foram expostos à radiação ultravioleta foram ensaiados e os resultados estão na Figura 58, sendo que os resultados para CPs sem exposição são aqueles já apresentados anteriormente. De uma maneira geral, houve uma tendência de perda de resistência com a exposição das juntas ao UV e tal perda tendeu a aumentar com o aumento do tempo de exposição. Dentre os grupos expostos, a diminuição da resistência para as juntas com AR300G1 foi de 84,0% e de 29,2% para as juntas com AR300G2. Há que se destacar que a resistência dos CPs com 2% de nanopartículas e exposto por 100 horas foi inferior à esperada, uma vez que foi menor do que a dos CPs AR300G1 com o mesmo tempo de exposição. Observando os resultados desse grupo, apresentado na Tabela 11, nota-se que a resistência do quinto CP destoa das demais do mesmo grupo. Isso pode ter sido provocado por um desgaste na barra de pressão do dispositivo de colagem que foi observado após a fabricação do grupo e, posteriormente, reparado. Tal defeito pode ter levado a uma pressão não uniforme do grupo, principalmente de CP indicado. Levando isso em consideração, para as demais condições, pôde-se observar que a junta com o AR300G2 teve maior resistência do que aquela com a adição de 1% de nanopartículas.

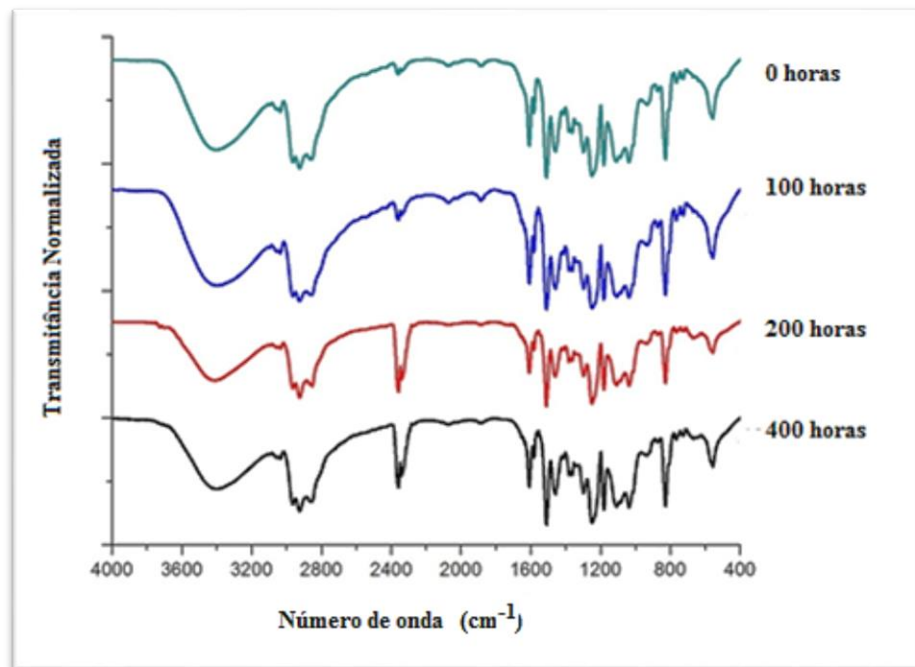


Figura 55. Espectro de absorção molecular por FTIR para adesivo AR300 sem grafeno

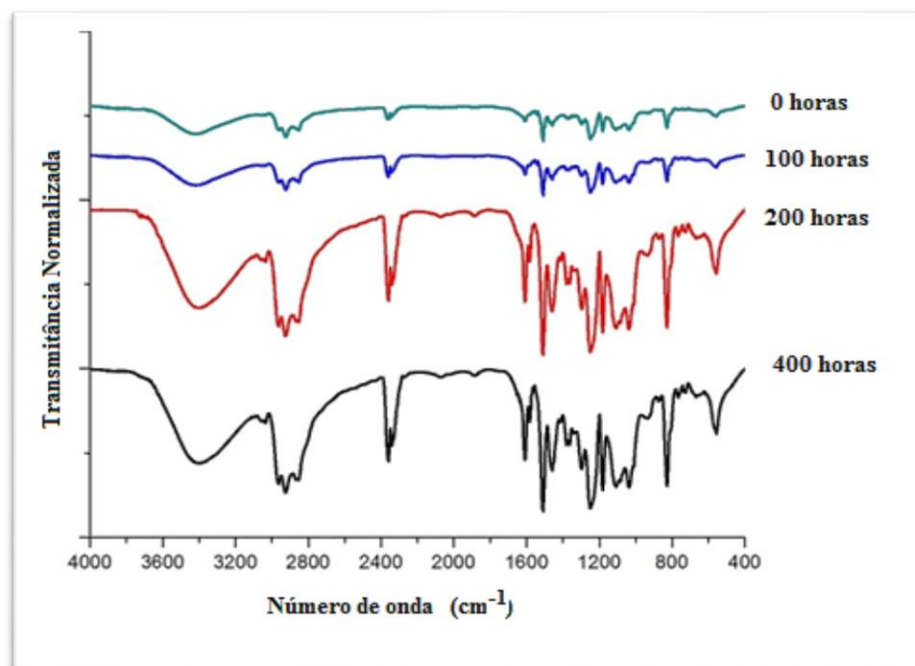


Figura 56. Espectro de absorção molecular por FTIR para AR300G1

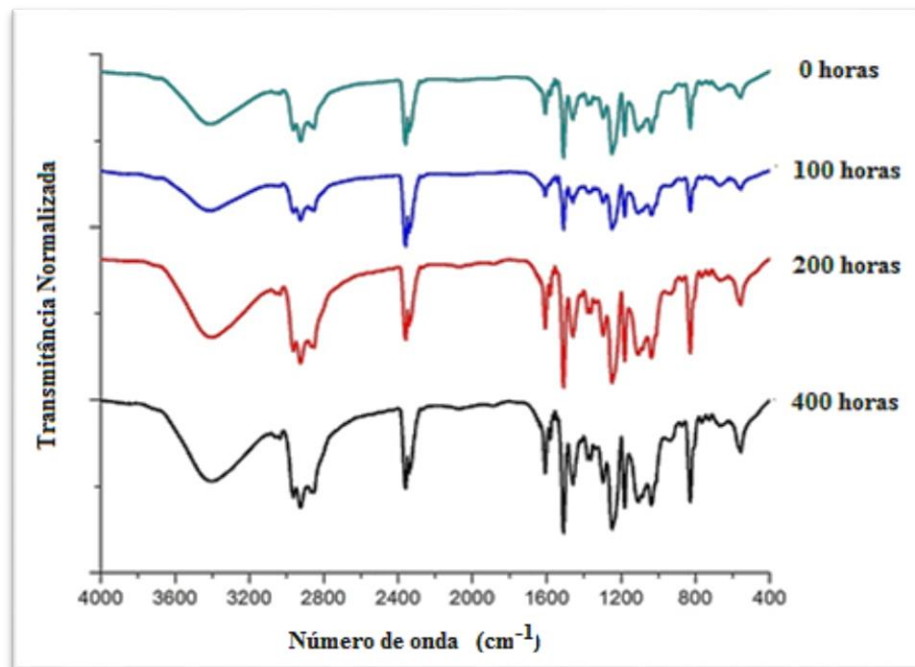


Figura 57. Espectro de absorção molecular por FTIR para AR300G2

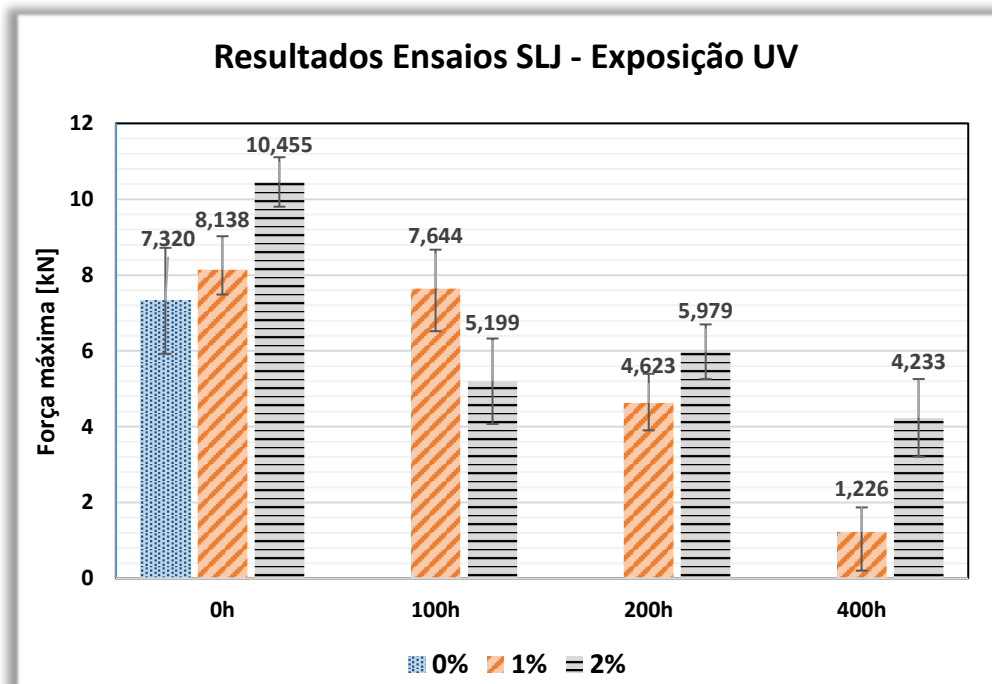


Figura 58. Resistência de juntas SLJ para diferentes concentrações de nanopartículas e diferentes tempos de exposição UV

Tabela 11. Resultados do ensaio SLJ para o grupo de CPs com 2% de grafeno e 100 horas de exposição UV

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Força máx [kN]	6,248	5,916	5,184	5,307	3,341
Tensão @Força máx [MPa]	10,430	10,250	8,550	8,550	5,300

4.3.4. Classificação e quantificação dos modos de falha

Por meio da Tabela 12 tem-se uma visão dos modos de falha medidos nas fractografias dos corpos de prova SLJ envelhecidos por UV e ensaiados. Observa-se que houve uma predominância de falhas mistas, mas que as falhas coesivas são constantes e dominantes nas regiões analisadas. As falhas adesivas dos CPs colados com AR300G1 e expostos à radiação UV por 400h podem justificar a baixa resistência desse grupo, uma vez que tal falha é a menos resistente. Já o elevado valor de resistência das juntas com 1% de grafeno e 100h de exposição UV, em relação as demais juntas envelhecidas, pode ser devido à predominância da falha LFT. Em especial por tais falhas apresentarem uma distribuição dispersa, ou até mesmo lamelar, pela superfície de falha, como mostrado na Figura 59.

4.3.5. Simulações do efeito do envelhecimento do adesivo na distribuição de tensões

Com a degradação da camada superficial exposta à radiação UV e com a formação de microtrincas na mesma região onde observamos picos de tensão de delaminação e cisalhamento, é provável que o processo de envelhecimento esteja diretamente relacionado ao comportamento das juntas *single-lap* quando de sua solicitação. Tais efeitos são simulados como uma microtrinca de 60 μm de comprimento (máxima penetração da degradação por UV segundo Mailhot et al. (2004)) nas seguintes situações: trinca iniciada na interface aderente-adesivo e trinca iniciada no meio da espessura do adesivo. Foram rastreadas as tensões de delaminação e cisalhamento nas direções paralela e perpendicular à sobreposição dos aderentes. É possível perceber na Figura 60 que as tensões ao longo da sobreposição não variam significativamente pela presença da pré trinca, nem com a sua posição.

Tabela 12. Resistência e modos de falha das medições das fratógrafias dos CPs SLJ envelhecidos por UV

CP Id	100h		200h		400h		
	F [kN]	MF	F [kN]	MF	F [kN]	MF	
1%	1	7,569	LFT-COH (80-20)	4,082	COH-LFT (85-15)	1,379	COH-ADH (65-35)
	2	9,263	LFT-COH (65-35)	5,961	COH-LFT (80-20)	1,279	COH-ADH (95-05)
	3	7,578	LFT-COH (75-25)	4,466	COH-LFT (85-15)	2,197	COH-ADH (90-10)
	4	6,415	LFT-COH (75-25)	4,501	COH-LFT (80-20)	0,677	COH-ADH (90-10)
	5	7,395	LFT-COH (80-20)	4,105	COH-LFT (65-35)	0,599	C-A-L (90-5-5)
2%	1	6,248	COH-LFT (70-30)	4,962	COH-LFT (50-50)	6,041	COH-LFT (75-25)
	2	5,916	COH-LFT (95-05)	5,564	LFT-COH (55-45)	4,037	COH-LFT (85-15)
	3	5,184	COH-LFT (55-45)	6,119	COH-LFT (50-50)	3,589	COH-LFT (90-10)
	4	5,307	COH-LFT (50-50)	6,692	COH-LFT (60-40)	3,789	COH-LFT (90-10)
	5	3,341	COH-LFT (65-35)	6,557	COH-LFT (55-45)	3,709	COH-LFT (90-10)

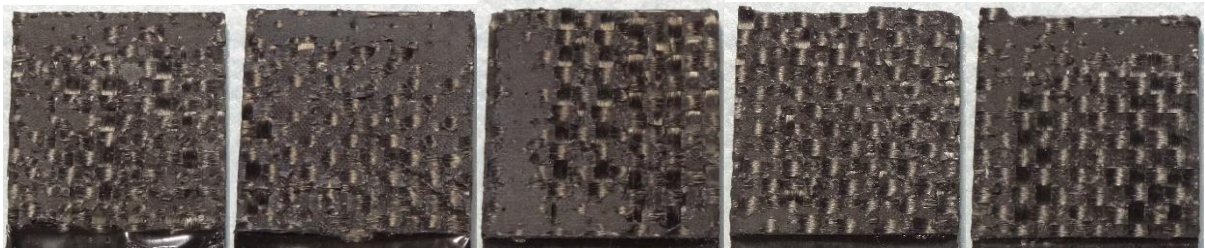


Figura 59. Fratógrafias dos CPs 1% 100h de envelhecimento na ordem de identificação

Da Figura 61 pode-se observar a mudança do ponto de singularidade para a ponta da trinca. A mudança de posicionamento desse pico de tensões pode levar à mudança do início de propagação da trinca que levará a junta ao colapso. Além disso, essa mudança também pode influenciar uma modificação do tipo de falha ou de sua distribuição pela área colada, justificando a predominância de modos de falha misto observado na

Tabela 12. Da Figura 62 e da Figura 63 obtém-se os gradientes de tensão de delaminação e cisalhamento, respectivamente, para o CP de FC com adesivo AR300G2. Observa-se que a diferença entre os gradientes de tensão de cisalhamento dos diferentes adesivos é pequena com relação à diferença dos gradientes de tensão de delaminação. Assim pode-se dizer que a alteração do adesivo tem maior influência nas tensões de delaminação. A Tabela 13 sintetiza os cálculos dos gradientes mostrados nas Figuras 64 e 65. Comparando aquela com a Tabela 9, observa-se que, apesar de haver uma diminuição dos gradientes, as diferenças entre eles são muito próximas. Isso indica que a adição de grafeno ao AR300 não altera a variação dos gradientes de tensão entre os adesivos quando esses são expostos à radiação UV.

É possível, portanto, notar que a degradação UV tem influência na distribuição das tensões no adesivo considerando que microtrincas são formadas no processo de envelhecimento. E sendo o gradiente de tensões influente na determinação dos modos de falha, é possível que este efeito seja o causador do aumento das dispersões dos dados de resistência observados nos ensaios SLJ, bem como na predominância dos modos mistos de falha (COH-LFT) observados.

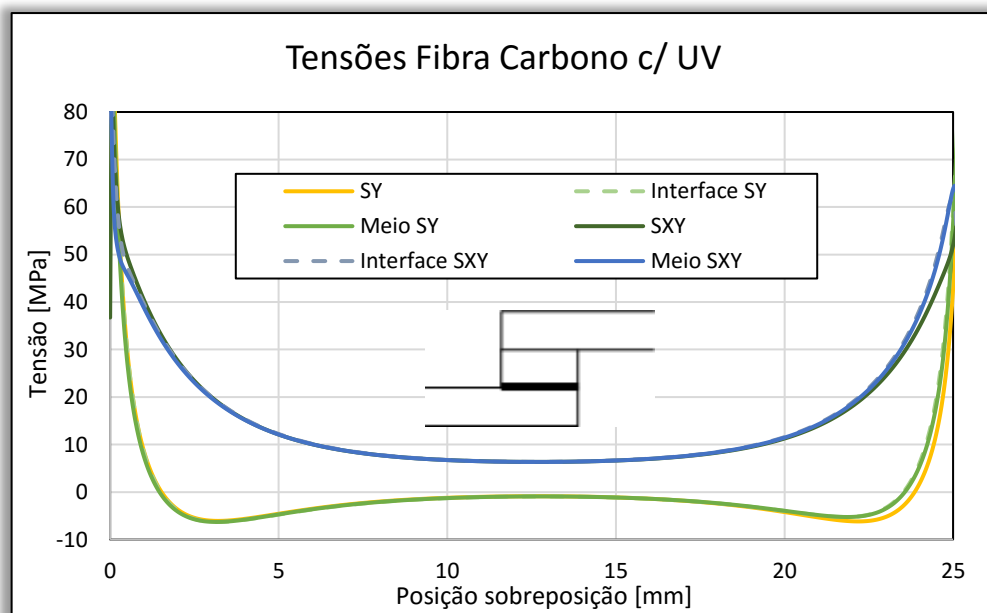


Figura 60. Comparação das tensões ao longo da sobreposição com e sem pré trincas

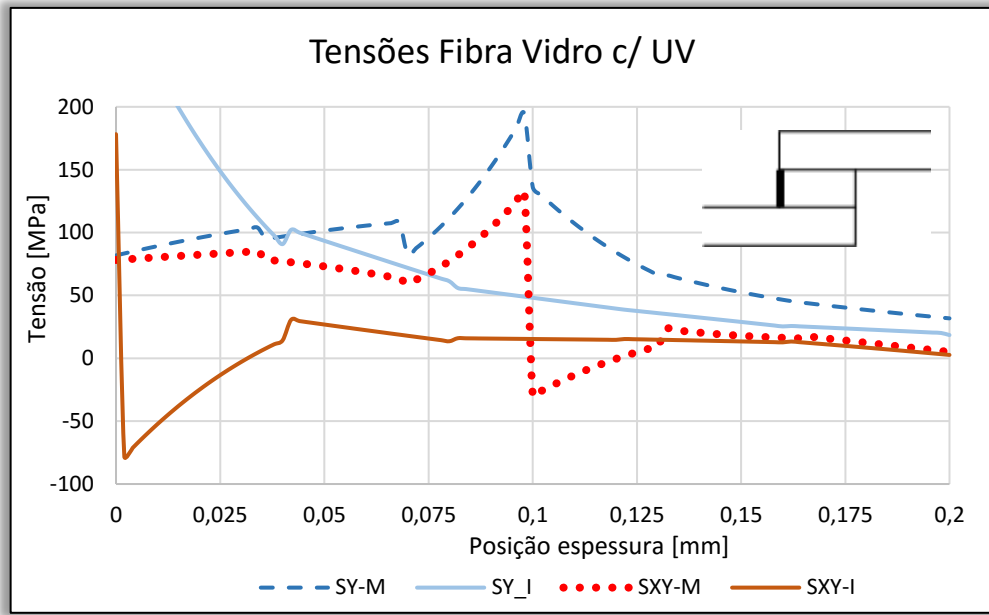


Figura 61. Tensões ao longo da espessura para adesivo com pré-trinca na interface e no meio

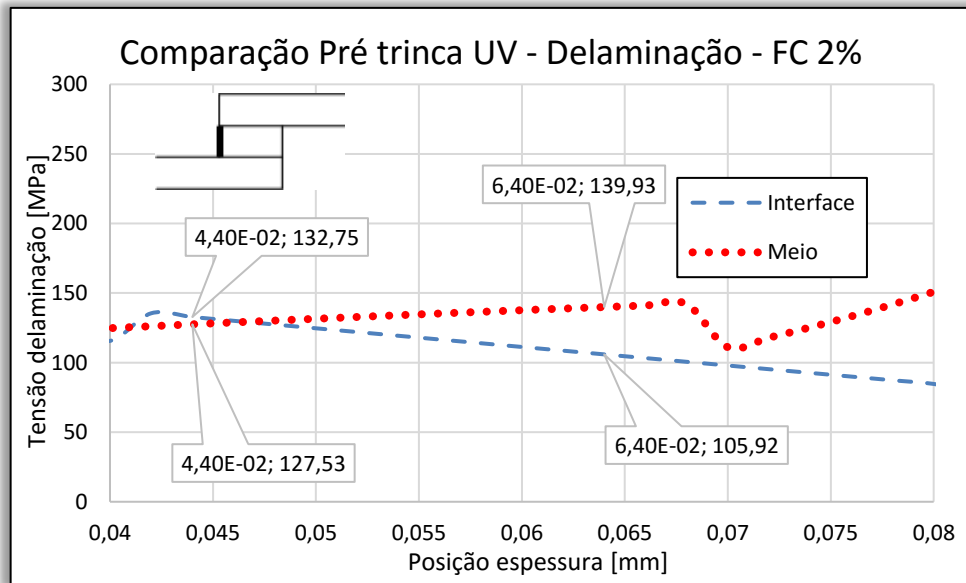


Figura 62. Referências para medições do gradiente das tensões de delaminação para CP de FC e adesivo AR3002G com pré trinca

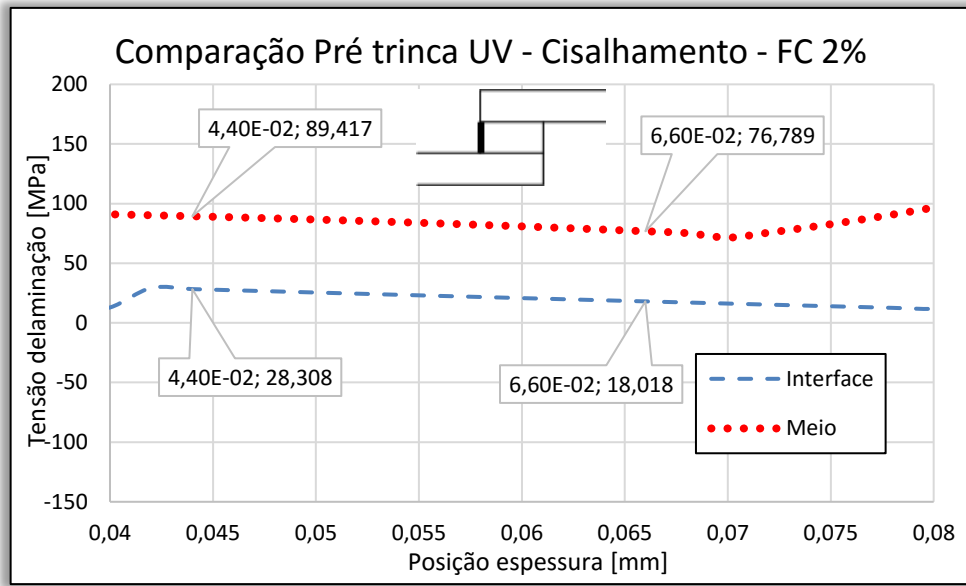


Figura 63. Referências para medições do gradiente das tensões de cisalhamento para CP de FC e adesivo AR3002G com pré trinca

Tabela 13. Módulo dos gradientes de tensão ao longo da espessura dos adesivos com pré trinca

	Módulo dos Gradientes [MPa/mm]			
	S_Y	Diferença	S_{XY}	Diferença
0%	933,71	---	331,23	---
FC 1%	1067,69	133,98 (14,3%)	373,85	42,62 (12,9%)
2%	1335,67	267,97 (25,1%)	461,65	87,81 (23,5%)

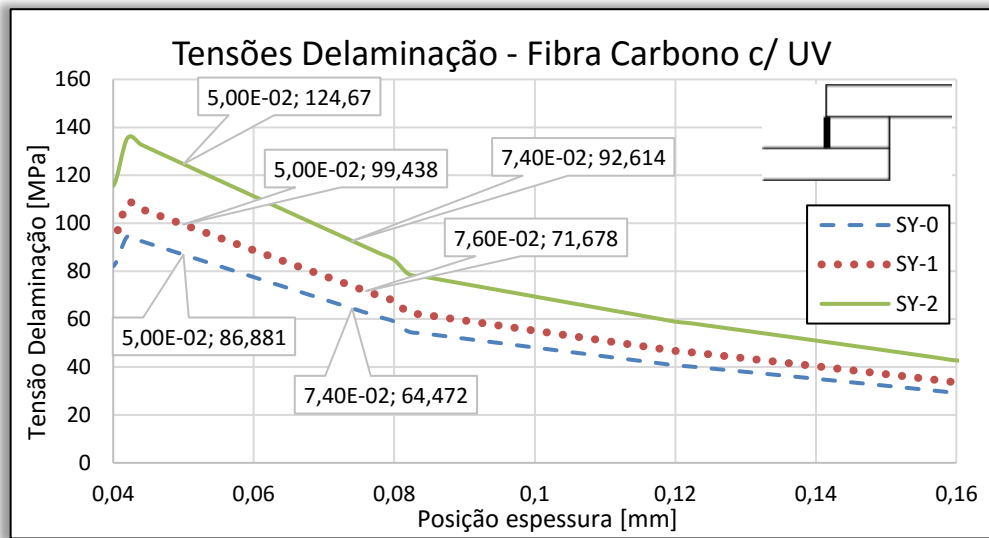


Figura 64. Gradiente das tensões de delaminação para CP de FC e adesivos com pré trinca

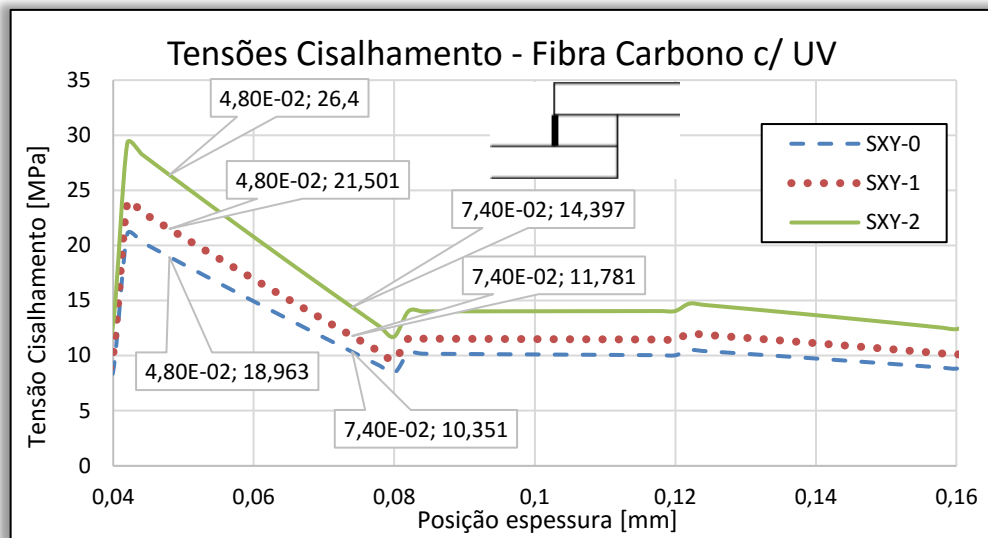


Figura 65. Gradiente das tensões de cisalhamento para CP de FC e adesivos com pré trinca

4.4. Proposta de uma nova junta

Várias são as técnicas propostas para a redução das tensões envolvidas no carregamento de juntas sobrepostas simples (*single-lap*) e para o seu consequente aumento de resistência. Os filetes oriundos do espalhamento do excesso de adesivo para as extremidades da sobreposição (*spew-fillets*) é uma técnica de aumento de resistência muito investigada que não introduz concentradores de tensão na junta.

Reforços de materiais compósitos aplicados à região da junta também é uma técnica para o aumento de resistência que, além de não introduzir concentradores de tensão, permite a divisão da trajetória do carregamento. Dessa forma, propõe-se uma técnica que aumenta a resistência da junta pela combinação das técnicas de *spew-fillet* e de reforços em compósito com uma forma de construção viável comercialmente. Além disso, o reforço em compósito pode servir como uma barreira de proteção contra a degradação ao UV do adesivo propriamente dito.

Simulações numéricas buscam demonstrar a eficácia do método pelo monitoramento das tensões e seus gradientes no adesivo. Ao se comparar os resultados com e sem reforço (Figura 66) observa-se que há uma redução dos valores de tensão máxima, seja ela de delaminação ou de cisalhamento. Esse resultado é, de certa forma, esperado, pois tais métodos aumentam a rigidez da junta à rotação com a introdução do

filete e do reforço em compósito. Isso pode ser evidenciado na Figura 67 com a redução dos ângulos de rotação de diferentes juntas. Os ângulos foram medidos usando um *software* livre de tratamento de imagens e mostram uma redução do ângulo de rotação em 14,8%. Tal alívio de tensões e aumento da rigidez da junta afirmam a eficácia do projeto proposto. No entanto, o método precisa de uma avaliação das influências das técnicas de aumento de resistência que foram integradas na proposta.

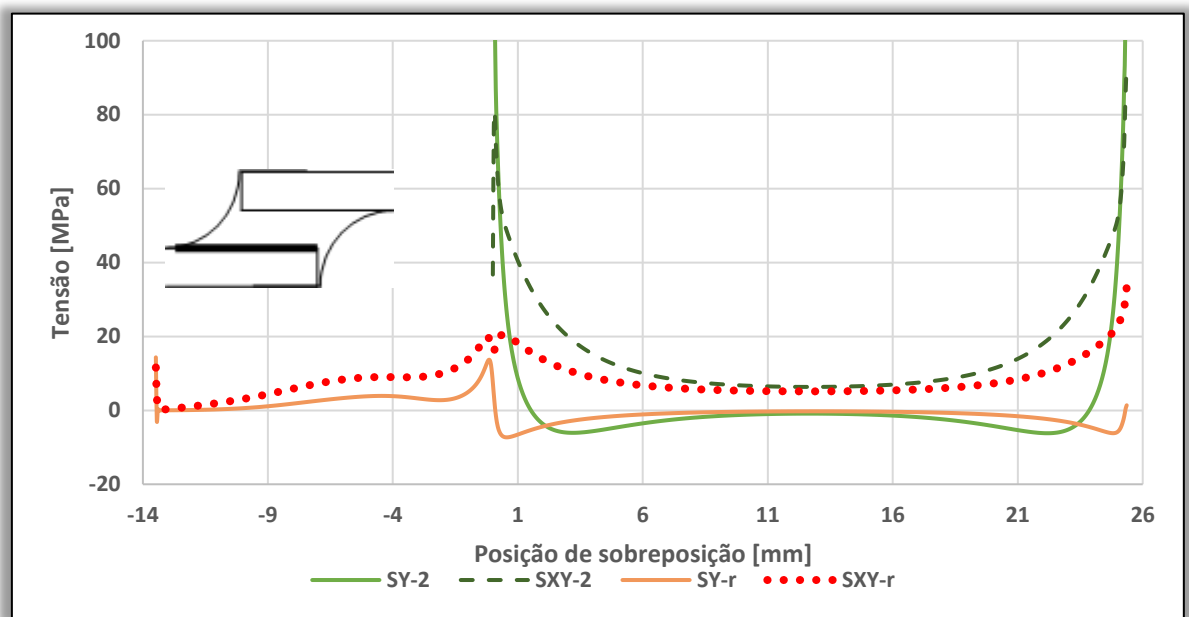
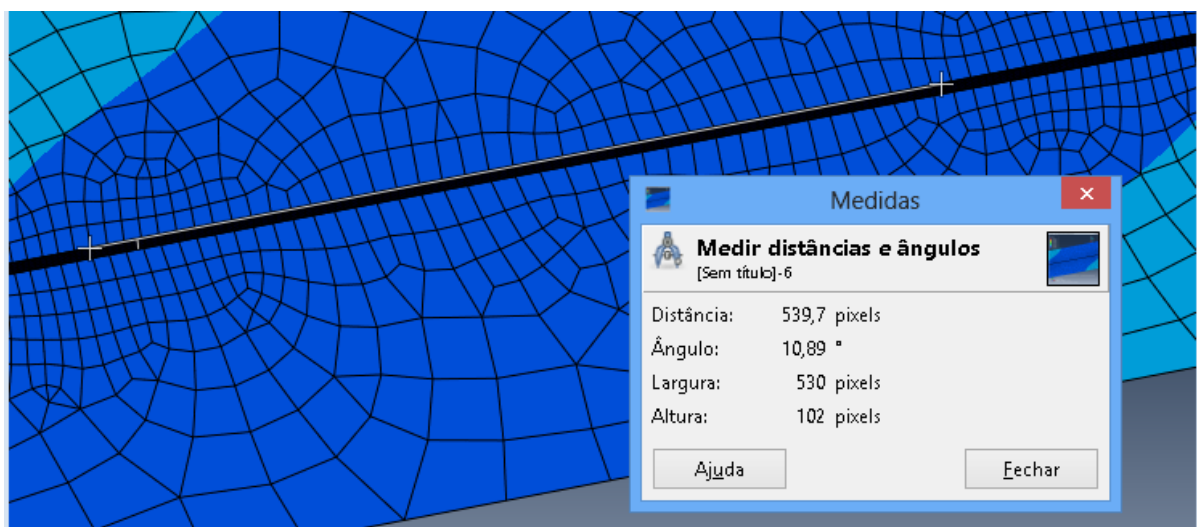
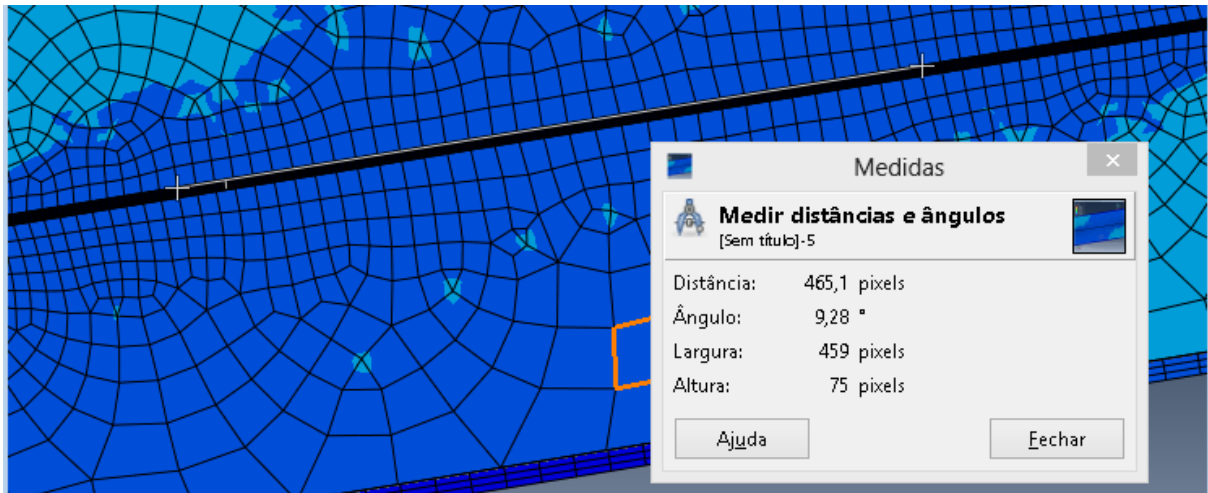


Figura 66. Comparação entre as distribuições das tensões para adesivo AR300G2 em CPs de FC com e sem reforço em compósito



(a)



(b)

Figura 67. Medição do ângulo de rotação da junta (a) com filete com raio de 10 mm e (b) com reforço de compósito e filete de 55 mm de raio.

Lang e Mallick (1998) já fizeram um estudo do efeito da geometria do *spew fillet* na distribuição de tensões do adesivo. Na ocasião, eles mostraram que a geometria de arco circunferencial é a que promove um maior alívio de tensão. No entanto, a forma como o arco foi gerado pelos autores é de difícil fabricação. Eles estipularam valores fixos de comprimento vertical e horizontal de “molhamento” do filete (como mostrado na Figura 68), variando somente o raio do arco. A solução aqui proposta possui uma geometria um pouco diferente por ser idealizada pela sua forma de fabricação. Assim, o comprimento de contato do adesivo com o substrato inferior varia de acordo com o raio do tubo de PVC usado na fabricação.

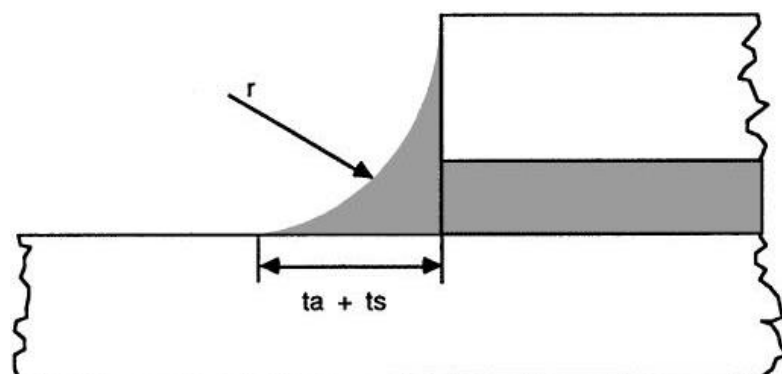


Figura 68. Forma de idealização do arco de filete de Lang e Mallick (1998), onde “ta” é a espessura do adesivo e “ts” do substrato

Um novo estudo sobre a influência dessa geometria no estado de tensões do adesivo foi feito. Como pode ser observado na Figura 69 (a), a variação da tensão de cisalhamento com o aumento do raio do arco parece não existir. No entanto a Figura 69 (b), mostra que a tensão de delaminação tem maior sensibilidade à variação do raio do arco, chegando a uma redução no pico de tensão de aproximadamente 12 % entre os valores de 10 e 55 mm de raio. Portanto, o aumento da resistência da junta por esse método se dá, não pela variação da tensão de cisalhamento, mas pelo alívio da tensão de delaminação. O mesmo comportamento pode ser observado (Figura 70) quando o reforço de compósito é adicionado à estrutura da junta.

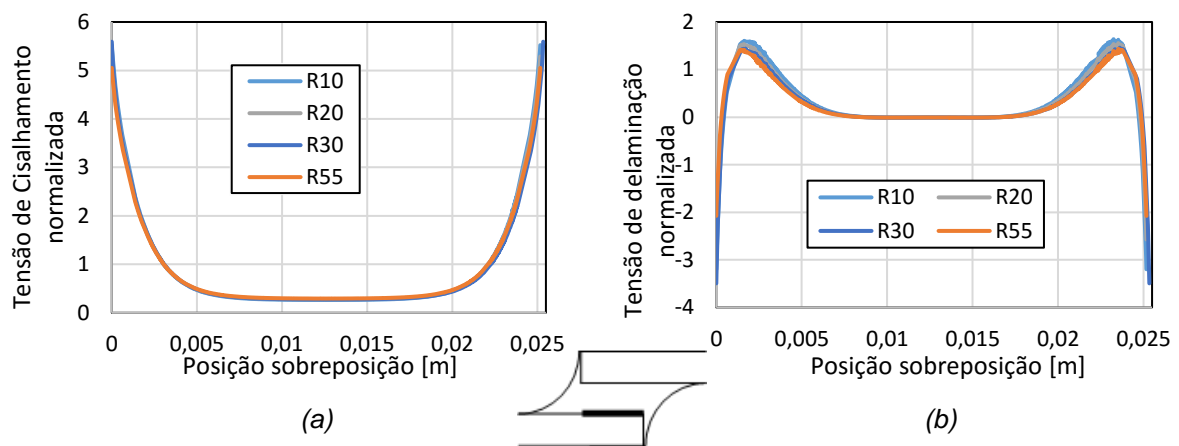


Figura 69. Comparação das tensões (a) de cisalhamento e (b) de delaminação para diferentes raios de curvatura do reforço

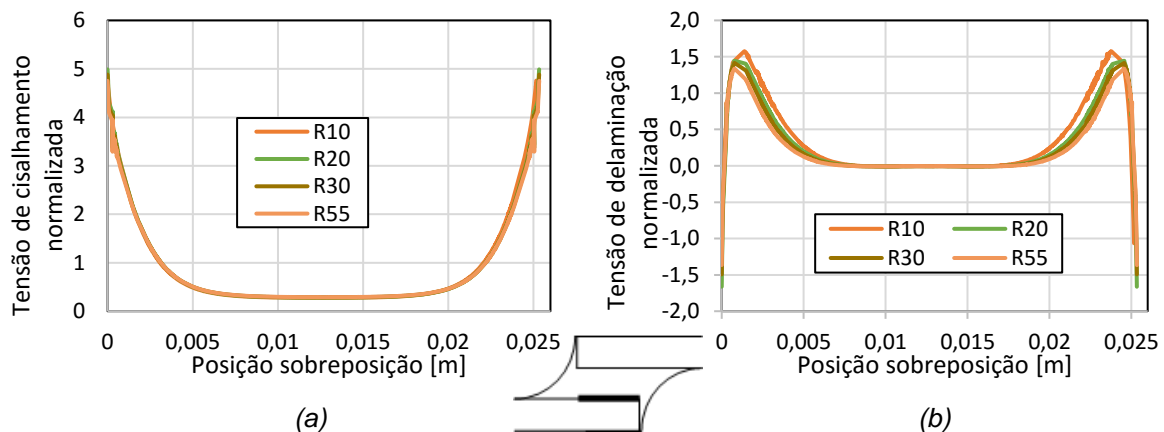


Figura 70. Comparação das tensões (a) de cisalhamento e (b) de delaminação para diferentes raios de curvatura do reforço

Um novo “caminho” para a redistribuição da carga é criado (mostrado na Figura 71) de forma a compensar parte do efeito de rotação da junta e aliviar a tensão de delaminação. Em termos gerais, o alívio da tensão de delaminação dos casos extremos é

de aproximadamente 18%, indo de 1,638 GPa/GPa (no caso da junta com filete de 10 mm de raio) para 1,336 GPa/GPa (caso com reforço de compósito com raio de 55 mm). Podemos observar na Figura 71 que o compósito é solicitado principalmente na região do filete, sendo, portanto, desnecessária a sua colocação por toda a região de sobreposição da junta.

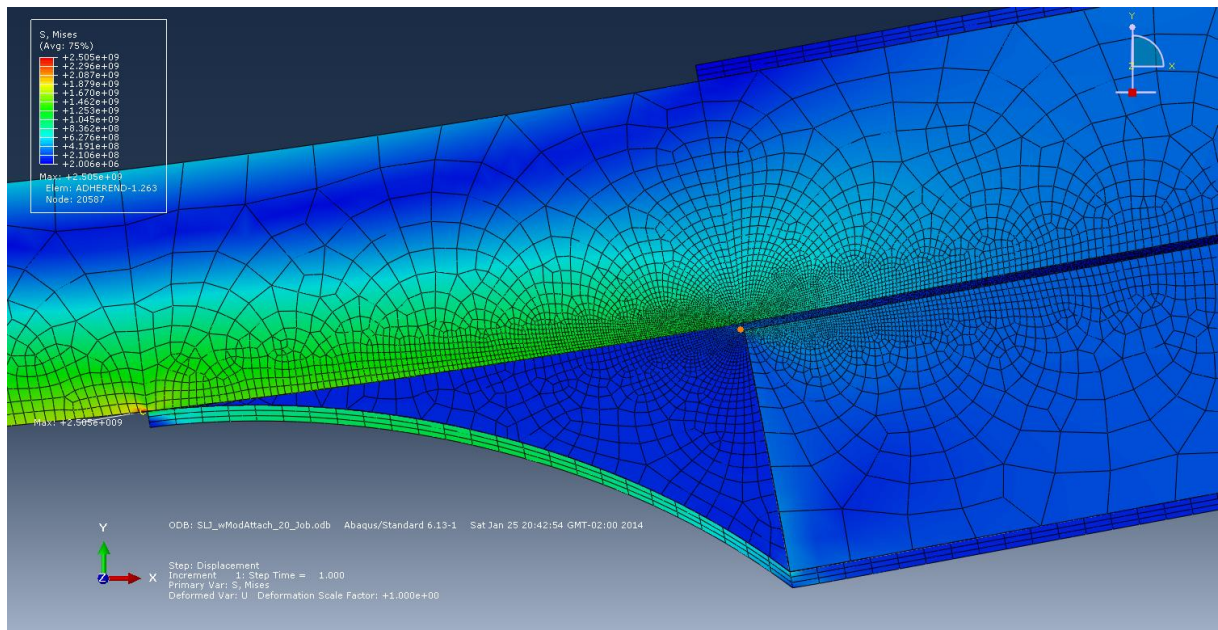


Figura 71. Detalhe da distribuição das tensões de von-Mises na junta sobreposta simples com reforço de compósito

Por meio da análise da Figura 72 observa-se que, apesar das diferenças nos níveis de tensão, os gradientes da tensão de cisalhamento não variam consideravelmente quanto os gradientes da tensão de delaminação. Enquanto o $\nabla S_{XY} = 742,23$ para a junta *single-lap*, $\nabla S_{XYr} = 577,75$ na junta proposta. Já $\nabla S_Y = 1821,79$ na SLJ e $\nabla S_{Yr} = 577,77$ na junta com reforço. Esses resultados corroboram a comprovação da eficácia da junta proposta quanto ao aumento de resistência. Espera-se ainda que a junta com reforço tenha uma maior estabilidade de propagação da trinca, com modos de falha e valores de resistência mais homogêneos. O compósito de reforço também atuará como barreira à radiação ultravioleta para o adesivo. O material do reforço, no entanto não ficará imune a degradação UV.

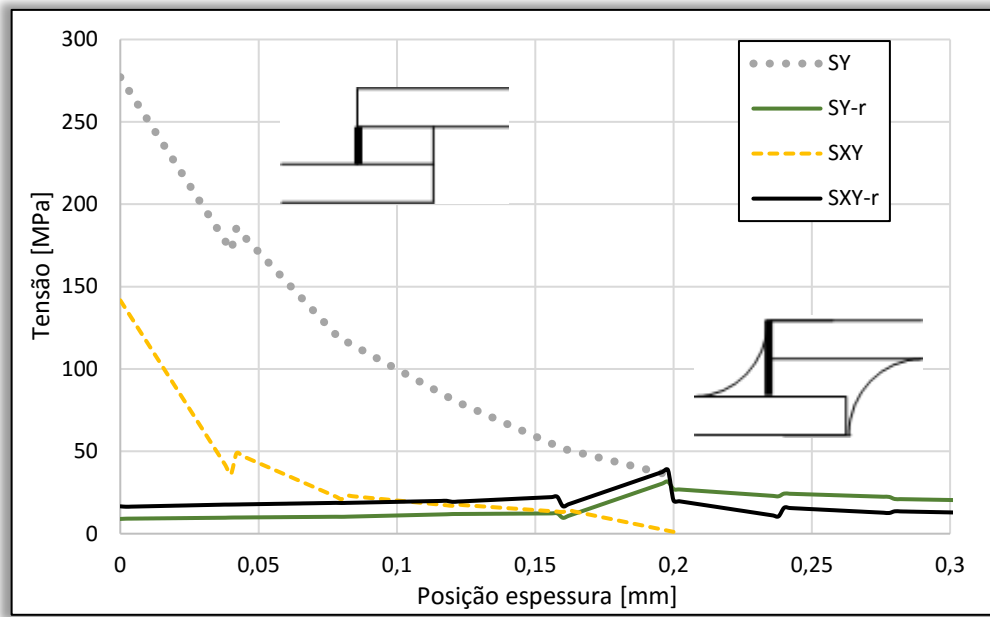


Figura 72. Comparação das tensões ao longo da espessura da junta *single-lap* e da junta proposta, ambas de FC e AR300G2

5. Conclusões

Para que os objetivos propostos pudessem ser atingidos, dois adesivos nanomodificados foram fabricados com êxito. Ambos são nanocompósitos de matriz epóxi, sendo que essa possui baixa viscosidade para melhor dispersar as nanoestruturas aglomerada de grafeno. A baixa variação das curvas dos ensaios de nanoindentação mostra que uma boa dispersão foi obtida. Houve, ainda, um aumento de 4,1% na rigidez e 2,5% na dureza do adesivo com 2% de nanopartículas em relação ao AR300 puro.

As juntas com aderentes em compósito de fibra de vidro apresentaram um aumento de 6% na resistência e 4,2% no deslocamento máximo com o adesivo AR300G1, enquanto as juntas com aderentes em fibra de carbono tiveram um aumento de resistência de 43% e deslocamento máximo de 23%. Foram medidas nas fractografias dos CPs dos ensaios de resistência das juntas, via *software* ImageJ, a proporção dos modos de falha encontrados. Uma mudança dos modos de falha foi identificada e relacionada qualitativamente à adição de nanopartículas ao adesivo. Houve um aumento de 16,7% no gradiente de tensões de delaminação e de 15,9% no gradiente de tensões de cisalhamento das juntas em fibra de vidro com adesivo AR300G1. Houve, ainda, um aumento de 40,2% no gradiente de tensões de delaminação e de 39,2% no gradiente de tensões de cisalhamento das juntas em fibra de carbono com o adesivo AR300G2. Foi estabelecida uma relação qualitativa da relação entre a rigidez do adesivo, do aderente e a variação do gradiente de tensões.

Foram investigados os efeitos da degradação do adesivo via espectroscopia em infravermelho por Transformada de Fourier e por Nanoindentação. Esta última apontou uma diminuição da rigidez de até 31,2% e da dureza de até 43,6% entre as amostras não envelhecidas e as expostas a radiação UV. Entre as amostras, o comportamento das curvas de carregamento de descarregamento mostra uma boa dispersão das nanopartículas bem como uma uniformidade de exposição UV. O adesivo AR300 teve um aumento na rigidez com o aumento do tempo de exposição de aproximadamente 5%. Já os adesivos com grafeno apresentaram diminuições na rigidez para 400h de exposição em relação aos expostos por 100h (-2% para o AR300G1 e -3% para o AR300G2). A dureza reduziu 1,5% para o AR300, 4,1% para o AR300G1 e 7,8% para o AR300G2. O FTIR apontou aumento da banda de estiramento do grupo funcional

epóxi (823 cm^{-1}) com o aumento do tempo de exposição ao UV. As bandas de estiramento do anel aromático (1612 ; 1545 ; 1512 cm^{-1}) reduziram com o tempo de exposição para o adesivo sem nanopartículas e aumentou para os nanomodificados. Os resultados dos ensaios das juntas *single-lap* também mostraram que houve degradação dos adesivos envelhecidos em radiação UV, com uma redução da resistência das juntas de 60% para os adesivos com 2% de nanopartículas. Dentre os grupos expostos, a diminuição da resistência para as juntas com AR300G1 foi de 84,0% e de 29,2% para as juntas com AR300G2. As medições das fractografias mostraram que houve uma predominância de falhas mistas com prevalência das falhas coesivas. Simulações das microtrincas observadas nos adesivos envelhecidos foram feitas. As diferenças observadas entre os gradientes das tensões de delaminação e de cisalhamento para os diferentes adesivos (14,3% de 0-1%, 25,1% de 1-2% para S_Y e 12,9% de 0-1%, 23,5% de 1-2% para S_{XY}) foram próximas às calculadas pelas simulações das juntas sem pré trincas. Uma relação qualitativa da relação entre as distribuições de tensão ao longo da espessura e os modos de falha também foi estabelecida.

Por fim, um novo método de projeto de junta combinando duas técnicas de aumento de resistência de SLJ foi proposto e sua eficácia verificada via simulação numérica por elementos finitos. Tal comprovação se deu pois houve um alívio das tensões no adesivo, devido ao aumento da rigidez à rotação da junta, e da mudança do fluxo de carga, onde parte dela é suportada pelo reforço. A redução do ângulo de rotação da junta foi de 14,8%. Foi verificado que o raio de curvatura do filete tem influência na distribuição das tensões de delaminação. Observou-se uma redução de 18% no pico de tensão de delaminação entre os raios de 10 e 55 *mm*. O método proposto alia a praticidade do processo de fabricação a uma melhor redistribuição das tensões no interior do adesivo. Além disso, o reforço de material compósito pode atuar como barreira de proteção ao envelhecimento do adesivo por UV.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Execução e ampliação do estudo da fratura desenvolvida nos novos adesivos via CScan 3D para posterior quantificação da relação entre os gradientes de tensão e os modos de falha envolvidos nas juntas *single-lap*;
- Fabricação e ensaios experimentais das novas juntas propostas;
- Avaliar o efeito de condições higrotérmicas na degradação dos adesivos e suas juntas;
- Explorar os efeitos da adição de nanopartículas de grafeno na degradação dos adesivos via Ressonância Magnética Nuclear (RMN).

Referências Bibliográficas

Amanco - Produtos - Predial. Disponível em:

<<http://www.amanco.com.br/web/produtos/predial/agua-fria/soldavel/tubo-de-pvc-soldavel/>>. Acesso em: 8 nov. 2013.

ASCIONE, Francesco. The influence of adhesion defects on the collapse of FRP adhesive joints. *Composites Part B: Engineering*, v. 87, p. 291–298, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.033>>.

ASHCROFT, Ian A.; MUBASHAR, Aamir. Numerical Approach: Finite Element Analysis. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 629–660.

ASTM. *D1002-10 - Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. . [S.I.]: ASTM International. , 2010a

ASTM. *D3165-07 - Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading of Single-Lap-Joint Laminated Assemblies*. . [S.I.]: ASTM International. , 2007

ASTM. *D3433-99 - Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. . [S.I.]: ASTM International. , 2012

ASTM. *D5573-99 - Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP)*. . [S.I.]: ASTM International. , 2005

ASTM. *D5868-01 - Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP)*. . [S.I.]: ASTM International. , 2008a

ASTM. *D638-10 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. . [S.I.]: ASTM International. , 2010b

ASTM. *D695-10 - Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. . [S.I.]: ASTM International. , 2010c

ASTM. *D897-08 - Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds*. . [S.I.]: ASTM International. , 2008b

ÁVILA, Antonio Ferreira; YOSHIDA, Maria Irene; *et al.* An investigation on post-fire behavior of hybrid nanocomposites under bending loads. *Composites Part B: Engineering*, v. 41, n. 5, p. 380–387, jul. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135983681000017X>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

ÁVILA, Antonio Ferreira; CARVALHO, Maria Gabriela dos Reis; *et al.* Nano-structured sandwich composites response to low-velocity impact. *Composite Structures*, v. 92, n. 3, p. 745–751, fev. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822309003481>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

ÁVILA, Antonio Ferreira; BUENO, Plínio de Oliveira. Stress analysis on a wavy-lap bonded joint for composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 24, n. 5, p. 407–414, out. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143749603001684>>. Acesso em: 31 jan. 2013.

- ÁVILA, Antonio Ferreira; EDUARDO, Alexandre Carlos; SILVA NETO, Almir. Vibrational analysis of graphene based nanostructures. *Computers & Structures*, v. 89, n. 11-12, p. 878–892, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794911000605>>.
- ÁVILA, Antonio Ferreira; LACERDA, Guilherme Silveira Rachid. Molecular mechanics applied to single-walled carbon nanotubes. *Materials Research*, v. 11, p. 325–333, set. 2008.
- BANEA, Mariana D.; DA SILVA, Lucas Filipe Martins. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, v. 223, n. 1, p. 1–18, jan. 2009. Disponível em: <<http://pil.sagepub.com/content/223/1/1.abstract>>.
- BIGWOOD, D. A.; CROCOMBE, Andrew D. Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 9, n. 4, p. 229–242, out. 1989. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0143749689900663>>.
- BUENO, Plínio de Oliveira. *Análise Comparativa entre Juntas “Single-lap” e “Wavy-lap” de Compósitos Unidas por Adesivos*. 2002. 136 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- BURCHARDT, Bernd. Automotive Industry. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1185–1212.
- CALLISTER, William D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 5th. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- CARVALHO, Maria Gabriela dos Reis. *Desenvolvimento e caracterizações mecânica e térmica de compósitos híbridos com matriz nanoestruturada*. 2009. 120 f. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2009.
- CHEN, Guohua *et al.* PMMA/graphite nanosheets composite and its conducting properties. *European Polymer Journal*, v. 39, n. 12, p. 2329–2335, dez. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0014305703001915>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- CHIVERS, Robin A. Adhesion in Medicine. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- COMYN, John. Theories of Adhesion. In: COGNARD, PHILIPPE (Org.). . *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*. 1st. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2006. p. 1–50.
- CROCOMBE, Andrew D.; ASHCROFT, Ian A. Simple Lap Joint Geometry. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS (Org.). . *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 3–23.
- CRUZ, Diego Thadeu Lopes Da. *Efeito da exposição a luz ultravioleta em adesivo nanomodificado por grafeno*. 2013. 92 f. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- DA SILVA, Lucas Filipe Martins. Design Rules and Methods to Improve Joint Strength. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg:

Springer Heidelberg, 2011. p. 689–723.

DA SILVA, Lucas Filipe Martins; CAMPILHO, Raul D. S. G. *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-642-23608-2>>. (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology).

DA SILVA, Lucas Filipe Martins; ÖCHSNER, Andreas (Org.). *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-3-540-79056-3>>. Acesso em: 15 out. 2013.

DANIEL, Isaac M.; FENNER, Joel S. Hybrid Nano/Microcomposites for Enhanced Damage Tolerance. In: PROULX, TOM (Org.). *Experimental and Applied Mechanics, Volume 6*. 1st. ed. New York: Springer New York, 2011. p. 259–265. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-0222-0_32>.

DANIEL, Isaac M.; ISHAI, Ori. *Engineering Mechanics of Composite Materials*. 1st. ed. New York: Oxford University Press, 1994.

DAVIES, Peter. Marine Industry. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.

DEBELAK, Bryan; LAFDI, Khalid. Use of exfoliated graphite filler to enhance polymer physical properties. *Carbon*, v. 45, n. 9, p. 1727–1734, ago. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622307002138>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

FESSEL, G *et al.* Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 27, n. 7, p. 574–583, out. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749606001242>>.

FIEDLER, Bodo *et al.* Fundamental aspects of nano-reinforced composites. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 16, p. 3115–3125, dez. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353805002575>>.

GAY, Daniel; HOA, Suong V.; TSAI, Stephen W. *Composite Materials: Design and Applications*. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

GOJNY, Florian H. *et al.* Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study. *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 15-16, p. 2300–2313, 2005.

GÜLTEKIN, Kürşat *et al.* The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, v. 98, p. 362–369, 2016. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836816307028>>.

HAGHPANAH, Babak; CHIU, Shihung; VAZIRI, Ashkan. Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 48, n. 0, p. 130–138, jan. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749613001796>>.

HARRIS, Peter John Frederich. *Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications*. 1st. ed. New York: Cambridge University Press, 2009.

HART-SMITH, L. J. Adhesively Bonded Joints in Aircraft Structures. In: DA SILVA,

- LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1103–1147.
- HARTUNG, Ilko; BOEHM, Stefan. Civil Construction. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- HUNTSMAN. *Multi-purpose resin: Araldite M with HY 956 or HY 5162 Low viscosity - unfilled epoxy systems*. , nº Publication No. T 163 b GB. [S.l.: s.n.], 2000.
- HUSSAIN, F. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. *Journal of Composite Materials*, v. 40, n. 17, p. 1511–1575, 9 jan. 2006. Disponível em: <<http://jcm.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0021998306067321>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- IJIMA, Sumio. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature*, Owner: Almir Silva Neto Added to JabRef: 2012.11.12, v. 354, p. 56–58, nov. 1991.
- JONES, Robert M. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd. ed. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999. (Materials Science and Engineering Series).
- KALAITZIDOU, Kyriaki; FUKUSHIMA, Hiroyuki; DRZAL, Lawrence T. Mechanical properties and morphological characterization of exfoliated graphite–polypropylene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 7, p. 1675–1682, jul. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X07000292>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- KAW, Autar K. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. (Mechanical and Aerospace Engineering Series).
- KAWAI, M.; TANIGUCHI, T. Off-axis fatigue behavior of plain weave carbon/epoxy fabric laminates at room and high temperatures and its mechanical modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 37, n. 2, p. 243–256, 2006.
- KOO, Joseph H. *Polymer Nanocomposites: Processing, Characterization, And Applications*. 1st. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- KOTOV, Nicholas A. Carbon sheet solutions. *Nature*, v. 442, n. 7100, p. 254–255, 11 ago. 2006.
- KRUZIC, J J *et al.* Indentation techniques for evaluating the fracture toughness of biomaterials and hard tissues. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, v. 2, n. 4, p. 384–95, ago. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.10.008>>.
- LANG, T P; MALLICK, P K. Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 18, n. 3, p. 167–177, jun. 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749697000560>>.
- LI, Hui *et al.* The reinforcement efficiency of carbon nanotubes/shape memory polymer nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, Owner: Almir Silva Neto Added to JabRef: 2012.11.19, v. 44, n. 1, p. 508–516, jan. 2013.

- LI, Jing *et al.* Morphology and properties of UV/ozone treated graphite nanoplatelet/epoxy nanocomposites. *Composites Science and Technology*, v. 67, n. 2, p. 296–305, fev. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353806002958>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- LOMOV, Stepan V. *et al.* A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites. Part 2: Comprehensive experimental results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 40, n. 8, p. 1144–1157, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.03.012>>.
- MAI, Yiu-Wing; YU, Zhong-Zhen (Org.). *Polymer nanocomposites*. Abinton: Woodhead Publishing Limited, 2006. Disponível em: <<http://woodhead.metapress.com/openurl.asp?genre=issue&id=doi:10.1533/9781845691127>>. Acesso em: 2 maio 2013.
- MAILHOT, Bénédicte *et al.* Depth Profiling by AFM Nanoindentations and Micro-FTIR Spectroscopy for the Study of Polymer Ageing. *Macromolecular Rapid Communications*, v. 25, n. 2, p. 436–440, jan. 2004. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/marc.200300110>>. Acesso em: 12 mar. 2013.
- MAZUMDAR, Sanjay. *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- MENDONÇA, Paulo de Tarso R. *Materiais Compostos e Estruturas-Sanduíche*. 1st. ed. Barueri: Editora Manole, 2005.
- MOULDS, Richard J. Design and Stress Calculations for Bonded Joints. In: COGNARD, PHILIPPE (Org.). *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*. 1st. ed. Oxford: Elsevier Ltd, 2006. p. 197–231.
- MUNGROO, Rubeena *et al.* Epoxidation of Canola Oil with Hydrogen Peroxide Catalyzed by Acidic Ion Exchange Resin. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Owner: Almir Silva Neto Added to JabRef: 2012.11.05, v. 85, p. 887–896, 2008.
- NASSEH, Jorge. *Manual de Construção de Barcos*. 1st. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2000.
- NASSEH, Jorge. *Métodos Avançados de Construção em Composites*. 1st. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Composites, 2007.
- NGONO, Yvette; MARÉCHAL, Yves. Epoxy-amine reticulates observed by infrared spectrometry. II. Modifications of structure and of hydration abilities after irradiation in a dry atmosphere. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 38, n. 2, p. 329–340, 15 jan. 2000. Disponível em: <[http://doi.wiley.com/10.1002/\(SICI\)1099-0488\(20000115\)38:2<329::AID-POLB5>3.0.CO;2-T](http://doi.wiley.com/10.1002/(SICI)1099-0488(20000115)38:2<329::AID-POLB5>3.0.CO;2-T)>.
- OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, v. 7, n. 6, p. 1564–1583, 1992.
- OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, v. 19, n. 01, p. 3–20, 3 mar. 2004. Disponível em: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0884291400085800>.

- OYEN, Michelle L.; COOK, Robert F. A practical guide for analysis of nanoindentation data. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 2, n. 4, p. 396–407, ago. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.10.002>>.
- PAPON, Eric. Adhesive Families. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- PEREIRA, Gláucio Carley. *Nanocompósitos híbridos modificados com nanotubos de carbono: síntese e caracterização*. 2013. Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- QIAN, D *et al.* Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites. *Applied Physics Letters*, v. 2868, n. 2000, p. 4–7, 2000. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?APPLAB/76/2868/1>>.
- SANCAKTAR, Erol. Classification of Adhesive and Sealant Materials. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- SILVA NETO, Almir. *Desenvolvimento de um Adesivo Nanomodificado por Grafeno*. 2011. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG<p>Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8NWH5T>>.
- STANKOVICH, Sasha *et al.* Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon*, v. 45, n. 7, p. 1558–1565, jun. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008622307000917>>. Acesso em: 10 fev. 2013.
- STEIN, Itai Y.; WARDLE, Brian L. Mechanics of aligned carbon nanotube polymer matrix nanocomposites simulated via stochastic three-dimensional morphology. *Nanotechnology*, v. 27, n. 3, p. 035701, 22 jan. 2016. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-4484/27/i=3/a=035701?key=crossref.7d9ee58608e8e9acc0191bd3cfd7820b>>.
- SUÁREZ, Juan C. Bioadhesives. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- TAYLOR, Ambrose C. Adhesives with Nanoparticles. In: DA SILVA, LUCAS FILIPE MARTINS; ÖCHSNER, ANDREAS; ADAMS, ROBERT D. (Org.). . *Handbook of Adhesion Technology*. 1st. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Heidelberg, 2011. p. 1543.
- THOSTENSON, Erik T.; LI, Chunyu; CHOU, Tsu-Wei. Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, v. 65, n. 3-4, p. 491–516, mar. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353804003008>>. Acesso em: 30 jan. 2013.
- TURAGA, Umamaheswar V. R. S.; SUN, Chin-Teh. Improved Design for Metallic and Composite Single-Lap Joints. *Journal of Aircraft*, v. 45, n. 2, p. 440–447, mar. 2008. Disponível em: <<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.28934>>. Acesso em: 14 mar. 2013.
- VAN INGEN, J. W.; VLOT, A. *Stress Analysis of Adhesively Bonded Single Lap*

Joints. . Delft: [s.n.], 1993.

VELMURUGAN, R.; MOHAN, T.P. Epoxy-Clay Nanocomposites and Hybrids: Synthesis and Characterization. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 28, n. 1, p. 17–37, 18 jul. 2008. Disponível em: <<http://jrp.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0731684407081439>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

VICULIS, Lisa M. *et al.* Intercalation and exfoliation routes to graphite nanoplatelets. *Journal of Materials Chemistry*, v. 15, n. 9, p. 974, 2005. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=b413029d>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

WAHAB, Magd Abdel. *The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints: Finite Element Analysis with ANSYS*. 1st. ed. Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2014.

WEI, Tong *et al.* Dispersibility and stability improvement of graphite nanoplatelets in organic solvent by assistance of dispersant and resin. *Materials Research Bulletin*, v. 44, n. 5, p. 977–983, maio 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025540808004108>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

YASMIN, Asma; DANIEL, Isaac M. Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites. *Polymer*, v. 45, n. 24, p. 8211–8219, nov. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032386104009279>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

YASMIN, Asma; LUO, Jyi-Jiin; DANIEL, Isaac M. Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocomposites. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 9, p. 1182–1189, jul. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353805003830>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

ZARE, Yasser *et al.* An analysis of interfacial adhesion in nanocomposites from recycled polymers. *Computational Materials Science*, v. 81, p. 612–616, jan. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.08.041>>.

ZARE, Yasser. Determination of polymer–nanoparticles interfacial adhesion and its role in shape memory behavior of shape memory polymer nanocomposites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 54, p. 67–71, out. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.05.004>>.

ZARE, Yasser. Modeling of tensile modulus in polymer/carbon nanotubes (CNT) nanocomposites. *Synthetic Metals*, v. 202, p. 68–72, 2015.

ZARE, Yasser; GARMABI, Hamid. Modeling of interfacial bonding between two nanofillers (montmorillonite and CaCO₃) and a polymer matrix (PP) in a ternary polymer nanocomposite. *Applied Surface Science*, v. 321, p. 219–225, dez. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.156>>.

ZHU, Jiang *et al.* Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength. *Composites Science and Technology*, v. 67, n. 7-8, p. 1509–1517, 2007.

ZIENKIEWICZ, Olgierd Cecil; TAYLOR, Robert Leroy. *The Finite Element Method Fifth edition Volume 1 : The Basis*. 5th. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000. v. 1.

Apêndice 1. Publicações do autor no período de qualificação

Como resultado do trabalho no grupo de pesquisa coordenado pelo professor Antônio Ferreira Ávila ao longo do doutorado, foram produzidos:

- Um pedido de patente:
 - *Processo de obtenção de resina polimérica estrutural modificada por nanoestruturas de carbono: produto e uso.* Pedido de Patente protocolado no INPI sob registro **BR 10 2014 008543-2**, divulgado na **Revista da Propriedade Industrial (RPI)** 2295 de 31/12/2014;
- Um capítulo de livro:
 - *Thermo-mechanical Characterization of Graphene Based Hybrid Nanocomposites*, publicado no livro ***Nanocomposites: Second volume in the American Society for Composites' Series on Advances in Composite Materials***;
- Dois artigos em periódicos internacionais:
 - *Bending investigation on carbon fiber/epoxy composites nano-modified by graphene*, publicado no ***Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering***;
 - *Nano-modified adhesive by graphene: the single lap-joint case*, publicado no ***Materials Research***;
- E três artigos apresentados em congressos internacionais:
 - *Nano-Modified Adhesives by Graphene: The Effect Ageing Investigation*, apresentado no ***54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference***;
 - *New Design to Improve Single-Lap Joint Strength*, apresentado no ***Fifth International Symposium on Solid Mechanics***;
 - *Novel Bonded Joint Design with Improved Load Capacity: The spew-fillet with attachments approach*, apresentado no ***Meeting on Aeronautical Composite Materials and Structures – MACMS 2015***.

Apêndice 2. Script para realização de ensaio DCB

```

>>>>> Programa Tesc
>>>>> Método FraturaComPreTrinca100kgf
1 >>>Mensagens
2 FC -> FIM DE CURSO ATINGIDO ENSAIO ABORTADO.
3 LF -> LIMITE DE FORÇA ATINGIDO ENSAIO ABORTADO.
4 EF -> ENSAIO FINALIZADO
5
6 >>> Parametros
7 a0 -> "a0", 0,0 mm, Ent, Rel, Edi
8 h -> "h esp", 0,00 mm, Ent, Rel, Edi
9 b -> "b larg", 0,00 mm, Ent, Rel, Edi
10 t -> "t", 0,00 mm, Ent, Rel, Edi
11 Fix -> "Fixacao", "", Ent, Rel, Edi
12
13 >>> Comandos
14 SALVAR_POSIÇÃO_INICIAL( )
15 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 90,00 kgf )
16 ATIVAR_LIMITE_DEFORM( 250,0 mm )
17 SUBIR_COM_VELOC_CONST( 1,000 mm/min )
18 AGUARDAR_CHEGADA( )
19
20 EM_TECLA_F( 3,000 )
21 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
22 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 5,000 N ) Inv
23 DESCER_COM_VELOC_CONST( 25,00 mm/min )
24 AGUARDAR_CHEGADA( )
25
26 EM_LIMITE_FORÇA( )
27 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
28 BIP( 0,0000 )
29 AGUARDAR( 60,00 min )
30
31 EM_TECLA_F( 2,000 )
32 ATIVAR_LIMITE_FORÇA( 90,00 kgf )
33 ATIVAR_DET_RUPTURA( 0,0000 )
34 SUBIR_COM_VELOC_CONST( 1,000 mm/min )
35 AGUARDAR_CHEGADA( )
36 BIP( 0,0000 )
37 DISPARAR_MENSAGEM( FC; 20,00 s )
38 FINALIZAR_ENSAIO( )
39
40 EM_LIMITE_FORÇA( )
41 PARAR_ABRUPTAMENTE( )
42 BIP( 0,0000 )
43 DISPARAR_MENSAGEM( LF; 0,0000 s )
44 FINALIZAR_ENSAIO( )
45
46 EM_RUPTURA/COLAPSO( )
47 PARAR_SUAVEMENTE( )
48 BIP( 0,0000 )
49 DISPARAR_MENSAGEM( EF; 20,00 s )
50 FINALIZAR_ENSAIO( )

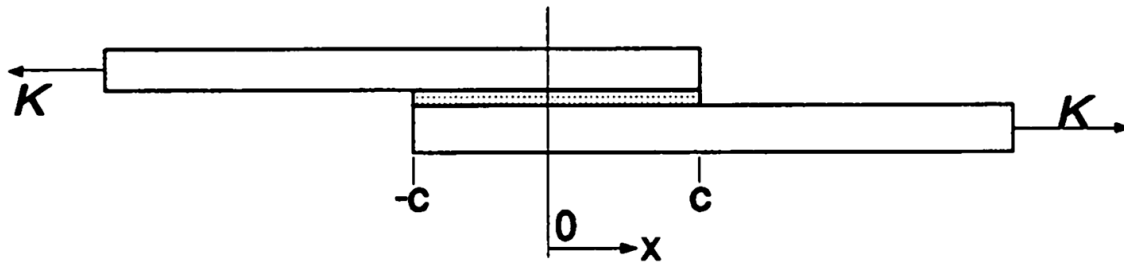
```

***Anexo 1. Exemplos de Programas para Cálculo Analítico
das Tensões em Juntas Single-Lap***

Appendix 1: MATHCAD document Goland and Reissner

(This program is also available on disk)

Geometry:



Input variables:

c	Half the overlap length
b	Width of the joint
t	Thickness of the adherends
E	Young's modulus of the adherends
ν	Poisson's ratio of the adherends
d	Thickness of the adhesive
G_a	Shear modulus of the adhesive
E_a	Young's modulus of the adhesive
K	Applied force

$$p := \frac{P}{t} \quad \text{Average tensile stress [N/mm}^2\text{]}$$

$$\tau_{av} := \frac{K}{2 \cdot c \cdot b} \quad \text{Average shear stress in the adhesive [N/mm}^2\text{]}$$

2. Calculation of the bending moment factor k

$$u2c := \sqrt{3 \cdot \frac{1 - \nu^2}{2} \cdot \frac{c}{t} \cdot \sqrt{\frac{p}{E}}} \quad \text{Variable needed for k-factor}$$

$$k := \frac{1}{1 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tanh(u2c)} \quad \text{k-factor}$$

The bending moment factor for this case is: $k = 0.608$

3. Solution of the differential equations.

- Variable needed in the formula for the shear stress:

$$\delta := \sqrt{8 \cdot \frac{G a t}{E d}}$$

- Variables needed in the formula for the normal stress:

$$y := \sqrt{6 \cdot \frac{E a t}{E d}}$$

and from this: $\lambda := y \cdot \frac{c}{t}$ (λ is in radians so no conversion is needed for calculation of $\sin(\lambda)$ or $\cos(\lambda)$ since mathcad uses radians.)

$$A := \frac{1}{2} \cdot (\sinh(2 \cdot \lambda) + \sin(2 \cdot \lambda))$$

$$R1 := \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda)$$

$$R2 := \sinh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \cdot \sin(\lambda)$$

$$H := \frac{1}{\lambda} \cdot \left[\frac{t}{c} \right]^2 \cdot p$$

$$k' := k \cdot \frac{c}{t} \cdot \sqrt{3 \cdot [1 - \nu^2] \cdot \frac{p}{E}}$$

- The solution for the shear stress $\tau(m)$ [N/mm²] (where $m=x/c$) now becomes for $m=0$ (middle of the joint) to $m=1$ (joint edge):

$m := 0, 0.01 \dots 1$ (increment 0.01)

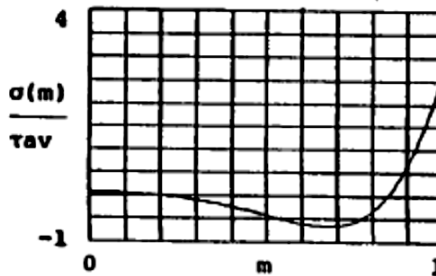
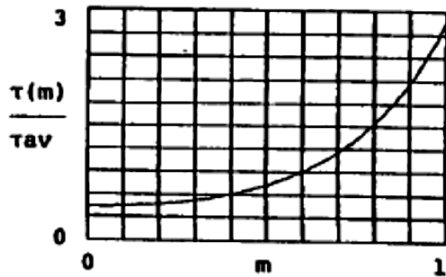
$$\tau(m) := \left[\frac{B \cdot c}{t} \cdot (1 + 3 \cdot k) \cdot \frac{\cosh\left[\frac{B}{c} \cdot m\right]}{\sinh\left[\frac{B \cdot c}{t}\right]} + 3 \cdot (1 - k) \right] \cdot p \cdot \frac{t}{8 \cdot c}$$

- And the adhesive normal stress $\sigma(m)$ [N/mm²] is:

$$\sigma(m) := H \cdot \left[\begin{aligned} & \left[R2 \cdot \lambda \cdot \frac{2k}{2} - \lambda \cdot k' \cdot \cosh(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \right] \cdot \cosh(\lambda \cdot m) \cdot \cos(\lambda \cdot m) \dots \\ & + \left[R1 \cdot \lambda \cdot \frac{2k}{2} - \lambda \cdot k' \cdot \sinh(\lambda) \cdot \sin(\lambda) \right] \cdot \sinh(\lambda \cdot m) \cdot \sin(\lambda \cdot m) \end{aligned} \right]$$

4. The results

The non dimensional stresses are plotted below against the parameter $m=x/c$:



Maximum shear stress at joint edge: $\tau(1) = 66.246$ [N/mm²]
 Maximum normal stress at joint edge: $\sigma(1) = 62.284$ [N/mm²]

Average shear stress in the adhesive: $\tau_{av} = 23.25$ [N/mm²]
 Tensile stress in the adherends: $p = 184.547$ [N/mm²]

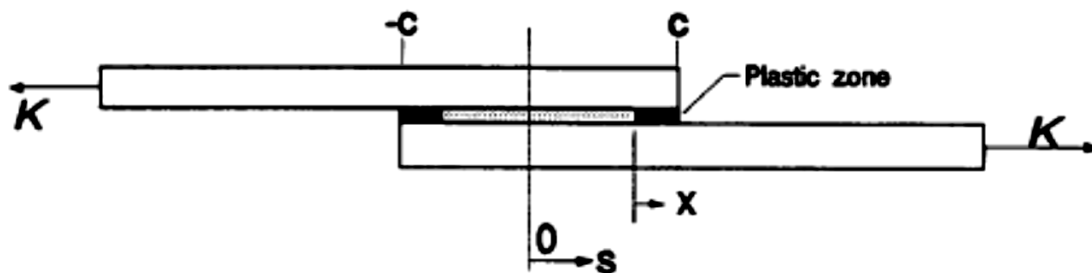
The shear stress concentration at the joint edge: $\frac{\tau(1)}{\tau_{av}} = 2.849$

The normal stress concentration at the joint edge: $\sigma(1)$

Appendix 2: MATHCAD document Hart-Smith

(This program is also available on disk)

Geometry:



Input variables:

c	Half the overlap length
b	Width of the joint
t	Thickness of the adherends
E	Young's modulus of the adherends
ν	Poisson's ratio of the adherends
d	Thickness of the adhesive
G_a	Shear modulus of the adhesive
E_a	Young's modulus of the adhesive
τ_p	Shear stress in plastic region
γ_p/γ_e	Ratio of the maximum plastic and elastic shear strain of the adhesive
K	Applied force

Mathcad document: HARTSMTH.MCD

Elastic-Plastic calculation of the adhesive shear -and normal stress
in a single lap joint according to:

Adhesive bonded single-lap joints.

Technical report NASA CR 112236

L.J. Hart-Smith

Remarks:

- Adhesive is assumed to be elastic plastic in the derivation of the shear stress only.
- In Hart-Smith's report the optimal joint parameters are determined from the boundary condition: the shear strain at the joint edge is the maximum possible shear strain. This is a failure criterion with which the maximum strength of the joint can be determined by means of an iterative process.
This is not done here; the present calculation gives the stress distribution for given joint parameters and loads.
The shear strain at the joint edge is therefore not necessarily equal to the maximum possible shear strain.
- The shear stress distribution has been checked against figures 9 to 14 (page 79 to 85) of the report and found to be correct. (This can only be done if the joint parameters are chosen so that the joint is optimal i.e. the shear strain at the joint edge is the maximum possible shear strain.)
- The differential equation governing the normal stress is the same as with Goland and Reissner. However because of the different boundary conditions the results are not the same.
- The normal stress is checked against figure 16 (page 86) of the report and found to be correct.

1. Joint specification.

Currently programmed:

- Geometry: ASTM D 1002-72
- Adherends: Aluminum 2024-T3
- Adhesive: AF-163-2K (3M-report, modelled as elastic-plastic, equal areas)

(Changes in the joint configuration could be made below.)

-Joint dimensions [mm]:

c := 6.35 Length of adhesive layer divided by 2
b := 25.4 Joint width
l := 2·c Length of the adhesive layer

-Adherends (Aluminum) [mm], [N/mm²]:

E := 72000 Modulus of elasticity adherends
ν := 0.33 Poisson's ratio adherends
t := 1.6 Adherend thickness

-Adhesive (ductile, elastic-plastic) [mm], [N/mm²]:

d := 0.15 Adhesive thickness
G_a := 700 Shear modulus
E_a := 1000 Modulus of elasticity

$$Y_e := \frac{\tau_p}{G_a} \quad \text{Maximum Elastic shear strain: } Y_e = 0.064$$

$$Y_p := Y_e \cdot Y_{p_e} \quad \text{Maximum plastic shear strain: } Y_p = 1.286$$

-Applied tensile force [N]:

$$K := 7500 \quad \text{Applied tensile force, from which follows:}$$

$$P := \frac{K}{b} \quad \text{Tensile force per unit width [N/mm]}$$

$$p := \frac{K}{t \cdot b} \quad \text{Average tensile stress in adherend [N/mm}^2]$$

$$\tau_{av} := \frac{K}{2 \cdot c \cdot b} \quad \text{Average shear stress in the adhesive [N/mm}^2]$$

$\tau_{av} = 23.25$

$$\lambda := \sqrt{\frac{2 \cdot G_a}{E \cdot t \cdot d}} \quad \text{(Parameter)}$$

2. Calculation of the bending moment factor k.

Hart-Smith's bending moment factor is:

$$D := \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot [1 - \nu^2]} \quad \text{and} \quad k_{si} := \sqrt{\frac{P}{D}} \quad \text{(Variables for k-factor)}$$

$$k := \frac{1}{1 + k_{si} \cdot c + \frac{1}{6} \cdot (k_{si} \cdot c)^2} \quad \text{Bending moment factor}$$

$$M_0 := k \cdot P \cdot \frac{t}{2} \left[1 + \frac{d}{t} \right]$$

The k-factor for this case is: $k = 0.578$
 And the bending moment per unit
 sheet width at the joint edge: $M_0 = 149.431$ [Nmm/mm]

3. Calculation of the adhesive shear stress.

The differential equations governing the adhesive shear stresses are:

$$\frac{d^3}{ds^3} \tau(s) - \text{const} \cdot \tau(s) = 0 \quad \square$$

The solution of this equation is:

$$\tau(s) := A2 \cdot \cosh(2 \cdot \lambda \cdot s) + C2 \quad \square \quad \text{and} \quad Y(s) := \frac{\tau(s)}{Ga} \quad \square$$

-Plastic region, $\tau(x) = \tau_p$, ($x=0$ to $x=(1-r)/2$, origin x at $s=r/2$):

$$\frac{d^3}{dx^3} Y(x) = 0 \quad \square \quad (Y(x) \text{ is shear strain in plastic region})$$

The solution of this equation is:

$$Y(x) := A3 \cdot x^2 + B3 \cdot x + C3 \quad \square \quad \text{and} \quad \tau(x) := \tau_p \quad \square$$

The unknown constants $A2$, $C2$, $A3$, $B3$, $C3$ and the length of the elastic region, r , are derived from the boundary conditions.

3.1 Determination of the constants.

The used boundary conditions are listed in Hart-Smith's report at page 22. Equations (64), (66), (67), (68), (69) are used here. Mathcad is able to solve these equations simultaneously, so no further algebraic manipulation is necessary. From equation (64) it is found that $C3 = Y_e$. The (arbitrary) guess values for the remaining constants are:

$$r := 10 \quad C2 := 1 \quad A2 := 1 \quad B3 := 1 \quad A3 := 1$$

Solving the equations:

given

$$Y_e = \frac{A2}{Ga} \cdot \cosh(\lambda \cdot r) + \frac{C2}{Ga} \quad \text{eq. (64)}$$

$$B3 = \frac{A2}{Ga} \cdot 2 \cdot \lambda \cdot \sinh(\lambda \cdot r) \quad \text{eq. (66)}$$

$$2 \cdot A3 = \frac{A2}{Ga} \cdot 4 \cdot \lambda^2 \cdot \cosh(\lambda \cdot r) \quad \text{eq. (67)}$$

$$2 \cdot A3 \cdot \frac{1-r}{2} + B3 = \frac{P}{E \cdot t \cdot d} \left[1 + 3 \cdot k \cdot \left[1 - v^2 \right] \cdot \left[1 + \frac{d}{t} \right] \right] \quad \text{eq. (68)}$$

$$\frac{A2}{2 \cdot \lambda} \cdot \sinh(\lambda \cdot r) + C2 \cdot \frac{r}{2} + \tau_p \cdot \frac{1-r}{2} = \frac{P}{2} \quad \text{eq. (69)}$$

Mathcad finds the solution:

$$\begin{bmatrix} C2 \\ A2 \\ A3 \\ B3 \\ r \end{bmatrix} := \text{find}(C2, A2, A3, B3, r) \quad \text{(If there is only plastic deformation in the joint, mathcad will not find a solution.)}$$

3.2 Results: the shear stress distribution.

The overlap length was: $l = 12.7$ mm
 The length of the elastic region is: $r = 10.886$ mm
 The length of one plastic region is: $\frac{l-r}{2} = 0.907$ mm
 (if negative; only elastic deformation in the joint, the present solution is not valid.)

-The shear stress distribution [N/mm²] in the elastic region is (from the middle of the joint ($s=0$) to the beginning of the plastic region ($s=r/2$)) :

$$s := 0, 0.0635 \dots \frac{r}{2} \quad \text{(increment 0.00635 mm)}$$

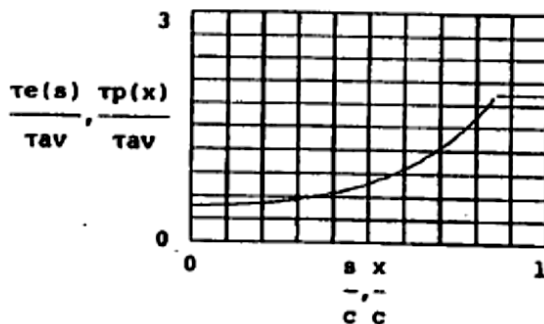
$$\tau_e(s) := A2 \cdot \cosh(2 \cdot \lambda \cdot s) + C2 \quad \text{(Elastic shear stress distribution)}$$

-The shear stress distribution [N/mm²] in the plastic region is:

$$x := \frac{r}{2}, \frac{r}{2} + 0.01 \dots c \quad \text{(increment 0.01 mm)}$$

$$\tau_p(x) := \tau_p \quad \text{(Plastic shear stress distribution)}$$

-A plot of the non dimensional shear stress against the parameters s and x [mm] :



The maximum shear stress is: $\tau_p(0) = 45$ N/mm²
 The minimum shear stress is: $\tau_e(0) = 10.975$ N/mm²
 The average shear stress is: $\tau_{av} = 23.25$ N/mm²

The shear stress concentration in the plastic region: $\frac{\tau_p(0)}{\tau_{av}} = 1.935$

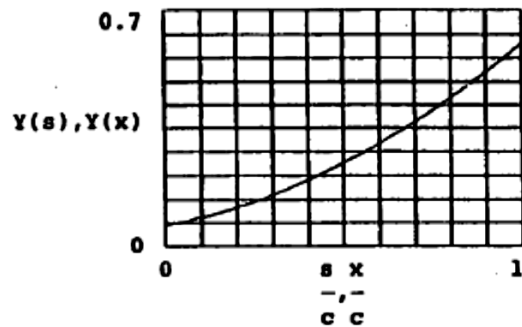
-The shear strain distribution in the elastic region is:

$$Y(s) := \frac{\tau_e(s)}{G_a} \quad \text{(Elastic shear strain distribution)}$$

-The shear strain distribution in the plastic region is:

$$Y(x) := A3 \cdot x^2 + B3 \cdot x + Y_e \quad \text{(Plastic shear strain distribution)}$$

-Plot of the shear strain distribution against the parameters s/c, x/c:



Note that there is no discontinuity between the two curves of the elastic and plastic shear strain distribution. This is the result of the applied boundary condition at the transition: $Y(s)=Y(x)$, $Y'(s)=Y'(x)$ and $Y''(s)=Y''(x)$.

One should check the adhesive shear strain at the edge of the joint ($x=(1-r)/2$). It may not exceed its maximum value Y_e+Y_p .

The value at the joint edge ($x=(1-r)/2$): $Y\left[\frac{1-r}{2}\right] = 0.099$

This should be smaller than the maximum possible adhesive strain: $Y_e + Y_p = 1.35$

(The joint is optimal with respect to its strength if the shear strain at the joint edge has the maximum possible value.)

4. The adhesive normal stress.

$$\frac{d^4}{dx^4} \sigma(x) + 4 \cdot Z^4 \cdot \sigma(x) = 0 \quad \square$$

The solution of this equation is:

$$\sigma(x) := A \cdot \cos(Z \cdot x) \cdot \cosh(Z \cdot x) + B \cdot \sin(Z \cdot x) \cdot \sinh(Z \cdot x) \quad \square$$

In which:

$$Z := \sqrt{\frac{Ea}{2 \cdot d \cdot D}} \quad (D \text{ is flexural rigidity adherends})$$

and A and B unknown constants which must be determined using boundary conditions.

4.1 The integration constants A and B.

To determine these constants, equations 101 and 105 on page 31 of the report are used.

Again Mathcad finds the solution:

$$A := 1 \quad B := 1 \quad (\text{guess values})$$

given

$$A \cdot (\sin(Z \cdot c) \cdot \cosh(Z \cdot c) + \cos(Z \cdot c) \cdot \sinh(Z \cdot c)) = -B \cdot \left[\begin{array}{l} \sin(Z \cdot c) \cdot \cosh(Z \cdot c) \dots \\ + \cos(Z \cdot c) \cdot \sinh(Z \cdot c) \end{array} \right]$$

$$\frac{Ea \cdot M_0}{d \cdot D} = -2 \cdot A \cdot Z^2 \cdot \sin(Z \cdot c) \cdot \sinh(Z \cdot c) + 2 \cdot B \cdot Z^2 \cdot \cos(Z \cdot c) \cdot \cosh(Z \cdot c)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} := \text{find}(A, B) \quad (\text{Mathcad finds the solution})$$

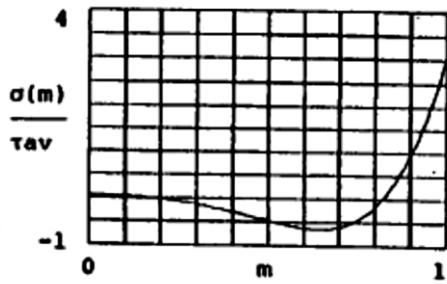
4.2 The results.

The normal stress for $m=0$ to $m=1$ ($m=s/c$, non dimensional parameter):

$$m := 0, 0.01 \dots 1 \quad (\text{increment } 0.01)$$

$$\sigma(m) := A \cdot \cos(Z \cdot m \cdot c) \cdot \cosh(Z \cdot m \cdot c) + B \cdot \sin(Z \cdot m \cdot c) \cdot \sinh(Z \cdot m \cdot c)$$

-Plot of the non dimensional normal stress against m:



The maximum normal stress is:
 The normal stress in the middle:
 The applied tensile stress is:

$$\begin{aligned} \sigma(1) &= 71.583 && \text{N/mm}^2 \\ \sigma(0) &= 1.128 && \text{N/mm}^2 \\ p &= 184.547 && \text{N/mm}^2 \end{aligned}$$

The normal stress concentration
 at the joint edge:

$$\frac{\sigma(1)}{\tau_{av}} = 3.079$$

Export of the results:

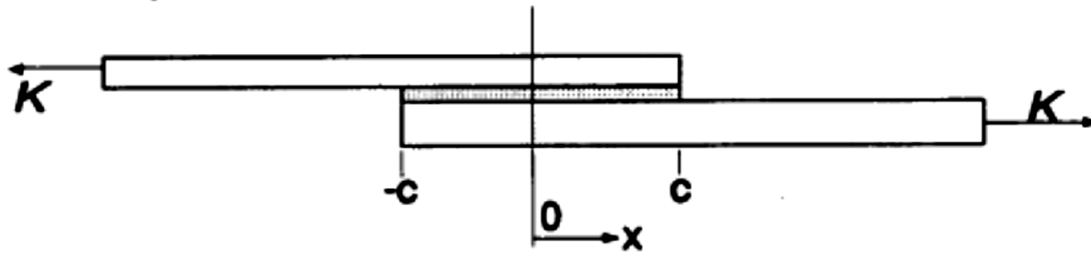
$$\text{WRITEPRN} \left[\begin{array}{l} \text{hartsml} \\ \text{dat} \end{array} \right] := \frac{\tau_e(s)}{\tau_{av}}$$

$$\text{WRITEPRN} \left[\begin{array}{l} \text{harts m2} \\ \text{dat} \end{array} \right] := \frac{\sigma(m)}{\tau_{av}}$$

Appendix 4: MATHCAD document Bigwood and Crocombe

(This program is also available on disk)

Geometry:



Input variables:

- c** Half the overlap length
- b** Width of the joint
- t₁, t₂** Thickness of the adherends

- E₁, E₂** Young's modulus of the adherends
- ν₁, ν₂** Poisson's ratio of the adherends

- d** Thickness of the adhesive
- G_a** Shear modulus of the adhesive
- E_a** Young's modulus of the adhesive

- K** Applied force

Mathcad document: BIGWOOD.MCD

Calculation of the adhesive shear -and normal stress in a single lap joint, according to:

Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints.

Int. J. adhesion and adhesives, vol. 9, no. 4 october 1989
D.A. Bigwood and A.D. Crocombe

Remarks:

- The simplified peel and shear analysis of the article are used.
- This simplified theory is used here to calculate the stresses in a symmetrical single lap joint.
- No transverse shear effects in the adherends.
- The integration constants and eigen values have been checked against table 3 and fig 9 of the article for the following parameters:
c=12.5 b=15 E1=70000 v1=0.33 t1=1 Ga=669.65 Ea=1875 d=0.1.
The results are correct.

1. The joint parameters.

Currently programmed:

- Geometry: ASTM D 1002-72
- Adherends: Aluminum 2024-T3
- Adhesive: AF-163-2K (JM-report)

(Changes of the joint parameters should be made here)

-Joint dimensions [mm]:

c := 6.35 Length of adhesive layer divided by 2
b := 25.4 Joint width
L := c·2 Length of the adhesive layer

-Adherend 1 (Aluminum) [mm], [N/mm²]:

E1 := 72000 Modulus of elasticity adherends
v1 := 0.33 Poisson's ratio adherends
t1 := 1.6 Adherend thickness

-Adherend 2 (Aluminum) [mm], [N/mm²]:

E2 := E1 Modulus of elasticity adherends
v2 := v1 Poisson's ratio adherends
t2 := t1 Adherend thickness

-Adhesive (ductile) [mm], [N/mm²]:

Ga := 700 Shear modulus
Ea := 1900 Modulus of elasticity
d := 0.15 Thickness of adhesive

-Applied tensile force [N]:

K := 7500 [N] (From test-reports, typical strength: 10000 N)

P := $\frac{K}{b}$ Tensile force per unit width [N/mm]

$$p := \frac{P}{t_1} \quad \text{Average tensile stress [N/mm}^2\text{]}$$

$$\tau_{av} := \frac{K}{2 \cdot c \cdot b} \quad \text{Average shear stress in the adhesive [N/mm}^2\text{]}$$

2. The bending moment factor k and edge loads

This theory allows all kind of boundary conditions representing different joint geometries. In the present calculation the single lap joint geometry is implemented. To change the joint configuration one only has to alter the edge loads on the adherend adhesive sandwich. It is for example possible to analyze a plate under tension on which a stiffener is bonded.

- Correspondent to the article, the bending moment factor of Hart-Smith is used for the single lap joint geometry:

$$D := \frac{E_1 \cdot t_1^3}{12 \cdot [1 - \nu_1^2]} \quad \text{and} \quad k_{si} := \sqrt{\frac{P}{D}} \quad \text{(Variables for k-factor)}$$

$$k := \frac{1}{1 + k_{si} \cdot c + \frac{1}{6} \cdot (k_{si} \cdot c)^2} \quad \text{(k-factor)}$$

The bending moment factor for this case is: $k = 0.578$

-In this theory, the adhesive thickness d is neglected in the determination of the edge loads (page 236 of the article).

-To ensure equilibrium of the overlap, the shearing force is calculated from moment equilibrium.

The edge loads per unit sheet width for the single lap joint are thus found to be:

-The tension force per unit sheet width: P

-The bending moment per unit sheet width at the joint edge (thickness neglected): $M_0 := k \cdot P \cdot \frac{t_1}{2}$

-The shearing force per unit sheet width at the joint edge (thickness neglected): $Q_0 := \frac{t_1 \cdot P - 2 \cdot M_0}{L}$

- The edge loads [N/mm], [Nmm/mm] on the general adherend adhesive sandwich for the single lap joint according to fig. 8 on page 236 are:

Adherend 1		Adherend 2	
x=0	x=L	x=0	x=L
T11 := P	T12 := 0	T21 := 0	T22 := P
M11 := -M0	M12 := 0	M21 := 0	M22 := M0
Q11 := -Q0	Q12 := 0	Q21 := 0	Q22 := -Q0

3. The governing differential equations.

-The differential equations governing the adhesive shear (τ) and normal (σ) stress are:

$$\frac{d^3}{dx^3} \tau(x) - K6^2 \cdot \tau(x) = 0 \quad \circ \quad \frac{d^4}{dx^4} \sigma(x) + 4 \cdot K5^4 \cdot \sigma(x) = 0 \quad \circ$$

-The solution for the shear stress is:

$$\tau(x) := B1 \cdot \cosh(K6 \cdot x) + B2 \cdot \sinh(K6 \cdot x) + B3 \quad \circ$$

In which:

- x is the coordinate in longitudinal direction from x=0 (joint edge) to x=L (other joint edge).
- B1, B2 and B3 are unknown integration constants and K6 is the root from the auxiliary equation.

- The solution for the normal stress is:

$$\sigma(x) := A1 \cdot \cos(K5 \cdot x) \cdot \cosh(K5 \cdot x) + A2 \cdot \cos(K5 \cdot x) \cdot \sinh(K5 \cdot x) \dots \circ \\ + A3 \cdot \sin(K5 \cdot x) \cdot \cosh(K5 \cdot x) + A4 \cdot \sin(K5 \cdot x) \cdot \sinh(K5 \cdot x)$$

In which:

- A1, A2, A3 and A4 are unknown integration constants.
- K5 is the root from the auxiliary equation.

The 7 integration constants must be determined from the boundary conditions.

3. The integration constants.

The eigen values and integration constants are explicitly given in the article. Those formulae are used here.

3.1 Constants for the shear stress.

- Eigen value of the shear stress formula:

$$K6 := \sqrt{\frac{4 \cdot Ga}{d} \left[\frac{1 - \nu1^2}{E1 \cdot t1} + \frac{1 - \nu2^2}{E2 \cdot t2} \right]} \quad \text{(Eigen value)}$$

adherends with the first derivative of shear stress:

$$b1 := \frac{Ga}{d} \left[\frac{1 - \nu1^2}{E1 \cdot t1} \left[T11 - \frac{6 \cdot M11}{t1} \right] - \frac{1 - \nu2^2}{E2 \cdot t2} \left[T21 + \frac{6 \cdot M21}{t2} \right] \right]$$

$$b2 := \frac{Ga}{d} \left[\frac{1 - \nu1^2}{E1 \cdot t1} \left[T12 - \frac{6 \cdot M12}{t1} \right] - \frac{1 - \nu2^2}{E2 \cdot t2} \left[T22 + \frac{6 \cdot M22}{t2} \right] \right]$$

$$b3 := T12 - T11 \quad (\text{Hor. force equilibrium of the upper adherend})$$

- The integration constants of the shear stress formula now become:

$$B1 := \frac{[b2 - b1 \cdot \cosh(K6 \cdot L)]}{K6 \cdot \sinh(K6 \cdot L)}$$

$$B2 := \frac{b1}{K6}$$

$$B3 := \frac{b3}{L} - \frac{b2 - b1}{K6 \cdot L}$$

3.2 Constants of the normal stress.

-Flexural rigidity of the adherends:

$$D1 := \frac{E1 \cdot t1^3}{12 \cdot [1 - \nu1^2]} \quad D2 := D1 \quad (\text{symmetrical joint})$$

-The eigen value:

$$K5 := \sqrt{\frac{Ea}{4 \cdot d} \left[\frac{1}{D1} + \frac{1}{D2} \right]}$$

-Boundary conditions:

$$h1 := \frac{Ea}{d} \cdot \left[\frac{M21}{d} - \frac{M11}{d} \right] \quad h2 := \frac{Ea}{d} \cdot \left[\frac{M22}{d} - \frac{M12}{d} \right]$$

$$b3 := \frac{Ea}{2 \cdot K5 \cdot d} \cdot \left[\frac{Q21}{D2} - \frac{Q11}{D1} \right] \quad b4 := \frac{Ea}{2 \cdot K5 \cdot d} \cdot \left[\frac{Q22}{D2} - \frac{Q12}{D1} \right]$$

$$\begin{aligned} R1 &:= \cosh(K5 \cdot L) \cdot \sin(K5 \cdot L) - \sinh(K5 \cdot L) \cdot \cos(K5 \cdot L) \\ R2 &:= \cosh(K5 \cdot L) \cdot \sin(K5 \cdot L) + \sinh(K5 \cdot L) \cdot \cos(K5 \cdot L) \\ R3 &:= \cosh(K5 \cdot L) \cdot \sinh(K5 \cdot L) - \sin(K5 \cdot L) \cdot \cos(K5 \cdot L) \\ R4 &:= \cosh(K5 \cdot L) \cdot \sinh(K5 \cdot L) + \sin(K5 \cdot L) \cdot \cos(K5 \cdot L) \\ R5 &:= (\sinh(K5 \cdot L))^2 - (\sin(K5 \cdot L))^2 \\ R6 &:= (\cosh(K5 \cdot L))^2 - (\cos(K5 \cdot L))^2 \end{aligned}$$

- Integration constants for the normal stress now become:

$$A1 := \frac{b3 \cdot R3 - 2 \cdot b2 \cdot \sinh(K5 \cdot L) \cdot \sin(K5 \cdot L) + b1 \cdot R6 + b4 \cdot R1}{R5}$$

$$A2 := \frac{b2 \cdot R2 - b3 \cdot (\sinh(K5 \cdot L))^2 - b1 \cdot R4 - b4 \cdot \sinh(K5 \cdot L) \cdot \sin(K5 \cdot L)}{R5}$$

$$A3 := \frac{b2 \cdot R2 - b3 \cdot (\sin(K5 \cdot L))^2 - b1 \cdot R4 - b4 \cdot \sinh(K5 \cdot L) \cdot \sin(K5 \cdot L)}{R5}$$

$$A4 := b1$$

4. The results

- The solution for the shear stress $\tau(x)$ [N/mm²] now becomes for $x=c$ (middle of the joint) to $x=L$ (joint edge):

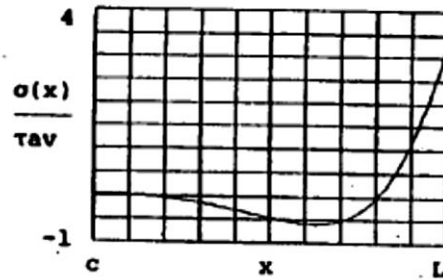
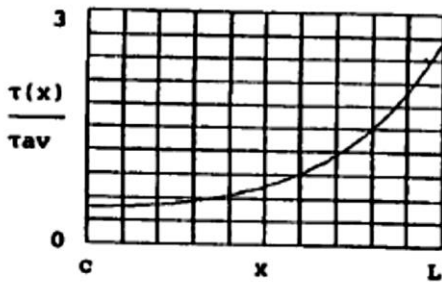
$$x := c, c + 0.0635 \dots L \text{ (increment 0.0635)}$$

$$\tau(x) := (B1 \cdot \cosh(K6 \cdot x) + B2 \cdot \sinh(K6 \cdot x) + B3) \cdot -1 \quad (\text{shear stress})$$

- And the adhesive normal stress $\sigma(m)$ [N/mm²] is:

$$\begin{aligned} \sigma(x) &:= A1 \cdot \cos(K5 \cdot x) \cdot \cosh(K5 \cdot x) + A2 \cdot \cos(K5 \cdot x) \cdot \sinh(K5 \cdot x) \dots \\ &+ A3 \cdot \sin(K5 \cdot x) \cdot \cosh(K5 \cdot x) + A4 \cdot \sin(K5 \cdot x) \cdot \sinh(K5 \cdot x) \end{aligned}$$

The non dimensional stresses are plotted below against the parameter x :



Maximum shear stress at joint edge:
Maximum normal stress at joint edge:

$$\begin{aligned} \tau(L) &= 61.72 & [\text{N/mm}^2] \\ \sigma(L) &= 76.3 & [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

Average shear stress in the adhesive:
Tensile stress in the adherends:

$$\begin{aligned} \tau_{av} &= 23.25 & [\text{N/mm}^2] \\ p &= 184.547 & [\text{N/mm}^2] \end{aligned}$$

The shear stress concentration at the joint edge:

$$\frac{\tau(L)}{\tau_{av}} = 2.655$$

The normal stress concentration at the joint edge:

$$\frac{\sigma(L)}{\tau_{av}} = 3.282$$

Export of the results:

WRITEPRN [bigwood1 dat] := $\frac{\tau(x)}{\tau_{av}}$

WRITEPRN [bigwood2 dat] := $\frac{\sigma(x)}{\tau_{av}}$