CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS MULTI-MATERIAIS

Mateus de Queiroz dos Reis

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título/certificado de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Orientadora: Doina Mariana Banea
Coorientador: Lucas Filipe Martins da Silva

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS COLADAS MULTI-MATERIAIS

Dissertação apresentada ao Programa/Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais - PPEMM, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título/certificado de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais.

Mateus de Queiroz dos Reis

Banca Examinadora:

Presidente, Professora Dra. Doina Mariana Banea (CEFET/RJ) (orientadora)

Dr. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira (PETROBRAS)

Professor Dr. Hector Reynaldo Meneses da Costa (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2019

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

R375 Reis, Mateus de Queiroz dos
Análise do comportamento mecânico de juntas coladas multi-materiais / Mateus de Queiroz dos Reis.—2019.
113f. + anexos : il. color. , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2019.
Bibliografia : f. 110-113
Orientadora : Doina Mariana Banea
Coorientador : Lucas Filipe Martins da Silva

1. Adesivos. 2. Juntas adesivas. 3. Temperatura. 4. Cisalhamento. 5. Tecnologia dos materiais. I. Banea, Doina Mariana (Orient.). II. Silva, Lucas Filipe Martins da (Coorient.). III. Título.

CDD 621.825

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Osvaldo Cristiano dos Reis (in memoriam), por me mostrar o caminho e a beleza das ciências exatas e por ter sido o meu melhor amigo em toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro prestado ao longo do meu mestrado.

À minha mãe, Sueli de Queiroz dos Reis, pelo apoio financeiro e emocional durante o intercâmbio.

À minha Orientadora, Professora Doina Mariana Banea, pelo convite, oportunidade, orientação e direcionamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu Coorientador, Professor Lucas Filipe Martins da Silva, pela oportunidade de estudar na Universidade do Porto e fazer parte do grupo de pesquisas ADFEUP.

Ao Dr. Ricardo João Camilo Carbas, pelo auxílio e ensinamentos referentes à parte experimental.

Ao Dr. Eduardo André de Sousa Marques, pelo auxílio e ensinamentos referentes às simulações numéricas.

Ao Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ADFEUP), pela oportunidade de desenvolver toda a parte experimental do meu trabalho.

À todos os colegas do ADFEUP e LADES.

À Dow Química, em especial à colaboradora Ho Sun Park pela doação dos adesivos.

À todos os amigos e colegas que fiz no Porto, em especial Ludmila Borges de Andrade, Marcos Andrés Caballero Torres e Rebeca Góes Mota. Sem vocês, seria impossível suportar a pressão e a vida.

Aos meus amigos, Daniel dos Santos Onofre, Gabriel dos Santos Onofre, Rafael Galvão Soares, Rodrigo de Sousa Dantas e Vanessa Silva Loyola, por entenderem minha ausência durante este ano.

EPÌGRAFE

The best and safest method of philosophizing seems to be first to inquire diligently into the properties of things, and establishing those properties by experiments, and then to proceed more slowly to hypotheses for the explanation of them.
Sir Isaac Newton.

RESUMO

Análise do Comportamento Mecânico de Juntas Coladas Multi-Materiais

Um dos maiores desafios para a indústria de transportes no século 21 é a redução das emissões e a economia de combustível. Para isso, estruturas mais leves são projetadas através da aplicação de diversos materiais, como ligas metálicas, polímeros e compósitos. Através da utilização de juntas coladas, é possível combinar esses diferentes materiais com durabilidade e resistência, além de vantagens como amortecimento de vibrações e flexibilidade no design da junta.

Juntas coladas são projetadas para trabalhar em uma faixa de temperaturas de acordo com a aplicação a que se destinam. No entanto, temperaturas diferentes resultam em um comportamento diferente da junta, devido à diversos fatores como a contração volumétrica do adesivo durante o processo de cura, diferentes coeficientes de expansão térmica (CTE) entre adesivos e aderentes e entre substratos dissimilares, que levam a tensões residuais na junta colada. Além disso, as propriedades dos adesivos também variam com a temperatura dado sua natureza polimérica.

Neste trabalho, foi realizada a caracterização de um um novo adesivo epóxi estrutural de dois componentes, Betamate^{TM}2096. Primeiro, mediu-se sua temperatura de transição vítrea para dois processos de cura distintos em ordem de escolher-se o mais adequado, bem como as temperaturas a serem utilizadas no ensaios (23, 40 e 60 °C). Posteriormente, a resistência mecânica de corpos de prova do adesivo maciço curado (bulk) foi medida em função da temperatura. A tenacidade a fratura em Modo I e II foi medida através dos ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End Notched Flexure* (ENF). Juntas de sobreposição simples de Aço Alta Resistência (HSS) carregadas em cisalhamento foram avaliadas em função do comprimento de sobreposição (12,5, 25 e 50 mm), espessura do adesivo (0,2 e 1 mm) e em função da temperatura (23, 40 e 60 °C) para uma avaliação completa do comportamento do adesivo. Finalmente, juntas de sobreposição simples similares e dissimilares com substratos Aço de Alta Resistência (HSS), Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP) e Alumínio (Al) solicitadas ao cisalhamento foram avaliadas quanto à temperatura ambiente (23 °C), 40 °C e 60 °C.

Os resultados obtidos mostram uma grande influência da temperatura nas propriedades dos adesivos, bem como uma amplificação nos comportamentos provenientes do aumento do comprimento de sobreposição e espessura do adesivo. Os resultados obtidos para as juntas dissimilares mostram que o mecanismo de escoamento global do adesivo foi responsável pela ruptura as juntas, à despeito da concentração de tensões. Todavia, comparando as juntas dissimilares e similares foi possível ver a existência de um mecanismo complexo que abrange temperatura, combinação de aderentes e adesivo, até a falha da junta.

Palavras-chave: Adesivos; Juntas Coladas; Juntas Multi-Material; Juntas Dissimilares; Temperatura

ABSTRACT

Analysis of Mechanical Behaviour of Multi-Material Bonded Joints

One of the biggest challenges for the 21st century transportation industry is reducing emissions and fuel economy. For this, lighter structures are designed through the application of various materials, such as metal alloys, polymers and composites. Through the use of bonded joints, these different materials can be combined with durability and strength, as well as advantages such as vibration damping and flexibility in joint design.

Bonded joints are designed to work in a range of temperatures according to the application for which they are intended. However, different temperatures result in a different behaviour of the joint, due to several factors such as the volumetric contraction of the adhesive during the curing process, different coefficient of thermal expansion (CTE) between adhesives and adhesives and between dissimilar substrates, which lead to tensions in the bonded joint. In addition, the properties of the adhesives also vary with the temperature due to their polymeric nature.

In this work, the characterization of a new two-component structural epoxy adhesive, Betamate^{TM}2096, was performed. First, the glass transition temperature was measured for two distinct curing processes in order to choose the most suitable, as well as the temperatures to be used in the tests (23, 40 and 60 °C). Subsequently, the mechanical strength of specimens of the bulk cured adhesive was measured as a function of temperature. The fracture toughness in Mode I and II was measured through the Double Cantilever Beam (DCB) and End Notched Flexure (ENF) tests. Shear-loaded High Strength Steel single lap joints were evaluated as a function of the overlap length (12.5, 25 and 50 mm), adhesive thickness (0.2 and 1 mm) and temperature (23, 40 and 60 °C) for a complete evaluation of the behaviour of the adhesive. Finally, similar and dissimilar single lap joints with High Strength Steel (HSS), Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Aluminium (Al) substrates were evaluated for room temperature (23 °C), 40 °C and 60 °C.

The obtained results show a great influence of the temperature on the properties of the adhesives, as well as an amplification in the behaviours coming from the increase of the length of overlap and thickness of the adhesive. The results obtained for the dissimilar joints show that the global yielding mechanism of the adhesive was responsible for the rupture of the joints, regardless of the concentration of stresses. However, by comparing the dissimilar and similar joints, it was possible to see the existence of a complex mechanism that includes temperature, adherends combination and adhesive, until the failure of the joint.

Keywords: Adhesives; Bonded Joints; Multi-Material Joints; Dissimilar Joints; Temperature

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - MATERIAIS UTILIZADOS EM APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS MODERNAS [4] 16

FIGURA 2 – JUNTAS COLADAS EM APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS [4] 17

FIGURA 3 – TENSÃO DE CISALHAMENTO AO LONGO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO EM UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES MULTI-MATERIAL 17

FIGURA 4 – ESQUEMA DA METODOLOGIA CIENTÍFICA UTILIZADA NESTA DISSERTAÇÃO 19

FIGURA 5 – ESQUEMA DE UMA JUNTA ADESIVA [9] 22

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS REBITADAS E COLADAS [9] 24

FIGURA 7 – MECANISMO DA ADESÃO MECÂNICA [9] 28

FIGURA 8 - MUDANÇA NA RESISTÊNCIA À RUPTURA EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE [13] 29

FIGURA 9 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE PARA AÇO E ALUMÍNIO [14] 29

FIGURA 10 – EFEITO DA PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE E PARÂMETRO DE RUGOSIDADE RA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS DE ALUMÍNIO [15] 30

FIGURA 11 – ESQUEMA DA ADESÃO; A) POR ADSORÇÃO FÍSICA; B) POR ADSORÇÃO QUÍMICA [9] 31

FIGURA 12 – ENERGIA DE LIGAÇÃO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA [9] 31

FIGURA 13 - ESQUEMA DA TEORIA DA ADESÃO POR DIFUSÃO [9] 32

FIGURA 14 – ESQUEMA DA TEORIA ELETROSTÁTICA [9] 33

FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CAMADA FRACA [9] 33

FIGURA 16 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [9] 34

FIGURA 17 – RESISTÊNCIA DE UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO [9] 34

FIGURA 18 - PONTOS DE INICIAÇÃO DE FISSURAS EM SUPERFÍCIES MUITO IRREGULARES [9] 35

FIGURA 19 – MODOS FUNDAMENTAIS DE CARREGAMENTO, (A) TRAÇÃO (B) CORTE OU CISALHAMENTO (C) COMPRESSÃO (D) CLIVAGEM (E) ARRANCAMENTO [17, 18] 35

FIGURA 20 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM UMA JUNTA DEVIDO À EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA AXIALIDADE [12] 36

FIGURA 21 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES CONFORME ANÁLISE DE VOLKERSEN [9] 37

FIGURA 22 – ESFORÇOS DE ARRANCAMENTO (A) E CLIVAGEM (B) [5] 38

FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CLIVAGEM E ARRANCAMENTO [5] 38

FIGURA 24 – DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM ADESIVOS FRÁGEIS E TENAZES [9] 38

FIGURA 25 - PRINCIPAIS TIPOS DE JUNTAS [9] 39

FIGURA 26 – ADESÃO EM UMA JUNTA COLADA 40

FIGURA 27 - MODOS DE RUPTURA EM JUNTAS ADESIVAS [12] 41

FIGURA 28 – CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ADESIVO AV118 EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [2] 43

FIGURA 29 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ADESIVO XN2144 EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [21] 43

FIGURA 30 – TENSÃO DE CISALHAMENTO EM JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA METAL-COMPÓSITO [24] 45

FIGURA 31 – COMPONENTES E TENSÃO RESULTANTE EM UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES HSS-CFRP COM T_O = 23 °C E T_{SF} = 60°C [25, 26] 46
FIGURA 32 - TENSÃO RESULTANTE EM 3 JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES MULTI-MATERIAL COM T_O = 23 °C E T_{SF} = 60°C [25, 26] 47
FIGURA 33 - TENSÃO RESULTANTE EM 3 JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES MULTI-MATERIAL COM T_O = T_{SF} = 60°C [25, 26] 47
FIGURA 34 - MISTURADORA DAC 150.1 FVZ SPEEDMIXER (HAUSCHILD, ALEMANHA). 49
FIGURA 35 - AQUECIMENTO DAS FIBRAS PRÉ-IMPREGNADAS COM PISTOLA DE AR QUENTE 52
FIGURA 36 - PLACA DE CFRP, MOLDE E ESPAÇADORES [28] 53
FIGURA 37 – PRENSA HIDRÁULICA DE PRATOS QUENTES INTOCO (GLOUCESTERSHIRE, INGLATERRA) 53
FIGURA 38 - CICLO DE CURA DO CFRP 54
FIGURA 39 - SERRA CIRCULAR MODELO DV 25, FORNECIDA POR BATISTI MECCANICA (EMPOLI, ITÁLIA). 54
FIGURA 40 - MÁQUINA DE JATEAMENTO DE LAURENTIIS, MODELO 705 GM (PESCARA, ITÁLIA) 56
FIGURA 41 - SUPERFÍCIES METÁLICAS TRATADAS 56
FIGURA 42 - SUPERFÍCIE DO CFRP TRATADA 57
FIGURA 43 - MÁQUINA PARA ENSAIO DMA E INTERFACE DO SOFTWARE 58
FIGURA 44 - ESQUEMA DO MOLDE UTILIZADO PARA CONFECÇÃO DAS PLACAS DE ADESIVO 59
FIGURA 45 - PLACA DE ADESIVO MACIÇO (BULK) 59
FIGURA 46 – DESIGN DO CORPO DE PROVA TIPO "OSSO-DE-CÃO" (DIMENSÕES EM MM) 59
FIGURA 47 - MÁQUINA DE TESTES UNIVERSAL INSTRON®, MODELO 3367 (NORWOOD, MASSACHUSETTS, USA) 60
FIGURA 48 - CÂMARA TÉRMICA 61
FIGURA 49 - MARCAÇÃO NOS CORPOS DE PROVA "OSSO-DE-CÃO" PARA MEDIÇÃO DA DEFORMAÇÃO 61
FIGURA 50 - GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA DCB/ENF (DIMENSÕES EM MM) [40] 62
FIGURA 51 - CORPO DE PROVA DCB COM COMPRIMENTO REDUZIDO [21] 63
FIGURA 52 - GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA ENF [44] 64
FIGURA 53 - MOLDE PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DCB/ENF 64
FIGURA 54 - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM SLJS - A) SEM TEMPERATURA B) COM TEMPERATURA 65
FIGURA 55 - MOLDE PARA CONFECÇÃO DE SLJS 66
FIGURA 56 - CONFECÇÃO DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES 66
FIGURA 57 - GEOMETRIA DAS JUNTAS DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO DA ESPESSURA DO ADESIVO E DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO (COTAS EM MM) 67
FIGURA 58 - JUNTAS DISSIMILARES (COTAS EM MM) 67
FIGURA 59 - JUNTAS MULTI-MATERIAL SIMILARES E DISSIMILARES (COTAS EM MM) 68
FIGURA 60 – RESULTADOS DO DMA PARA DOIS PROCESSOS DE CURA DISTINTOS 69
FIGURA 61 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO TÍPICAS PARA AS TEMPERATURAS AVALIADAS [25, 26] 70
FIGURA 62 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE YOUNG (E) E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO ADESIVO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA [25, 26] 71

FIGURA 63 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO PARA OS DCBS PADRÃO TESTADOS À TEMPERATURA AMBIENTE 72
FIGURA 64 - CURVAS R DE TENACIDADE À FRATURA PARA DCBS PADRÃO TESTADOS 72
FIGURA 65 - SUPERFÍCIE DE FRATURA DO DCB 73
FIGURA 66 - CURVAS R CARACTERÍSTICAS DOS DCBS CURTOS PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS TESTADAS 73
FIGURA 67 - TENACIDADE À FRATURA EM MODO I PARA AS DIFERENTES TEMPERATURAS TESTADAS 74
FIGURA 68 - SUPERFÍCIES DE FRATURA S DCBS CURTOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 75
FIGURA 69 – CURVA REPRESENTATIVA *P-Δ* PARA OS ENSAIOS ENF 76
FIGURA 70 – CURVA *R* REPRESENTATIVA PARA OS ENSAIOS *ENF* 76
FIGURA 71 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO REPRESENTATIVAS PARA A ESPESSURA DO ADESIVO DE 0.2 MM A DIFERENTES TEMPERATURAS 78
FIGURA 72 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO REPRESENTATIVAS PARA A ESPESSURA DO ADESIVO DE 0.2 MM A DIFERENTES TEMPERATURAS 79
FIGURA 73 – SUPERFÍCIES DE FRATURA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E ESPESSURA DO ADESIVO 79
FIGURA 74 - EFEITO DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS JUNTAS DE DIFERENTES ESPESSURAS 80
FIGURA 75 - EFEITO DA ESPESSURA DO ADESIVO NAS DIFERENTES TEMPERATURAS TESTADAS 81
FIGURA 76 - EFEITO DA TEMPERATURA NO DESLOCAMENTO DAS JUNTAS TESTADAS 82
FIGURA 77 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO REPRESENTATIVAS PARA COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 12,5 MM 83
FIGURA 78 - CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO REPRESENTATIVAS PARA COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 50 MM 84
FIGURA 79 – EVOLUÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA E COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO 84
FIGURA 80 - EFEITO DA TEMPERATURA NA FORÇA DE RUPTURA DAS JUNTAS EM FUNÇÃO DOS 3 COMPRIMENTOS DE SOBREPOSIÇÃO TESTADOS 85
FIGURA 81 - EFEITO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO NA CARGA MÁXIMA DAS JUNTAS EM FUNÇÃO DAS 3 TEMPERATURAS TESTADAS 86
FIGURA 82 – RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO 86
FIGURA 83 – CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS AL-CFRP 89
FIGURA 84 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS HSS-CFRP 89
FIGURA 85 - CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS AL-HSS 90
FIGURA 86 - EFEITO DA TEMPERATURA NO DESLOCAMENTO DAS JUNTAS DISSIMILARES TESTADAS 91
FIGURA 87 - FORÇA MÁXIMA X TEMPERATURA PARA AS DIFERENTES JUNTAS DISSIMILARES TESTADAS 92
FIGURA 88 - CURVAS REPRESENTATIVAS DAS JUNTAS AL-AL 93
FIGURA 89 - CURVAS REPRESENTATIVAS DAS JUNTAS HSS-HSS 93
FIGURA 90 - CURVAS REPRESENTATIVAS DAS JUNTAS CFRP-CFRP 94
FIGURA 91 – FORÇA MÁXIMA X TEMPERATURA PARA AS DIFERENTES JUNTAS SIMILARES TESTADAS 95
FIGURA 92 - DESLOCAMENTO X TEMPERATURA PARA AS JUNTAS SIMILARES TESTADAS 95
FIGURA 93 - SUPERFÍCIE DE FRATURA DAS JUNTAS SIMILARES 96
FIGURA 94 - CURVAS REPRESENTATIVAS DAS JUNTAS AL-CFRP 97
FIGURA 95 - CURVAS REPRESENTATIVAS DAS JUNTAS HSS-CFRP 98

FIGURA 96 - CURVAS REPRESENTATIVAS AS JUNTAS AL-HSS 98
FIGURA 97 – DESLOCAMENTO DAS JUNTAS DISSIMILARES TESTADAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 99
FIGURA 98 – FORÇA DE RUPTURA DAS JUNTAS DISSIMILARES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 100
FIGURA 99 – SUPERFÍCIES DE FRATURA AS JUNTAS DISSIMILARES EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 100
FIGURA 100 - COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA ENTRE AS JUNTAS SIMILARES E DISSIMILARES TESTADAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA 101
FIGURA 101 - MALHA UTILIZADA NOS MODELOS 103
FIGURA 102 - LEI DE TRAÇÃO-SEPARAÇÃO PARA O CZM [8] 104
FIGURA 103 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA O COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 25 MM COM ESPESSURA DO ADESIVO DE 0,2 MM 105
FIGURA 104 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA O COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 25 MM COM ESPESSURA DO ADESIVO DE 1 MM 106
FIGURA 105 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA O COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 12,5 MM COM ESPESSURA DO ADESIVO DE 0,2 MM 106
FIGURA 106 - COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS PARA O COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO DE 50 MM COM ESPESSURA DO ADESIVO DE 0,2 MM 107

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA 16

AGRADECIMENTOS 17

EPÌGRAFE 18

RESUMO 19

ABSTRACT 20

LISTA DE ILUSTRAÇÕES 21

CAPÍTULO 1 15

INTRODUÇÃO 15

1.1 Motivação 16

1.2 Objetivos 18

1.3 Metodologia 18

1.4 Organização do Trabalho 19

Capítulo 2 21

Revisão Bibliográfica 21

2.1 Definição de Adesivo 21

2.2 Vantagens e Desvantagens 22

2.3 Classificação dos Adesivos 24

2.3.1 Função 25

2.3.2 Composição química 26

2.4 Teoria da Adesão 27

2.4.1 Teoria mecânica 28

2.4.2 Teoria da adsorção 30

2.4.3 Teoria da Difusão 32

2.4.4 Teoria eletrostática 32

2.5 Defeitos em Juntas coladas 33

2.5.1 Camada Fraca 33
2.5.2 Concentração de Tensões 34
2.5.3 Irregularidades de Superfícies 34
2.6 Modos de Carregamento 35
2.7.1 Tração e Compressão 36
2.7.2 Cisalhamento 36
2.7.3 Clivagem e arrancamento 37
2.7 Tipos de Juntas 39
2.8 Preparação da Superfície 39
2.9 Modos de Ruptura 40
2.10 Efeito da Temperatura sobre as propriedades dos adesivos e juntas 42
2.10.1 Efeito da Temperatura sobre as propriedades dos adesivos 42
2.10.2 Efeito da temperatura nas propriedades das juntas 43
Capítulo 3 48
Materiais e Métodos 48
3.1 Adesivo 48
3.1.1 Preparação do Adesivo 49
3.2 Substratos 50
3.2.1 Juntas de Sobreposição Simples (SLJ) 50
3.2.2 *Double Cantilever Beam* (DCBs) e *End Notched Flexure* (ENF) 55
3.3 Testes 57
3.3.1 Análise Térmica 57
3.3.2 Resistência à Tração (Adesivo Maciço) 58
3.3.3 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo I (DCBs) 62
3.3.4 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo II (ENFs) 63
3.3.2 Ensaio de Tração - Resistência ao Cisalhamento (juntas de sobreposição simples) 64
..... 68

Capítulo 4 69
Resultados e discussão 69
4.1 Análise Térmica (DMA) 69
4.2 Resistência à Tração (adesivo maciço) 70
4.3 Ensaios de tenacidade à fratura em Modo I (DCB) 72
4.4 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo II (ENFs) 75
4.5 Ensaio de Tração - Resistência ao Cisalhamento (juntas de sobreposição simples) 77
4.5.1 Efeito da Espessura do Adesivo e Comprimento de Sobreposição 77
4.5.2 Juntas dissimilares (espessura de 0,4 mm) 87
4.5.2 Juntas Multi-material dissimilares (espessura de 0,2 mm) 92
Capítulo 5 103
Análise Numérica 103
5.1 Resultados numéricos 105
..... 107
Capítulo 6 108
Conclusões 108
6.1 Sugestões para trabalhos futuros 109
Bibliografia 110
Anexos 114

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A primeira evidência histórica de uma substância ser utilizada como adesivo é datada do início da pré-história, mais de 4000 antes de Cristo. Durante pesquisas em sítios fúnebres, arqueólogos encontraram dentro dos túmulos vasos que haviam sido colados com seivas de árvore. Outra referência arqueológica é a cola de alcatrão utilizada para colar globos oculares de marfim nas estátuas, na Babilônia. Ainda na idade antiga, no Egito, os sarcófagos dos faraós e as demais mobílias existentes eram ligados com algum tipo de cola animal. Os primeiros registros escritos de um procedimento de fabricação e utilização de cola animal foram elaborados em 200 antes de cristo.

Entre o ano 1 e o ano 500, gregos e romanos desenvolveram a tecnologia da madeira folheada, a qual era colada. Ainda da Grécia, vem o conhecido mito de Dédalo e Ícaro, sobre a utilização de cera de abelha para a construção de asas, e a deterioração desta cola natural quando exposta a altas temperaturas. Nesta época, foram utilizadas outras colas provenientes de animais como ovos, leite, couro, ossos e sangue, e também colas de origem vegetal, feitas de grãos, legumes e alcatrão.

Por volta do ano 1000, Gengis Khan superou seus adversários através da utilização de arcos feitos de madeira de limoeiro e chifre de touro, colados com um adesivo cuja fórmula foi perdida na antiguidade.

No século XVII surgiu na Holanda a primeira fábrica de cola animal, enquanto no século XVIII, na Inglaterra, surgiram as primeiras patentes de adesivos de peixe e de borracha natural.

Já após a segunda revolução industrial, entre o final do século XIX e início do século XX, o surgimento de adesivos sintéticos, a pesquisa, desenvolvimento e utilização de adesivos pela indústria bélica, motivada pelas duas Guerras Mundiais, além das indústrias aeronáutica, naval, automobilística e aeroespacial, fizeram com que os adesivos se desenvolvessem em 100 anos mais do que nos 6000 anteriores de história conhecida [1].

1.1 Motivação

A união de materiais através da colagem teve grande um grande crescimento desde o início do século XX, como alternativa aos métodos tradicionais de ligação mecânica, devido à diversas vantagens como a possibilidade de união de materiais distintos, leveza, amortecimento de vibrações, resistência à fadiga, menor concentração de tensões, resistência à corrosão, produtividade e redução de custos [1]. Além disso, em virtude do impacto causado ao meio-ambiente pelas emissões de poluentes somado à alta global nos preços dos combustíveis, a indústria de transportes tem buscado utilizar materiais mais leves como ligas de alumínio, polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP), plásticos reforçados com fibras (FRP), fibra de vidro e compósitos em geral, em busca de uma melhor eficiência energética por parte dos veículos [2, 3], em aplicações estruturais ou não, conforme mostrado na Figura 1 e na Figura 2.



Figura 1 - Materiais utilizados em aplicações automotivas modernas [4]



Figura 2 – Juntas coladas em aplicações automotivas [4]

Todavia, a união de materiais dissimilares através de juntas coladas possui algumas particularidades que serão discutidas nos próximos capítulos desta dissertação, sendo a principal delas a assimetria na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição, conforme mostrado na Figura 3.

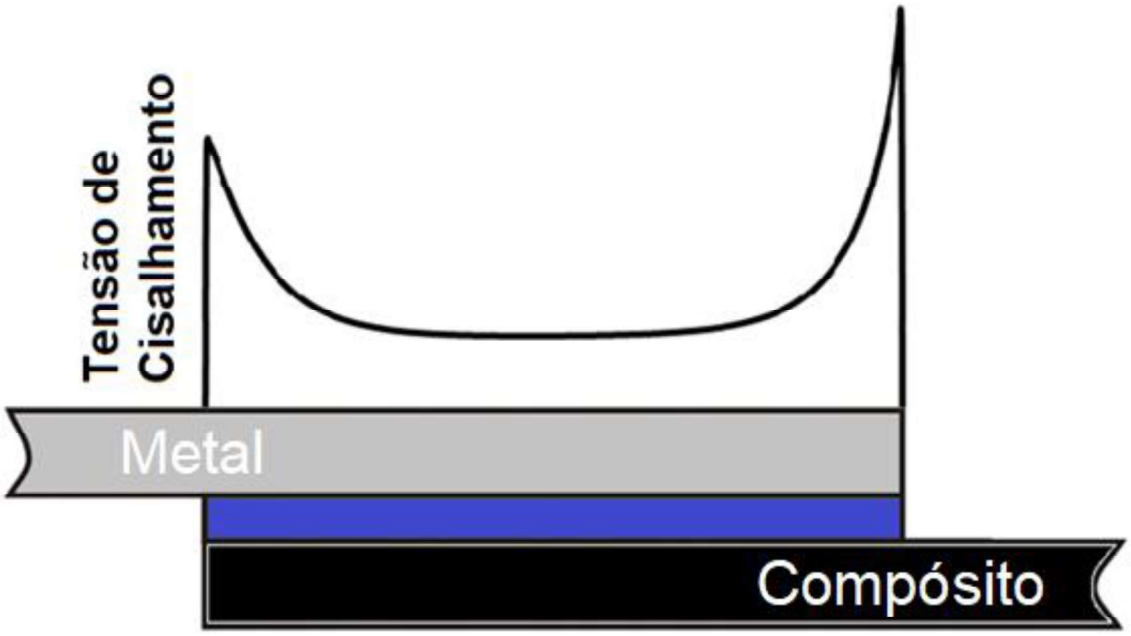


Figura 3 – Tensão de cisalhamento ao longo do comprimento de sobreposição em uma junta de sobreposição simples multi-material

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento e a resistência mecânica de juntas coladas multi-material sob diferentes temperaturas de operação.

Os objetivos específicos podem ser sub divididos em:

1. Determinação da Temperatura de Transição Vítrea (T_g) do adesivo em diferentes procedimentos de cura;
2. Determinação da resistência mecânica do adesivo em Modo I sob diferentes temperaturas;
3. A tenacidade à fratura do adesivo em Modo I sob diferentes temperaturas;
4. A tenacidade à fratura do adesivo em Modo II;
5. O efeito da espessura do adesivo na resistência mecânica de Juntas de Sobreposição Simples (SLJs);
6. O efeito do comprimento de sobreposição na resistência mecânica de SLJs;
7. O efeito da temperatura na resistência de SLJs;
8. A resistência mecânica ao cisalhamento de juntas coladas multi-materiais através da combinação de Aço de Alta Resistência (HSS), Alumínio (Al) e Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP), sob diferentes temperaturas.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho consistiu primeiramente em uma revisão bibliográfica abrangente acerca dos conhecimentos e tecnologias envolvidos em aplicações com adesivos estruturais e juntas coladas. Posteriormente, a pesquisa bibliográfica tornou-se mais focada em juntas dissimilares e suas especificidades.

A segunda etapa consistiu na seleção dos substratos, adesivo, testes e seus respectivos parâmetros a serem utilizados.

A terceira etapa consistiu na preparação dos corpos de prova de adesivo maciço (bulk), dos corpos de prova para medição da tenacidade à fratura em Modo I (DCB) e Modo II (ENF) bem como das juntas coladas de sobreposição simples (SLJ) através da combinação das diferentes configurações de juntas e materiais utilizados nos substratos.

A quarta etapa consistiu na determinação da T_g do adesivo, realização dos testes de tensão dos corpos de prova de adesivo maciço em modo I, do ensaio dos corpos de

prova do tipo DCB para determinação da tenacidade à fratura, também em modo I, determinação da tenacidade à fratura em modo II através dos ensaios dos corpos de prova do tipo ENF, além do teste das SLJs submetidas ao cisalhamento. É importante salientar que as etapas 3 e 4 foram realizadas simultaneamente, em virtude da grande quantidade de casos experimentais aqui apresentados (46 casos experimentais).

A quinta etapa consistiu em simulações numéricas através o software de elementos finitos Abaqus para algumas das juntas testadas ao cisalhamento.

A sexta etapa consistiu na análise dos resultados obtidos e comparação entre os casos experimentais.

O esquema da metodologia utilizada encontra-se apresentado na Figura 4 – Esquema da metodologia científica utilizada nesta dissertação

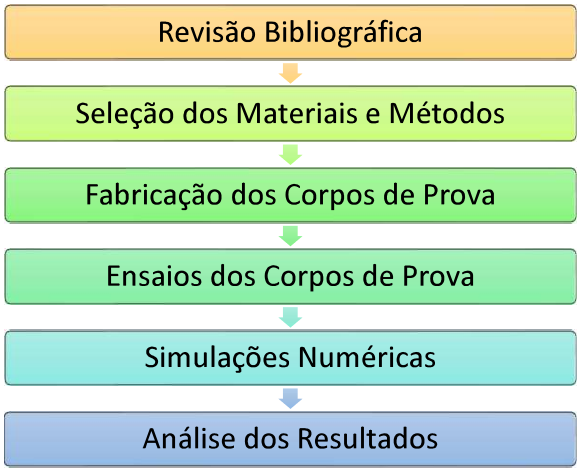


Figura 4 – Esquema da metodologia científica utilizada nesta dissertação

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos.

O Capitulo 1 trata da introdução, motivação, objetivos, metodologia e organização da dissertação.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica acerca de adesivos e juntas coladas, bem como os aspectos referentes à juntas dissimilares.

O Capítulo 3 apresenta os materiais selecionados, bem como o maquinário e métodos experimentais utilizados nos testes.

O Capítulo 4 apresenta os resultados parciais obtidos através de gráficos, tabelas e fotos.

O Capítulo 5 apresenta o modelo numérico utilizado e os resultados obtidos, comparados aos resultados experimentais.

O Capítulo 6 apresenta o cronograma referente à pesquisa desenvolvida e as próximas etapas para a conclusão da dissertação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Definição de Adesivo

Segundo a versão online do Dicionário Michaelis, adesivo pode ser definido como: S.f. 1 Que adere; aderente. 2 Caracterizado pela adesão de partes contíguas. 3 Que tem a capacidade de colar ou grudar coisas umas às outras. 4 Preparado para aderir, por exemplo, pelo revestimento com uma substância pegajosa [1].

Dentro da literatura técnica, voltada para engenheiros, físicos, químicos e demais áreas correlatas, o termo adesivo, segundo Kinloch [5] é definido como um material que quando aplicado às superfícies existentes entre dois materiais, pode os unir e resistir à separação dos mesmos. Ainda, se pode chamar de adesivo estrutural quando o adesivo resiste a forças significativas e também possui função de resistência e rigidez dentro da estrutura.

De acordo com a DIN EN 923 [6], um adesivo é definido como um aglutinante não metálico que atua por meio da adesão e da coesão. A ASTM D907-06 [7] define um adesivo como "uma substância capaz de conter os materiais em conjunto por meio da aderência à superfície" [8] e também define os demais termos apresentados a seguir.

O material que será ligado através do adesivo é chamado de substrato. O substrato também é chamado de aderente, em geral quando este faz parte de uma junta.

A interfase é região na qual ocorre o contato entre o adesivo e o aderente. Essa região é diferente fisicamente e quimicamente tanto do adesivo, quanto do aderente.

A interface é o plano de contato entre o adesivo e o aderente, podendo ser definida matematicamente como a camada limite, dentro da interfase.

O primer é uma substância que pode ser aplicada sobre os aderentes para melhorar adesão e/ou proteger a superfície até a aplicação do adesivo, e consequente fabricação da junta.

Por fim, denomina-se junta adesiva a construção em que aderentes são mantidos unidos por uma camada de adesivo, como mostrado na Figura 5.

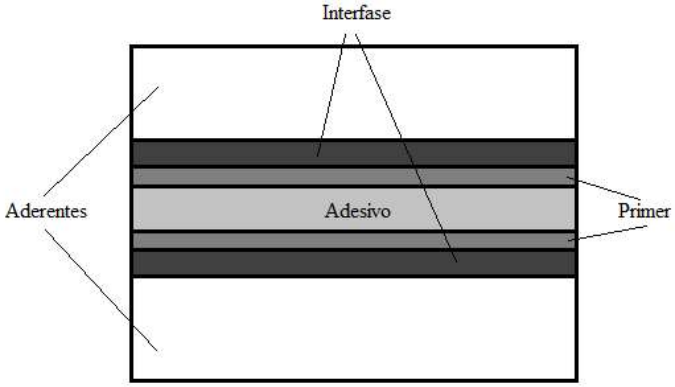


Figura 5 – Esquema de uma junta adesiva [9]

2.2 Vantagens e Desvantagens

Como todo processo de união entre elementos, a união de dois materiais por meio de colagem possui vantagens e desvantagens, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da união por colagem

Vantagens	Desvantagens
Distribuição mais uniforme das tensões na superfície ligada (Figura 6)	Baixa resistência às forças de arrancamento, clivagem e impacto
Amortecimento de vibrações	Alta susceptibilidade à tensões localizadas
União de materiais diferentes	Baixa resistência ao calor e umidade
Passível de automação	Necessidade de ferramentas de fixação
Pode ser utilizado em conjunto com outros métodos de união	Necessidade de uma cuidadosa preparação da superície
Flexibilidade da forma da junta	Necessidade de cura
Resistente a esforços de tração e compressão	Difícil controle de qualidade

Algumas comparações entre propriedades provenientes de juntas mecânicas e juntas coladas podem ser visualizadas através da Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação de propriedades entre juntas mecânicas e juntas coladas [10, 11].

Propriedades	Junta mecânica	Junta colada
Etapas de fabricação	Muitas	Poucas
Tempo de fabricação	Curto	Longo (devido ao tempo de cura)
Preparação da Superfície	Mínima/Nenhuma	Extensiva, crítica
Peso da junta	Alto	Baixo
União de seções finas	Limitado	Possível
Superfície Externa	Saliências	Pode ser lisa
Limitações de Temperatura	Baixa	Alta
Dificuldade de Inspeção	Pouca/Nenhuma	Alta
Problemas com o meio-ambiente	Possibilidade de corrosão galvânica	Sensibilidade ao solvente
Resistência à umidade	Nenhuma	Muita (Auto Vedante)
Concentração de Tensões	Significativas	Podem ser muito baixas
Efeitos por carregamentos de longa duração	Relaxamento e Fadiga	Fluência
Sensibilidade às forças de arrancamento	Resistente	Suscetível
Sensibilidade às forças de tração	Suscetível	Resistente
Amortecimento de vibrações	Nenhum	Amortecimento intrínseco
Impacto na saúde e segurança	Corte, perfuração e temperatura	Solvente e Temperatura

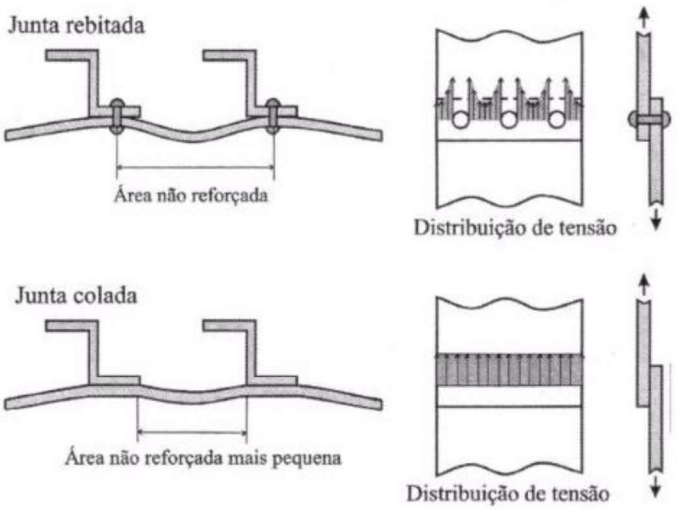


Figura 6 – Distribuição de tensões em juntas rebitadas e coladas [9]

2.3 Classificação dos Adesivos

Existem diversos critérios para a classificação de adesivos. O primeiro, e mais amplos deles é a distinção entre adesivos naturais e sintéticos. Os adesivos naturais são fabricados a partir de materiais disponíveis a natureza e/ou como subprodutos animais ou agrícolas. Já os adesivos sintéticos, são fabricados com materiais desenvolvidos pelo homem, como polímeros [9].

A classificação dos adesivos em naturais ou sintéticos é demasiado ampla. Por isso, a indústria utiliza outros critérios para classificar os adesivos, como exposto abaixo:

- Função;
- Composição química
- Modo de aplicação ou reação
- Forma física
- Custo
- Aplicação

Nos tópicos a seguir serão abordados os dois primeiros critérios, por serem mais importantes na escolha dos adesivos.

2.3.1 Função

Em relação à sua função, os adesivos podem ser classificados como estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho, e seu critério de classificação é definido por valores de resistência ao corte superiores a 5-10 MPa, e uma boa resistência às condições ambientais comuns. Um adesivo estrutural tem função de manter unidas as estruturas e resistir a cargas elevadas sem grande deformação [1, 9, 12].

Os adesivos não estruturais, não resistem à aplicação de grandes cargas e tem por função manter em posição materiais leves. Além disso, os adesivos não estruturais degradam-se após exposição prolongada ao ambiente, e fluem em cargas moderadas. Os adesivos não estruturais são, por vezes, usados com outro tipo de ligações mecânicas. Nessas aplicações, a ligação adesiva é considerada secundária. O uso de um adesivo não estrutural em conjunto com um método mecânico permite reduzir o número de ligações mecânicas e também permite vantagens adicionais tais como amortecimento de vibrações, vedação ou isolamento [1, 9, 12].

Os adesivos estruturais podem ser subdivididos nas seguintes famílias:

- Acrílicos;
- Epóxidos;
- Fenólicos;
- Poliuretanos;
- Poliamidas

As subdivisões de algumas destas famílias são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 -Subfamílias dos adesivos acrílicos, epóxidos e fenólicos [12]

Acrílicos	Anaeróbicos
	Cianoacrilatos
	Acrílicos modificados
Epóxidos	Epóxido-fenólicos
	Epóxido-nitrilo
	Epóxido-poliamida
	Epóxido-polisulfitos
	Epóxido-poliuretano
	Epóxido-vinílico
Fenólicos	Fenólicos-cloropreno
	Fenólicos-nitrilo
	Fenólicos-vinílicos

2.3.2 Composição química

A classificação dos adesivos segundo sua composição química divide os adesivos como termoendurecíveis, termoplásticos, elastómeros ou híbridos.

2.3.2.1 Adesivos termoendurecíveis

Os adesivos termoendurecíveis são materiais que não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente após a sua cura inicial [9]. Após concluída a cura, este tipo de adesivo pode ser amolecido até um determinado ponto através do reaquecimento, mas não pode ser refundido ou restaurado para o estado anterior à cura. Elevando-se suficientemente a temperatura, esses adesivos enfraquecem devido à oxidação ou quebra das cadeias moleculares. Os adesivos termorrígidos curam através de uma reação química irreversível, que pode ocorrer à temperatura ambiente ou em temperaturas elevadas, dependendo do tipo de reação química. Para alguns adesivos que curam à temperatura ambiente, a reação química de natureza exotérmica fornece a energia necessária para cura do material polimérico. A reação química que ocorre na cura faz com que ocorra a reticulação do adesivo, que a partir de dois polímeros lineares gera uma estrutura tridimensional rígida.

2.3.2.2 Adesivos termoplásticos

Os adesivos termoplásticos são polímeros sólidos que amolecem ou fundem quando submetidos ao calor. Sua diferença em relação aos adesivos termoendurecíveis reside no fato de que estes não curam ou endurecem quando submetidos ao calor. Em geral, este tipo de adesivo é um sólido que amolece ou se funde ao ser exposto ao calor. Esse comportamento vem do fato de que sua cura, diferente dos termorígidos, não ocorre de forma que as moléculas estejam em uma estrutura reticulada. O adesivo é fundido e aplicado sobre o substrato o qual se deseja colar, e conforme este vai perdendo calor ocorre sua solidificação e união dos materiais os quais se deseja colar [9].

É importante notar que número elevado de ciclos térmicos pode causar a degradação do material. Além disso, possuem temperatura de serviço mais limitada, podem apresentar fluência mesmo a baixas temperaturas.

2.3.2.3 Adesivos elastoméricos

Os adesivos elastoméricos têm uma classificação própria devido às suas características reológicas únicas [9]. Tratam-se de polímeros sintéticos ou naturais, com grande tenacidade e capacidade de deformação elástica quando submetidos à carregamentos trativos e compressivos. Tem boa aplicabilidade em juntas submetidas à carregamentos não uniformes devido à alta quantidade de energia que podem absorver.

Podem ser classificados também como termoendurecíveis ou termoplásticos, sendo os primeiros utilizados também como adesivo estrutural. Os adesivos elastoméricos em geral apresentam alto grau de deformação, baixo módulo de elasticidade e elevada tenacidade. Por isso, estes adesivos apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade que permite ligar substratos com coeficientes de expansão térmica diferentes. Também são utilizados como vedantes, amortecimento de vibrações e isolamento sonoro.

2.3.2.4 Adesivos híbridos

Adesivos híbridos são obtidos através da combinação dos outros três tipos de adesivos apresentados anteriormente, termoendurecíveis, termoplásticos e elastoméricos. O objetivo desta combinação de materiais é explorar o que de melhor cada um dos materiais tem a oferecer. Resinas rígidas e frágeis para altas temperaturas podem ser combinadas com um adesivo elastomérico ou termoplástico flexível e tenaz para melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorver energia. Ainda, podem ser introduzidas microestruturas no interior do adesivo, como uma fase elastomérica pequena, porém aumentado significativamente a tenacidade do adesivo, através de ligações químicas com a maior parte do adesivo, atuando de forma a reduzir ou impedir a propagação de trincas no mesmo [9].

2.4 Teoria da Adesão

Existem diversas teorias propostas para explicar o fenômeno da adesão, cada uma delas associada a resultados experimentais. Todavia, nenhuma delas explica de forma completa e geral, além de ensaios tomando por base uma única teoria às vezes

apresentar um resultado contraditório. Por isso, acredita-se que o mecanismo da adesão seja uma combinação das diversas teorias propostas.

A principal função do adesivo é unir partes. E essa união se dá através da combinação de forças mecânicas, químicas e físicas que atuam em conjunto e influenciando umas às outras. A adesão é um fenômeno essencialmente interfacial, e sua resistência corresponde ao grau de atração entre duas superfícies unidas e seu valor depende do tipo de teste utilizado na avaliação.

Dentre todas as teorias propostas para explicar a adesão, quatro teorias ganharam mas destaque e foram mais aprofundadas: Teoria mecânica, teoria da adsorção, teoria da difusão e teoria eletro estática.

2.4.1 Teoria mecânica

Foi a primeira teoria proposta para explicar a adesão, partindo do fato conhecido que a superfície efetiva de um objeto não é perfeitamente lisa, e sim composta por picos e vales de determinado tamanho e perfil, ou seja, parâmetros de rugosidade. Para que ocorra a adesão, o adesivo deve penetrar nas fendas existentes na superfície, parra que ocorra a ancoragem mecânica, conforme mostrado na Figura 7. Fato é que o adesivo deve ter uma viscosidade adequada para que molhe adequadamente penetre de forma suficiente os poros e aberturas da superfície que deseja se colar em tempo hábil, ocorrendo assim, uma boa adesão.

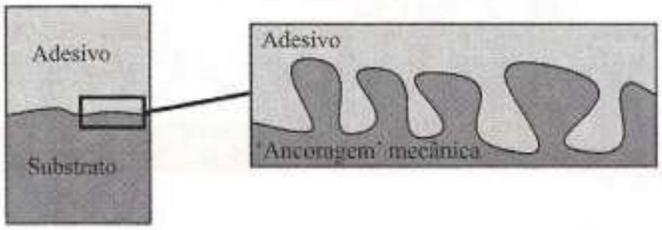


Figura 7 – Mecanismo da adesão mecânica [9]

Na presença de asperezas e/ou poros, o adesivo infiltra-se naturalmente, sendo a rugosidade um parâmetro preponderante, pois favorece o aumento da área de contato entre o substrato e o adesivo, com um consequente aumento das ligações da interface. Os estudos desenvolvidos por Charbonier [13] foram os primeiros à indicar existência de uma rugosidade ótima para a resistência da junta.

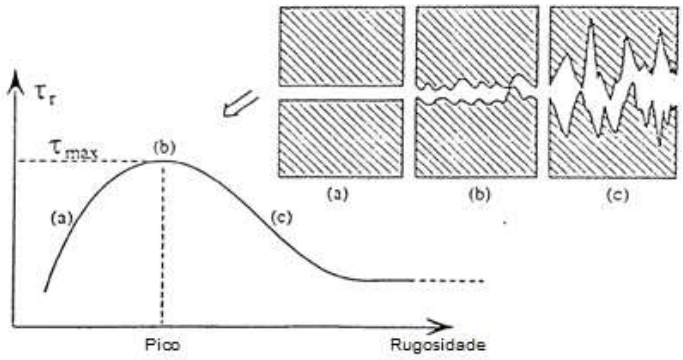


Figura 8 - Mudança na resistência à ruptura em função da rugosidade [13]

A Figura 8 mostra a influência da rugosidade, para uma superfície lisa (a) a colagem pode ser defeituosa por não haverem de pontos de ancoragem e tem difícil adesão, enquanto para uma superfície muito rugosa (c) a colagem também é defeituosa devido à má penetração do adesivo nas cavidades.

Trabalhos mais recentes como os desenvolvidos por Ghumatkar et al. [14], mostram a existência de valores de rugosidade ótimos para substratos metálicos, como apresentado na Figura 9.

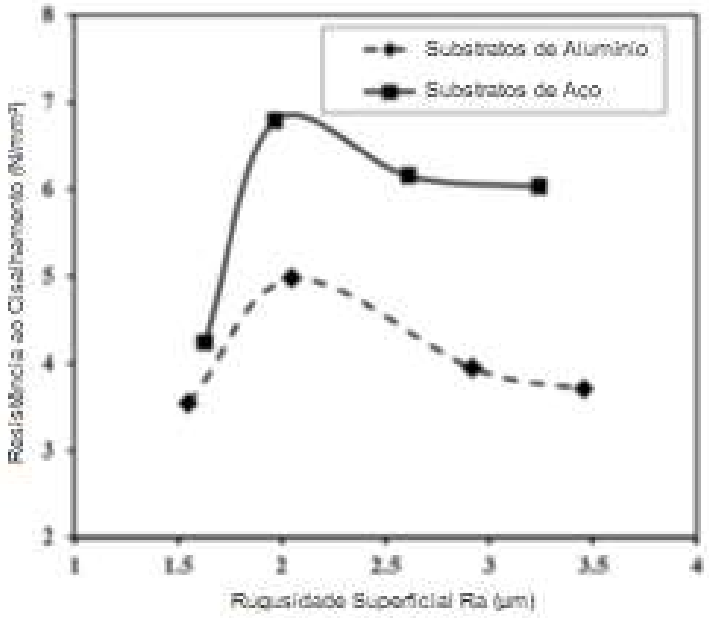


Figura 9 - Resistência ao cisalhamento em função da rugosidade para aço e alumínio [14]

Apesar do exposto acima, uma boa adesão pode ocorrer também em superfícies lisas, o que reforça a possibilidade de contradição acerca de resultados experimentais

apresentada anteriormente, devido ao fato que uma única teoria de adesão não pode ser levada em consideração de forma global. Dos Reis et al. (2017) [15], mostrou que o aumento da resistência mecânica não é proporcional ao aumento da rugosidade superficial em junta coladas de alumínio unidas com um adesivo epóxi de duas partes, bem como mesmo para superfícies não tratadas mecanicamente, uma boa adesão e resistência mecânica podem ser obtidas, conforme mostrado na Figura 13.

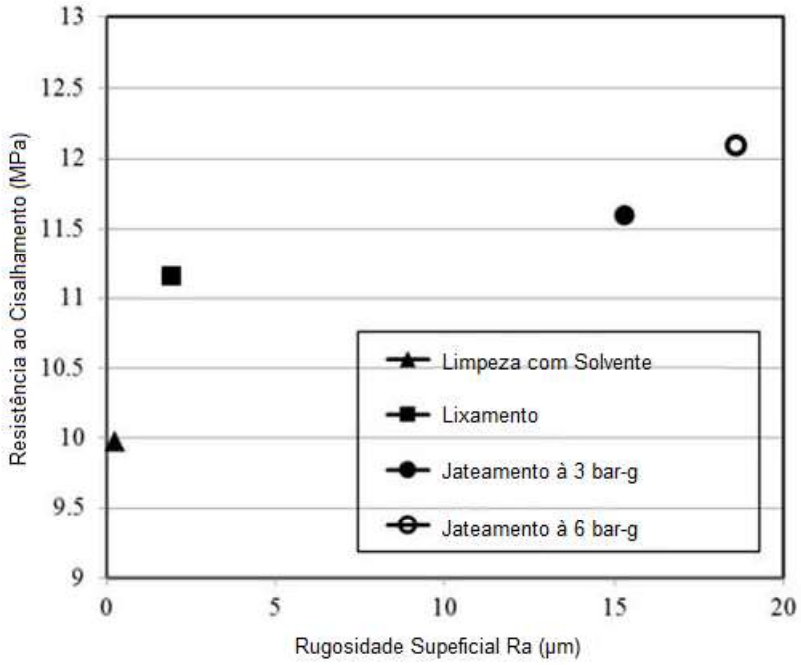


Figura 10 – Efeito da preparação de superfície e parâmetro de rugosidade Ra na resistência mecânica de juntas de alumínio [15]

2.4.2 Teoria da adsorção

A teoria da adsorção descreve o mecanismo essencialmente através das forças de superfície. Essas forças estão divididas por dois modos de atuação. No nível molecular considerando-se o mecanismo da molhabilidade e existência de uma camada limite, a denominada adsorção física, ocorre através da existência de forças van der Waals, dipolos induzidos ou permanentes, pontes de hidrogênio e interações ácido base. No nível atômico através das ligações químicas primárias, a adsorção química ocorre pela existência de ligações iônicas, covalentes e metálicas. Os dois tipos de adsorção podem ser visualizados na Figura 11.

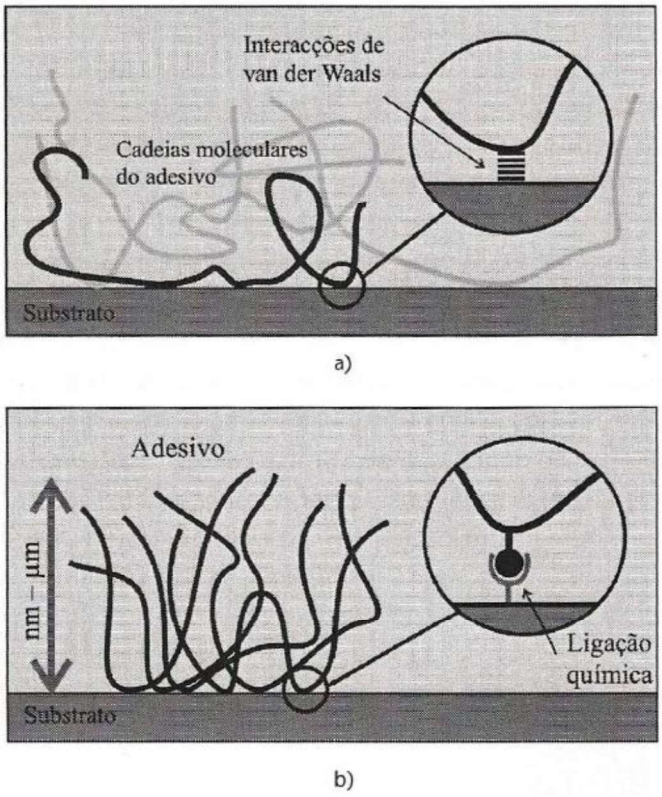


Figura 11 – Esquema da adesão; a) por adsorção física; b) por adsorção química [9]

É importante salientar que as forças primárias (adsorção química) não estão presentes em diversos adesivos. Todavia, é desejável a existência deste tipo de forças (mais fortes), especialmente para o bom desempenho de adesivos estruturais. A Figura 12 mostra a energia de ligação em função da distância para algumas forças de superfície.

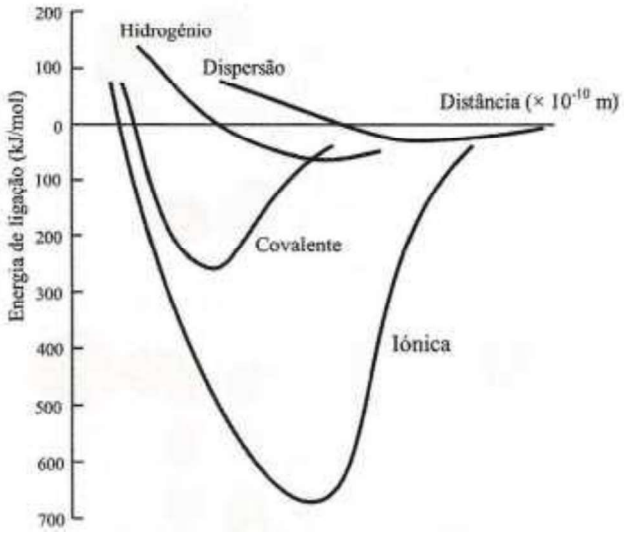


Figura 12 – Energia de ligação em função da distância [9]

2.4.3 Teoria da Difusão

A teoria da difusão foi desenvolvida por uma escola russa de química e tem sua validade para os mecanismos de adesão apenas de materiais poliméricos, não sendo válida para a adesão entre adesivos e substratos metálicos. Segundo esta teoria, a adesão corre através da difusão da cadeia molecular da superfície de um polímero sobre a superfície de outro polímero, resultando em uma ponte ou ligação através da interface, como mostrado na Figura 13.

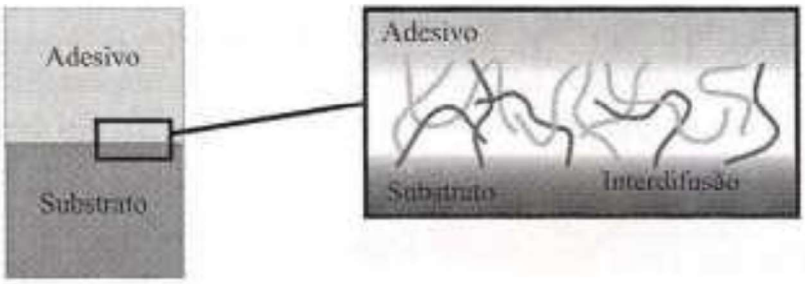


Figura 13 - Esquema da teoria da adesão por difusão [9]

Quando este tipo de adesão ocorre entre um material polimérico e ele próprio, é dado o nome de autoadesão, enquanto ao tratar-se de dois polímeros distintos é chamado de heteroadesão. Ainda, é importante salientar que a teoria da difusão não se aplica quando os materiais a ligar não são solúveis ou o movimento da cadeia do polímero é restringida pela sua estrutura reticulada ou cristalina, ou quando o adesivo está abaixo da sua temperatura de transição vítrea [9].

2.4.4 Teoria eletrostática

Também desenvolvida por um russo, esta teoria se aplica especificamente à adesivos de fita sensíveis à pressão. A teoria propõe que a adesão ocorre pela transferência de elétrons através da interface, criando cargas positivas e negativas que se atraem. Consequentemente, desenvolve-se uma dupla camada elétrica entre as cargas opostas que se atraem, provocando assim o surgimento de forças que atuam de forma a impedir a separação, como mostrado na Figura 14. Apesar da existência de resultados experimentais que apontam a ocorrência de descargas elétricas ao separar o adesivo do substrato, existe a controvérsia de que as forças eletrostáticas não seriam a causa, mas sim o resultado, de uma junta resistente.

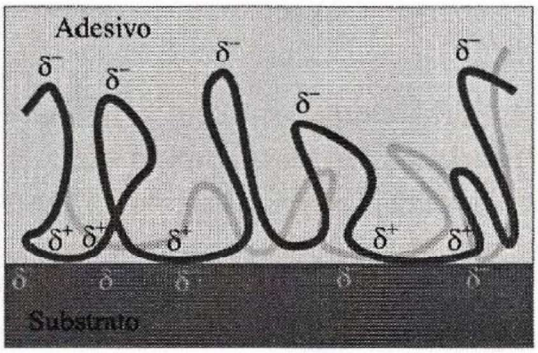


Figura 14 – Esquema da teoria eletrostática [9]

2.5 Defeitos em Juntas coladas

Após ensaios em juntas coladas, os resultados obtidos divergem do esperado de acordo com os modelos teóricos, às vezes até em grandes ordens de grandeza. Existem três justificativas propostas para tal fato, a serem discutidas nos itens a seguir.

2.5.1 Camada Fraca

A primeira razão para a diferença entre os valores teóricos e experimentais foi proposta por Bikermann [16], apresentando a hipótese de que as superfícies em contato seriam isentrópicas e de composição uniformes estava equivocada, dando origem à uma camada fraca, conforme mostrado na Figura 15.

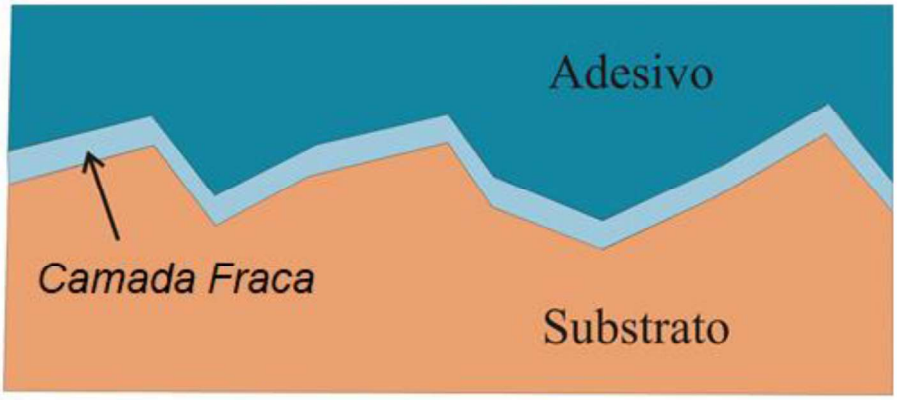


Figura 15 - Representação esquemática de uma camada fraca [9]

Na realidade a superfícies dos materiais reais tem propriedades distintas em relação ao seu interior, e dão origem a uma camada fraca por diversos motivos como:

1. Inclusão de gases em vazios ou bolhas;

2. Formação de filmes de óxidos mais fracos ou com baixa energia de ligação às camadas adjacentes;
3. Concentração de outros constituintes na superfície, mesmo em pequenas proporções.

2.5.2 Concentração de Tensões

A segunda razão que explica os valores menores de resistência é explicada pelo fenômeno da concentração de tensões. A distribuição de tensões sobre uma junta colada não é uniforme, ocorrendo concentração de tensões em suas extremidades como mostrado na Figura 16 [9]. Esse fato, explica também a existência de um valor limite de comprimento de sobreposição para o qual seu aumento não representa um aumento na resistência da junta, conforme Figura 17.

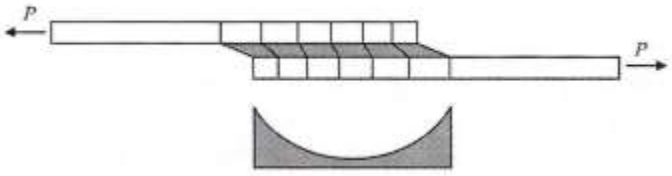


Figura 16 – Distribuição de tensões em uma junta de sobreposição simples [9]



Figura 17 – Resistência de uma junta de sobreposição simples em função do comprimento de comprimento de sobreposição [9]

2.5.3 Irregularidades de Superfícies

A terceira e última causa, recorrente em todos os materiais, é a existência de irregularidades de superfície, que agem como iniciadores e propagadores de trincas. Conforme as teorias clássicas de Griffith e Irwin, uma trinca pode ter resultados

catastróficos pela sua natureza de propagação rápida depois de um comprimento crítico. A divergência entre os valores teóricos esperados e os resultados práticos pode ser atribuída, a defeitos, vazios e outras irregularidades geométricas, que agem como concentradores de tensão durante o carregamento, conforme mostrado na Figura 18.

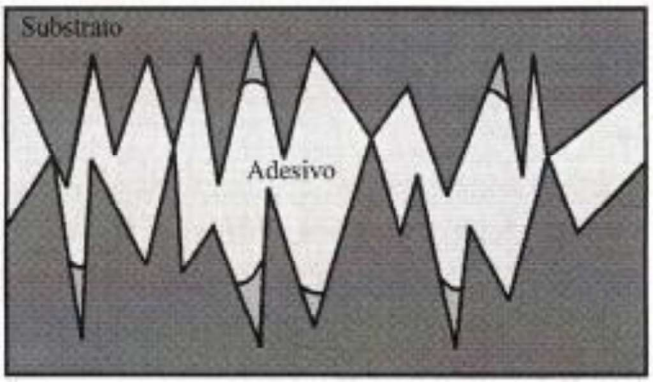


Figura 18 - Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares [9]

2.6 Modos de Carregamento

Para que o projeto de uma junta colada apresente um desempenho satisfatório em operação, se faz necessário conhecer a natureza das tensões atuantes sobre a junta e o respectivo comportamento produzido ao ser submetida à estas tensões.

Existem essencialmente quatro modos fundamentais de carregamento: Corte (cisalhamento), tração, arrancamento e clivagem. Qualquer combinação ou variação destes pode ser encontrada na prática [9]. Os modos citados neste parágrafo podem ser vistos na Figura 19 – Modos fundamentais de carregamento.

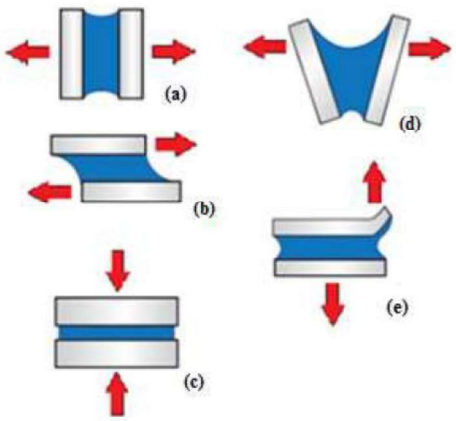


Figura 19 – Modos fundamentais de carregamento, (a) Tração (b) Corte ou cisalhamento (c) Compressão (d) Clivagem (e) Arrancamento [17, 18]

2.7.1 Tração e Compressão

As tensões de tração ocorrem quando as forças aplicadas ocorrem de forma perpendicular à junta, de forma que os substratos sejam paralelos e todas as tensões atuantes sejam normais à superfície. Todavia, em juntas reais, isso não ocorre de maneira idêntica ao modelo teórico, devido à variação da espessura do adesivo ao longo da junta, e pelo fato das forças não serem perfeitamente perpendiculares, isso resulta primeiramente em uma distribuição de tensões ao longo do da junta que alternam entre tração e compressão, conforme mostrado na Figura 20, além de forças de corte e cisalhamento.

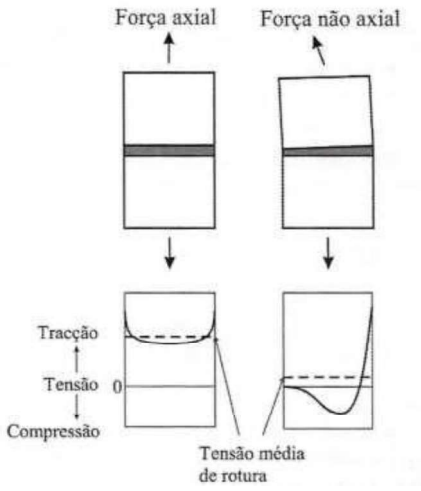


Figura 20 – Distribuição de tensões em uma junta devido à em função da variação da axialidade [12]

As juntas submetidas a carregamentos de tração, em especial para juntas de topo, podem vir a apresentar mesmo para forças perfeitamente axiais, tensões de arrancamento e corte caso o módulo de elasticidade do adesivo seja menor que do substrato, devido à contração lateral do adesivo.

2.7.2 Cisalhamento

As tensões de cote, também chamadas de cisalhamento, ocorrem quando as forças atuando no plano do adesivo tendem a separar os substratos [1]. De maneira geral, juntas coladas são mais resistentes quando submetidas à tensões de cisalhamento. Isso, juntamente com a relativa facilidade de fabricar este tipo de junta, faz com que estas sejam as mais utilizadas na prática, especialmente as juntas de sobreposição simples, ou *single lap joint*.

Os valores da tensão de cisalhamento podem ser determinados de maneira simples dividindo-se a força aplicada pela área colada. Porém, a tensão não é distribuída uniformemente no adesivo, estando mais concentrada nos extremos do comprimento de sobreposição e mais reduzida na região central como mostrado na Figura 21, conforme o método de deformação diferencial introduzido por Volkersen em 1983.

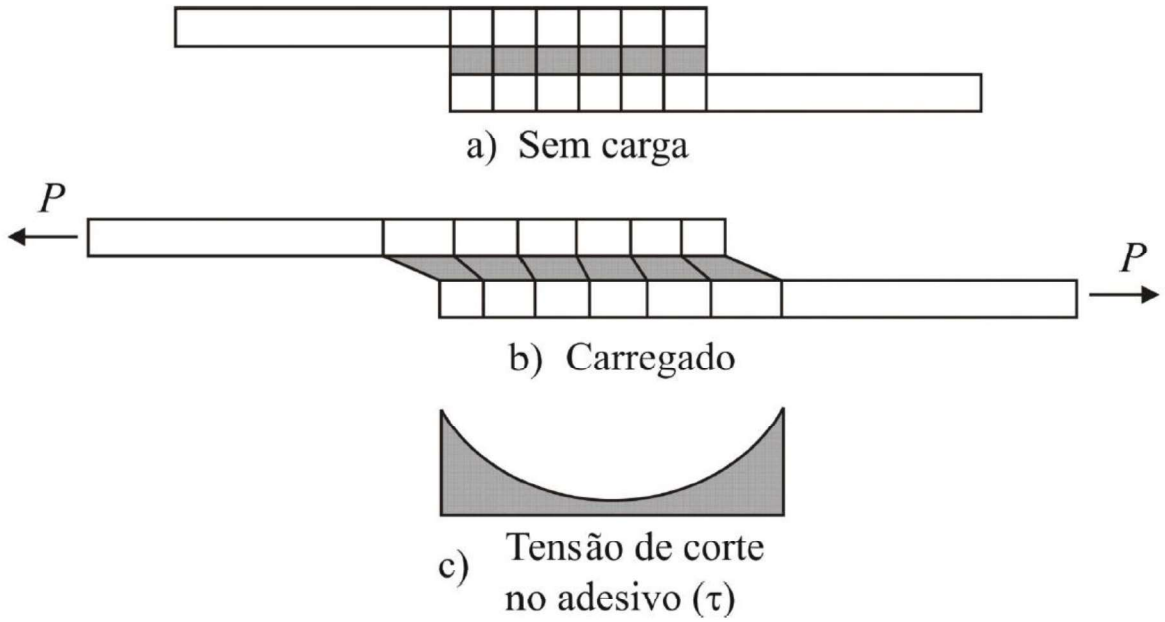


Figura 21 – Distribuição de Tensões conforme análise de Volkersen [9]

2.7.3 Clivagem e arrancamento

As tensões de clivagem e arrancamento são as mais críticas para uma junta colada. A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos como pode ser visto na Figura 22. As tensões de arrancamento são similares às de clivagem com a diferença de que um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo assim deixar-se deformar plasticamente e levar à concentração das forças trativas numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação conforme mostrado na Figura 23.

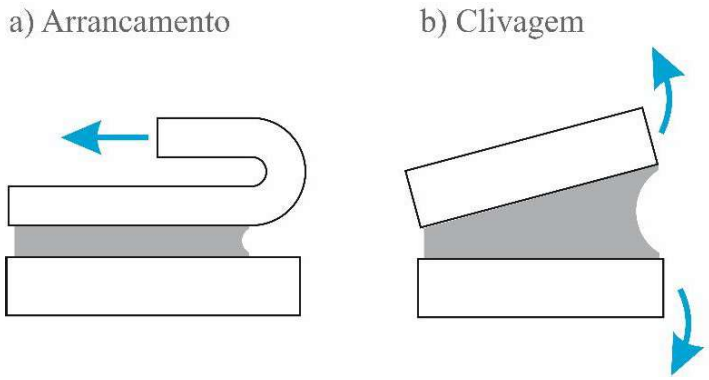


Figura 22 – Esforços de arrancamento (a) e clivagem (b) [5]

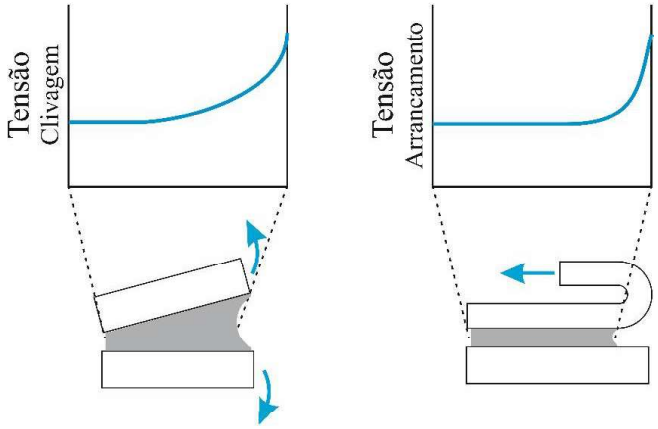


Figura 23 - Distribuição da tensão de clivagem e arrancamento [5]

As juntas coladas apresentam resistência mecânica muito menor quando submetidas a carregamentos de clivagem ou arrrancamento, comparado à resistência ao cisalhamento puro. Isso ocorre, porque nestes tipos de carregamento a tensão está localizada na extremidade da junta e está concentrada numa área muito menor. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e também uma maior resistência como ilustrado na Figura 24.

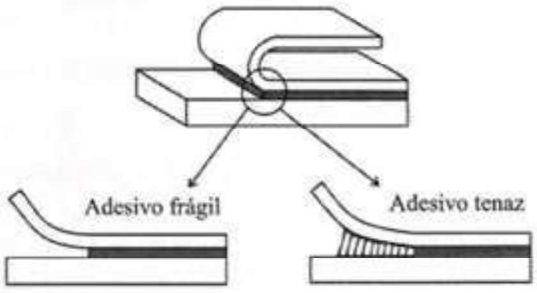


Figura 24 – Distribuição de tensões em adesivos frágeis e tenazes [9]

2.7 Tipos de Juntas

As juntas coladas podem possuir diversas formas em função de fatores como: tensões envolvidas, intensidade da tensão e facilidade de fabricação.

Os diversos formatos de juntas, mostrados na Figura 25 foram evoluindo para diminuir as tensões envolvidas nela com base nos avanços teóricos dos modelos de tensões, porém devido ao custo, as juntas mais simples continuam sendo as mais utilizadas. As juntas mais comuns encontradas são de sobreposição simples, dupla e chanfro [19].

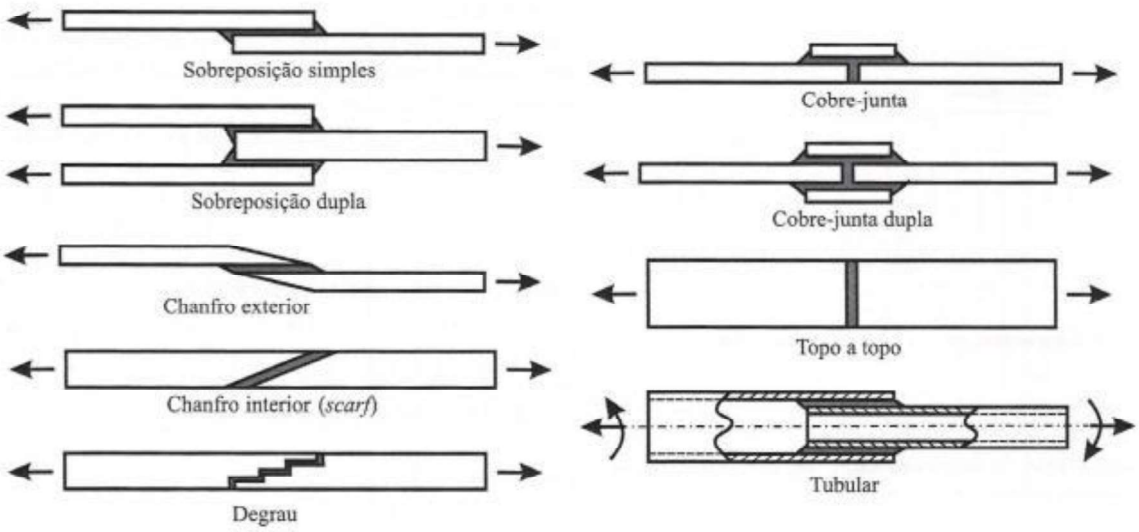


Figura 25 - Principais tipos de juntas [9]

2.8 Preparação da Superfície

A preparação da superfície é uma das etapas mais importantes no processo de fabricação de juntas coladas, que envolve processos químicos, físicos e/ou mecânicos de acordo com o material do substrato, e possui grande influência na resistência mecânica final da junta. Partindo do que foi apresentado pela Teoria da Adesão, nota-se que os tratamentos superficiais são quase sempre necessários, e não somente para a obtenção de uma molhagem perfeita, e sim para buscar uma coexistência entre os diversos tipos de ligação propostos pelas teorias da adesão e melhoria dos parâmetros físicos e químicos envolvidos.

Para reduzir a influência de impurezas junto à superfície, processos de preparação, também denominados de tratamento de superfície, são realizados, provocando um acréscimo considerável na resistência mecânica de juntas adesivas, entre os quais podemos destacar o tratamento mecânico por meio de abrasivos [1, 9, 15].

Como já exposto anteriormente, numa junta colada ideal espera-se que o elo mais fraco seja o adesivo ou o aderente e não a interface, sendo o objetivo da preparação da superfície obter este resultado. A Figura 26 mostra o esquema de “elos de adesão” em uma junta colada.

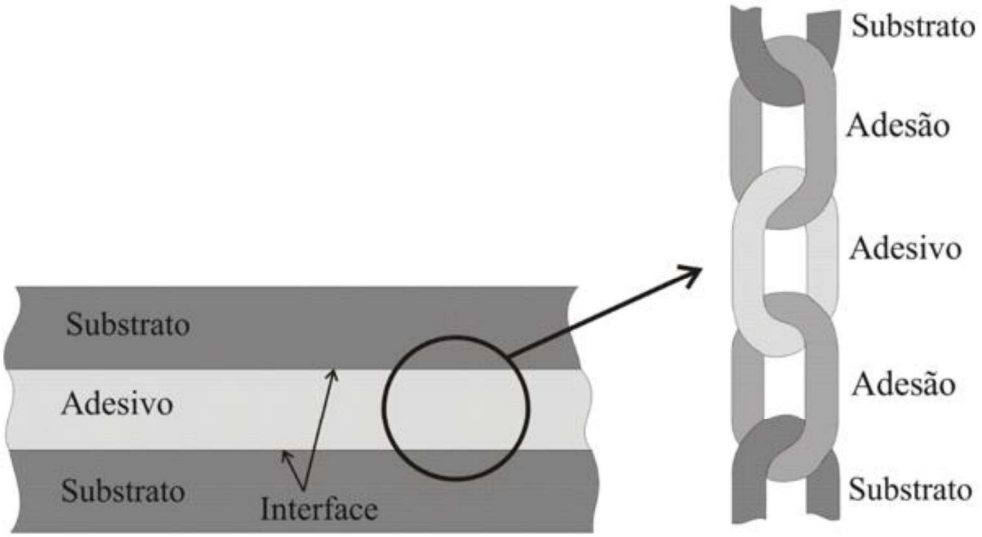


Figura 26 – Adesão em uma junta colada

Tendo em vista que os valores de resistência do adesivo e do substrato são conhecidos na literatura, a compreensão e controle da superfície do aderente se faz necessária em juntas coladas onde a interface é o elo mais fraco, à baixa resistência sendo associada à ruptura adesiva. Sendo a ruptura adesiva resultado das camadas fracamente ligadas à superfície, como óxidos e partículas soltas e/ou contaminantes como óleos, gorduras e agentes desmoldantes, que devido à sua baixa energia superficial impedem a boa molhagem do substrato pelo adesivo.

2.9 Modos de Ruptura

O objetivo de uma junta é resistir e transmitir os carregamentos estáticos e dinâmicos ao qual está submetida dentro de determinadas condições ambientais, mantendo sua integridade estrutural. Por isso, se faz necessário a compreensão da

forma que essas tensões atuam sobre as juntas e os consequentes modos de ruptura por elas induzidos. Além disso, é necessário projetar as juntas coladas de forma que a ligação entre o adesivo e o aderente não seja a mais fraca presente. Por isso se faz necessário estudar os modos de ruptura de uma ligação adesiva para que se obtenham melhores propriedades. De maneira geral, existem três modos de ruptura distintos: ruptura coesiva no interior do adesivo, ruptura adesiva na interface entre o adesivo e o substrato, ou ruptura interfacial, e a ruptura no substrato, ou ruptura coesiva no substrato. Ainda, a ruptura pode ocorrer parcialmente de forma adesiva e parcialmente de forma coesiva, denominada de ruptura mista. Esses modos de ruptura podem ser visualizados na Figura 27.

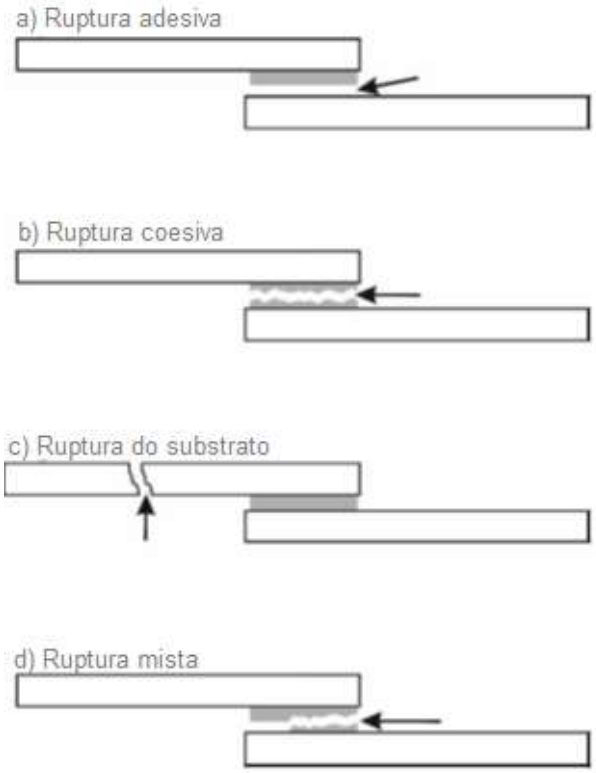


Figura 27 - Modos de ruptura em juntas adesivas [12]

A ruptura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e o substrato. Após a ruptura é possível ver que uma das superfícies do substrato não apresenta qualquer resíduo de adesivo. Em geral, esse tipo de ruptura ocorre devido à uma má preparação das superfícies ou à não compatibilidade entre o adesivo e o substrato.

A ruptura coesiva no adesivo ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência do próprio adesivo, além do substrato também ser mais resistente que o adesivo. Ao analisar juntas coladas após romperem desta forma, é possível visualizar que ambos os substratos estão cobertos pelo adesivo.

A ruptura coesiva no substrato ocorre quando a junta é bem projetada e sua carga de ruptura coincide com a resistência mecânica do substrato.

Finalmente, a ruptura mista, ou combinação das rupturas adesiva e coesiva, ocorre devido a uma má limpeza durante a preparação da junta ou mesmo devido ao próprio adesivo escolhido para a aplicação.

As juntas coladas devem ser sempre projetadas e fabricadas com os cuidados necessários para que a ruptura ocorra de forma coesiva, haja visto que os cálculos executados para estimar a resistência da junta são baseados na resistência máxima do adesivo ou aderente, e não na resistência da ligação adesiva. Evitar a ruptura adesiva é primordial para um bom funcionamento da junta, e uma das melhores formas de evitar isso, é através de uma boa preparação da superfície.

2.10 Efeito da Temperatura sobre as propriedades dos adesivos e juntas

2.10.1 Efeito da Temperatura sobre as propriedades dos adesivos

As propriedades mecânicas dos adesivos estruturais como resistência mecânica, ductilidade e tenacidade à fratura são diretamente afetadas pela temperatura. Isso ocorre, devido à natureza polimérica dos adesivos, fazendo com que a temperatura de utilização destes seja geralmente o fator mais importante durante o projeto de uma junta colada. Adesivos epóxidos tipicamente apresentam diminuição da resistência mecânica e do módulo de elasticidade associados à um aumento da ductilidade conforme o aumento da temperatura, para os testes realizados em amostras de corpos de prova maciços (bulk) com temperaturas abaixo da Temperatura de Transição Vítrea (T_g). Além disso, à medida que a temperatura diminui, o adesivo torna-se mais frágil e sofre um aumento aparente em sua resistência mecânica e módulo de elasticidade, porém com uma menor ductilidade associada. Para temperaturas acima da T_g, o adesivo se comporta como uma borracha, com uma drástica redução de resistência, elasticidade e ductilidade [2, 20-23].

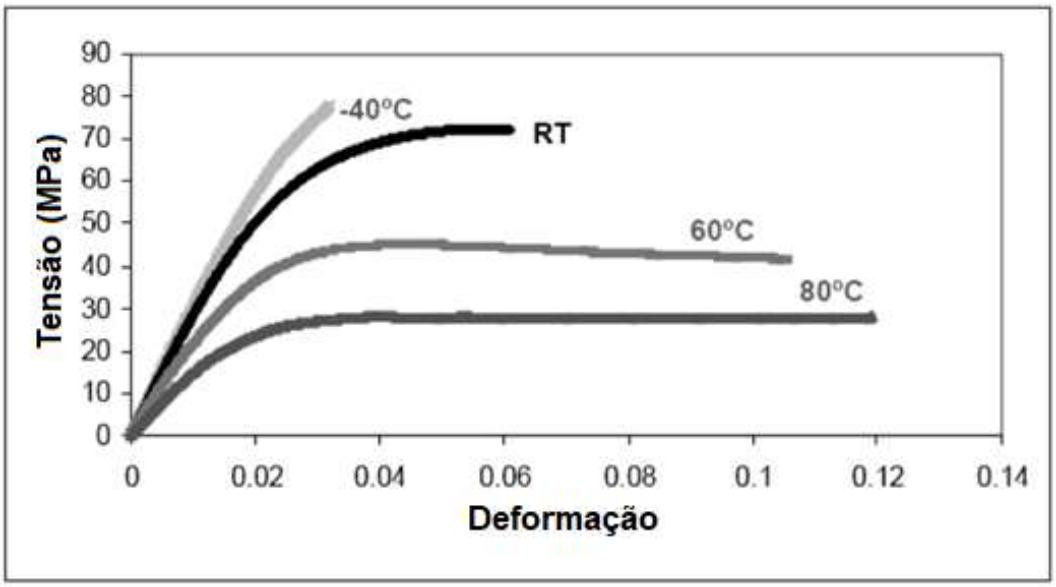


Figura 28 – Curvas tensão-deformação do adesivo AV118 em função da temperatura [2]

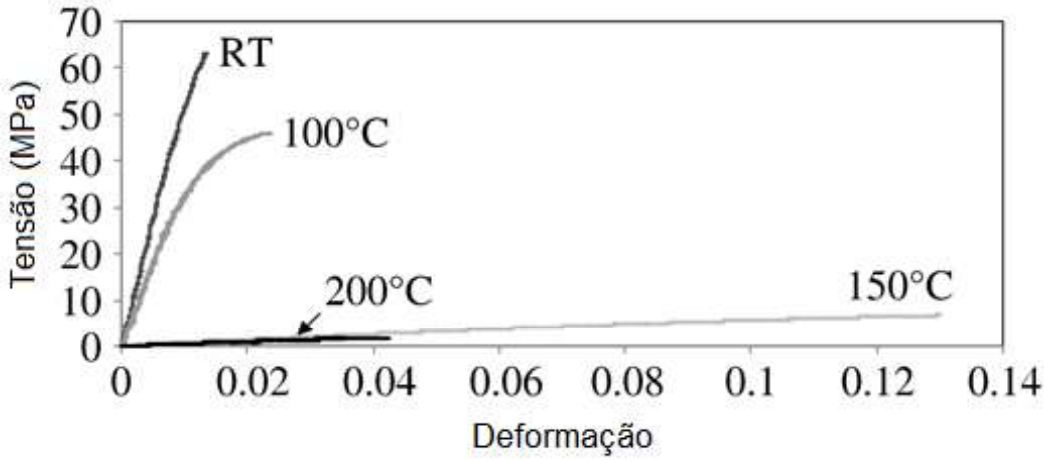


Figura 29 - Curvas tensão-deformação do adesivo XN2144 em função da temperatura [21]

2.10.2 Efeito da temperatura nas propriedades das juntas

As juntas de sobreposição simples multi-material possuem uma distribuição de tensão de cisalhamento assimétrica ao longo do comprimento de sobreposição, devido à diferença de rigidez entre o adesivo e aderentes e as tensões térmicas residuais. A diferença entre o módulo de elasticidade de cada um dos substratos em uma junta dissimilar leva a uma distribuição de tensão desigual quando a junta é carregada mecanicamente em modo II. Além disso, de acordo com a temperatura de utilização da junta, esta pode vir a ter uma tensão térmica residual, em virtude da diferença do

coeficiente de expansão térmica entre o adesivo e os substratos [2, 20-24] A carga térmica é definida como a diferença entre a temperatura livre de estresse térmico *(T_g* ou temperatura de cura para adesivos que curam abaixo da temperatura de transição vítrea) e a temperatura de trabalho, conforme descrito na Equação 1.

$$\Delta T = T_o - T_{sf} \quad (1)$$

$\Delta T = Tensão\ térmica\ residual$
$T_o = Temperatura\ de\ operação\ da\ junta$
$T_{sf} = Temperatura\ livre\ de\ estresse\ térmico$

Para uma junta colada dissimilar submetida à um carregamento mecânico simultaneamente à uma tensão térmica residual, a distribuição de tensões resultante pode ocorrer de duas maneiras principais:

1. A tensão residual térmica (proveniente dos diferentes coeficientes de expansão térmica) combinada com a tensão mecânica (desbalanceada em virtude dos diferentes módulos de elasticidade de cada substrato) pode vir a minimizar o desbalanceamento e a concentração de tensões;
2. A tensão residual térmica (proveniente dos diferentes coeficientes de expansão térmica) combinada com a tensão mecânica (desbalanceada em virtude dos diferentes módulos de elasticidade de cada substrato) pode agravar a concentração de tensões em um lado da junta, diminuindo sua resistência.

A Figura 31 apresenta um esquema referente ao segundo caso, mais crítico e importante para o estudo de juntas dissimilares.

As Figura 31,Figura 32 Figura 33 apresentam simulações numéricas referentes às componentes de tensão em uma junta dissimilar HSS-CFRP, bem como a comparação entre a distribuição de tensões para juntas dissimilares confeccionadas com Alumínio (Al), Aço de Alta Resistência (HSS) e CFRP (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) (dos Reis, 2018) [25, 26].

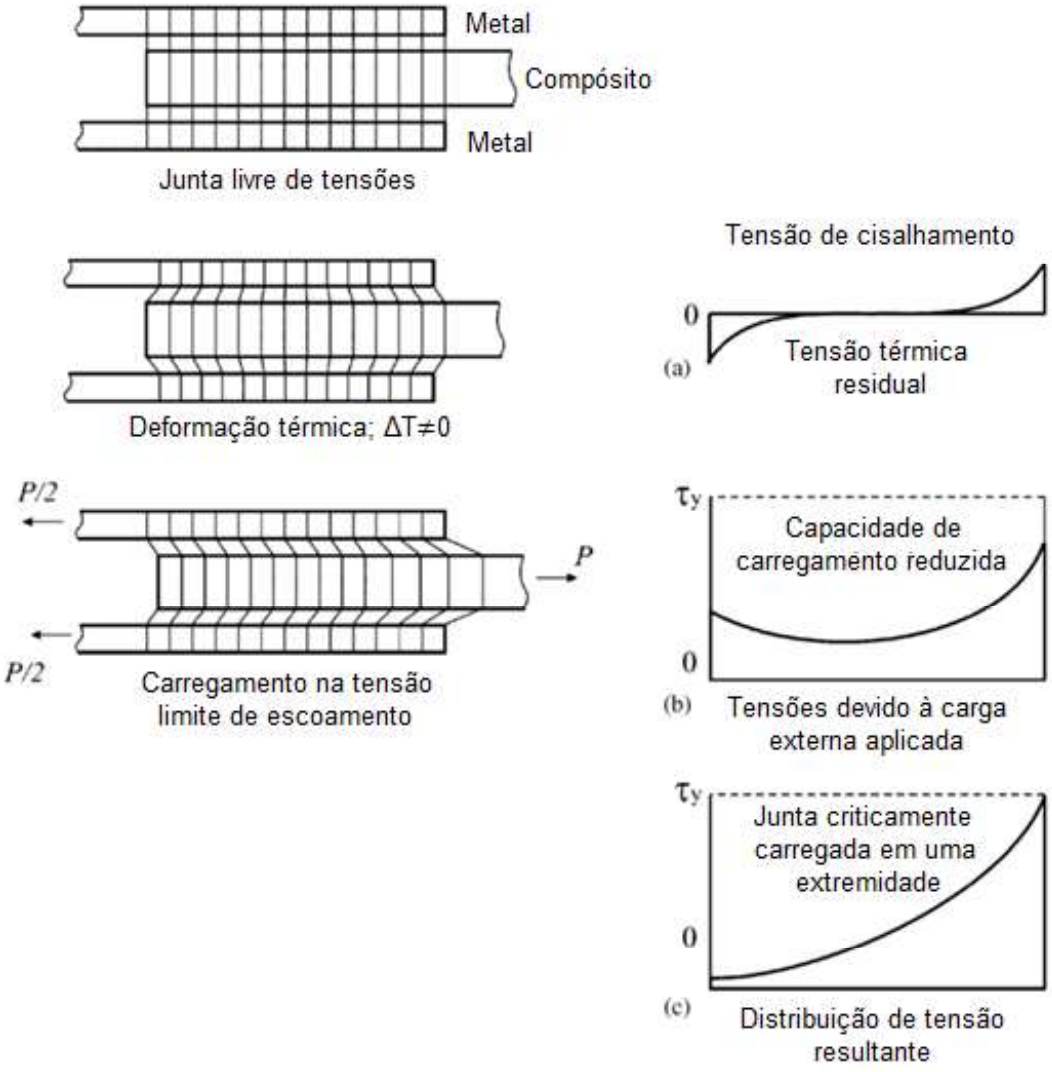


Figura 30 – Tensão de cisalhamento em Juntas de Sobreposição Dupla Metal-Compósito [24]

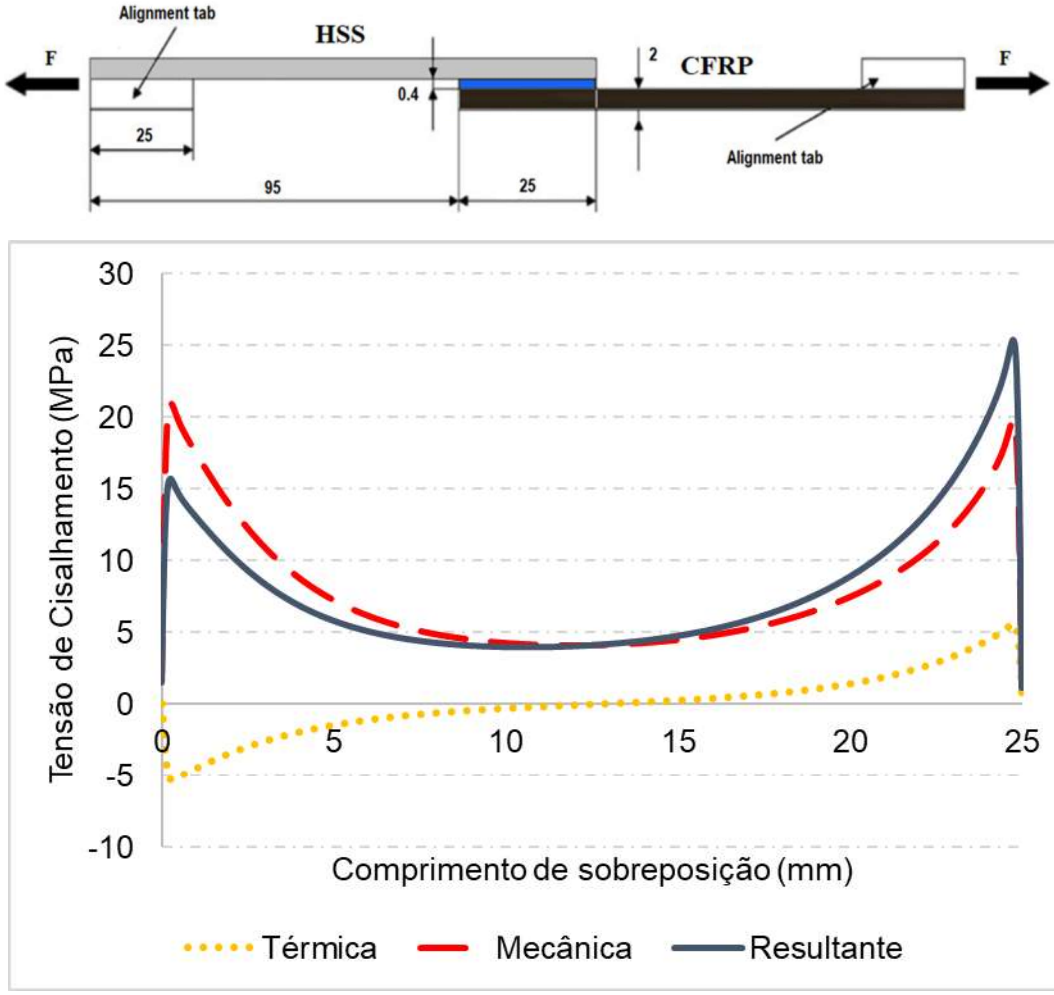


Figura 31 – Componentes e tensão resultante em uma junta de sobreposição simples HSS-CFRP com T_o = 23 °C e T_{sf} = 60°C [25, 26]

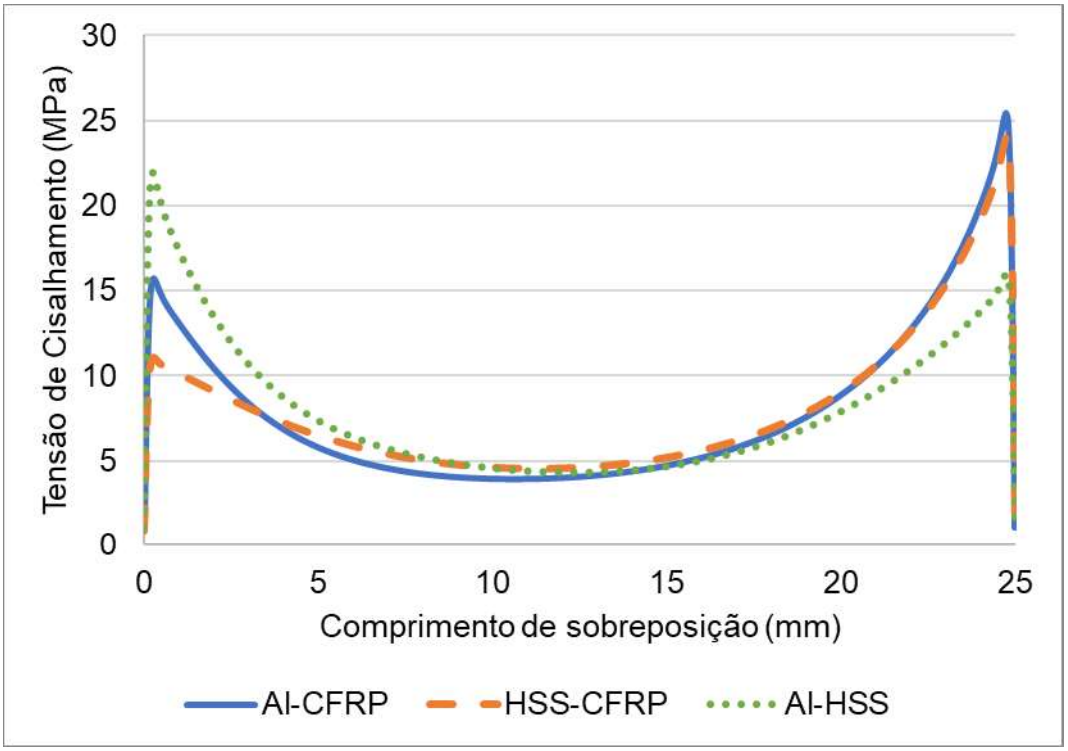


Figura 32 - Tensão resultante em 3 juntas de sobreposição simples multi-material com T_o = 23 °C e T_{sf} = 60°C [25, 26]

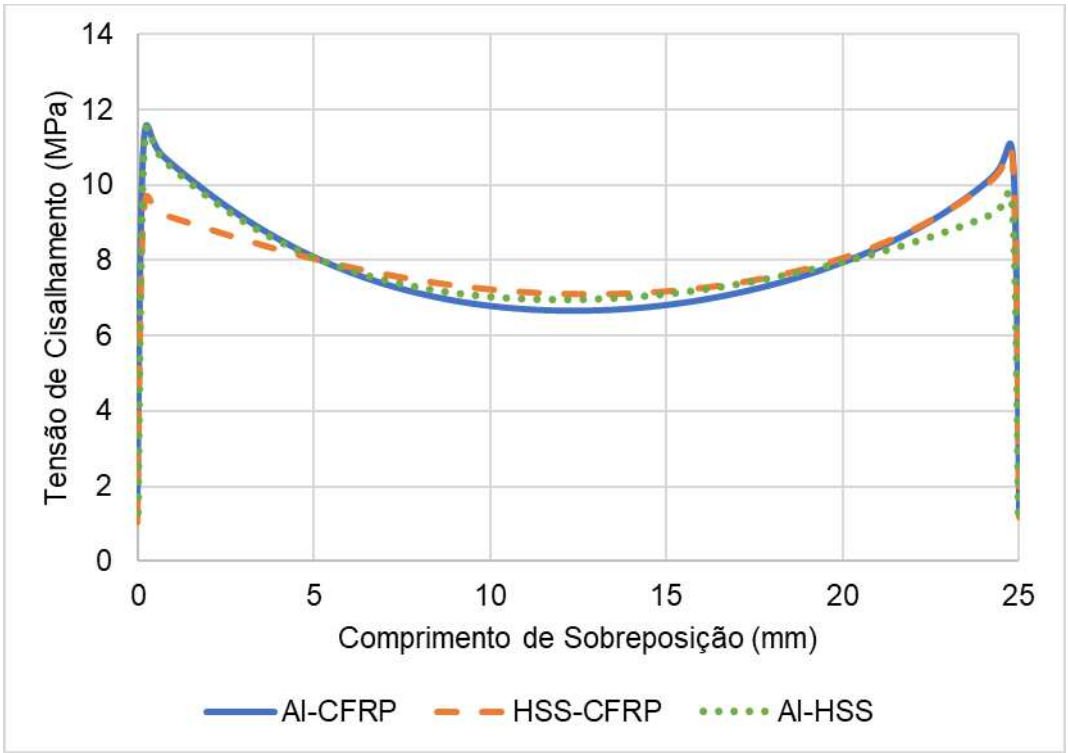


Figura 33 - Tensão resultante em 3 juntas de sobreposição simples multi-material com T_o = T_{sf} = 60°C [25, 26]

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Este capítulo enumera os materiais, tipos e layout dos corpos de prova utilizados, bem como os equipamentos e metodologias utilizadas para realização dos testes e posterior obtenção dos resultados. Todos os corpos de prova foram confeccionados e testados nas instalações da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

3.1 Adesivo

Foi utilizado o adesivo Betamate^{TM}2096 , fornecido pela empresa DOW Química, situada em Pindamonhangaba, São Paulo. Trata-se de um adesivo bi componente, com base epóxi. Mais especificamente, o componente A é uma resina epóxi e componente B é uma amina polimérica. Este adesivo tem sua principal utilização da indústria automobilística, tanto para construção quanto para reparo, devido à sua capacidade de prolongar a vida útil das peças aliado à sua resistência ao impacto e rigidez, muito importante nas situações de colisão. Além disso, possui também excelente adesão a aços automotivos, incluindo aços revestidos, ao alumínio pré-tratado, aos polímeros (reforçados ou não) e compósitos em geral, além de alta durabilidade, coesão, proteção contra corrosão além de sua capacidade selante.

De acordo com as especificações técnicas do fabricante, a cura do adesivo pode ser realizada a quente ou em temperatura ambiente. Para a cura em temperatura ambiente, em 2 dias o adesivo atinge 90% de sua resistência final, sendo o processo de cura concluído após 7 dias. Para o processo de cura à quente, o fabricante recomenda 2 horas à 60 ºC, o qual foi utilizado no escopo deste trabalho. As propriedades informadas pelo fabricante para o processo de cura utilizado são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades do BetamateTM2096 para cura à 60 °C por 2 horas conforme o fabricante

Resistência à tração (Bulk)	Alongamento (Bulk)	Módulo de Young (Bulk)	Resistência ao cisalhamento (SLJ)
29 MPa	9%	1700 MPa	21 MPa

3.1.1 Preparação do Adesivo

Antes da mistura das duas partes do adesivo, o mesmo foi submetido à uma temperatura de 40 à 50 °C no interior do cartucho, sem mistura das partes, visando eliminar qualquer possibilidade de cristalização em virtude das variações da temperatura ambiente e tempo de armazenamento.

Antes da aplicação do adesivo sobre os substratos e/ou molde para confecção de corpos de prova de adesivo maciço, o mesmo foi misturado na máquina misturadora centrífuga SpeedMixer (DAC 150.1 FVZ Speedmixer, Hauschild, Alemanha) por 60s a 2500 RPM, como mostrado na Figura 34. Este procedimento tem por objetivo a homogeneização uniforme da mistura entre as duas partes que compõem o adesivo.



Figura 34 - Misturadora DAC 150.1 FVZ SpeedMixer (Hauschild, Alemanha).

Posteriormente à mistura das partes, o adesivo foi aplicado aos substratos com as superfícies mecanicamente preparadas e limpas com acetona previamente. Apesar do fabricante informar um tempo de aplicação de até 1 hora, foi constatado durante a confecção dos corpos de prova, que o adesivo inicia sua cura por volta de 5 minutos após a mistura, constatado pelo aumento da viscosidade, observado qualitativamente. Isso ocorre porque a utilização da misturadora eleva a temperatura do adesivo, desencadeando o início do processo de cura, enquanto o tempo informado pelo fabricante é baseado na utilização do bico aplicador (responsável pela mistura) à 23 °C. O bico aplicador não foi utilizado neste trabalho, tendo em vista que perder-se-ia adesivo

à cada utilização do mesmo, uma vez que a produção continua seria inviável, dado os mais de 100 corpos de prova produzidos.

3.2 Substratos

3.2.1 Juntas de Sobreposição Simples (SLJ)

Para as juntas de sobreposição simples foram utilizados três materiais distintos, Aço de Alta Resistência (HSS), Alumínio (Al) e Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP), descritos individualmente nos subtópicos à seguir.

3.2.1.1 Substratos de Aço de Alta Resistência (HSS)

Para os ensaios de SLJs referentes à caracterização do adesivo, bem como das juntas multi-materiais, o substrato mais utilizado foi o Aço de Alta Resistência (*High Strength Steel* – HSS) DIN C65 (termicamente tratado). Aços de Alta Resistência vem sendo utilizados constantemente pela indústria dos transportes, e as aplicações incluem não apenas carrocerias de veículos, mas também motores, chassis, rodas e muitas outras peças, visando a redução de peso e aumento da resistência, rigidez e outras propriedades estruturais. Tornando assim, os veículos mais leves e seguros ao mesmo tempo [27].

O HSS é conhecido pela sua alta resistência mecânica, e como padrão possui limites de escoamento entre 450 e 600 MPa. Ainda, Aços de Alta Resistência especiais (*ultrahigh strength steel*) podem possuir limites de escoamento acima dos 600 MPa, e em casos especiais até mesmo acima dos 1000 MPa [28]. Apesar de mais caro que os aços-carbono tradicionais, o HSS tem sido muito utilizado pela indústria automotiva, dada a redução de peso associada a utilização de estruturas de menor volume, porém com a resistência mecânica necessária.

Foram utilizados neste estudo, substratos de HSS DIN C65 com espessura de 2 mm. Tipicamente utilizada em aplicações automotivas de juntas coladas. As propriedades do material são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades dos substratos de Aço de Alta Resistência DIN utilizados nos SLJs [29]

Resistência à Tração [MPa]	1300
Limite de Escoamento [MPa]	1050
Deformação [%]	14-17
Módulo de Young [GPa]	210

3.2.1.1 Substratos de Alumínio (Al)

O Alumínio utilizado foi a liga 6082-T651, uma liga de alumínio de alta resistência mecânica e com boa resistência à fadiga, amplamente utilizada na indústria automotiva e indústria de transportes em geral, sendo utilizado em trens de força, chassi e partes estruturais. O uso de alumínio oferece um potencial considerável na redução de peso dos veículos, tendo em vista sua relação entre o peso e resistência mecânica associada [30].

Novamente, a espessura adotada para os substratos foi de 2 mm, e suas propriedades estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades dos substratos de Alumínio utilizados nos SLJs [31]

Resistência à Tração [MPa]	324
Limite de Escoamento [MPa]	264
Deformação [%]	21
Módulo de Young [GPa]	70

3.2.1.1 Substratos de Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP)

Os substratos de CFRP foram fabricados utilizando-se fibras de carbono pré-impregnadas com resina epóxi, SEAL® Texipreg HS160 RM. Posteriormente, placas de CFRP foram fabricadas através de empilhamento unidirecional, com os passos à seguir:

1. Remover os rolos pré-impregnados do freezer (mecanismo para impedir a ativação da resina antes do uso), e aguardar que atinjam a temperatura ambiente;
2. Limpeza dos moldes e espaçadores utilizados para fabricação das placas de CFRP, através da remoção de resíduos sólidos com espátulas e panos e posteriormente com acetona. Por fim, aplicam-se 3 camadas de desmoldante (Loctite® Frekote 770-NC fornecido por Henkel, Dusseldorf, Alemanha);
3. Cortar os rolos de fibra pré-impregnada em quadrados de 300 x 300 mm

4. Empilhar 14 camadas na mesma direção, de forma a obter-se CFRP unidirecional com espessura de 2 mm. Entre cada etapa do empilhamento, após a remoção do papel e camada de teflon que envolvem as fibras, as placas pré-impregnados devem ser aquecidas com uma pistola de ar quente para favorecer a adesão entre as camadas durante o empilhamento, conforme mostrado na Figura 35. Após cada empilhamento, as bolhas devem ser removidas aplicando-se pressão sobre as camadas;

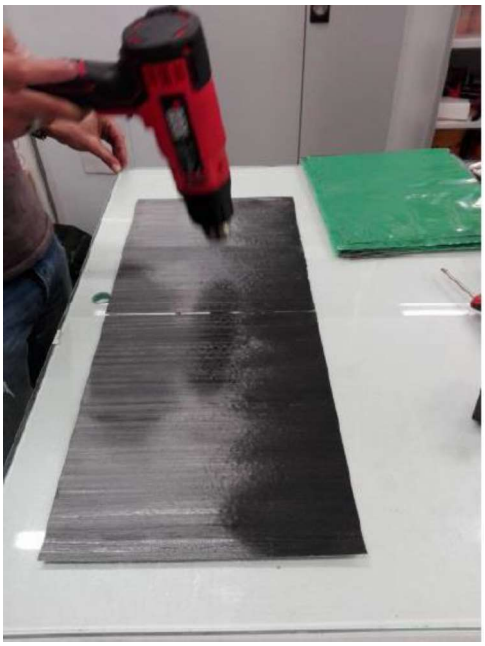


Figura 35 - Aquecimento das fibras pré-impregnadas com pistola de ar quente

5. Posicionar à placa no interior do molde com os espaçadores (Figura 36) , e levar à prensa de pratos quentes (Figura 37), por 1 h à 130 °C sob uma pressão de 30 bar-g, com um ciclo de aquecimento e resfriamento de 4 °C por minuto (Figura 38), conforme recomendação do fabricante;

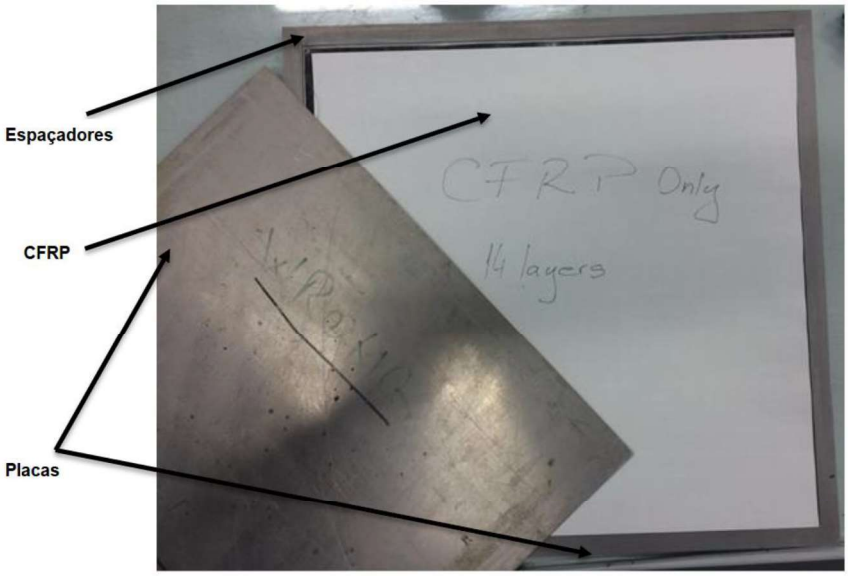


Figura 36 - Placa de CFRP, molde e espaçadores [28]



Figura 37 – Prensa hidráulica de pratos quentes Intoco (Gloucestershire, Inglaterra)

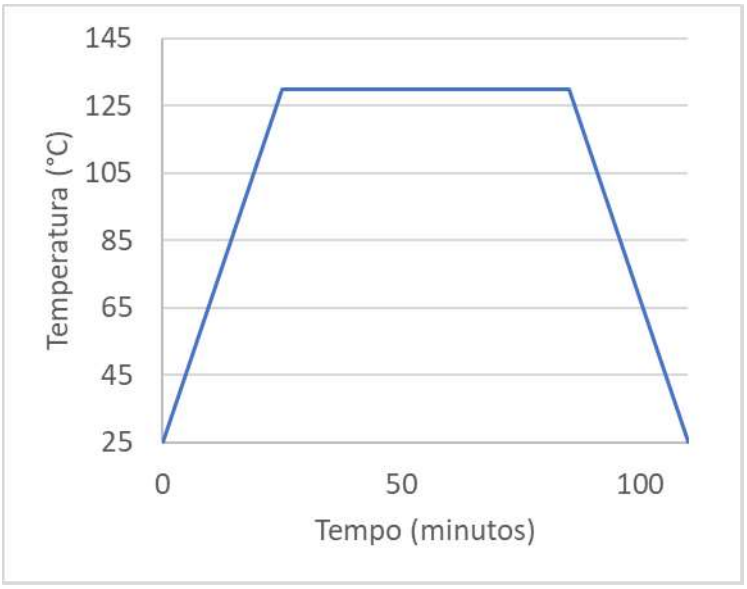


Figura 38 - Ciclo de cura do CFRP

6. Após a cura das placas, cortar as mesmas na forma dos substratos a serem utilizados nas SLJs, com o auxílio de uma serra circular, com braço manual e refrigeração à água, utilizando-se um disco diamantado, conforme mostrado na Figura 39.



Figura 39 - Serra Circular modelo DV 25, fornecida por Batisti Meccanica (Empoli, Itália).

Após a execução de todos os processos fabris, obtêm-se o CFRP unidirecional, com as propriedades apresentadas na Tabela 7. É importante salientar que as juntas

foram cortadas de forma que os carregamentos e esforços principais fossem aplicados na primeira direção.

Tabela 7 - Propriedades ortotrópicas do CFRP [32]

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} [MPa]	G_{23} [MPa]	G_{13} [MPa]
109000	8819	8819	0.342	0.342	0.380	4315	4315	3200

3.2.2 *Double Cantilever Beam* (DCBs) e *End Notched Flexure* (ENF)

Para os ensaios DCB e ENF, foram utilizados substratos de Aço Duro DIN 40CrMnMo7 com o objetivo de se evitar a deformação plástica dos substratos durante o ensaio [8]. As propriedades mecânicas dos substratos são dadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades dos corpos de prova DCB de Aço Duro [8]

Resistência à Tração [MPa]	1000-1068
Limite de Escoamento [MPa]	861-930
Deformação [%]	14-17
Módulo de Young [GPa]	205

3.2.3 Preparação dos Substratos

Os substratos metálicos foram jateados à 6 bar-g, com óxido de alumina, conforme Figura 40, para proporcionar uma superfície com boa adesão e posteriormente limpos com acetona visando remoção de óleos e gorduras, evitando assim a formação de uma camada fraca e garantindo uma melhor molhagem da superfície [9, 15]. Os substratos metálicos utilizados para juntas foram jateados em ambas as faces, para evitar qualquer tipo de tensões residuais e/ou deformação plástica na direção transversal. As superfícies metálicas tratadas são apresentadas na Figura 41. Os substratos DCB/ENF foram jateados apenas na superfície na qual aplicou-se o adesivo, uma vez que dada as dimensões destes, não há necessidade de jatear ambas as faces.



Figura 40 - Máquina de Jateamento de Laurentiis, modelo 705 GM (Pescara, Itália)



Figura 41 - Superfícies metálicas tratadas

Para garantir uma boa adesão, os substratos de CFRP tiveram suas superfícies preparadas mecanicamente através de lixas d'água com granulometria 200. A camada superficial de resina foi removida através do lixamento manual em ângulos de + 45 °/- 45 °, formando uma superfície em X, com cuidado de manter as fibras superficiais íntegras. Em seguida, foi a superfície foi limpa com papel embebido em acetona repetidamente, até que não mais houvesse pó de fibra de carbono na superfície, como mostrado na Figura 42.



Figura 42 - Superfície do CFRP tratada

3.3 Testes

3.3.1 Análise Térmica

A análise experimental desenvolvida, teve início com a determinação da Temperatura de Transição Vítrea (Tg) do adesivo utilizado. Uma vez que seriam desenvolvidos diversos ensaios em temperaturas distintas, avaliaram-se dois procedimentos e cura propostos pelo fabricante do adesivo, 7 dias à temperatura ambiente e 2 horas a 60 °C. O objetivo desta análise foi medir e avaliar um intervalo adequado para aplicação de adesivo e juntas em serviço em função dos procedimentos de cura, e selecionar o mais adequado. Tendo em vista que a Tg tem alta influência no comportamento do adesivo [20, 33]. Para medida da temperatura de transição vítrea, foi utilizada a técnica Dynamic Mechanical Analysis (DMA), de acordo com a norma ISO 6721-11 [34], tendo sido confeccionados 3 corpos e prova para cada procedimento de cura.

. O DMA é baseado na aplicação de uma frequência senoidal nas amostras, enquanto a temperatura, que é gradativamente aumentada, e o amortecimento são registrados [35, 36]. A avaliação do amortecimento como forma e determinar a T_g de uma adesivo, vem do fato de que para sólidos elásticos, a resposta de deformação encontra-se na mesma fase da tensão aplicada, enquanto que para fluidos viscosos existe um intervalo de fase de 90° entre tensão e deformação. Polímeros possuem comportamento dependente da temperatura, transitando de um comportamento elástico em temperaturas suficientemente longes da temperatura de transição, para um comportamento viscoelástico com o aumento da temperatura (combinação de deformação elástica com escoamento viscoso), até um comportamento de escoamento viscoso em temperaturas suficientemente altas. Dada essa variação, o ângulo de fase pode ser usado para avaliar o comportamento em função da temperatura uma vez que a deformação manifesta-se defasada em relação à tensão conforme a temperatura vai aproximando-se da T_g [9, 37]. A T_g foi medida com baseada na temperatura

correspondente ao maior amortecimento registrado, e as curvas medidas são obtidas através da Equação 2.

$$\delta = \arctan\frac{E''}{E'} \quad (2)$$

Onde E' é o modulo da componente em fase, E" é o módulo da componente defasada (ou módulo de perda) e δ é o respectivo ângulo entre as componentes. Para a realização do DMA, foi utilizada uma máquina própria, desenvolvida no Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (AdFEUP), mostrada na Figura 43.

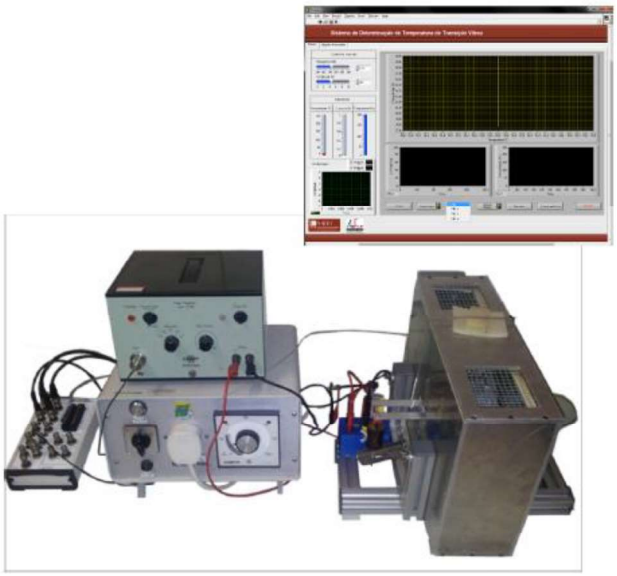


Figura 43 - Máquina para ensaio DMA e interface do software

3.3.2 Resistência à Tração (Adesivo Maciço)

Corpos de prova de adesivo maciço foram confeccionados conforme a norma NF T 76-142 [38]. Um invólucro de silicone foi usado entre as chapas de metal do molde para evitar vazamento do adesivo e a formação de bolhas, conforme mostrado na Figura 44. As dimensões da placa de adesivo após o procedimento de cura foram de 150 mm x 45 mm x 2 mm, correspondentes às dimensões internas do invólucro, conforme apresentado na Figura 45. Posteriormente, corpos de prova do tipo "osso-de-cão" foram confeccionados com as dimensões de 150 mm x 10 mm x 2mm, conforme a norma BS 2782 [39], cujo layout encontra-se na Figura 46. Para cada caso experimental, no mínimo 3 corpos de prova foram confeccionados.

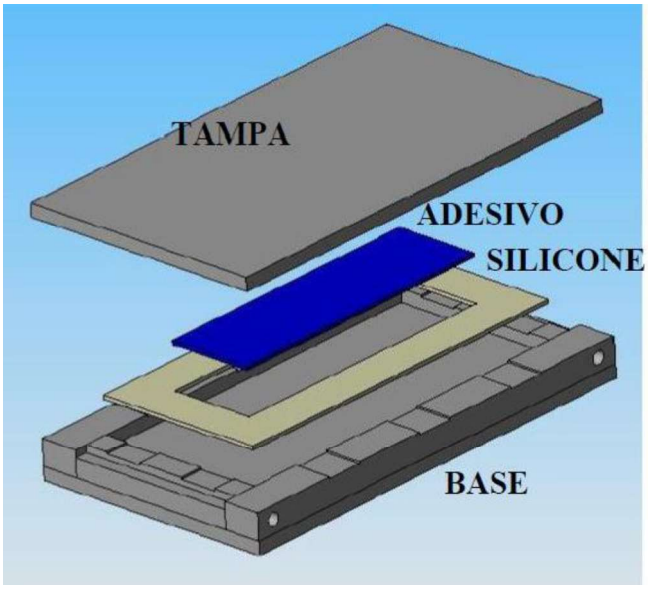


Figura 44 - Esquema do molde utilizado para confecção das placas de adesivo



Figura 45 - Placa de adesivo maciço (bulk)

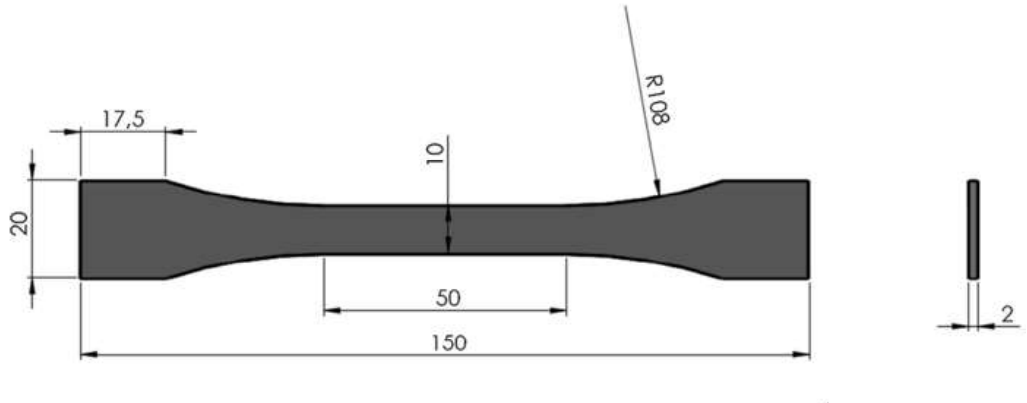


Figura 46 – Design do corpo de prova tipo "osso-de-cão" (dimensões em mm)

Os ensaios de tração foram realizados utilizando-se uma Máquina de Testes Universal INSTRON®, modelo 3367 (Norwood, Massachusetts, USA), conforme

mostrado na Figura 47, com uma capacidade de carga de 30kN. Para os corpos de prova de adesivo maciço foi utilizado uma célula de carga de 10 kN, com uma velocidade de carregamento de 1 mm/min.



Figura 47 - Máquina de Testes Universal INSTRON®, modelo 3367 (Norwood, Massachusetts, USA)

O modulo de Young (E) foi determinado através da Equação 3, onde $\Delta\sigma$ é a variação da tensão e $\Delta\varepsilon$ a variação da deformação.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

A câmara térmica disponível na máquina (Figura 48) foi utilizada para os testes à 40 °C e 60 °C. Para os testes executados à temperatura ambiente (RT = 23 °C), a utilização da câmara foi facultativa, uma vez que a temperatura do laboratório foi mantida à 23 °C durante todos os ensaios.

Para aquisição dos dados referente à deformação dos corpos de prova, uma câmera digital de 10 Megapixels foi utilizada, através a captura de imagens dos testes com um intervalo de 5 segundos entre cada imagem. Para aquisição da deformação, marcações foram realizadas nos corpos da prova, distando 50 mm entre si (comprimento útil utilizado para o cálculo), conforme mostrado na Figura 49. Posteriormente, as os dados referente à força e tempo disponíveis na máquina de ensaios foram combinados com a distância medida entre linhas em cada foto. A medição

da deformação bem como a combinação dos dados das diferentes fontes para obtenção da curva tensão-deformação foi realizada utilizando-se uma sub-rotina externa programada dentro do software iterativo de cálculo numérico de alta performance MATLAB R2015a (MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, EUA).



Figura 48 - Câmara térmica

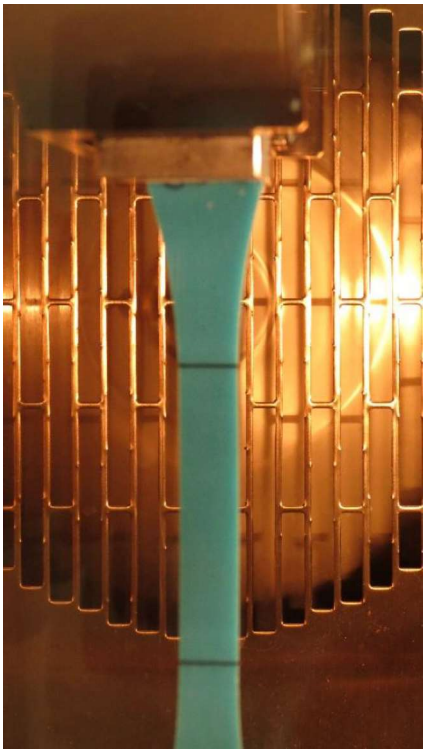


Figura 49 - Marcação nos corpos de prova "osso-de-cão" para medição da deformação

A utilização da câmera se faz necessária uma vez que técnicas de medição da deformação que envolvem instrumentos de contato como extensômetros e *strain*

gauges não são recomendados para materiais elastoméricos dúcteis, uma vez que estes instrumentos podem afetar os resultados dos ensaios [2].

3.3.3 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo I (DCBs)

Os ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo I foram realizados utilizando-se uma Máquina de Testes Universal INSTRON®, modelo 3367 (Norwood, Massachusetts, USA), com uma capacidade e célula de carga de 30kN, com uma velocidade de carregamento de 0.2 mm/min. Três corpos corpos de prova foram testados até a falha, e o layout dos mesmos é apresentado na Figura 50.

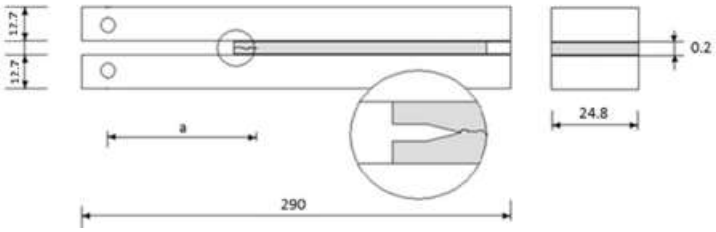


Figura 50 - Geometria dos corpos de prova DCB/ENF (dimensões em mm) [40]

Para avaliação da Energia Crítica de Fratura em Modo I (G_{I_C}) à partir das curvas P-δ, foi utilizado o método CBBM (*compliance-based beam method*) em ordem de obter-se as curvas R. Este método foi desenvolvido por Moura et al [41], e é baseado no conceito de trinca equivalente, dependendo apenas da flexibilidade do corpo de prova durante o ensaio [41, 42]. O valor de G_{I_C} pode ser analiticamente determinado pela Equação 4:

$$G_{I_C} = \frac{6P^2}{B^2 t}\left(\frac{2a_{eq}^2}{t^2 E_f} + \frac{1}{5G}\right) \quad (4)$$

Onde P é a carga aplicada, B a espessura do corpo de prova, *t* a altura de cada um dos substratos metálicos. $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta a_{FPZ}$ é a o Comprimento de Trinca Equivalente, obtido através da flexibilidade experimental, onde a é o comprimento da trinca, Δ é o fator de correção para rotação e deflexão da frente da trinca, determinado à partir de uma regressão linear analítica de $(C)^{1/3}$ em função dos dados obtidos, conforme descrito na Norma ISO 15024 [43], e Δa_{FPZ} é o fator de correção proveniente da Zona e Processo de Fratura (FPZ), E_f é o Módulo de Flexão corrigido para todos os efeitos na curva P–δ, como concentração de tensões na frente da trinca e disparidades na rigidez entre os substratos e adesivo.

Para medição da influência da temperatura na Tenacidade à Fratura, corpos de prova DCB com comprimento reduzido foram utilizados devido às restrições de espaço provenientes da câmara térmica disponível na máquina de ensaios, como mostrado na Figura 51. Estes corpos de prova também tiveram as curvas de tenacidade R obtidas através do método CBBM. Os testes foram realizados nas temperaturas ambiente (23 °C), 40 e 60 °C, tendo sido testados 3 corpos de prova em cada temperatura.

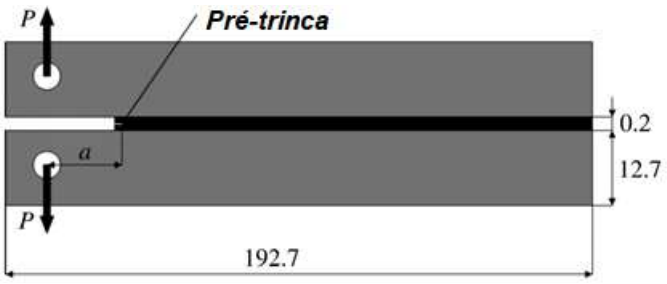


Figura 51 - Corpo de prova DCB com comprimento reduzido (dimensões em mm) [21]

3.3.4 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo II (ENFs)

Para os ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo II, utilizou-se a célula de carga de 30 kN e uma velocidade de carregamento de 0,5 mm/min. Adicionalmente, uma restrição de carga máxima de 20 kN foi imposta à máquina de forma a evitar a possibilidade de deformação plástica dos 6 corpos de prova testados, principalmente para os casos onde não houve propagação estável da trinca. Os corpos de prova ENF possuem a mesma geometria dos corpos DCB padrão, tendo seu ensaio diferindo apenas pelas condições de contorno das restrições e ponto de aplicação da carga, conforme mostrado na Figura 52.

O método CBBM também foi utilizado para obtenção das curvas R de Tenacidade à Fratura em Modo II (G_{II_C}), a partir as curvas P-δ resultantes dos corpos de prova ENF, cujo modelo analítico é apresentado na Equação 5.

$$G_{II_C} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f t^3} \quad (5)$$

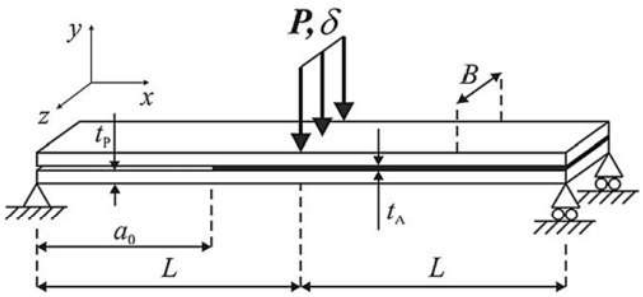


Figura 52 - Geometria dos corpos de prova ENF [44]

Para fabricação dos corpos de prova do tipo DCB/ENF, foi utilizado um molde de aço ferramenta de forma a posicionar os corpos de prova corretamente durante o processo de cura na prensa de pratos de quentes e impedir que os mesmos se movimentem. Para formação da trinca e garantir a espessura do adesivo, na face oposta ao sentido de crescimento da trinca, espaçadores de 0,2 mm foram posicionados em cada um dos substratos, enquanto a trinca foi induzida utilizando-se uma lâmina de 0,1 mm com entalhe na ponta, cercada por dois espaçadores de 0,05 mm, garantindo a espessura do adesivo e a formação de um perfil inicial para o crescimento da trinca, como mostrado na Figura 53.

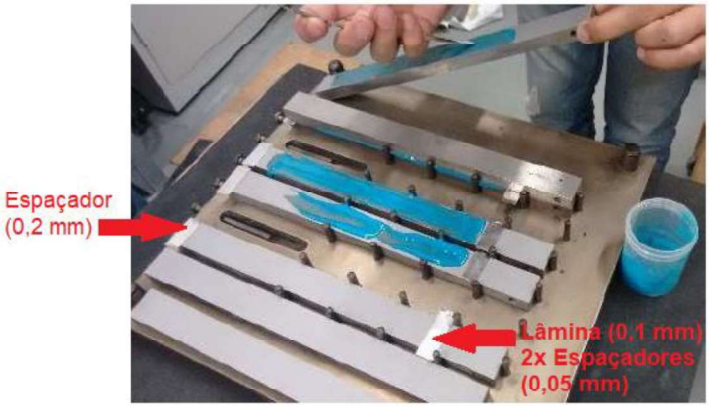


Figura 53 - Molde para confecção dos corpos de prova DCB/ENF

3.3.2 Ensaio de Tração - Resistência ao Cisalhamento (juntas de sobreposição simples)

Diversas juntas de sobreposição simples (SLJs) com as mais distintas configurações e geometrias foram testadas neste trabalho. As juntas foram carregadas axialmente, visando o cisalhamento do adesivo. Abas de alinhamento foram adicionadas aos extremos dos substratos, para garantir a axialidade das forças aplicadas. Todas as

análises apresentadas nos próximos subtópicos foram executadas à temperatura ambiente (RT = 23 °C), 40 e 60 °C, com o auxílio da câmara térmica, utilizando-se da célula de carga de 30 kN e velocidade de carregamento de 1 mm/min, com a montagem mostrada na Figura 54.

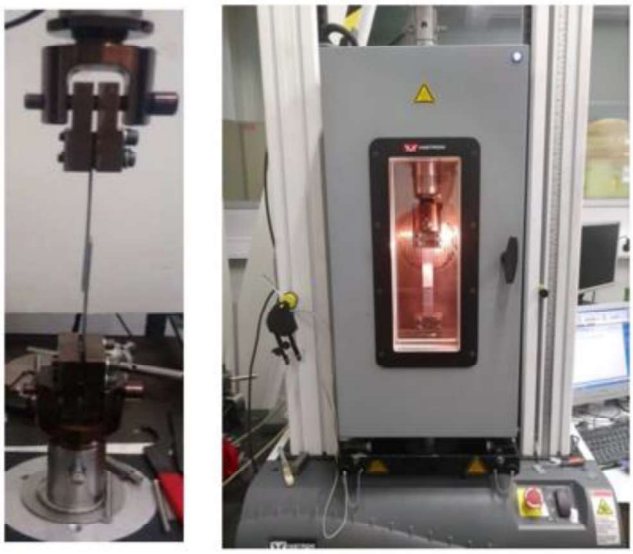


Figura 54 - Ensaios de resistência ao cisalhamento em SLJs - a) sem temperatura b) com temperatura

Curvas Carga-Deslocamento foram produzidas para cada uma das juntas testadas neste trabalho, e a resistência ao cisalhamento foi obtida através da Equação 6, onde P é a carga, l o comprimento de sobreposição e b a largura da junta (25 mm em todos os casos experimentais avaliados).

$$\sigma = \frac{P}{l \times b} \tag{6}$$

Para confecção das juntas de sobreposição simples (SLJs) utilizou-se um molde de aço ferramenta, para fixação dos substratos em sua posição durante o processo de cura na prensa de pratos quentes, através de blocos de pressão, mecanicamente travados por parafusos, e pinos distribuídos ao longo do comprimento dos substratos, garantindo o comprimento de sobreposição desejado, bem como o alinhamento das partes. Adicionalmente, espaçadores metálicos foram utilizados para controlar e proporcionar às juntas a espessura do adesivo desejada. A composição deste conjunto assim como o molde são mostrados na Figura 55. Posteriormente aos substratos com suas superfícies tratadas, posicionados corretamente no molde, e com o adesivo

devidamente misturado, aplica-se uniformemente sobre os substratos, para posterior confecção da junta, como mostrado na Figura 56.

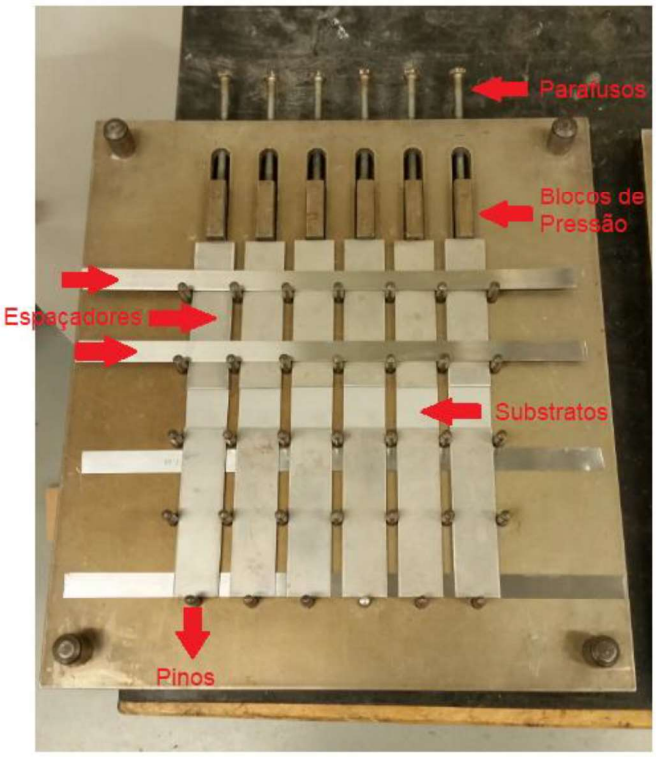


Figura 55 - Molde para confecção de SLJs



Figura 56 - Confecção das juntas de sobreposição simples

Os distintos grupos de juntas avaliados e suas geometrias são mostrados nos subtópicos à seguir. É importante salientar que todas as geometrias e combinações de materiais foram testadas à temperatura ambiente (23 °C), 40 e 60 °C, e para cada caso experimental, duas juntas de sobreposição simples foram testadas.

3.3.2.1 Caracterização do adesivo

Para uma caracterização completa do adesivo e posterior tomada de decisão acerca das geometrias a serem utilizadas nas juntas multi-material, foram avaliados os efeitos da variação da espessura do adesivo, bem como do comprimento de sobreposição em função da variação de temperatura. Para esta etapa, foram selecionados substratos de Aço de Alta Resistência (HSS) e as variações nos parâmetros utilizados são apresentadas na Figura 57.

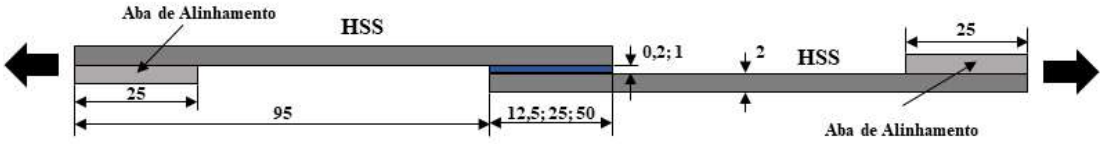


Figura 57 - Geometria das juntas de Aço de Alta Resistência para avaliação do efeito da espessura do adesivo e do comprimento de sobreposição (cotas em mm)

3.3.2.2 Juntas dissimilares

Na segunda etapa referente ao ensaio de SLJs, tendo em vista os resultados obtidos na primeira etapa, optou-se por prosseguir com o comprimento de sobreposição de 25 mm e espessura do adesivo de 0,4 mm, avaliando-se somente juntas com substratos dissimilares (HSS, Al e CFRP), conforme mostrado na Figura 58.

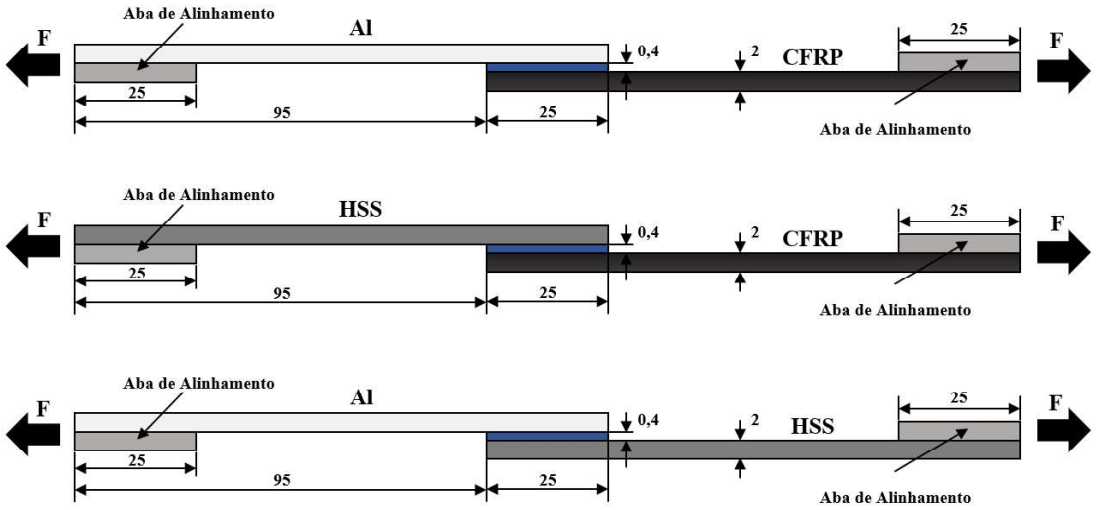


Figura 58 - Juntas dissimilares (cotas em mm)

3.3.2.3 Juntas Multi-material similares e dissimilares

Após os resultados obtidos na segunda etapa referentes as juntas dissimilares com espessura do adesivo de 0,4 mm, procedeu-se a realização de uma terceira etapa de testes em juntas de sobreposição simples multi-material. Nesta nova etapa, foram confeccionadas juntas similares e dissimilares de Alumínio (Al), Aço de Alta Resistência (HSS) e Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP), conforme mostrado na Figura 59.

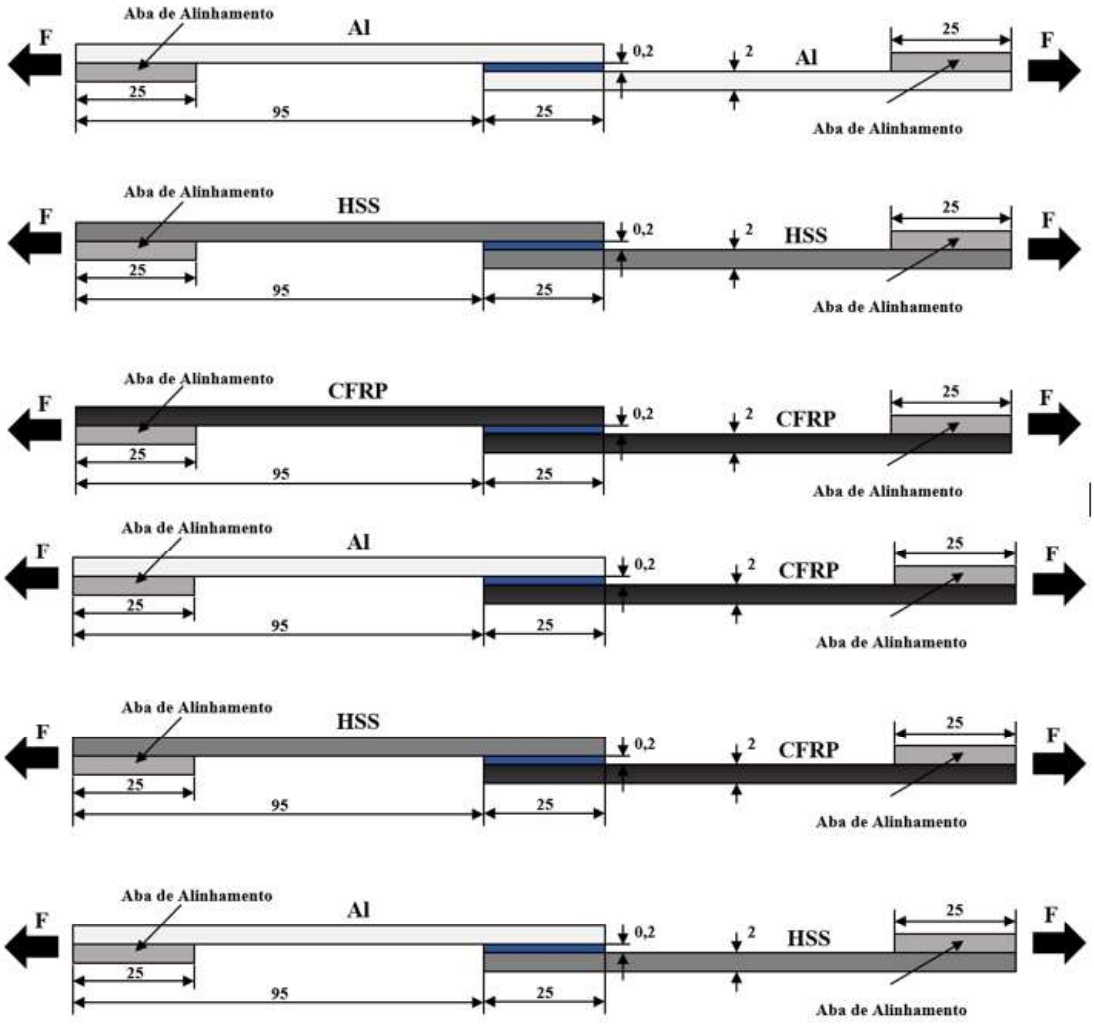


Figura 59 - Juntas multi-material similares e dissimilares (cotas em mm)

Capítulo 4

Resultados e discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais dos testes descritos na sessão anterior concomitante à discussão dos resultados obtidos bem como a influência da variação dos parâmetros experimentais, como temperatura e geometria dos corpos de prova. Os resultados experimentais apresentados consistem nas médias e seus desvios padrão com base na dispersão e número de repetições executadas em cada teste.

4.1 Análise Térmica (DMA)

A determinação da temperatura de transição vítrea (T_g) através do teste *Dynamical Mechanical Analysis* (DMA), foi realizada para dois processos de cura distintos informados pelo fabricante, 7 dias à temperatura ambiente e 2 horas à 60 °C, cujo os resultados são apresentados na Figura 60.

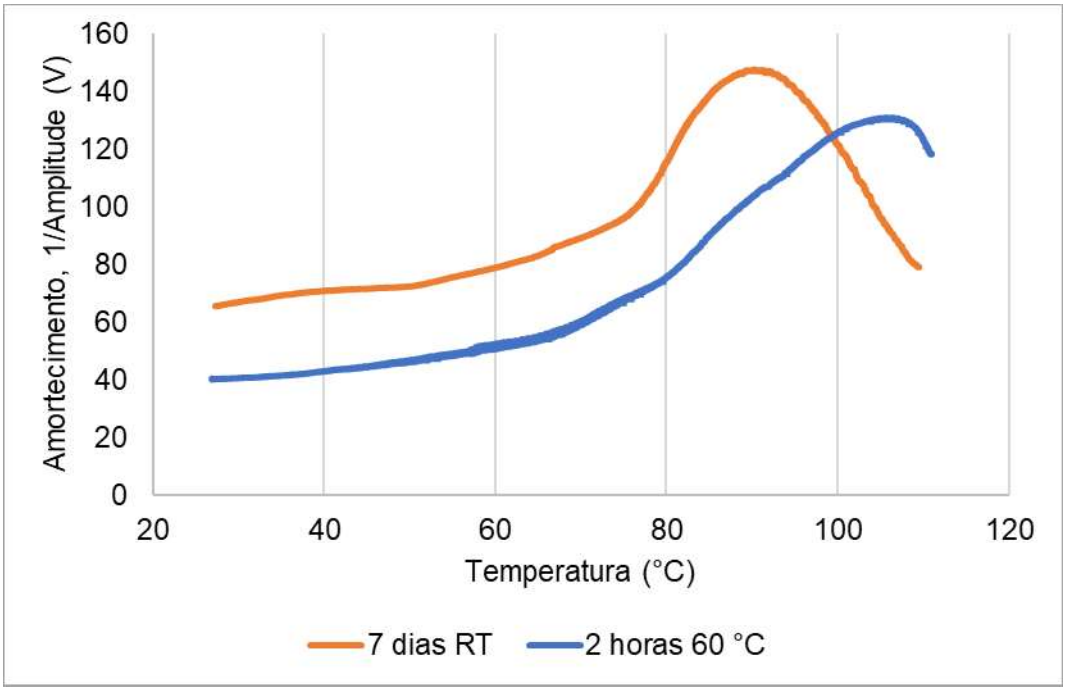


Figura 60 – Resultados do DMA para dois processos de cura distintos

Os resultados encontrados para a temperatura de transição vítrea foram 90,2 °C para o procedimento de cura de 7 dias à temperatura ambiente e 105,6 °C para o

procedimento de cura de 2 horas a 60 ° C. Com base nisso, os testes subsequentes foram realizados com os adesivos sendo curados por 2 horas à 60 °C, uma vez que os para aplicações reais, os adesivos devem ser utilizados em temperaturas suficientemente distantes da T_g, de forma a minimizar as transições no comportamento elástico do adesivo.

4.2 Resistência à Tração (adesivo maciço)

Os corpos de prova “osso-de-cão” confeccionados com adesivo maciço foram testados em diferentes temperaturas (ambiente, 40 °C e 60 °C) visando avaliar a degradação das propriedades do adesivo em função do aumento da temperatura. Para cada temperatura, no mínimo 3 corpos de prova foram testados. Os resultados destes testes são apresentados na Figura 61.

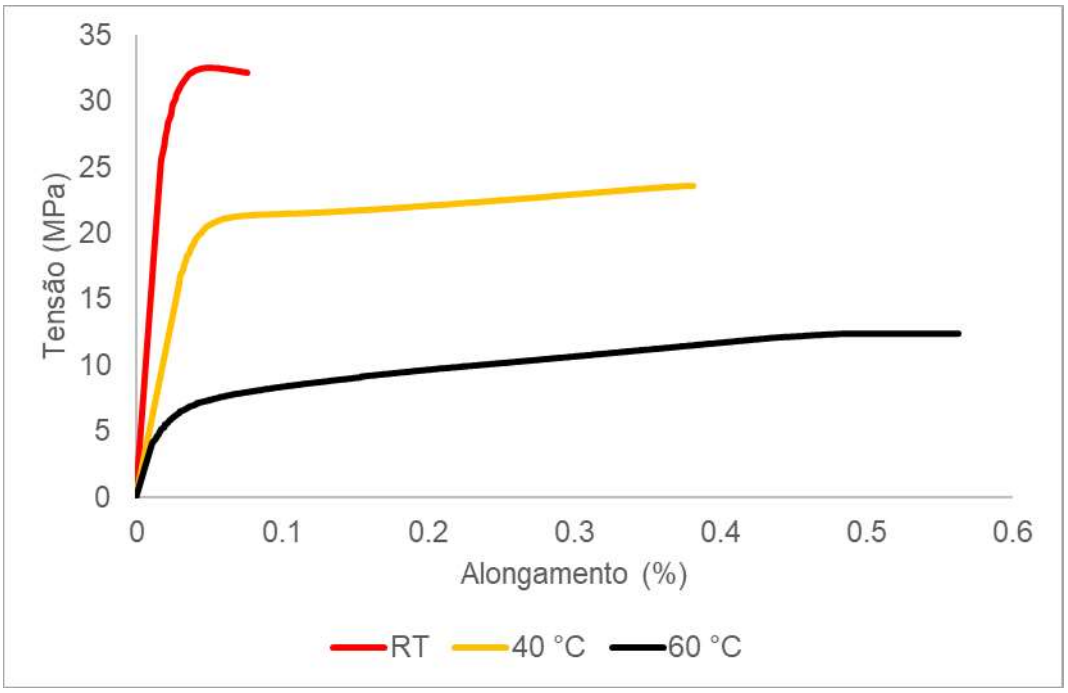


Figura 61 - Curvas tensão-deformação típicas para as temperaturas avaliadas [25, 26]

Os resultados obtidos mostram um decréscimo na tensão máxima em tração (σ_f) de 34% para temperatura de 40°C e 61% para a temperatura de 60 °C, em comparação à temperatura ambiente (23 °C). Enquanto isso, o alongamento percentual teve um crescimento de 359% e 524%, respectivamente. Além disso, o Módulo de Young (E) teve uma redução de 56% para 40 °C e 86% para 60 °C, conforme mostrado na Figura 62.

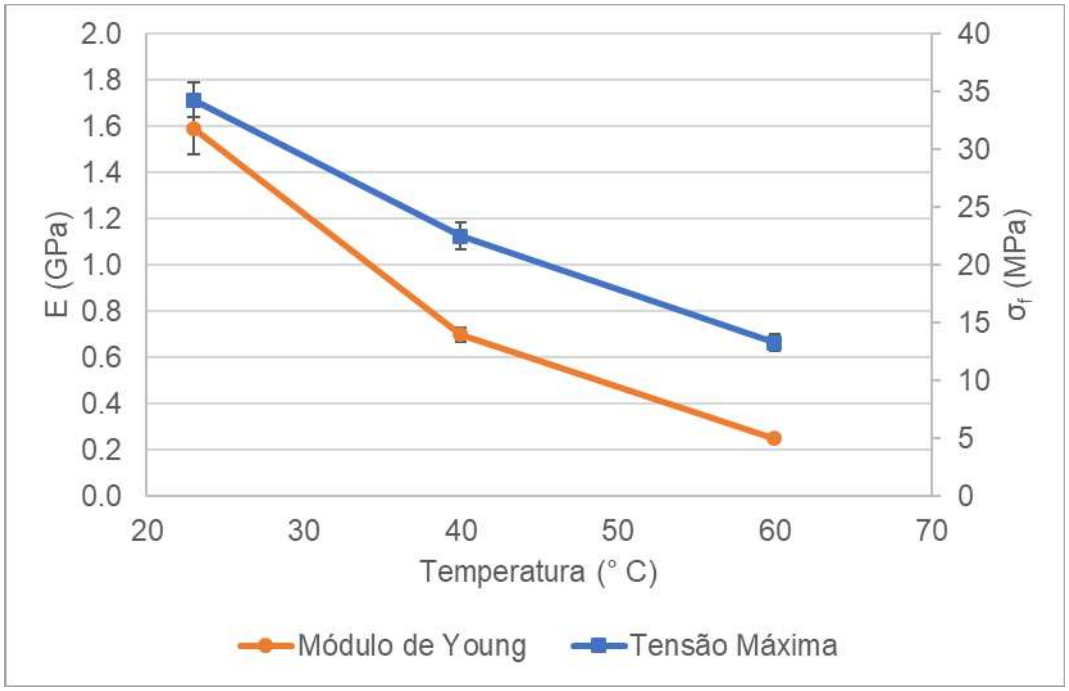


Figura 62 – Variação do módulo de Young (E) e da resistência mecânica do adesivo em função da temperatura [25, 26]

Para os ensaios de tração executados à temperatura ambiente, a resistência à tração final encontrada foi de 34,27 ± 1,52 MPa contra 29,00 MPa informados pelo fabricante. No entanto, o desvio padrão encontrado foi de apenas 4,44%, indicando uma baixa dispersão. Muitas razões podem explicar essa diferença de resistência à tração, como procedimentos de testes, umidade ou parâmetros de cura (tempo e/ou temperatura). A tensão de tração encontrada foi de 8,04 ± 0,39% contra 9,00% informados. O Módulo de Young encontrado foi 6,36% menor do que informado, 1591,94 ± 114,61 MPa contra 1700,00 MPa. As mesmas razões da diferença em σ_f poderiam ser usadas para explicar os valores encontrados para E. Além disso, geralmente a folha de dados do fabricante difere dos resultados práticos dos testes dos testes. Os resultados gerais dos ensaios com os corpos de prova de adesivo maciço (bulk) podem ser visualizados na Tabela 9. Os resultados encontrados de perda de resistência e rigidez com aumento da ductilidade condiz com o apresentado na literatura [2, 20].

Tabela 9 – Variação das propriedades do adesivo em função da temperatura medidas pelo teste de tração

Temperatura (°C)	E (MPa)	σ_f (MPa)	ε_f (%)
23	1591,94 ± 114,61	34, 27 ± 1,52	8,04 ± 0,39
40	699,94 ± 31,26	22,48 ± 1,18	36,89 ± 2,51
60	247,51 ± 6,98	13,27 ± 0,74	50,18 ± 8,84

4.3 Ensaios de tenacidade à fratura em Modo I (DCB)

Inicialmente, DCBs padrão foram testados à temperatura ambiente sem a utilização da câmara térmica, tendo sido 3 amostras testadas. As curvas força-deslocamento e as curvas R de tenacidade a fratura são apresentadas nas Figura 63 eFigura 64, respectivamente, tendo sido o valor médio crítico de Tenacidade à Fratura em Modo I (G_{Ic}) para propagação estável da trinca foi de 1.41 N/mm. A superfície de Fratura dos corpos de prova foi do tipo coesiva e é apresentada na Figura 65.

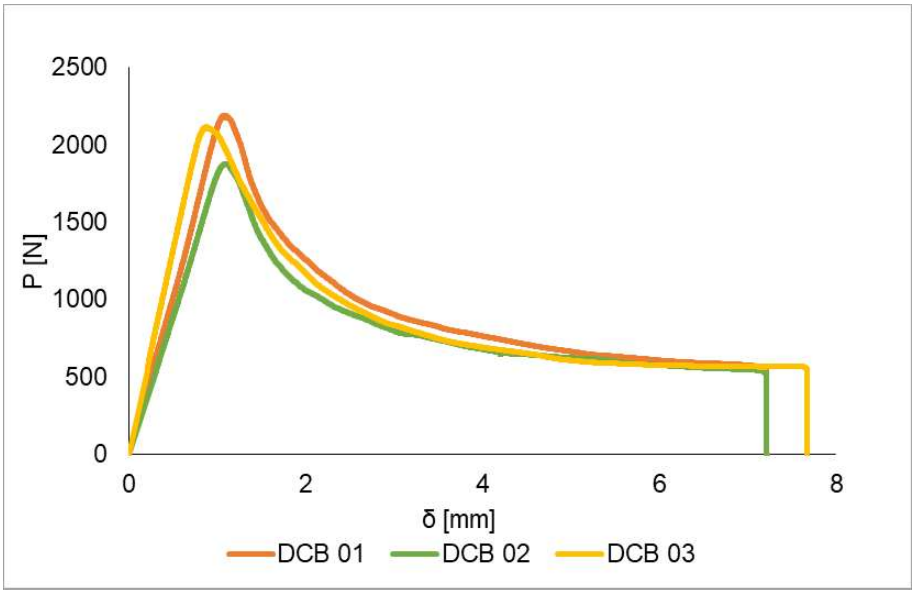


Figura 63 - Curvas força-deslocamento para os DCBs padrão testados à temperatura ambiente

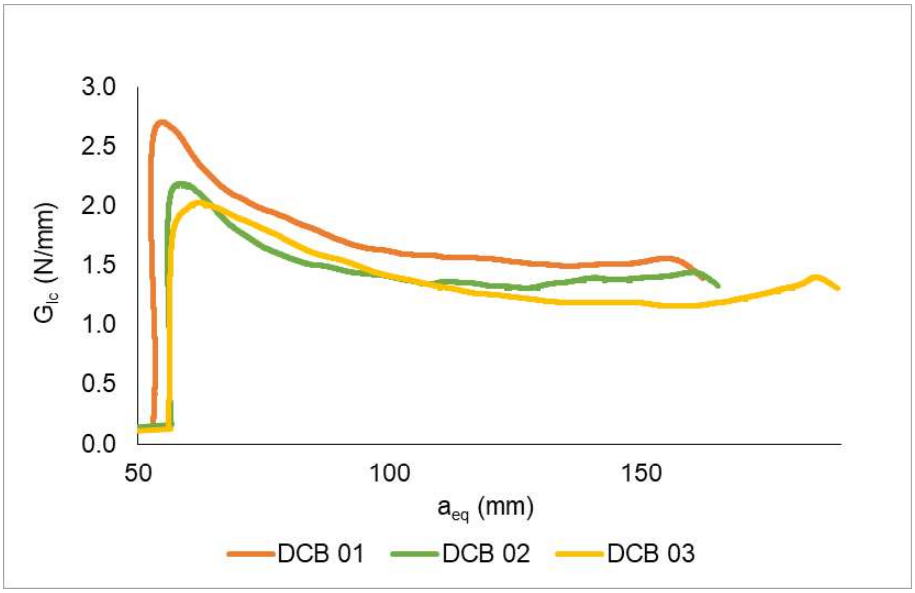


Figura 64 - Curvas R de tenacidade à fratura para DCBs padrão testados



Figura 65 - Superfície de Fratura do DCB

Para avaliar a influência da temperatura na tenacidade à fratura em Modo I, DCBs com o comprimento reduzido foram fabricados de forma a caberem dentro da câmara térmica da máquina de testes, tendo sido testados 3 corpos de prova em cada temperatura. O método CBBM também foi usado para gerar as curvas R de tenacidade à Fratura a partir dos dados P-δ fornecidos pela máquina. No entanto, o comprimento da amostra não foi suficiente para que o teste fosse conduzido até uma propagação de estável da trinca. Apesar disso, uma vez que a análise de Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) foi utilizada para avaliar a tenacidade à fratura, a taxa máxima de liberação de energia em Modo I (G_I) do DCB padrão foi comparada com o valor relativo dos DCBs curtos, para obter GIc para várias temperaturas. As curvas R para os DCBs curtos para RT, 40 °C e 60 °C são apresentadas na Figura 66 e a comparação dos valores de tenacidade encontrados na Figura 67.

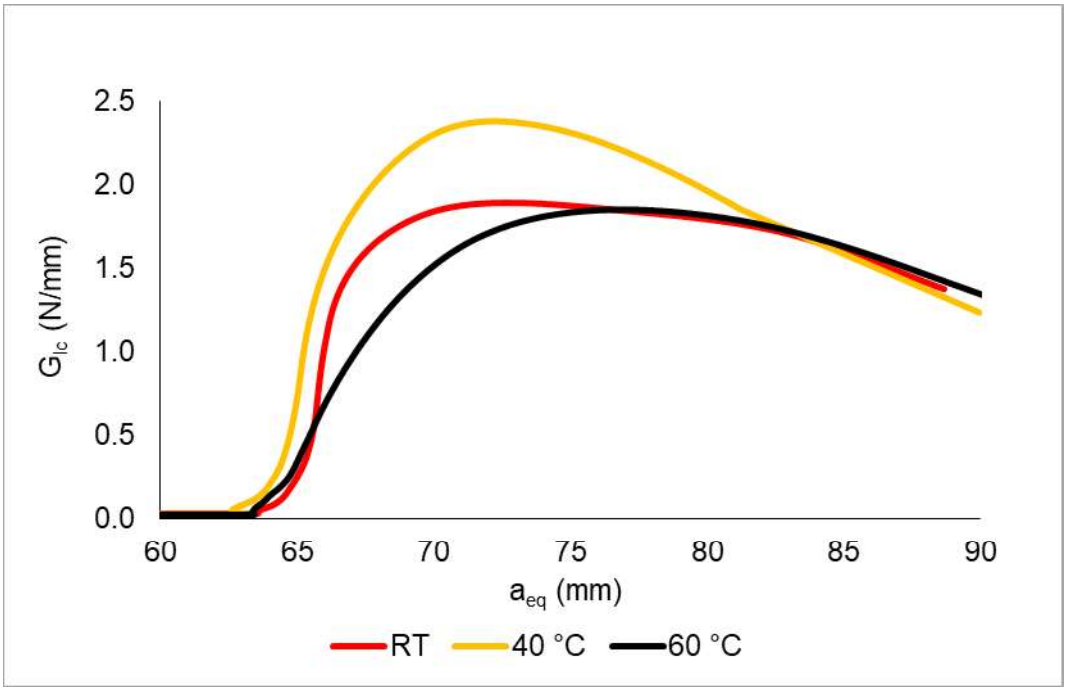


Figura 66 - Curvas R características dos DCBs curtos para as diferentes temperaturas testadas

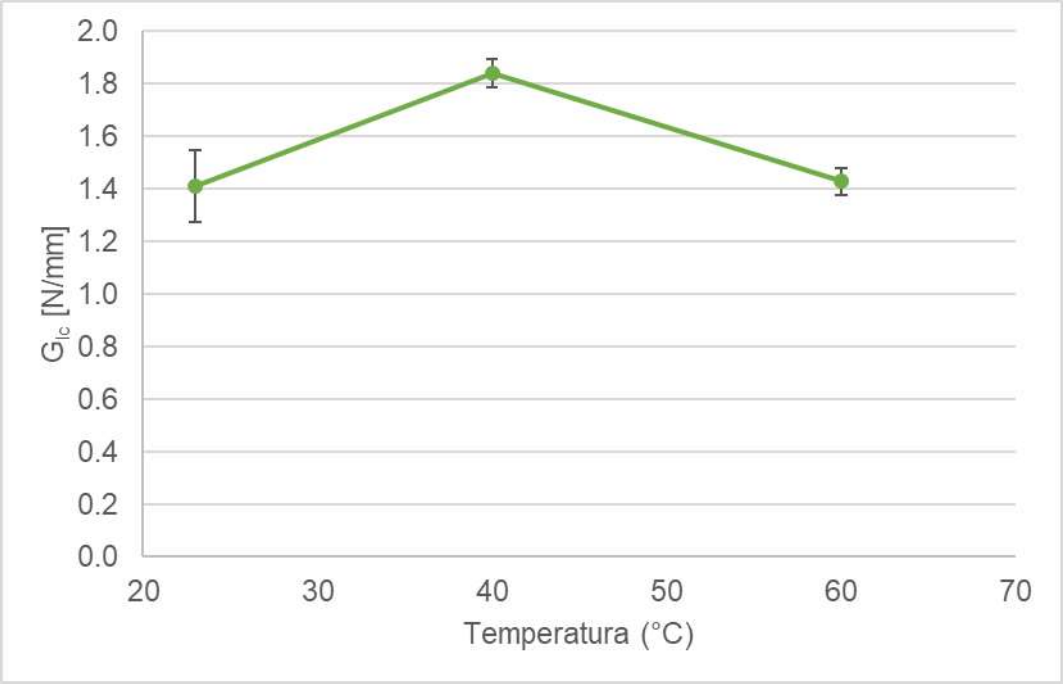
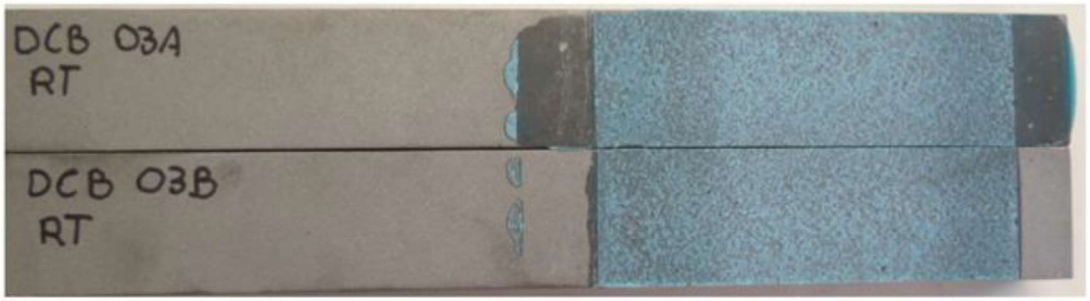


Figura 67 - Tenacidade à fratura em modo I para as diferentes temperaturas testadas

Os resultados encontrados mostram um aumento de 23% na tenacidade à fratura à temperatura de 40 °C. Isso pode ser explicado pois apesar da redução na resistência mecânica, há um aumento na ductilidade, que aumenta a deformação plástica na ponta da trinca, aumentando a tenacidade à fratura. No entanto, aumentando mais ainda a temperatura, o efeito da perda de resistência mecânica é mais significativo e a tenacidade à fratura diminui [21]. As superfícies de fratura para as três temperaturas testadas são mostradas na Figura 68. Todas as superfícies mostram falhas coesivas, e um aumento na ductilidade pode ser observado com o aumento da temperatura. Além disso, a superfície da fratura também mostra uma maior carga máxima e tenacidade à fratura a 40 °C, através da maior área escura na superfície de fratura, associada ao mecanismo de falha durante o aumento da carga no ensaio.



a)

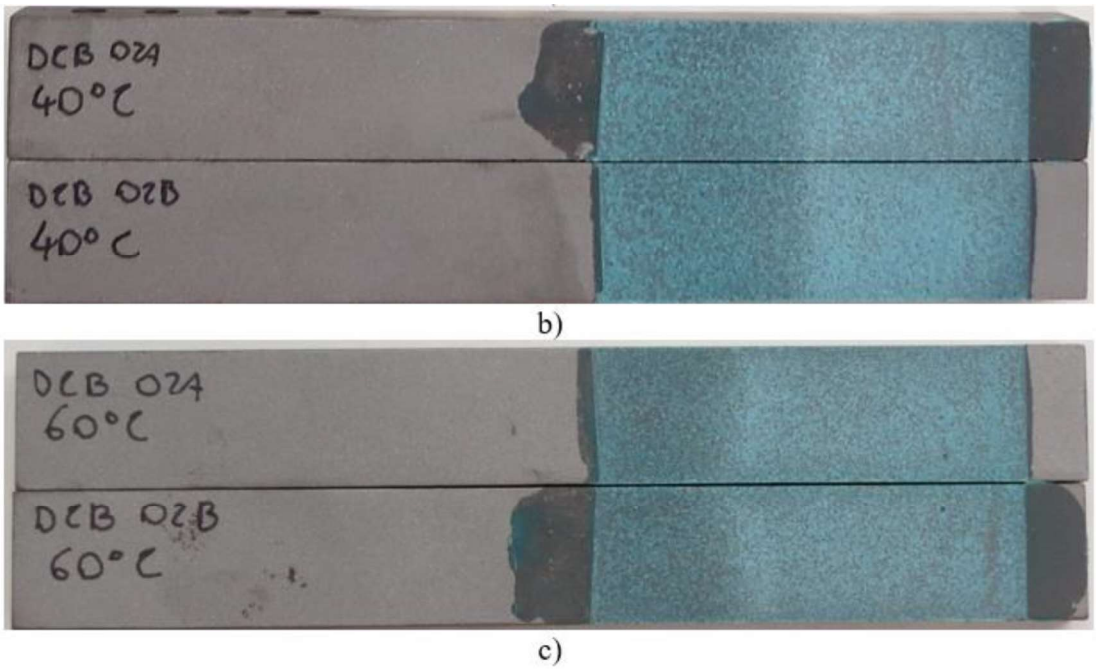


Figura 68 - Superfícies de fratura s DCBs curtos em função da temperatura

4.4 Ensaios de Tenacidade à Fratura em Modo II (ENFs)

Os corpos de prova ENF foram testados somente à temperatura ambiente, devido à restrição de espaço da câmara térmica, pois apesar da existência de corpos de prova mais curtos, o aparato utilizado para gerar as condições de contorno o teste excedem as dimensões internas da câmara. As curvas P-δ e R para tenacidade à fratura no Modo II são mostradas nas Figura 69 e Figura 70. Foram testados 6 corpos de prova, em virtude da dificuldade em obter-se uma propagação estável da trinca em alguns casos. Um valor médio de 10,46 N/mm foi encontrado para a tenacidade à fratura crítica no modo II, 7,42 vezes maior do que o encontrado para G_{Ic} Sabe-se, que para adesivos epóxis há uma grande variação na relação entre tenacidade à fratura dos modos I e II, e valores entre 5 e 10 foram relatados na literatura [33, 45, 46]. A partir da relação encontrada entre as tenacidades à fratura em Modo I e II à temperatura ambiente, foram estimadas as tenacidades em Modo II para 40 e 60 °C, apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Tenacidade à fratura do adesivo BetamateTM2096 em função da temperatura

Propriedade	23 °C	40 °C	60 °C
G_{Ic}	1,41 ± 0,24	1,84 ± 0,05	1,43 ± 0,05
G_{IIc}	10,46 ± 1,26	13,65 ± 0,34	10,61 ± 0,26

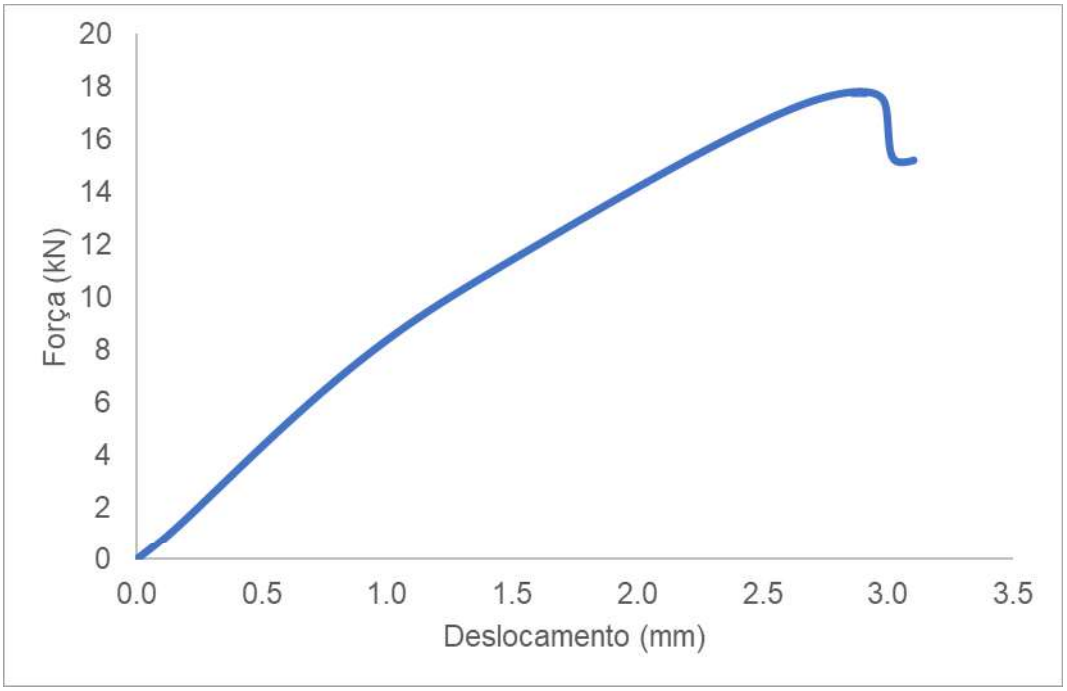


Figura 69 – Curva representativa *P-δ* para os ensaios ENF

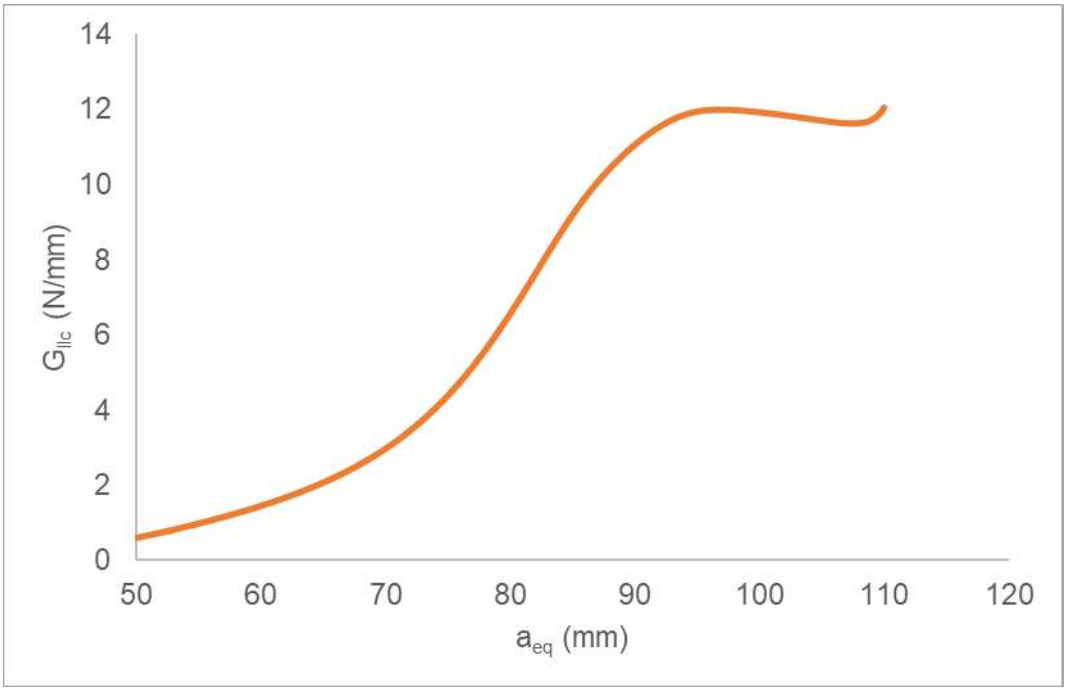


Figura 70 – Curva *R* representativa para os ensaios *ENF*

4.5 Ensaio de Tração - Resistência ao Cisalhamento (juntas de sobreposição simples)

Como apresentado anteriormente na seção 3.3.2, diversas geometrias de junta de sobreposição simples foram testadas com diferentes combinações de substratos (Al, CFRP e HSS), em três temperaturas de referência distintas (23, 40 e 60 °C). Para cada combinação dos parâmetros experimentais foram testadas no mínimo três juntas. Os próximos tópicos apresentam os resultados e as discussões destes ensaios.

4.5.1 Efeito da Espessura do Adesivo e Comprimento de Sobreposição

Na primeira etapa dos testes das juntas de sobreposição simples, para uma melhor compreensão e caracterização do comportamento do adesivo utilizado, juntas HSS-HSS foram testadas com diferentes configurações geométricas, sendo variado separadamente a espessura do adesivo (0,2 e 1 mm) e o comprimento de sobreposição (12,5; 25 e 50 mm) sendo todas geometrias testadas nas temperaturas de referência. Para avaliar-se o efeito da espessura do adesivo e comprimento de sobreposição combinados com a variação e temperatura, utilizou-se o plano experimental reduzido apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Plano Experimental (L_{18-6})

N° do Ensaio	Espessura do Adesivo (mm)	Comprimento de Sobreposição (mm)	Temperatura (°C)
1	0,2	12,5	23
2	0,2	12,5	40
3	0,2	12,5	60
4	0,2	25	23
5	0,2	25	40
6	0,2	25	60
7	0,2	50	23
8	0,2	50	40
9	0,2	50	60
10	1	25	23
11	1	25	40
12	1	25	60

4.5.1.1 Efeito da Espessura do Adesivo

As juntas de diferentes espessuras foram testadas nas 3 temperaturas de referências utilizadas nos testes prévios. As curvas força-deslocamento representativas para cada uma das temperaturas em ambas as espessuras verificadas são apresentadas nas Figura 71 Figura 72.

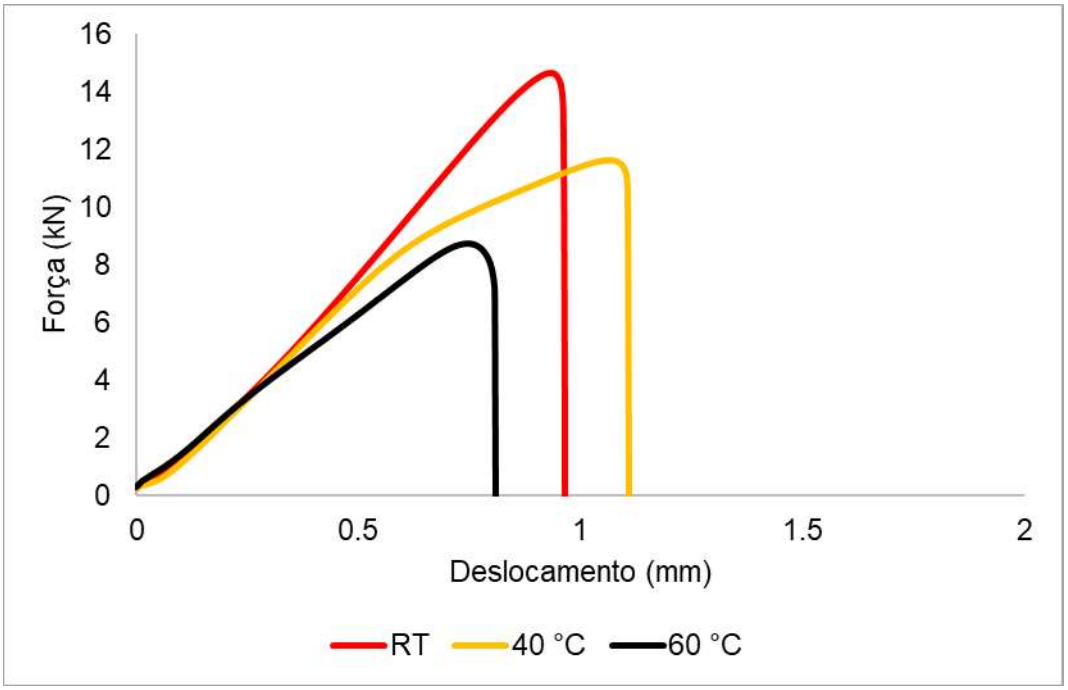


Figura 71 - Curvas Força-Deslocamento representativas para a espessura do adesivo de 0.2 mm a diferentes temperaturas

A força máxima (média) para as juntas com um comprimento de sobreposição de 25,0 mm e uma espessura de adesivo de 0,2 mm diminuiu aproximadamente 19% com o aumento da temperatura de 23 °C para 40 °C e 36% da temperatura ambiente (RT) para 60 °C. O deslocamento médio foi aproximadamente o mesmo para 23 e 40 °C. Já na temperatura de 60 °C, uma redução no deslocamento de aproximadamente 36% foi encontrada em relação à temperatura ambiente.

Para as juntas com uma espessura de adesivo de 1,0 mm a força máxima diminuiu 17% com o aumento da temperatura de 23 para 40 °C e 33% com o aumento para 60 °C. O deslocamento aumentou com o aumento da temperatura, 10% a 40 °C e 24% a 60 °C.

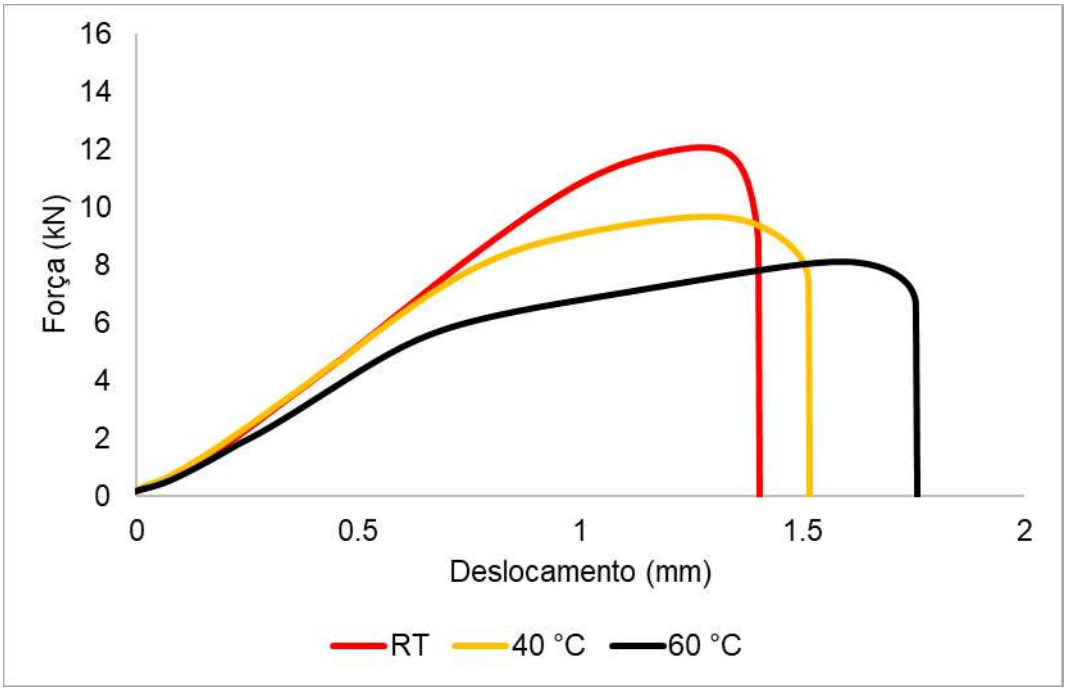


Figura 72 - Curvas Força-Deslocamento representativas para a espessura do adesivo de 0.2 mm a diferentes temperaturas

A Figura 73 mostra as superfícies de fratura para os 6 casos experimentais aqui avaliados. Para a espessura de 0,2 mm as superfícies de fratura foram coesivas para 23 e 40 °C. Todavia, as superfícies mostram um aumento de ductilidade com o aumento da temperatura. À 60 °C, as superfícies apresentam-se como fratura mista, mostrando apontando uma redução no mecanismo de adesão com o aumento da temperatura, bem como o amolecimento do adesivo.

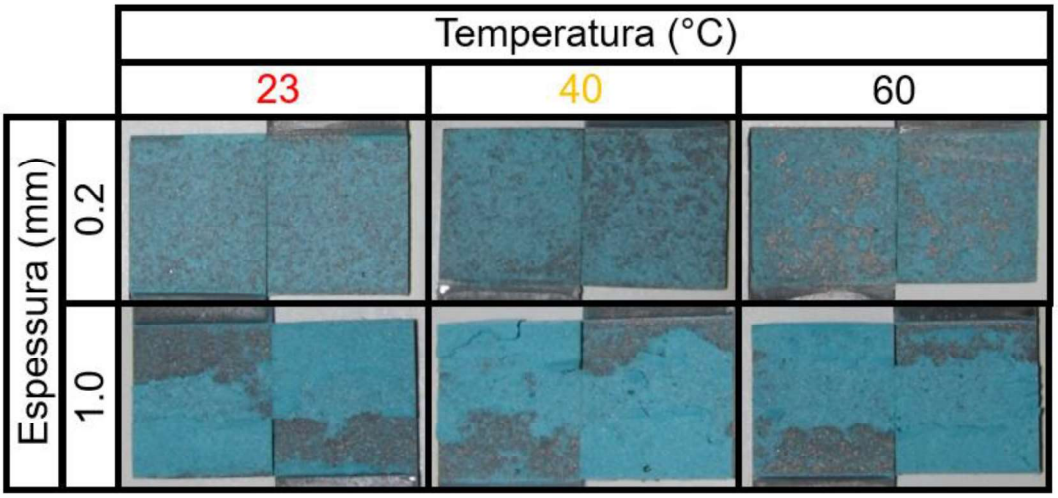


Figura 73 – Superfícies de fratura em função da temperatura e espessura do adesivo

Para a espessura do adesivo de 1 mm, as superfícies de fratura mostram também um aumento da ductilidade com o aumento da temperatura. Todavia, todas as superfícies apresentaram fratura mista. Este comportamento está associado com o aumento da espessura do adesivo, que leva à uma maior concentração de tensões nos cantos da interface adesivo-substrato, uma vez que um carregamento puramente axial é experimentalmente impossível e juntas de grande espessura [29], levando ao início da propagação de trincas no canto das SLJ [47, 48].

A comparação do efeito da temperatura combinada com o efeito da espessura do adesivo na resistência mecânica das SLJs é mostrada nas. Os resultados mostram que o aumento da espessura do adesivo reduz a resistência dos SLJs, resultado já reportado em outros trabalhos na literatura [29, 46, 49].

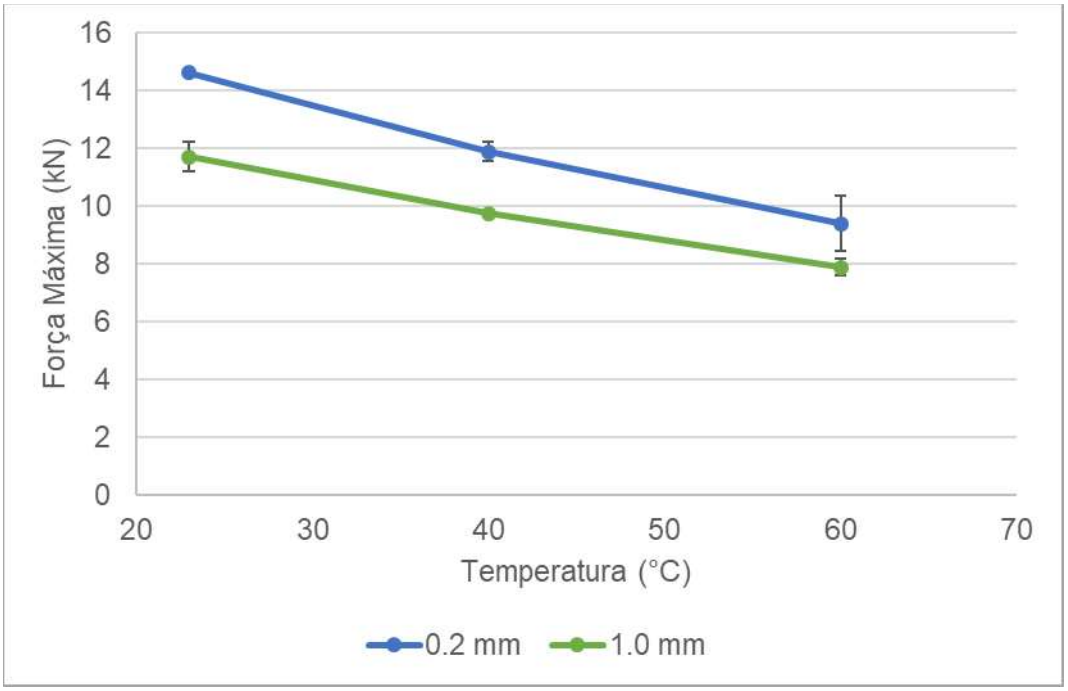


Figura 74 - Efeito da temperatura na resistência mecânica das juntas de diferentes espessuras

Essa redução pode ser explicada pelo aumento do momento de flexão e pela concentração de tensão de arrancamento e cisalhamento no canto da interface, dando início à ruptura do adesivo, como pode ser visto nas superfícies de fratura das juntas com 1,0 mm de espessura. Além disso, a redução na resistência da junta também pode ser explicada pelo aumento proporcional de defeitos como bolhas e poros no adesivo com o aumento da espessura, levando a uma menor resistência ao cisalhamento.

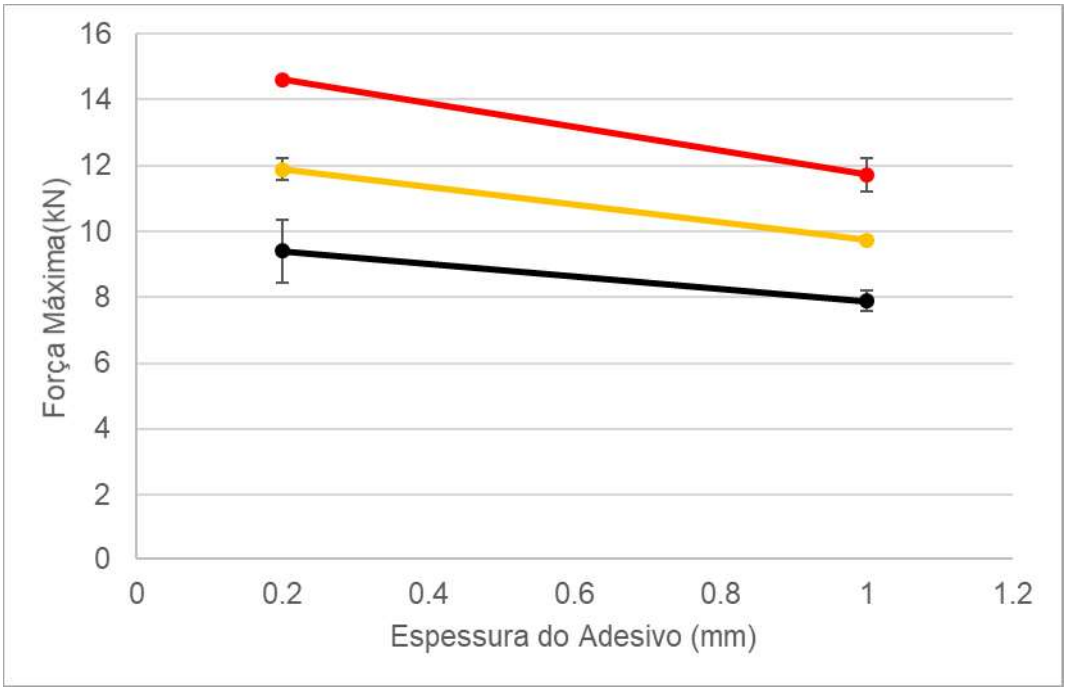


Figura 75 - Efeito da espessura do adesivo nas diferentes temperaturas testadas

A redução na força de ruptura foi de aproximadamente 25% à temperatura ambiente, 22% a 40 °C e 19% a 60 °C. Estes resultados indicam que, com o aumento da temperatura, o efeito da espessura do adesivo tem menor influência na força máxima e na resistência da junta. Pode-se relacionar que com aumentos de temperatura, o adesivo torna-se mais dúctil e menos resistente, e a falha ocorre mais devido à escoamento global da camada adesiva do que devido à concentração de tensões em qualquer ponto da junta, como usualmente ocorre à temperatura ambiente.

Relacionado ao deslocamento, para juntas com espessura de adesivo de 0,2 mm, o deslocamento foi aproximadamente o mesmo para 23 e 40 °C, enquanto foi 18% menor à 60 °C. Para as juntas de 1,0 mm de espessura, houve um aumento de 10% de 23 °C para 40 °C e 23% para 60 °C. A diferença nesse comportamento pode ser explicada pela distribuição de tensão nessas juntas. Para 0,2 mm, a tensão de cisalhamento é a principal responsável pela falha da junta. Portanto, espera-se que, com o aumento da temperatura e a redução de força associada, ocorra uma redução do deslocamento. No entanto, a partir dos resultados anteriores, sabe-se que a tenacidade à fratura tem um aumento de 23 °C para 40 °C, explicando o ligeiro aumento no deslocamento durante os ensaios. Para 1,0 mm de espessura do adesivo, a tensão na primeira direção (Modo I) é muito mais relevante, resultando em um cenário de carregamento de modo misto, levando a um comportamento de aumento no deslocamento com o aumento da temperatura, como observado nos ensaios de tração dos corpos de prova de adesivo

puro (bulk). Comparando o deslocamento entre as diferentes espessuras do adesivo testadas, verificou-se que o deslocamento aumenta com o aumento da espessura em todas as temperaturas, 30% à temperatura ambiente, 36% para 40 °C e 95% a 60 °C. O aumento da deformação da junta com o aumento da espessura do adesivo ocorre devido ao aumento da tenacidade à fratura com o aumento da camada adesiva [29, 46]

A Figura 76 mostra o efeito da temperatura no deslocamento das duas espessuras adesivas avaliadas.

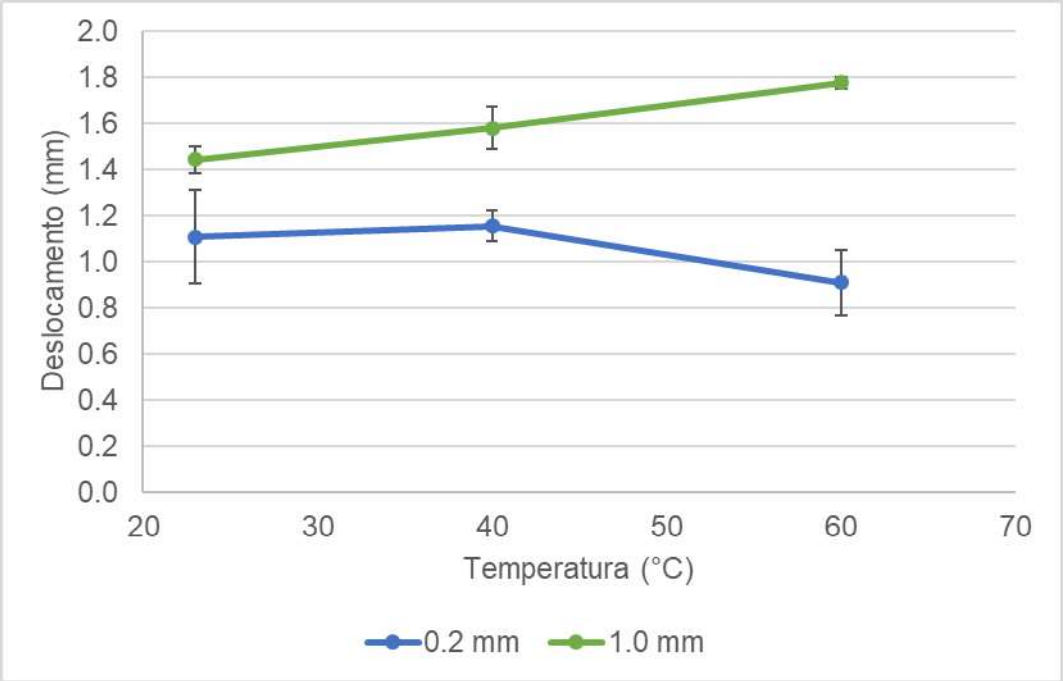


Figura 76 - Efeito da temperatura no deslocamento das juntas testadas

A totalidade dos resultados obtidos para o efeito da espessura do adesivo combinado com o efeito da temperatura são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado do efeito da temperatura combinado com a espessura do adesivo

Espessura	0,2 mm		1,0 mm	
Temperatura (°C)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)
23	14.62 ± 0.02	1.11 ± 0.20	11.72 ± 0.50	1.44 ± 0.06
40	11.89 ±0.35	1.16 ± 0.07	9.74 ± 0.11	1.58 ± 0.09
60	9.40 ± 0.95	0.91 ± 0.14	7.89 ± 0.30	1.78 ± 0.03

4.5.1.1 Efeito do Comprimento de Sobreposição

Juntas com espessura de adesivo de 0,2 mm foram fabricadas em três diferentes comprimentos de sobreposição (12,5; 25; 50 mm), para avaliar o efeito do comprimento

de sobreposição na resistência da junta. Todos os comprimentos foram testados nas três temperaturas de referência distintas apresentadas nos testes anteriores, e as curvas de força-deslocamento para os comprimentos de sobreposição de 12,5 e 50 mm são mostradas nas Figura 77Figura 78, respectivamente. Os resultados referentes ao comprimento sobreposição de 25,0 mm utilizados referem-se aos já apresentados nos tópicos anteriores da avaliação do efeito da espessura do adesivo, no caso, as juntas com 0,2 mm de espessura e comprimento de sobreposição de 25 mm.

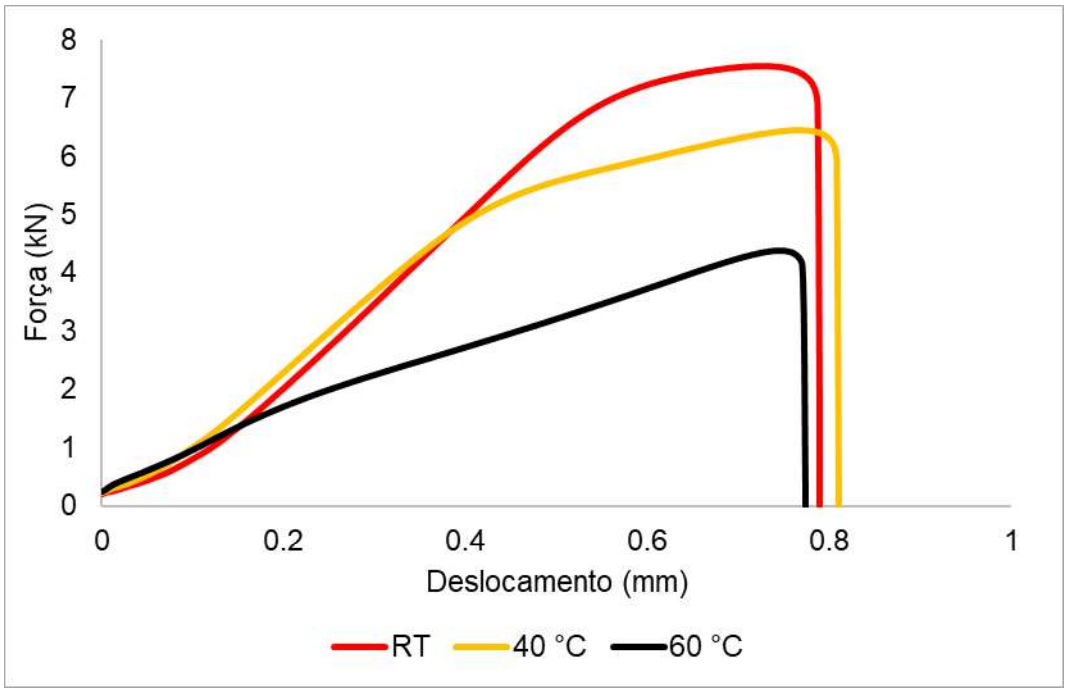


Figura 77 - Curvas força-deslocamento representativas para comprimento de sobreposição de 12,5 mm

Para as juntas com comprimento de sobreposição de 12,5 mm, a força máxima (média) diminuiu 13% de 23 °C para 40 °C e 38% para 60 °C. O deslocamento médio foi aproximadamente o mesmo para todas as temperaturas, com um leve crescimento com um o aumento da temperatura para 40 °C e um leve decréscimo para 60 °C. Este comportamento similar ao observado nas juntas com comprimento de sobreposição de 25,0 mm com a mesma espessura de adesivo apresentados anteriormente.

Para as juntas com comprimento de sobreposição de 50,0 mm, a resistência diminuiu 17% para 40 °C e 47% para 60 °C, em relação à temperatura ambiente. O deslocamento diminuiu quase na mesma proporção, como mostram as curvas força-deslocamento.

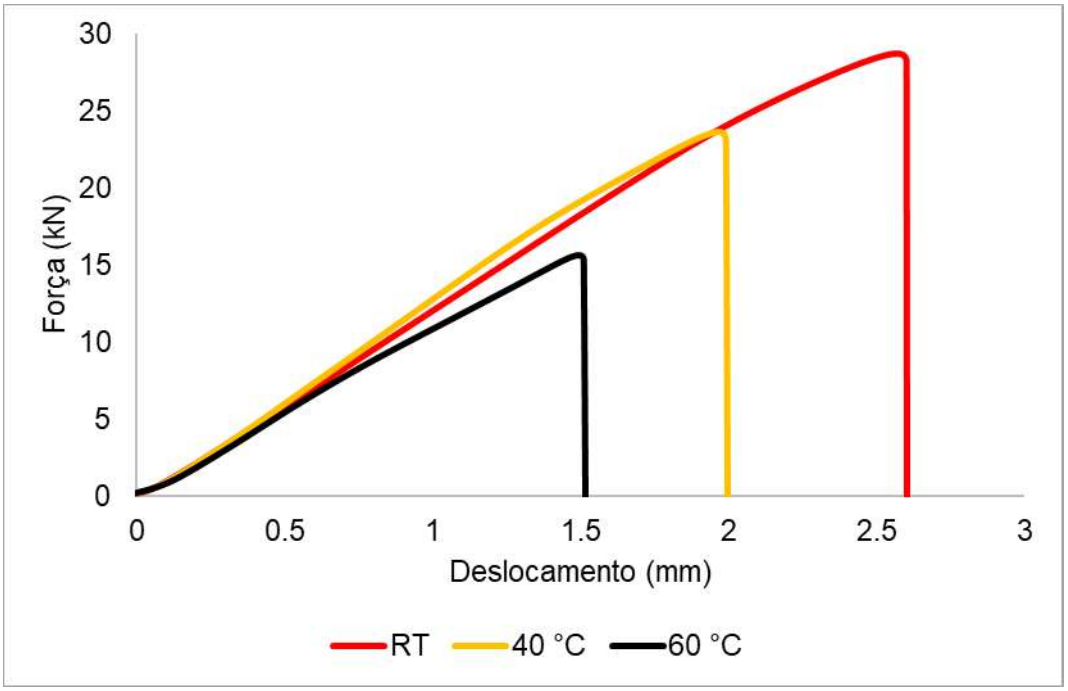


Figura 78 - Curvas força-deslocamento representativas para comprimento de sobreposição de 50 mm

As superfícies de fratura tiveram comportamentos bem distintos em função do comprimento de sobreposição avaliado, conforme mostrado na Figura 79.

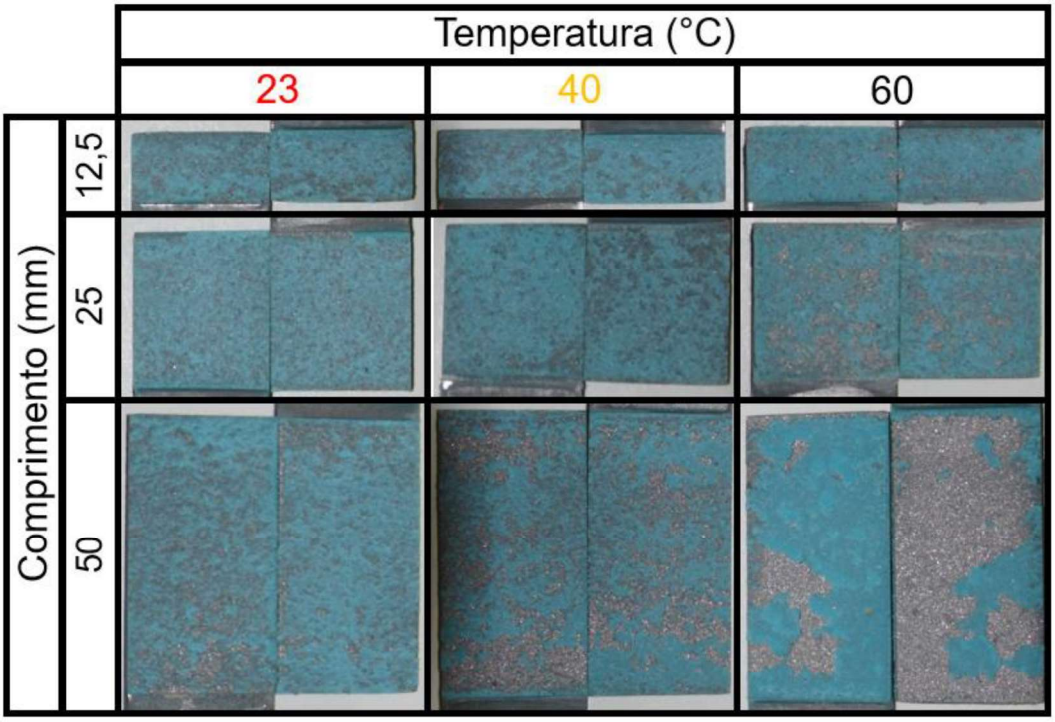


Figura 79 – Evolução das superfícies de fratura em função da temperatura e comprimento de sobreposição

Para as juntas com 12,5 mm, as superfícies foram coesivas em todas as temperaturas, enquanto para as juntas de 25 mm, as superfícies foram coesivas na temperatura ambiente (RT) e 40 °C, e mistas à 60 °C. Já nas juntas de 50 mm, as superfícies de fratura foram coesivas à 23 °C, mistas à 40 °C e adesivas à 60 °C. A evolução da superfície da fratura, principalmente no comprimento de sobreposição de 50 mm, deve-se ao aumento da concentração de tensões de arrancamento e cisalhamento com o aumento do comprimento de sobreposição. Isto, combinado com a degradação das propriedades do adesivo e diminuição das forças de contato entre adesivo e substratos com aumento de temperatura, leva à evolução das superfícies de fratura de coesiva para adesiva. O efeito do comprimento de sobreposição sobre as cargas de ruptura nas juntas testadas em várias temperaturas é mostrado nas

Figura *80* e Figura 81.

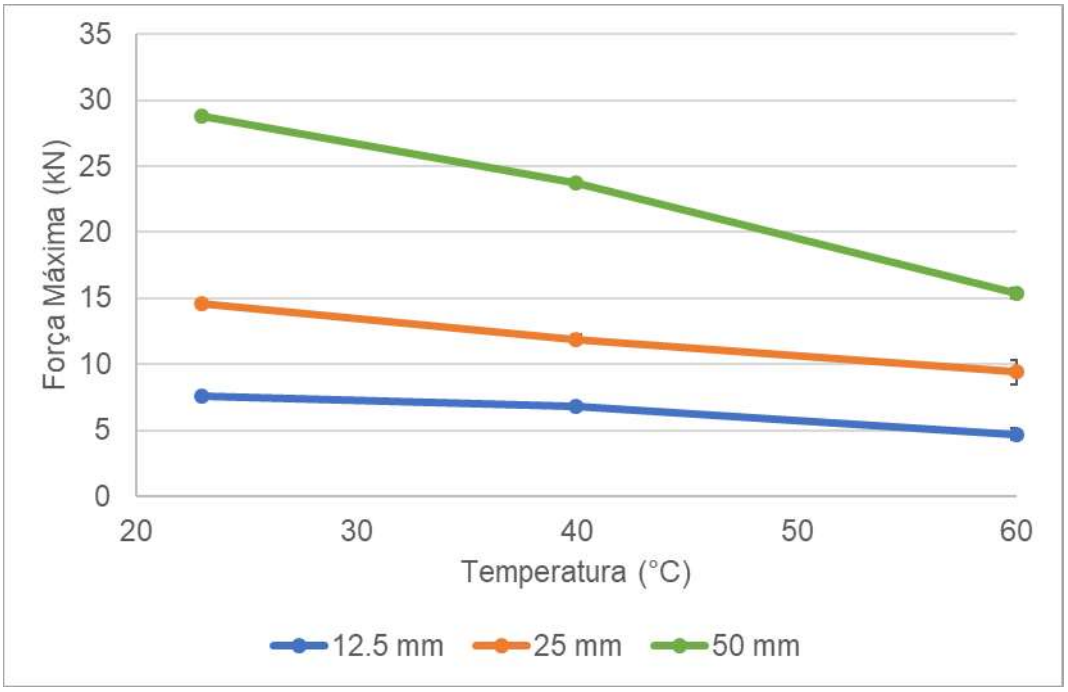


Figura 80 - Efeito da temperatura na força de ruptura das juntas em função dos 3 comprimentos de sobreposição testados

Os resultados mostram que o efeito da temperatura na resistência mecânica da junta é maior com o aumento do comprimento de sobreposição, principalmente devido ao aumento da concentração de tensões nas extremidades da área colada combinado com a degradação de propriedades do adesivo, conforme explicado anteriormente.

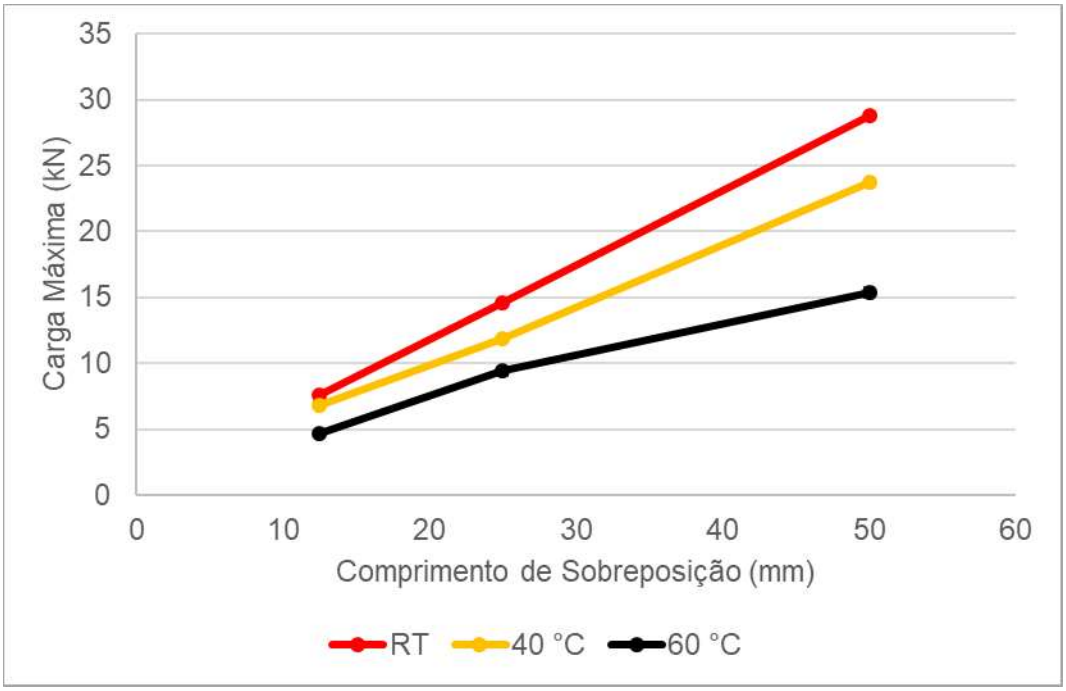


Figura 81 - Efeito do comprimento de sobreposição na carga máxima das juntas em função das 3 temperaturas testadas

Além disso, os resultados mostram que a resistência a cisalhamento tem uma pequena redução com o aumento do comprimento de sobreposição à temperatura ambiente, que é potencializada com o aumento da temperatura, como mostrado na Figura 82.

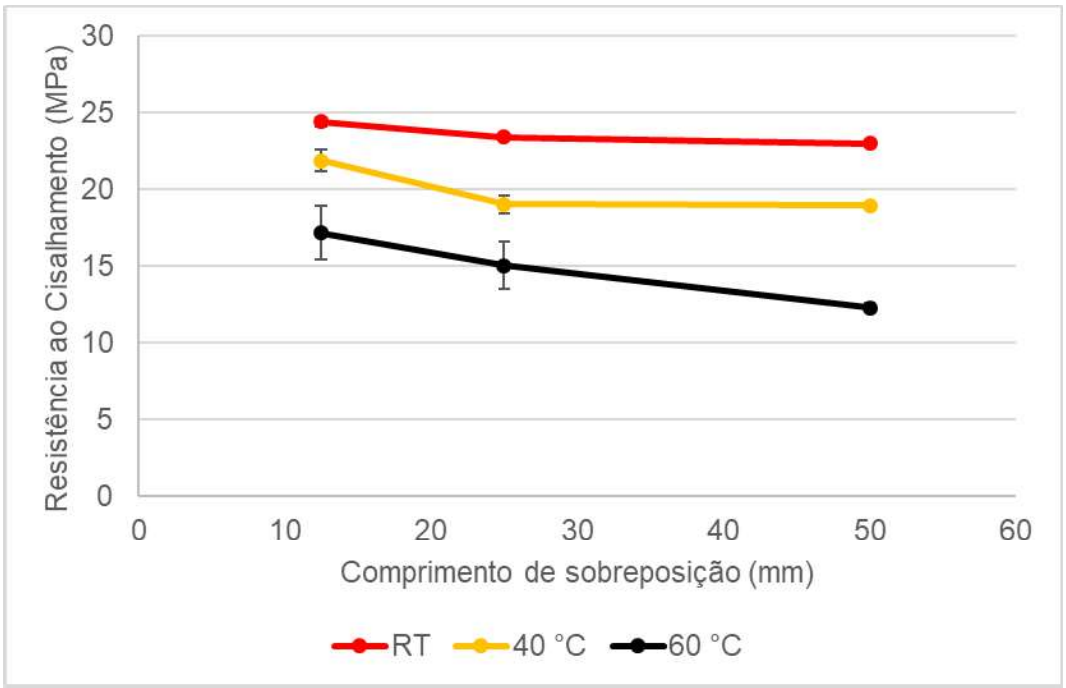


Figura 82 – Resistência ao cisalhamento em função do comprimento de sobreposição

A totalidade dos resultados obtidos para o efeito do comprimento de sobreposição combinado com o efeito da temperatura são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do efeito do comprimento de sobreposição combinado com a temperatura

Comprimento	12,5 mm		25,0 mm		50,0 mm	
Temperatura	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)
23	7,63 ± 0,10	0,82 ± 0,04	14,62 ± 0,02	1,11 ± 0,20	28,76 ± 0,09	2,75 ± 0,21
40	6,84 ± 0,22	0,85 ± 0,05	11,89 ±0,35	1,16 ± 0,07	23,69 ± 0,04	2,20 ± 0,29
60	4,72 ± 0,48	0,80 ± 0,04	9,40 ± 0,95	0,91 ± 0,14	15,37 ± 0,39	1,53 ± 0,02

Os resultados obtidos são de extrema relevância, uma vez que não há referências na literatura sobre o efeito do comprimento de sobreposição, combinado com a temperatura de utilização de juntas. De fato, é possível observar que quanto maior o comprimento de sobreposição, mais susceptíveis aos efeitos da temperatura e decréscimo de resistência mecânica as juntas se tornam. Isso pode ser observado através dos resultados da resistência ao cisalhamento encontrados, bem como através da evolução das superfícies de fratura das juntas, mudando de coesivas para adesivas em função do aumento do comprimento de sobreposição, bem como o aumento de temperatura.

4.5.2 Juntas dissimilares (espessura de 0,4 mm)

Após a avaliação do efeito do comprimento de sobreposição e espessura do adesivo em diferentes temperaturas, prosseguiu-se para a etapa seguinte na confecção e ensaios de juntas de sobreposição simples (SLJ). Foram confeccionadas juntas dissimilares utilizando os substratos de Alumínio (Al), Aço de Alta Resistência (HSS) e Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP). Dado os resultados da etapa anterior, optou-se por um comprimento de sobreposição de 25 mm, uma vez que este é um comprimento de sobreposição típico utilizado em aplicações práticas, e um comprimento de sobreposição maior que este poderia induzir deformações plásticas muito grandes nos substratos de alumínio. Já em relação à espessura do adesivo intermediária aos dois valores testados anteriormente, de 0,4 mm.

Como apresentado no tópico 2.10.2 da revisão bibliográfica, a utilização de substratos distintos em uma junta colada leva à uma distribuição de tensões no adesivo (e na junta em si) assimétrica e complexa. Esta distribuição de tensões atípica ocorre

devido a dois fatores: A diferença de elasticidade entre os substratos faz com que durante o carregamento da junta os lados a área colada estejam submetidos a carregamentos mecânicos distintos, e a diferença entre os coeficientes de expansão térmica entre os substratos entre si, bem como entre os mesmos e o adesivo gerem tensões residuais térmicas [37, 50]. Mais especificamente, nos casos analisados neste trabalho, as tensões térmicas tem origem da diferença entre a temperatura de cura 60 °C (temperatura livre de estresse), temperatura na qual o adesivo se solidificou e aderiu aos substratos, e a temperatura de utilização. Tendo em vista isso, à temperatura ambiente as juntas dissimilares possuem a maior tensão térmica residual, e à 60 °C, nenhuma.

Deste ponto em diante, as juntas serão referidas em função da combinação de substratos utilizados: Al-CFRP, HSS-CFRP e Al-HSS. As siglas estão orientadas de forma que o substrato com o maior coeficiente térmico (α) inicie a sigla da junta. Os módulos de elasticidade já apresentados anteriormente, bem como os coeficientes de expansão térmica são apresentados na

Tabela 14. As curvas características para cada um dos casos experimentais são apresentadas nas Figura 83Figura 84Figura 85.

Tabela 14 - Propriedades dos substratos

Material	E (GPa)	α (10^{-6} °C^{-1})
Al	70	23
HSS	210	13
CFRP	109	0

Os resultados encontrados mostram que em relação à temperatura ambiente, para as juntas Al-CFRP, a carga de ruptura decaiu aproximadamente 21% para 40 °C e 48% à 60 °C. Já o deslocamento decaiu 29% e 46% para 40 e 60 °C, respectivamente.

Para as juntas HSS-CFRP, a força máxima em relação à temperatura ambiente decaiu 17% e 41% para 40 e 60 °C, respectivamente. Enquanto isso, o deslocamento decaiu 7% à 40 °C e 11% à 60.

Para as juntas Al-HSS, o decréscimo na força de ruptura em relação à temperatura ambiente foi de 17% à 40 °C e 40%à 60 °C. Já o deslocamento, decaiu 3% à 40 °C e 13% à 60 °C.

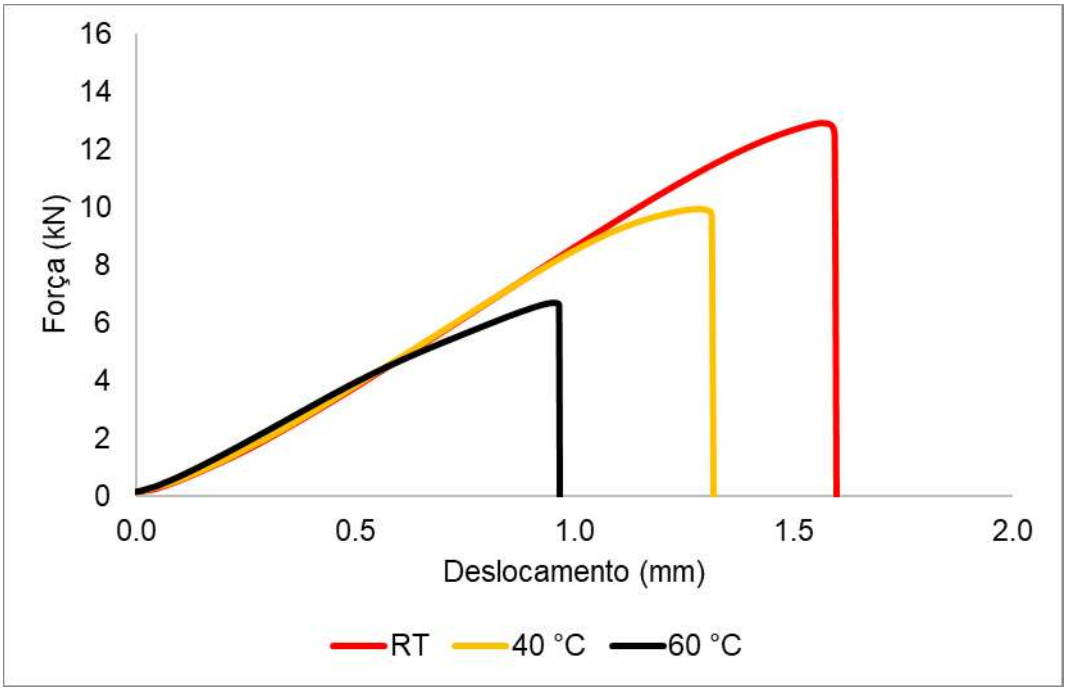


Figura 83 – Curvas características das juntas Al-CFRP

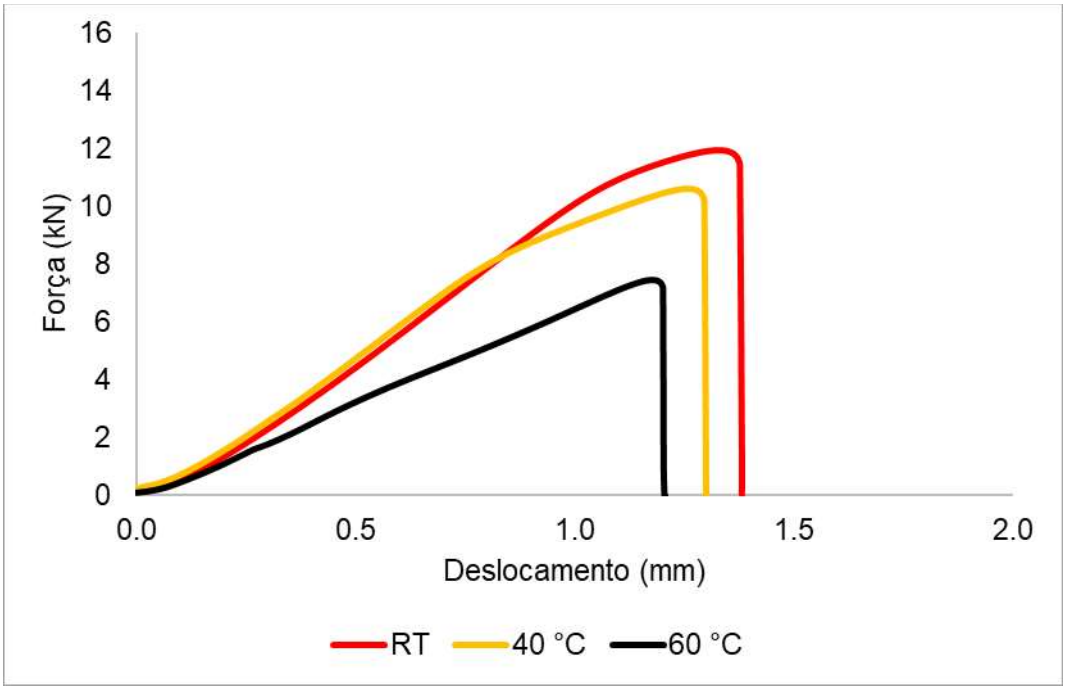


Figura 84 - Curvas características das juntas HSS-CFRP

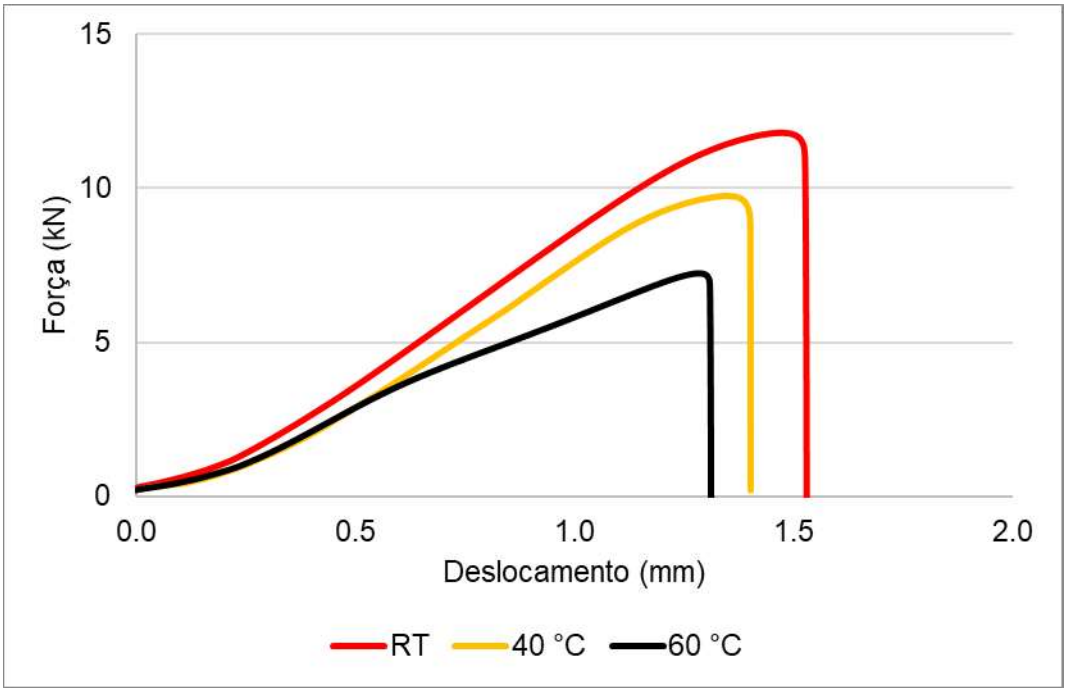


Figura 85 - Curvas características das juntas Al-HSS

Comparando as combinações de substratos avaliados, nota-se que para todos os casos avaliados o deslocamento reduziu com o aumento da temperatura. Comparando os grupos entre si, é possível inferir que o deslocamento está associado à média dos módulos de elasticidade entre os dois substratos, médias maiores significam menos deslocamento e médias menores significam um maior deslocamento. Isso só não mostra-se verdade para as juntas Al-CFRP fora da temperatura ambiente. Uma hipótese que explica isto, é que o alumínio sofre uma grande flexão durante o carregamento, devido à concentração de tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição aliado ao seu baixo módulo de elasticidade, e à impossibilidade de um carregamento axial perfeito, o que pode ter levado ao decaimento tão acentuado do deslocamento com o aumento da temperatura e a perda de propriedades do adesivo. Estes resultados podem ser visualizados na Figura 86.

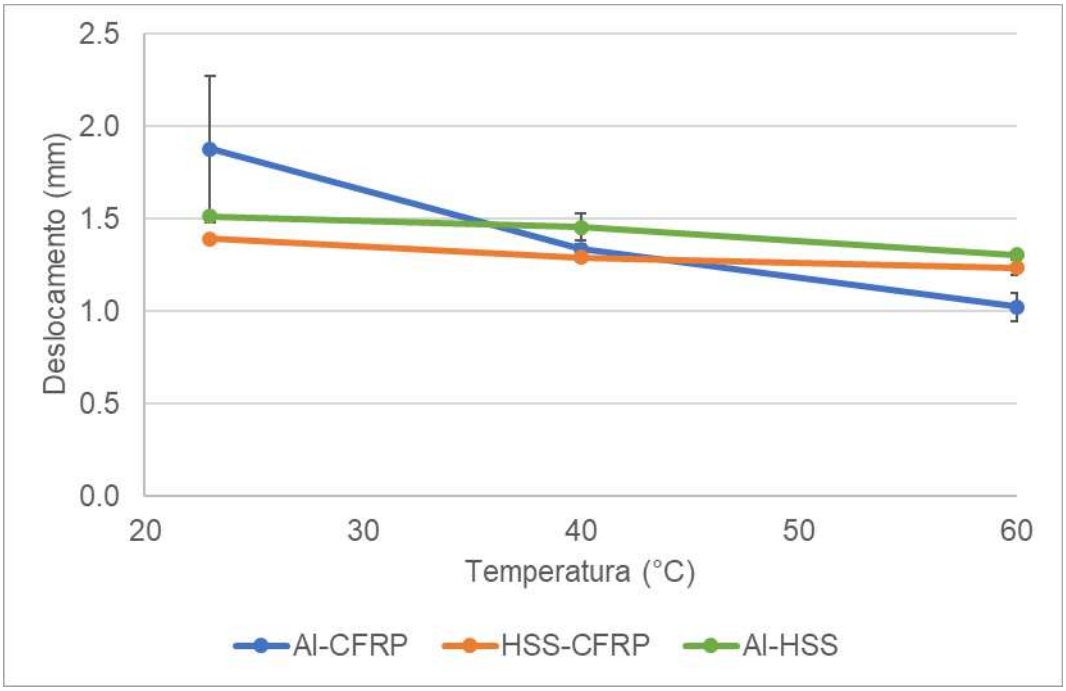


Figura 86 - Efeito da temperatura no deslocamento das juntas dissimilares testadas

Em relação à força de ruptura das juntas, foi verificado que a mesma decaiu em função da temperatura, como esperado. A comparação ente as diferentes combinações de substratos (à mesma temperatura) não apresentou variações significativas na resistência mecânica, isso ocorreu devido ao mecanismo de falha recorrente em muitos dos epóxis modernos, através da falha por escoamento global [3]. Que ocorre principalmente para comprimentos de sobreposição curtos e grandes espessuras dos adesivos. Nos casos experimentais avaliados neste tópico, tanto a espessura quando o comprimento de sobreposição utilizados foram intermediários, levando à uma grande influência da escoamento global no mecanismo de falha. Os resultados das cargas de ruptura são apresentados na Figura 87. E a totalidade dos resultados obtidos é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados do efeito da temperatura em juntas multi-material dissimilares

Junta	Al-CFRP		HSS-CFRP		Al-HSS	
Temperatura (°C)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)
23	12,54 ± 0,51	1,88 ± 0,40	12,17 ± 0,31	1,39 ± 0,01	11,88 ± 0,11	1,51 ± 0,02
40	9,95 ± 0,01	1,34 ± 0,02	10,18 ± 0,58	1,29 ± 0,02	9,90 ± 0,21	1,45 ± 0,07
60	6,56 ± 0,18	1,02 ± 0,08	7,18 ± 0,38	1,24 ± 0,04	7,10 ± 0,19	1,31 ± 0,01

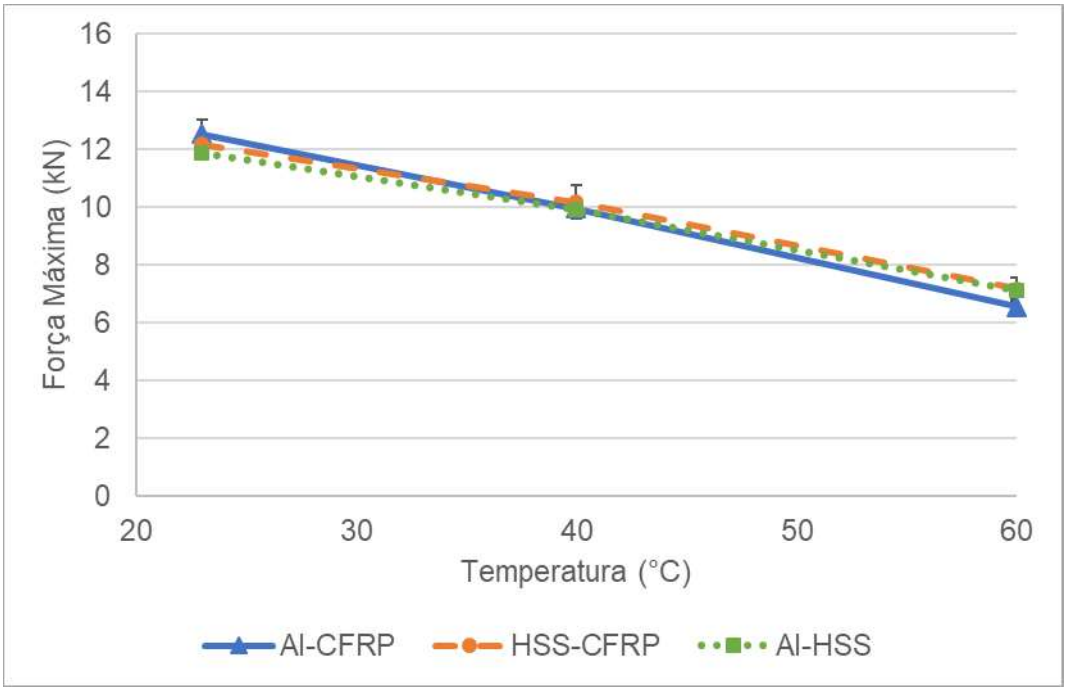


Figura 87 - Força máxima x Temperatura para as diferentes juntas dissimilares testadas

Os resultados obtidos nesta análise são extremamente relevantes do ponto de vista da utilização prática deste adesivo na indústria. A falha por escoamento global, e o baixo efeito da combinação de materiais na resistência mecânica juntas propicia à utilização de um critério global de força de ruptura e resistência mecânica das juntas, independente dos materiais utilizados, o que leva à uma otimização dos projetos de estruturas coladas, tornando-os mais flexíveis e menos restritivos.

4.5.2 Juntas Multi-material dissimilares (espessura de 0,2 mm)

Tendo em vista os resultados obtidos para as juntas multi-material dissimilares com espessura de 0,4 mm, optou-se por confeccionar novas juntas com espessura do adesivo de 0,2 mm, uma vez que a redução da espessura do adesivo aumenta as tensões de cisalhamento e arrancamento, e os picos de concentração nas extremidades das juntas. Adicionalmente as juntas dissimilares foram confeccionadas também juntas similares de Alumínio (Al), Aço de Alta Resistência (HSS) e Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (CFRP). As curvas características para cada uma dessas juntas similares são apresentadas nas Figura 88,Figura 89 eFigura 90.

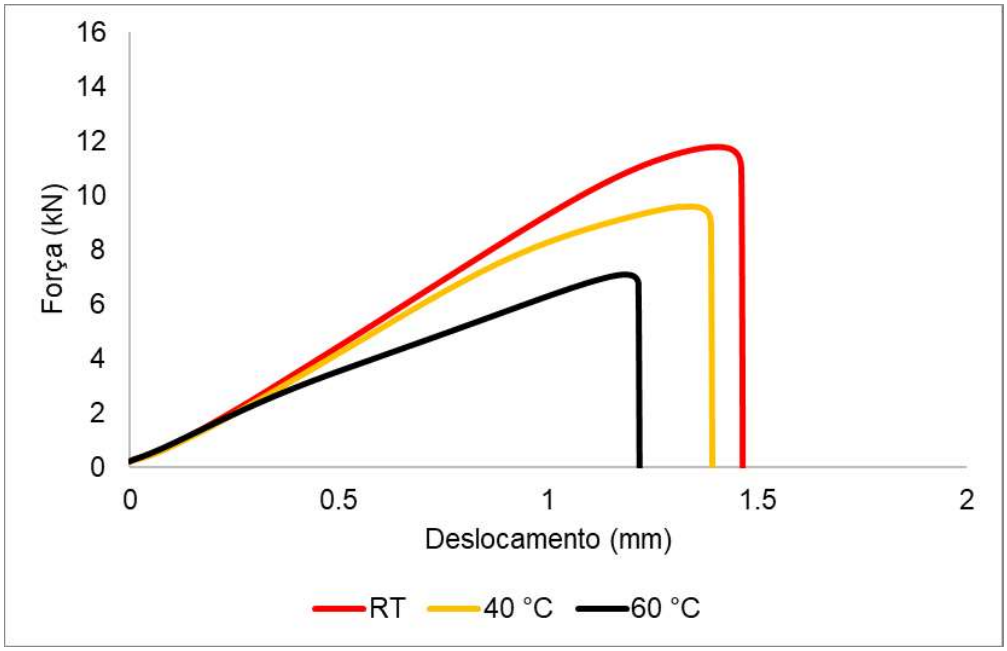


Figura 88 - Curvas representativas das juntas Al-Al

As juntas Al-Al mostraram uma redução na força de ruptura, em comparação à temperatura ambiente, de 18% à 40 °C e 40% à 60 °C. O deslocamento apresentou redução de 7% à 40 °C e 16% à 60 °C.

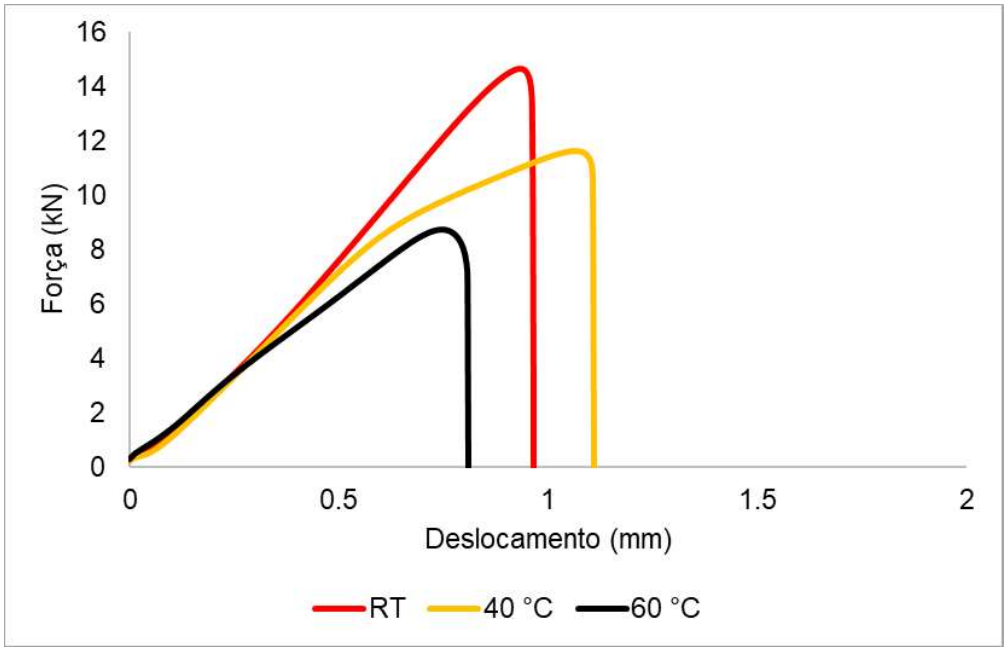


Figura 89 - Curvas representativas das juntas HSS-HSS

A força máxima (média) para as juntas HSS-HSS diminuiu aproximadamente 19% com o aumento da temperatura de 23 °C para 40 °C e 36% da temperatura

ambiente (RT) para 60 °C. O deslocamento médio foi aproximadamente o mesmo para 23 e 40 °C, com um ligeiro aumento. Já na temperatura de 60 °C, uma redução no deslocamento de aproximadamente 36% foi encontrada em relação à temperatura ambiente.

As juntas CFRP-CFRP apresentaram uma redução na resistência de 38% da temperatura ambiente para 40 °C, e 63% para 60 °C. Em relação ao deslocamento, o mesmo apresentou uma redução de 21% à 40 °C e 51% à 60 °C.

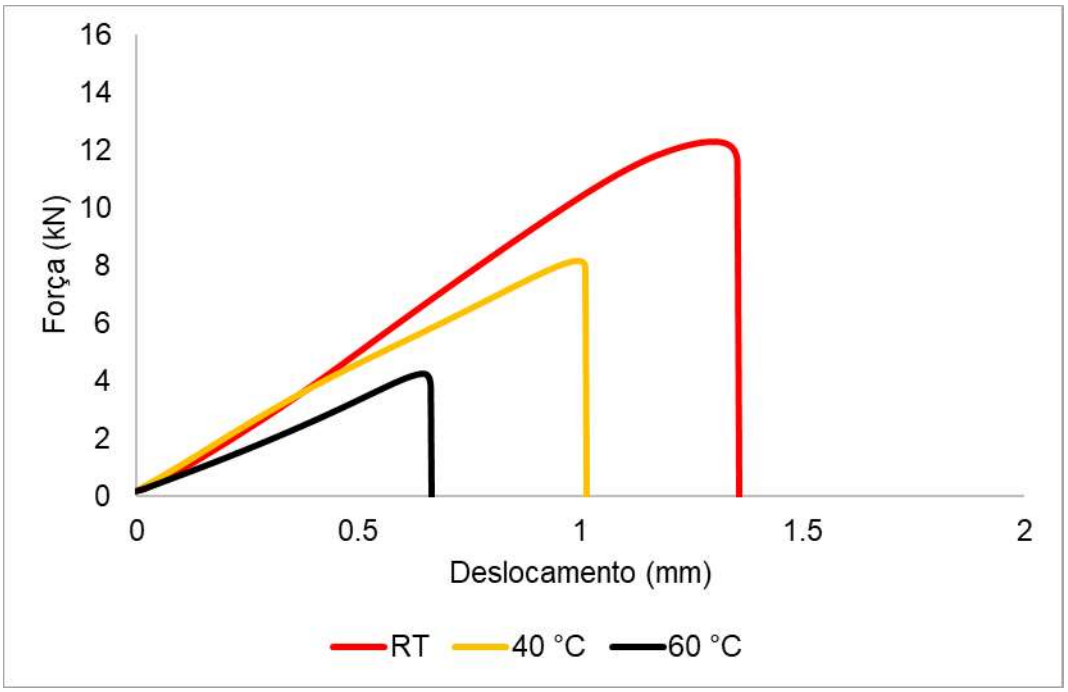


Figura 90 - Curvas representativas das juntas CFRP-CFRP

Os resultados obtidos através da comparação entre os grupos de juntas similares mostram que à temperatura ambiente, os substratos com maior módulo de elasticidade resultaram em maior força de ruptura (HSS), enquanto os substratos com o menor módulo de elasticidade (Al) apresentou a menor força dentre os 3. Esse comportamento repetiu-se para as juntas Al-Al e HSS-HSS também com o aumento da temperatura. Todavia, as juntas CFRP-CFRP apresentaram uma queda mais acentuada do que o esperado com o aumento da temperatura. Uma possibilidade que explica este comportamento seria a redução das propriedades do compósito com o aumento da temperatura, em função da diminuição das propriedades da resina, especialmente relativas a sessão transversal, que poderiam proporcionar uma flexão devido à concentração de tensões combinada com o carregamento axial imperfeito, o que poderia elevar muito as tensões de arrancamento, reduzindo a resistência da junta. O

comparativo entre as forças de ruptura é apresentado na Figura 91, enquanto o comparativo referente ao deslocamento é apresentado na Figura 92.

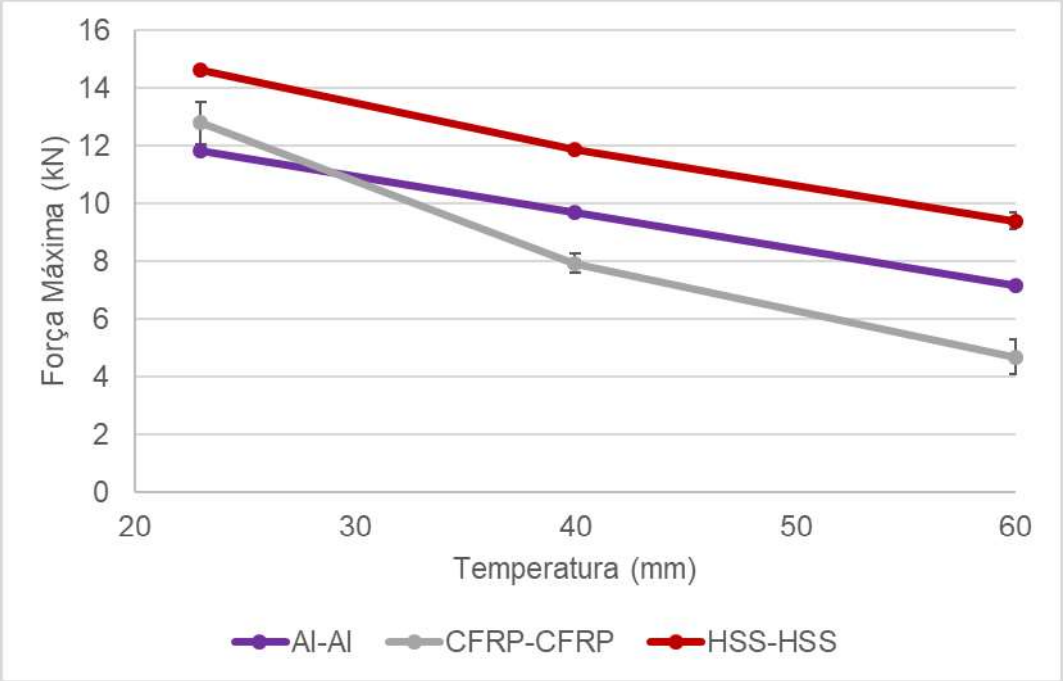


Figura 91 – Força Máxima x Temperatura para as diferentes juntas similares testadas

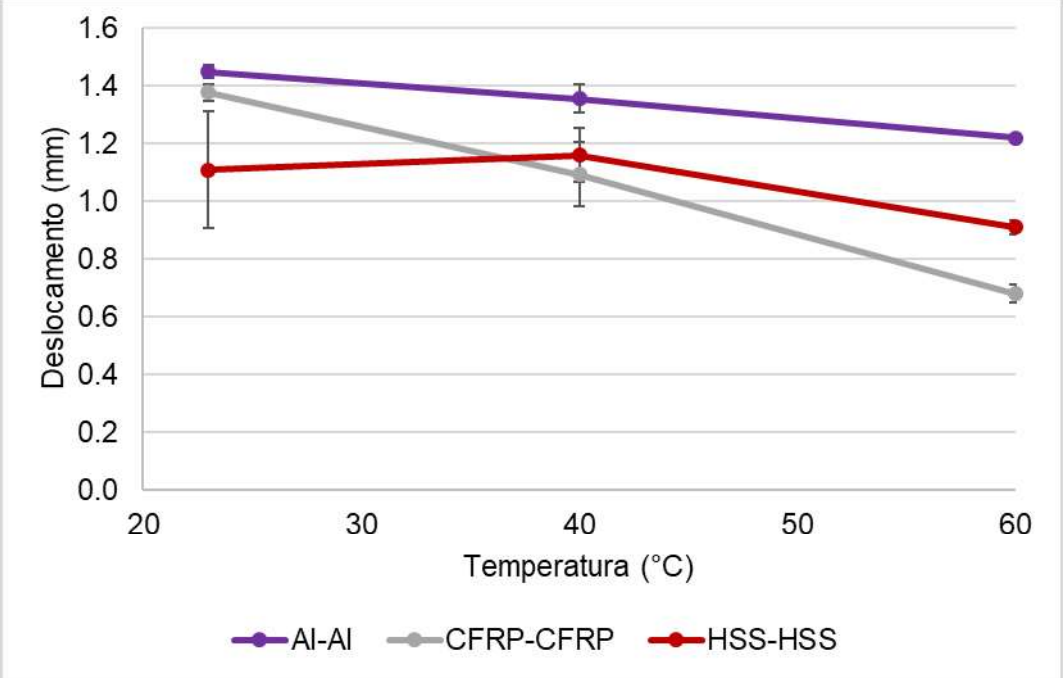


Figura 92 - Deslocamento x Temperatura para as juntas similares testadas

Os resultados quanto à variação do deslocamento, como especificado nos tópicos anteriores para as juntas HSS-HSS, apresenta um ligeiro aumento ocorre de 23 °C para 40 °C, seguido por uma redução a 60 °C, para as juntas Al-Al observa-se uma redução no deslocamento com o aumento da temperatura, enquanto para as juntas CFRP-CFRP observa-se uma redução mais acentuada, possivelmente pela redução das propriedades com o aumento da temperatura, como descrito anteriormente.

As superfícies de fratura das juntas multi-material dissimilares testadas podem ser visualizadas na Figura 93. É possível observar pelas superfícies de fratura o aumento da ductilidade do adesivo com o aumento da temperatura. Além disso, para as juntas Al-Al e HSS-HSS as superfície apresentadas são coesivas à RT e 40 °C e mistas à 60 °C. Já para as juntas CFRP-CFRP, a superfície foi mista para todas as temperaturas.

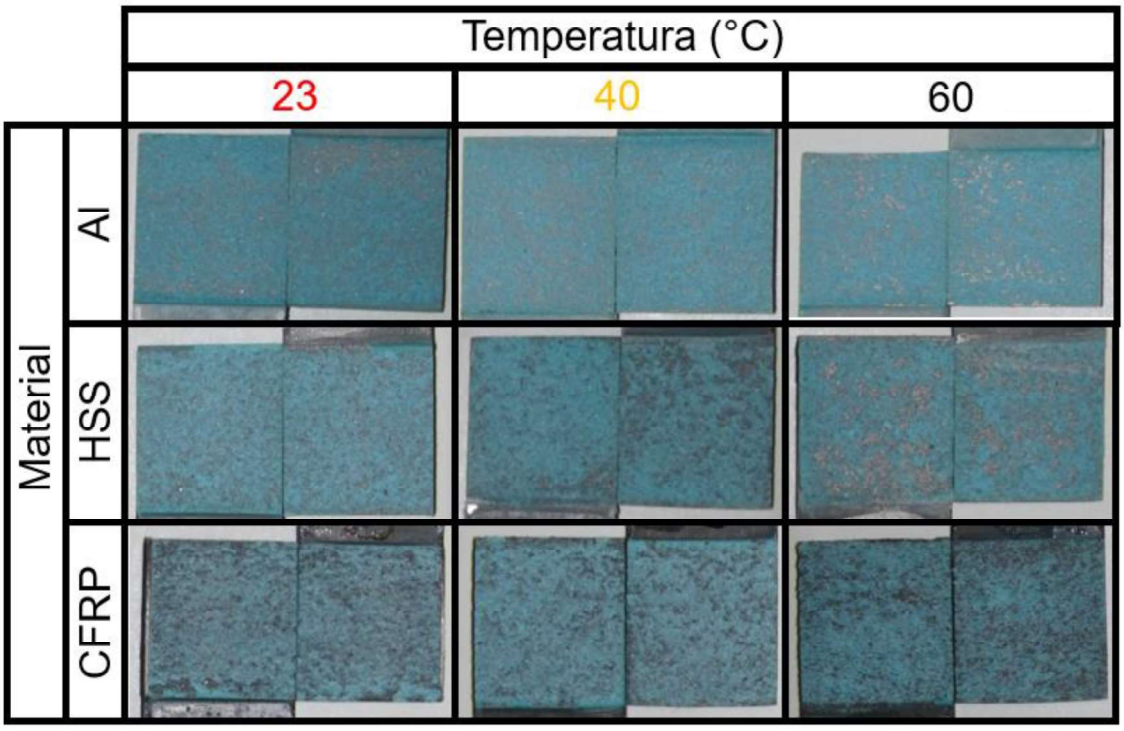


Figura 93 - Superfície de fratura das juntas similares

Tabela 16 - Resultado das juntas multi-material similares em função da temperatura

Junta	Al-Al		HSS-HSS		CFRP-CFRP	
Temperatura (°C)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)
23	11,83 ± 0,06	1,45 ± 0,02	14,62 ± 0,02	1,11 ± 0,20	12,38 ± 0,73	1,38 ± 0,03
40	9,96 ± 0,12	1,36 ± 0,05	11,89 ± 0,35	1,16 ± 0,07	7,93 ± 0,34	1,09 ± 0,11
60	7,14 ± 0,07	1,22 ± 0,01	9,40 ± 0,95	0,91 ± 0,14	4,68 ± 0,60	0,68 ± 0,03

O apanhado geral dos resultados obtidos nesta análise de juntas multi-material similares é mostrado na Tabela 16.

Referente as juntas dissimilares, as mesmas foram confeccionadas nesta etapa com espessura de 0,2 mm, 50% menor que anteriormente. O objetivo disto foi aumentar a concentração de tensões de forma que as mesmas venham a influenciar de forma mais impactante a ruptura da junta, a despeito da escoamento global e baixa dispersão de resultados entre os grupos, ocorridas nas juntas dissimilares com espessura de 0,4 mm.

As curvas representativas das juntas Al-CFRP, HSS-CFRP e Al-HSS são apresentadas nas Figura 94,Figura 95 e Figura 96.

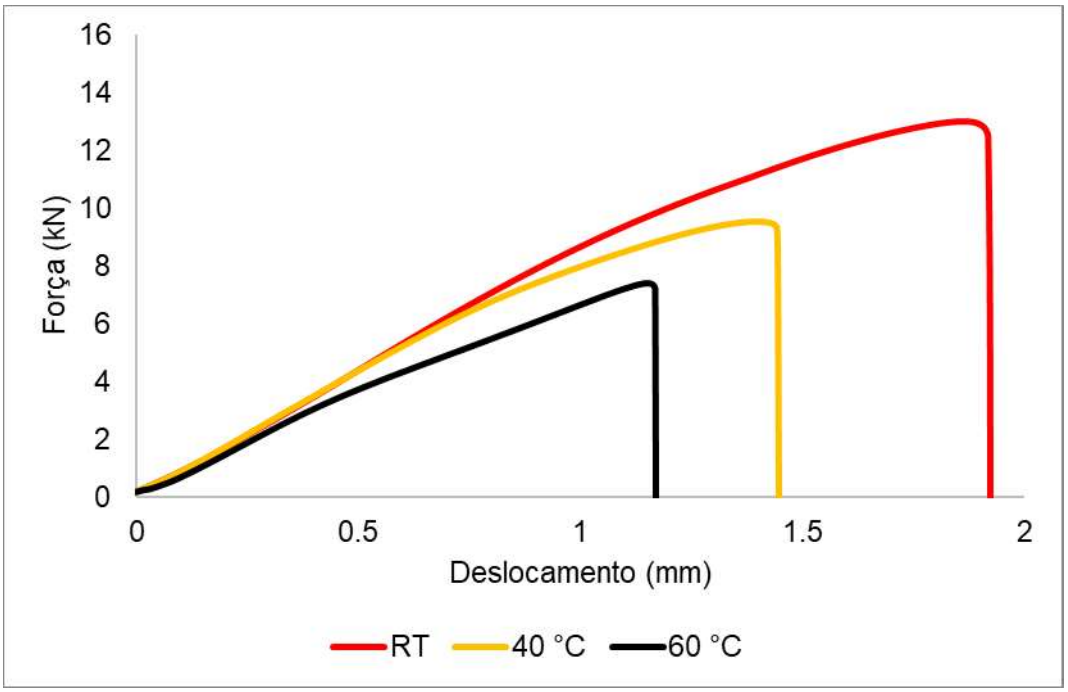


Figura 94 - Curvas representativas das juntas Al-CFRP

As juntas Al-CFRP apresentaram um decréscimo na força de ruptura de 29% à 40 °C e 38% à 60 °C, em relação á temperatura ambiente. Relativo ao deslocamento, verificou-se uma redução de 22% à 40 °C e 32% à 60 °C

As juntas HSS-CFRP tiveram sua resistência mecânica reduzida em função do aumento da temperatura, sendo 27% à 40 °C e 50% à 60 °C. Já o deslocamento, apresentou uma redução de 15% à 40 °C e 16% à 60 °C.

Por último, as juntas Al-HSS mostraram um decréscimo na força máxima de 15% com o aumento da temperatura de 23 °C para 40 °C e 43% de 23 °C para 60 °C. O deslocamento apresentou um decréscimo desprezível (inferior a 1%) com o aumento da temperatura para 40 °C e 10% para 60 °C.

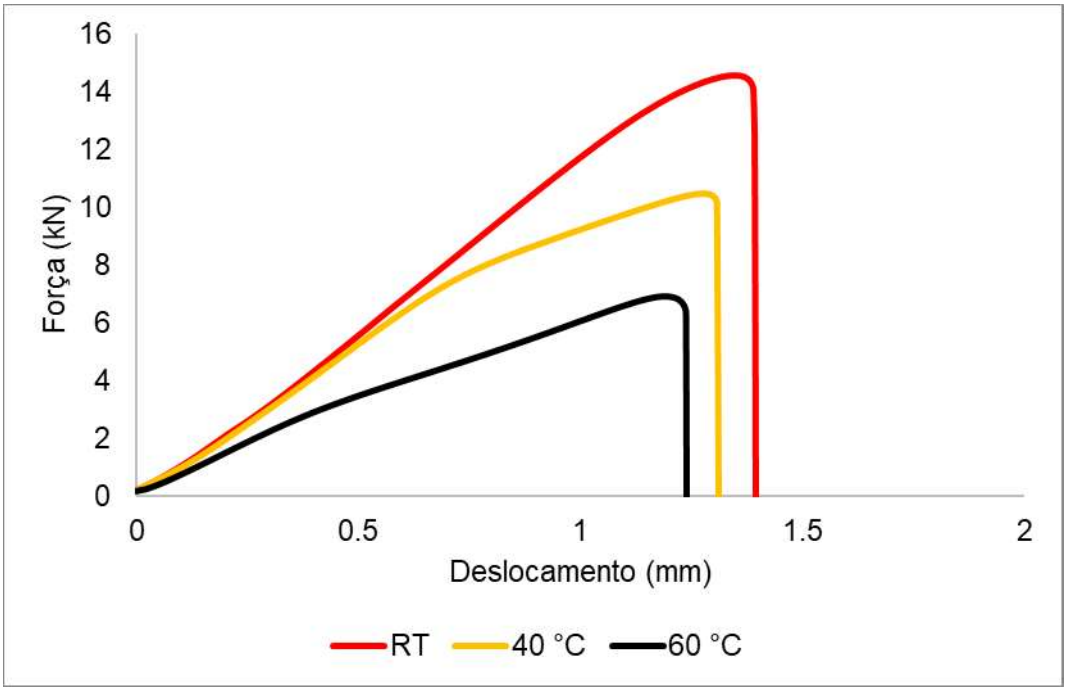


Figura 95 - Curvas representativas das juntas HSS-CFRP

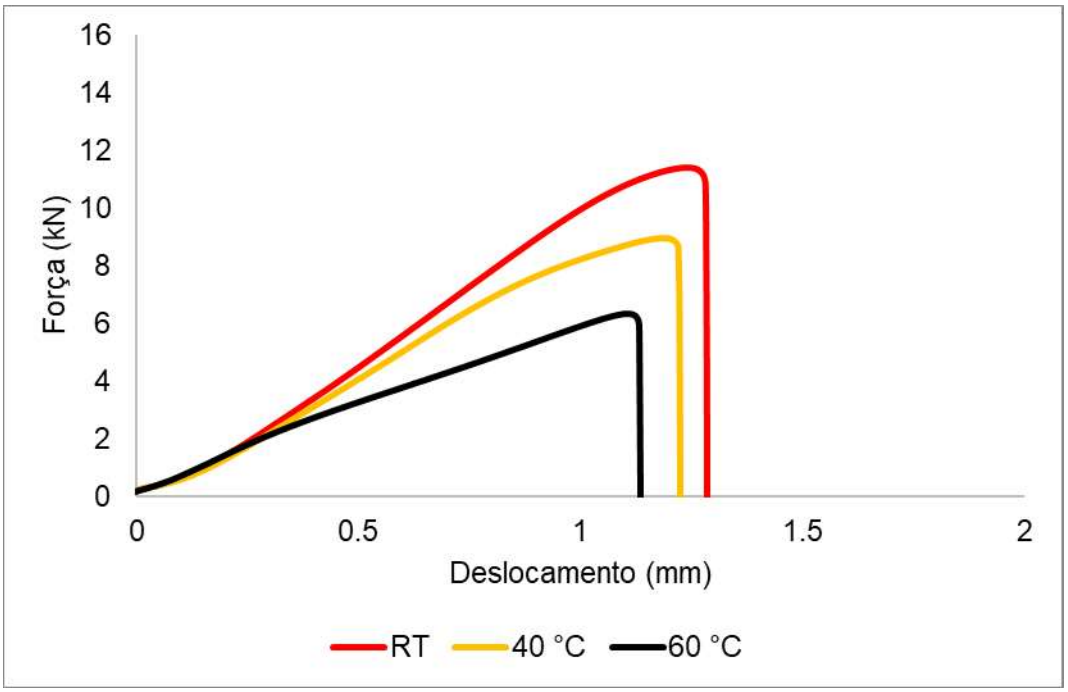


Figura 96 - Curvas representativas as juntas Al-HSS

Efetuando-se a comparação entre os grupos de juntas dissimilares, novamente nota-se o padrão de redução do deslocamento com o aumento da temperatura, bem como a influência da combinação dos módulos e elasticidade dos substratos. Os

deslocamentos relativos a cada junta dissimilar em função da temperatura são apresentados na Figura 97.

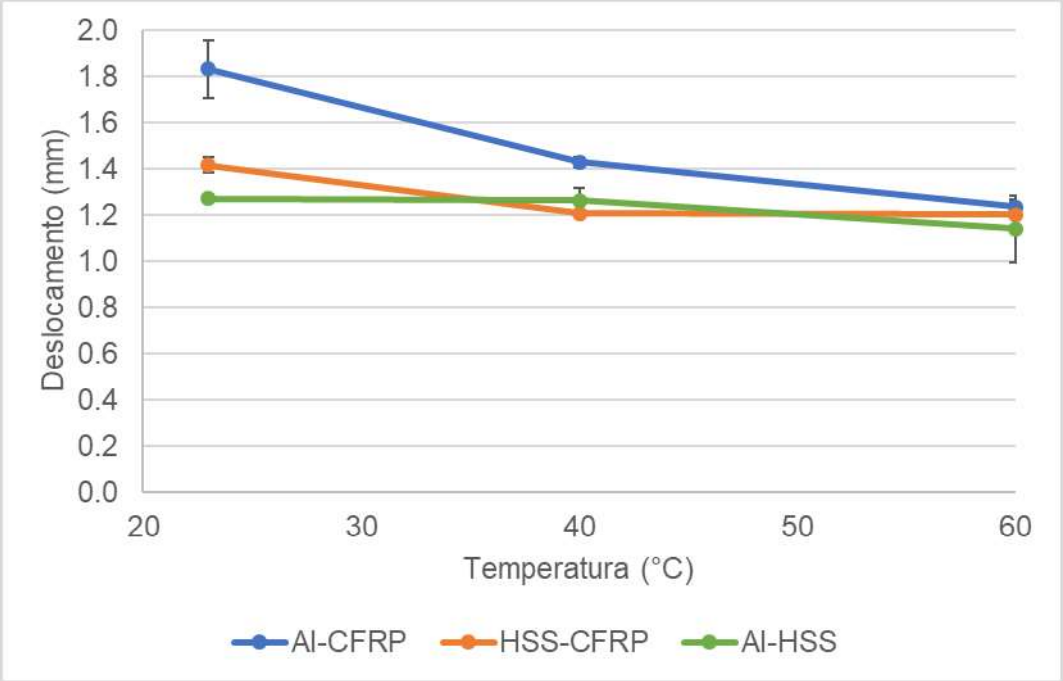


Figura 97 – Deslocamento das juntas dissimilares testadas em função da temperatura

A Figura 98 apresenta os valores de força de ruptura das juntas dissimilares testadas. Diferentemente do obtido com as juntas de 0,4 mm espessura, estas juntas com 0,2 mm mostram tendências mais distintas entre as combinações de aderentes utilizadas. As juntas Al-HSS apresentaram os piores resultados em todas as temperaturas avaliadas, isso deve-se à grande diferença entre o módulo de elasticidade do HSS (210 GPa) e do Alumínio (70 GPa), o que leva a um desbalanceamento e concentração de tensões muito elevado no adesivo. As juntas HSS-CFRP mostraram-se as melhores à temperatura ambiente (RT = 23 °C) e à 40 °C. Isso deve-se ao fato de que estes materiais possuem a menor diferença entre seus coeficientes de expansão térmica dentre os substratos avaliados, juntamente com uma diferença de elasticidade não tão elevada. À 60 °C às juntas Al-CFRP mostraram-se as melhores entre os 3 grupos. Como exposto anteriormente, o procedimento de cura utilizado para a confecção destas juntas foi à temperatura de 60 °C. Sendo assim, nesta temperatura não há tensão térmica residual. Logo, o desbalanceamento entre as concentrações de tensões nas extremidades das juntas neste temperatura devem-se apenas ao módulo

de elasticidade, e nesse caso, a menor diferença de módulo entre os 3 materiais refere-se à combinação d0 Alumínio (70 GPa) com o CFRP (109 GPa).

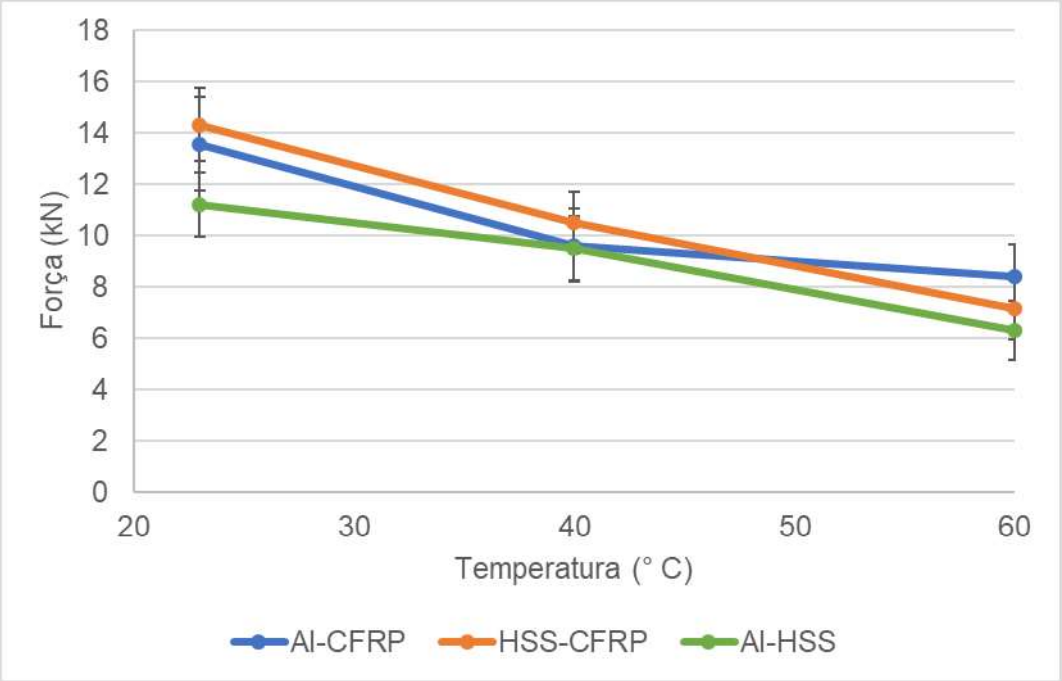


Figura 98 – Força de ruptura das juntas dissimilares em função da temperatura

As superfícies de fratura das juntas dissimilares são apresentadas na Figura 99.

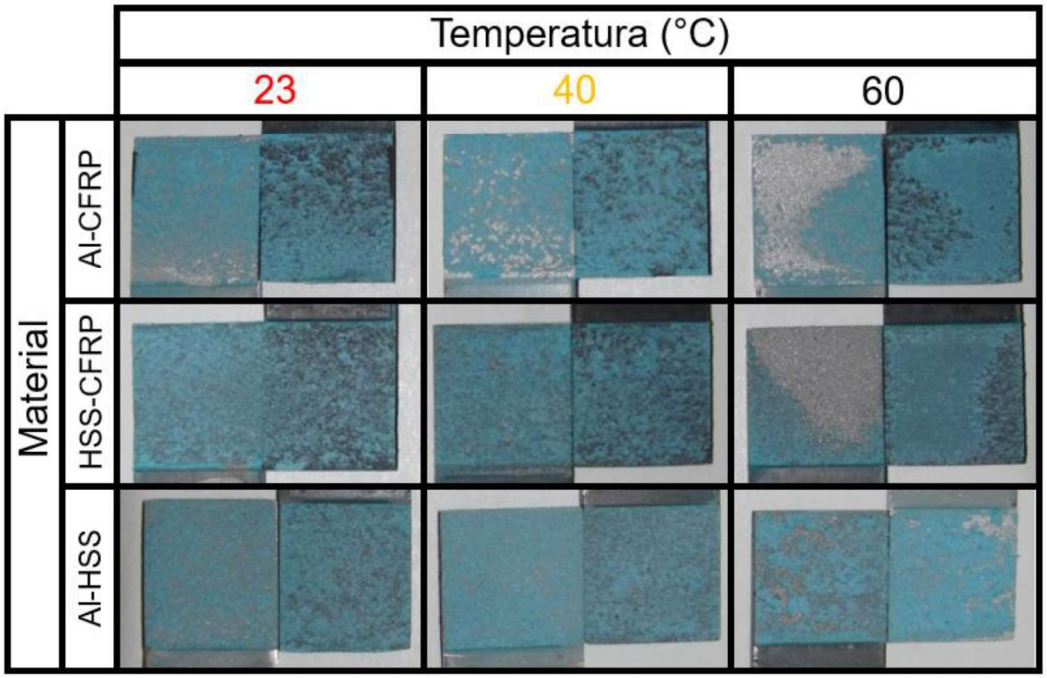


Figura 99 – Superfícies de fratura as juntas dissimilares em função da temperatura

Todas as superfícies de fratura avaliadas mostraram um aumento da ductilidade do adesivo com o aumento da temperatura. Para as juntas Al-CFRP a superfície de fratura foi mista para todas as temperaturas avaliadas. Além disso, é possível observar o fenômeno a concentração de tensão nas extremidades da camada adesiva, através da concentração de adesivo em um dos lados, ainda mais acentuado com o aumento da temperatura e degeneração das propriedades do adesivo. Para as juntas HSS-CFRP as superfícies e fratura foram coesivas em 23 e 40 °C e mista à 60 °C, com uma grande parcela de ruptura adesiva. Para as juntas Al-HSS as fraturas foram coesivas à 23 °C e 40 °C e mistas à 60 °C, sendo ainda possível observar em todas as temperaturas a concentração de tensões nas extremidades da junta.

Os resultados das juntas dissimilares testadas em função da temperatura podem ser visualizados na Figura 100 e na Tabela 17.

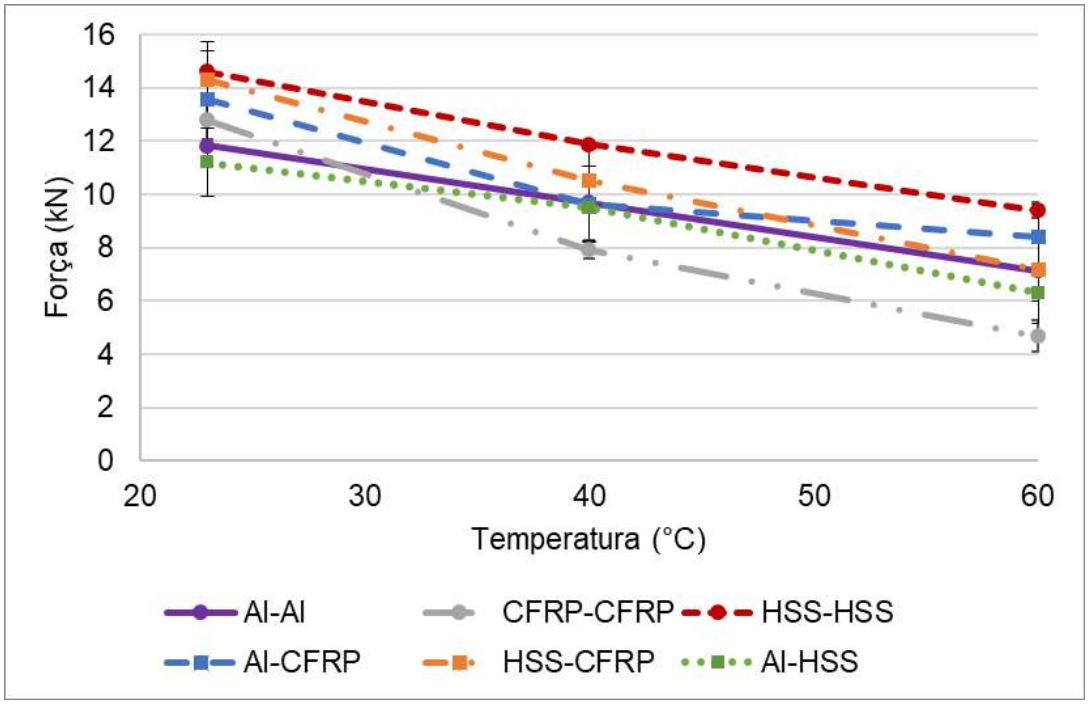


Figura 100 - Comparação da resistência entre as juntas similares e dissimilares testadas em função da temperatura

Tabela 17 - Resultados das juntas dissimilares testadas em função da temperatura

Junta	Al-CFRP		HSS-CFRP		Al-HSS	
Temperatura (°C)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)	Força de Ruptura (kN)	Alongamento (mm)
23	13,57 ± 0,79	1,83 ± 0,13	14,32 ± 0,34	1,42 ± 0,03	11,21 ± 0,28	1,27 ± 0,02
40	9,63 ± 0,10	1,42 ± 0,02	10,51 ± 0,05	1,21 ± 0,14	9,51 ± 0,75	1,26 ± 0,05
60	8,40 ± 1,38	1,24 ± 0,09	7,18 ± 0,38	1,20 ± 0,05	6,30 ± 0,02	1,14 ± 0,01

Dos resultados gerais combinando juntas similares e dissimilares, alguns pontos devem ser ressaltados: As juntas HSS-HSS mostram-se as mais resistentes em todas as temperaturas testadas, isso deve-se ao fato de possuírem o maior módulo de elasticidade dentre os materiais avaliados. As juntas Al-Al e Al-HSS foram as piores à temperatura ambiente. Verificou-se nestas juntas que o alumínio possuía grande deformação plástica em forma de flexão, o que pode ter levado a falha prematura da junta. As juntas CFRP-CFRP mostraram uma grande perda de resistência mecânica com o aumento da temperatura, possivelmente devido à redução das propriedades da resina utilizada no compósito.

De maneira geral, a análise de juntas de sobreposição simples multi-material possuem um alto grau de complexidade, uma vez que diversos parâmetros estão envolvidos na resposta das juntas aos carregamentos aplicados, a seguir: Mudança das propriedades mecânicas do adesivo com a mudança da temperatura, mudança das forças de adesão com a mudança da temperatura, alteração nas propriedades dos substratos com a variação da temperatura, diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos substratos e dos adesivos e tensão residual térmica associada, diferença na elasticidade dos substratos. A combinação de todos estes fatores resulta nos distintos comportamentos das juntas multi-material.

Capítulo 5

Análise Numérica

Utilizou-se o software de elementos finitos ABAQUS 6.14 (Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, EUA) para prever as cargas de falha para as 12 condições SLJs testadas, em função da variação da espessura do adesivo, comprimento de sobreposição e temperatura, através uma análise numérica geométrica não linear. A malha utilizada no modelo foi refinada nas bordas da interface do substrato com o adesivo, devido ao fenômeno de concentração de tensões que ocorre nesta região, como mostrado na Figura 101 [20, 51].

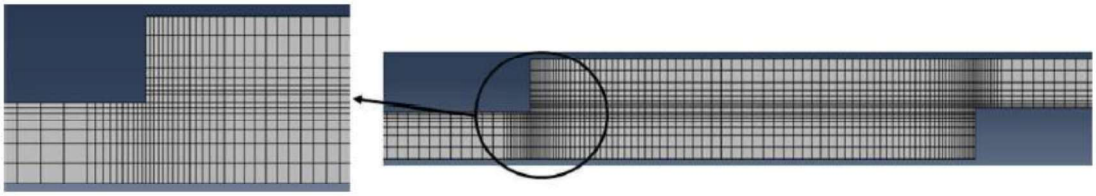


Figura 101 - Malha utilizada nos modelos

Foram utilizados modelos 2D, com elementos sólidos de deformação plana para os substratos de aço de alta resistência (referenciados como CPE4 na biblioteca do ABAQUS®) e com elementos coesivos para a camada adesiva (referenciados como COH2D4 na biblioteca do ABAQUS®). Uma lei triangular de separação em tração foi utilizada para modelar o amaciamento do adesivo e a degradação das propriedades após a força máxima [52]. Esta lei de separação de tração considera uma combinação de tensão dos modos I e II, levando a uma avaliação de modo misto e da evolução do dano após os limites o material até sua consequente ruptura. Figura 102 apresenta a relação tração-deslocamento na forma triangular utilizada, através da determinação do critério de falha como a Tensão Máximo em Modo Misto (Combinação das Tensões de Tração e Cisalhamento puras), e a área do triângulo refere-se à resistência à fratura em estado estacionário [8].

As propriedades utilizadas na modelagem da zona coesiva (CZM) são mostradas na Tabela 18. O módulo de cisalhamento foi estimado a partir da relação entre o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, como mostrado na Equação 7. O valor de ν normalmente varia entre 0,3 e 0,5, e um valor de 0,33 foi usado para todas as temperaturas.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{7}$$

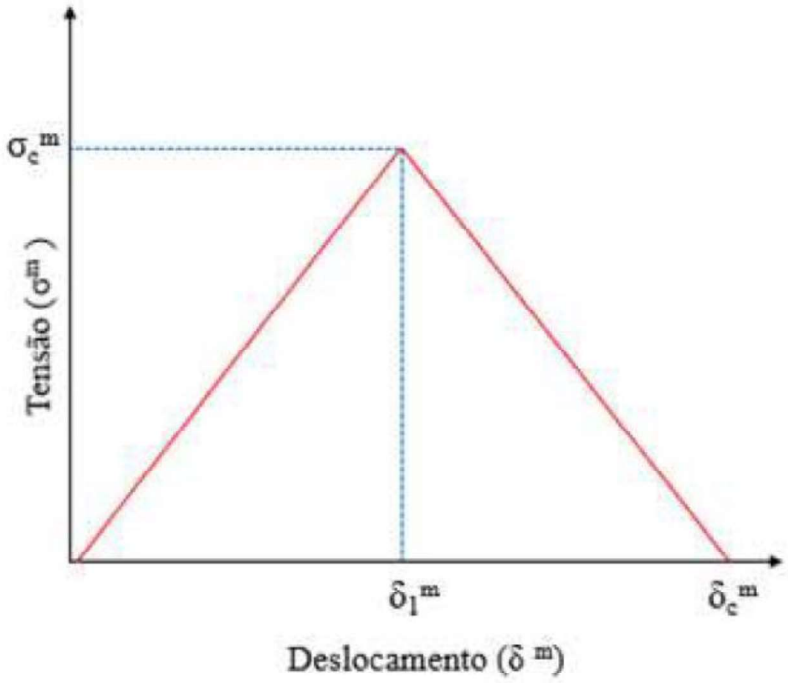


Figura 102 - Lei de tração-separação para o CZM [8]

Para previsão da resistência ao cisalhamento a partir da resistência à tração, foi utilizado o método de Dolev e Ishai, apresentado na Equação 8 [53]. Este critério foi escolhido a despeito do tipicamente utilizado critério de von Mises, pois o segundo não é estritamente válido para polímeros, sendo mais aplicável á materiais frágeis, tendo em vista que o adesivo estudado tem um comportamento dúctil, mesmo à temperatura ambiente e que aumenta com o aumento da temperatura, esse critério torna-se mais adequado.

$$\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \frac{2\lambda}{(\lambda+1)} \tag{8}$$

A variável λ é a razão entre a tensão limite de escoamento em compressão com a tensão limite de escoamento em tração, e normalmente varia entre 1,2 e 1,4. Um valor de 1,3 foi escolhido para todas as temperaturas simuladas

Todas as outras propriedades utilizadas na análise por elementos foram obtidas a partir dos resultados dos testes realizados para a caracterização do adesivo.

Tabela 18 - Propriedades utilizadas nos modelos numéricos em diferentes temperaturas

Propriedade	RT	40 °C	60 °C
E	1591,94	699,64	247,51
G	598,49	263,16	92,98
T_n	34,27	22,48	13,27
T_s	22,37	14,67	8,66
G_{Ic}	1,41	1,84	1,43
G_{IIc}	10,46	13,65	10,61

5.1 Resultados numéricos

A comparação entre forças experimentais e numéricas obtidas para a análise do efeito da espessura do adesivo em função da temperatura são mostradas nas Figura 103Figura 104. Os resultados mostram uma relação entre as forças de ruptura encontradas numericamente com as obtidas experimentalmente de -7% a 23 °C, -24 % a 40 °C e -43% a 60 °C para a espessura do adesivo de 0,2 mm.

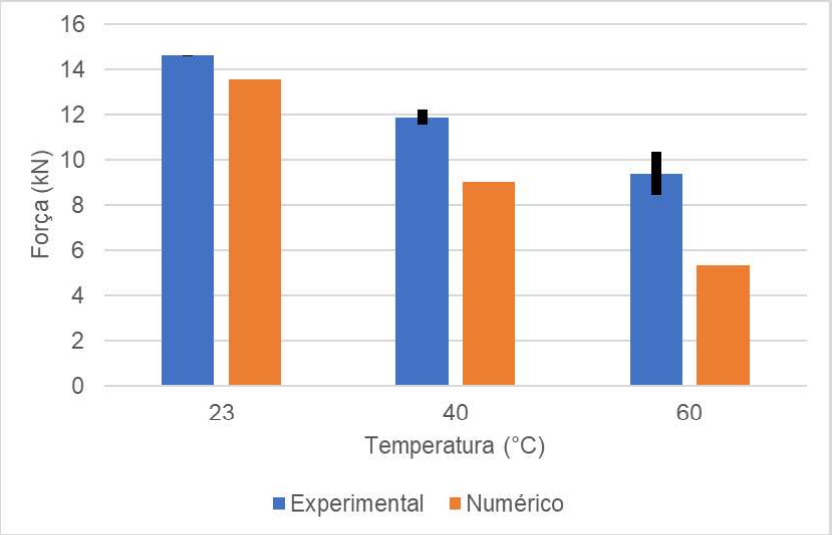


Figura 103 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o comprimento de sobreposição de 25 mm com espessura do adesivo de 0,2 mm

Para a espessura do adesivo de 1,0 mm, os resultados foram + 12% à temperatura ambiente, -9% a 40 °C e -33% a 60 °C. Pode-se observar que a força de ruptura obtida numericamente tem uma redução maior com o aumento da temperatura em do que as obtidas numericamente. Isso ocorre devido à grande plasticidade resultante dos aumentos de temperatura, que não podem ser precisamente modelados por leis triangulares. Além disso, a tenacidade à fratura aumenta com o aumento da espessura

do adesivo [29, 46], o que não foi avaliado previamente na caracterização. Ainda, o CZM considera a camada adesiva como uma única linha coesiva, não levando em conta o início do dano mais próximo do canto de interface adesivo/substrato, como visto nos resultados experimentais.

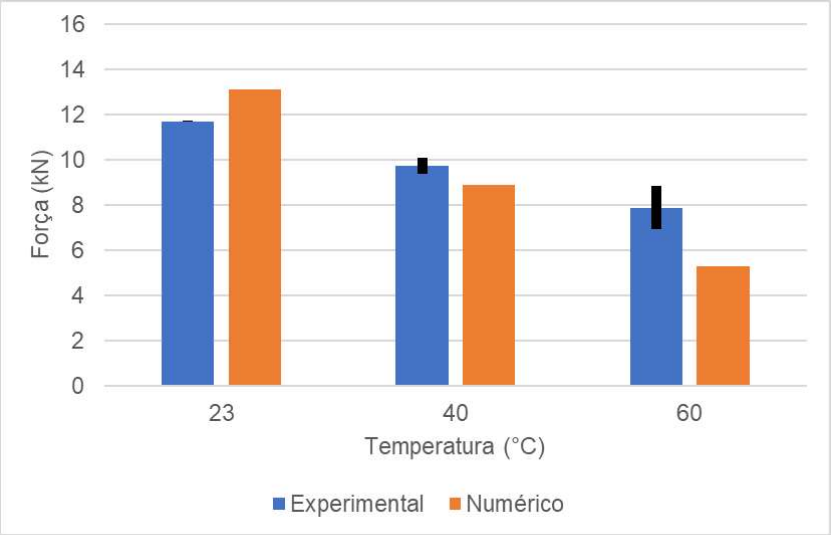


Figura 104 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o comprimento de sobreposição de 25 mm com espessura do adesivo de 1 mm

A comparação entre as forças de ruptura obtidas por métodos experimentais e numéricos na comparação do comprimento de sobreposição em função da temperatura são mostradas nas Figura 105 eFigura 106. Para as juntas com 12,5 mm de comprimento de sobreposição, a relação entre as forças de ruptura obtidas por métodos numéricos e experimentais foi de -10% à temperatura ambiente, -34% a 40 °C e -38% a 60 °C.

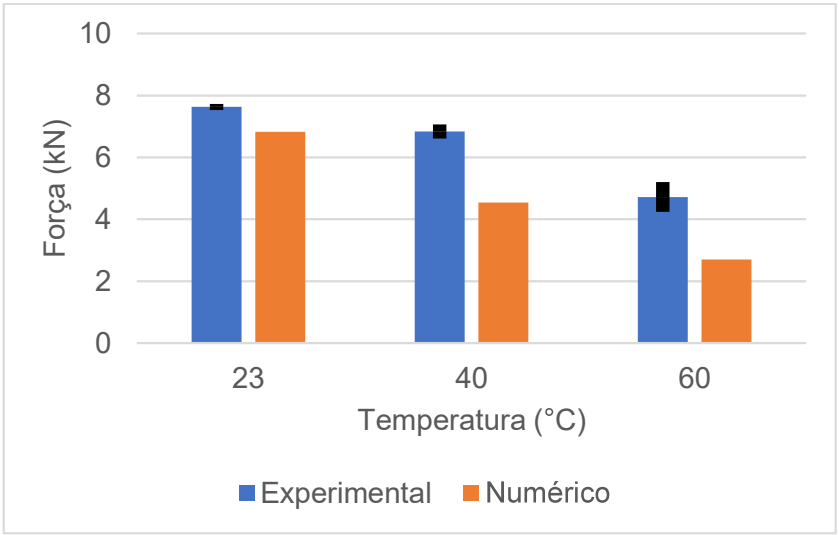


Figura 105 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o comprimento de sobreposição de 12,5 mm com espessura do adesivo de 0,2 mm

Os resultados para o comprimento de sobreposição de 25 mm são os mesmos relatados para a espessura do adesivo de 0,2 mm. Para as juntas com comprimento de sobreposição de 50 mm, os resultados foram de -6% à temperatura ambiente, -24% a 40 °C e -30% a 60 °C.

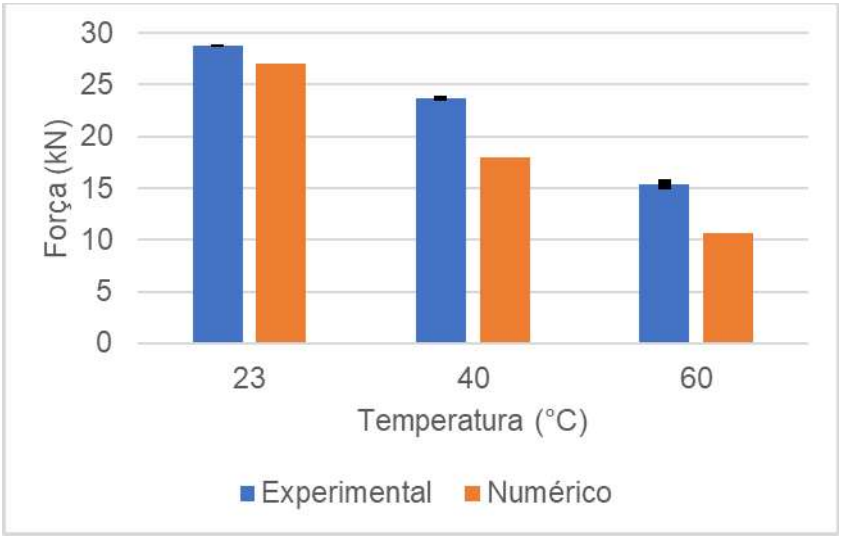


Figura 106 - Comparação entre os resultados numéricos e experimentais para o comprimento de sobreposição de 50 mm com espessura do adesivo de 0,2 mm

Em vista dos resultados obtidos, conclui-se que as leis triangulares utilizadas não foram satisfatórias em prever as forças de ruptura. Os modelos numéricos mostram resultados mais próximos na temperatura ambiente, mas com o aumento da ductilidade, não foram capazes de modelar adequadamente a ruptura das juntas. Apesar disso, os resultados numéricos mostram a mesma tendência encontrada nos resultados experimentais, de diminuição na força de ruptura com o aumento da temperatura, da espessura do adesivo e do comprimento de sobreposição. Todavia, para a modelagem das juntas multi-material seria necessário possuir a tenacidade a fratura para 0,4 e 1 mm, modelar o dano coesivo através de leis trapezoidais matriciais ajustadas para cada um dos casos experimentais e utilizar modelos que levem em consideração a plastificação dos adesivos e substratos. Por isso, não foi dado continuidade a modelagem numéricas para estes casos, ficando como sugestão para trabalhos futuros.

Capítulo 6

Conclusões

Neste trabalho, um adesivo epoxy de duas partes foi testado para obter-se suas propriedades térmicas e mecânicas. O ensaio de *Dynamic Mechanical Analysis (DMA)* foi utilizado para determinação da temperatura de transição vítrea. Ensaios de tração em corpos de prova de adesivo maciço em função da temperatura, ensaios de tenacidade fratura (DCB em função da temperatura e ENF) e desempenho de juntas de sobreposição simples, em função da espessura do adesivo, comprimento de sobreposição, temperatura, a fim de caracterizar totalmente o adesivo foram realizados. Posteriormente, juntas similares e dissimilares foram testadas de forma verificar-se o comportamento da mesmas sob influência de diferentes temperaturas. As seguintes conclusões podem ser obtidas:

1. .O teste de DMA mostra uma temperatura de transição vítrea maior com um procedimento de cura de 2 horas a 60 °C em comparação à 7 dias à temperatura ambiente (105,6 contra 90,2 °C);
2. Os testes de tração mostraram que este adesivo tem boa resistência mecânica (34 MPa) associada à uma boa ductilidade (8% de tensão) e rigidez (E = 1592 MPa) à temperatura ambiente;
3. Os ensaios de tração nos corpos de prova de adesivo maciço mostram redução da resistência à tração e aumento da ductilidade com o aumento da temperatura;
4. Os testes de DCB para tenacidade à fratura em Modo I mostram um aumento da tenacidade com o aumento da temperatura de 23 °C para 40 °C, seguido por uma diminuição a 60 °C;
5. Os ensaios ENF para determinação da tenacidade a fratura em Modo II apresentaram valores 7,42 vezes maior que em Modo I;
6. O aumento da temperatura mostra uma diminuição na resistência ao cisalhamento para os 21 casos de juntas de sobreposição avaliados, e mostra também o aumento na ocorrência de regiões de falha adesiva ou mista na fratura superficial das juntas;
7. O aumento na espessura do adesivo de 0,2 para 1 mm leva a uma diminuição na resistência ao cisalhamento e também afeta o modo de falha, alterando de no meio da camada adesiva para próximo da interface;

8. O aumento do comprimento de sobreposição diminui a resistência ao cisalhamento e também afeta a fratura da superfície com mais áreas plasticamente deformadas, levando à falha mista ou adesiva;
9. Os resultados apresentados mostram que quanto maior as tensões sobre a superfície das juntas, seja com diminuição da espessura do adesivo, ou aumento do comprimento de sobreposição, mais sensíveis à temperatura as mesmas se tornam;
10. As juntas multi-material dissimilares com comprimento de sobreposição de 25 mm e espessura de 0,4 mm apresentaram forças de ruptura muito próximas, devido à predominância do mecanismo de escoamento global do adesivo, o que possibilita para esta geometria a utilização de um critério global de falha por parte da indústria, não importando o material utilizado;
11. As juntas multi-material similares com espessura de 0,2 mm apresentaram maior resistência mecânica para os substratos com os maiores módulos de elasticidade;
12. As juntas multi-material dissimilares com 0,2 mm de espessura apresentaram tendências bem definidas para as forças de ruptura em função da combinação de substratos e temperatura;
13. Os modelos triangulares utilizados não foram satisfatórios para estimar os resultados experimentais adequadamente.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

1. Utilizar outros substratos como titânio, aço inoxidável, polímeros reforçados com fibras naturais, entre outros;
2. Utilizar temperaturas inferiores à temperatura ambiente, bem como temperaturas negativas;
3. Testar outras geometrias para as juntas multi-material e avaliar o comportamento obtido;
4. Realizar outros ensaios como fadiga, fluência e envelhecimento, de forma a ter uma avaliação completa do comportamento das juntas multi-material;
5. Elaborar modelos numéricos de dano coesivo com maior grau de complexidade, de forma a ser capaz de prever adequadamente diferentes combinações e substratos, espessuras, comprimentos de sobreposição e temperaturas de forma satisfatória.

Bibliografia

1. M.Q. dos Reis, *Influência da prepração de superfície em juntas coladas de sobreposição simples*. Rio de Janeiro: Dissertação de Graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), 2017.
2. M.D. Banea e L.F.M. da Silva, *Effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry*. Vol. 224. 2010. 51-62..
3. M.D. Banea, et al., *Multi-material adhesive joints for automotive industry.* Composites Part B: Engineering, 2018. **151**: p. 71-77.
4. Newsroom, L.-U. [cited 2019 Fevereiro]; Available from: http://pressroom.lexus.com.
5. A.J. Kinloch, *Adhesion and adhesives: Science and technology*. 1987, London: Chapman and Hall.
6. DIN EN 923:2008-06 (E), *Adhesives - Terms and definitions (includes Amendment A1:2008)*. 2008.
7. ASTM D907-06, *Standard Terminology of Adhesives*. 2006.
8. J.C.G.C. Bonaldo, *Juntas coladas modificadas com partículas térmicamente expansíveis*, Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ). 2017.
9. L. F. M. da Silva, A.G. Magalhães e M.F.S.F. Moura, Juntas adesivas estruturais, Porto: Publindústria, Edições Técnicas 2007.
10. Morais, J.F.A., *Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)*, Porto. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), 2013.
11. A. Beckwith, B. Strong and W. Scott,, *Joining Composite Materials - Mechanical or Adhesive?* Plastics: Materials and Processing, 1996.
12. J.P.R. Monteiro, *Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2015, ISEP.
13. J.C. Charbonier, Influence des Traitments de surface sur le collage des aciers. 1996.
14. A. Ghumatkar, S.B., R. Sekhar, M. D. Banea e S. de Barros, *Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength.* Latin American Journal of Solids and Structures, 2016. **13**.

15. M. dos Reis, et al., *Effect of adherend surface preparation on the mechanical properties of aluminium bonded joints.* Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, 2017. **28**: p. 6.
16. J.J Bikermann, *The science of adhesive joints.* Academic, London, 1961.
17. R. Nashett, *Structural Bonding Alternatives for Plastics,*. 2014: Henkel Corporation.
18. J. Morris, *The Effect of Flaws on the Strength of Adhesive Joints*. 2009, University of Edinburgh: Edinburgh.
19. K.A. Fucuhara, *Aplicação De Adesivos Estruturais Em Painéis De Carros*. 2014, UNESP.
20. M.D. Banea, L.F.M. da Silva e R.D.S.G. Campilho, *Effect of temperature on the shear strength of aluminium single lap bonded joints for high temperature applications.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2014. **28**(14-15): p. 1367-1381.
21. M.D. Banea, L.F.M. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of temperature on tensile strength and mode I fracture toughness of a high temperature epoxy adhesive.* J Adhes Sci Technol, 2012. **26**.
22. S.G. Kang, M.G. Kim, e C.G. Kim, *Evaluation of cryogenic performance of adhesives using composite–aluminum double-lap joints.* Composite Structures, 2007. **78**(3): p. 440-446.
23. M.D. Banea e L.F.M. da Silva, *Mechanical Characterization of Flexible Adhesives.* The Journal of Adhesion, 2009. **85**(4-5): p. 261-285.
24. L.F.M. da Silva e R.D. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
25. M.Q. dos Reis, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva e M.D. Banea, *Effect of Temperature on the Behaviour of Multi-Material Adhesive Joints for Automotive Industry*, in *2nd International Conference on Materials Design and Applications*. 2018.
26. M.Q. dos Reis, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva e M.D. Banea, *Effect of Temperature on the Behaviour of Multi-Material Adhesive Joints for Automotive Industry*, in *12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian Conference of Adhesion and Adhesives*. 2018.
27. J. DeCicco,, *Steel and Iron Technologies for Automotive Lightweighting*. 2005.

28. M. Roșioară, *Multi-material adhesive joints for automotive industry*. 2015, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP),: Porto.
29. M.D. Banea, L.F.M. da Silva e R.D.S.G. Campilho, *The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive.* The Journal of Adhesion, 2015. **91**(5): p. 331-346.
30. G.S. Cole e A.M. Sherman, *Light weight materials for automotive applications.* Materials Characterization, 1995. **35**(1): p. 3-9.
31. R.D.S.G. Campilho, et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling.* Int J Adhes Adhes, 2011. **31**.
32. M.F.S.F. Moura, R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints.* Int J Solids Struct, 2009. **46**.
33. D.F.S. Saldanha, et al., *Mechanical characterization of a high elongation and high toughness epoxy adhesive.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **47**: p. 91-98.
34. ISO 6721-11, *Plastics — Determination of dynamic mechanical properties — Part 11: Glass transition temperature*, 2012.
35. Y.A. Zhang, R.D. Adams, L.F.M. da Silva e A. Rapid, *Method of measuring the glass transition temperature using a novel dynamic mechanical analysis method.* Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **89**: p. 785–806.
36. A.J. Kinloch, et al., *Polymers*. Vol. 24. 1983.
37. L.F.M da Silva, A. Öschner and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011.
38. N.T. 76-142:1988, *Méthode de préparation de plaques d'adhésifs structuraux pour la réalisation d'éprouvettes d'éssai de caractérisation. La Plaine Saint-Denis. France.*
39. B.S. 2782:2011, *Methods of testing plastic*.
40. D.G. dos Santos, et al., *Reinforcement of CFRP joints with fibre metal laminates and additional adhesive layers.* Composites Part B: Engineering, 2019. **165**: p. 386-396.
41. M.F.S.F. Moura, R.D.S.G. Campilho e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading.* Compos Sci Technol, 2008. **68**.

42. M.F.S.F. Moura, et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints.* Int J Adhes Adhes, 2008. **28**.
43. ISO 15024:2011, *Fibre-reinforced plastic composites—determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIC, for unidirectionally reinforced materials*.
44. J.P.R. Monteiro, et al., *Experimental estimation of the mechanical and fracture properties of a new epoxy adhesive.* 2015.
45. M.D. Banea, L.F.M da Silva e R.D.S.G. Campilho,,*Mode II Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints as a Function of Temperature: Experimental and Numerical Study* The Journal of Adhesion, 2012. **88**(4-6): p. 534-551.
46. L.F.M da Silva, F.A.C.R.G. de Magalhães, F.J.P. Chaves e M.F.S.F. de Moura, *Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness* The Journal of Adhesion, 2010. **86**(9): p. 891-905.
47. D.M Gleich, M.J.L. Van Tooren e A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures,* Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
48. R.D. Adams e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints.* Journal of Strain Analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
49. D. Castagnetti, A. Spaggiari e E. Dragoni, *Effect of Bondline Thickness on the Static Strength of Structural Adhesives Under Nearly-Homogeneous Shear Stresses*. Vol. 87. 2011. 780-803.
50. R.D. Adams, et al., *The effect of temperature on the strength of adhesive joints.* International Journal of Adhesion and Adhesives, 1992. **12**(3): p. 185-190.
51. J. Bonaldo, et al., *Functionally graded adhesive joints by using thermally expandable particles.* The Journal of Adhesion, 2018: p. 1-20.
52. T.A.B Fernandes, R.D.S.G. Campilho, M.D. Banea e L.F.M. da Silva, *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction,* The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
53. G. Dolev, O. Ishai, *Mechanical Characterization of Adhesive Layer in-situ and as Bulk Material,* The Journal of Adhesion, 1981. **12**(4): p. 283-294.

Anexos

Dow Automotive

Technical Datasheet

BETAMATE™ 2096

Crash resistant 2-Component Structural Adhesive

Description / Application:

BETAMATE™ 2096 is a two component, epoxy based adhesive especially developed for the body shop and the repair of vehicles. The adhesive is used in the car to increase the operation durability, the crash performance and the body stiffness.

Properties:

- Excellent adhesion to automotive steels, including coated steels (e.g. e-coated or organic coated steel) and pretreated aluminum
- Helps to increase or restore the stiffness and the crash stability of the entire car body
- High durability of the adhesive and the adhesive bond
- Due to its sealing capability the metal and weld points are protected against corrosion
- Compatible with other mechanical and thermal joining techniques

Application:

The product is cold pumpable and applicable as a bead (mixing ratio 2:1; static or dynamic). It can be applied with the following parameters:

application speed	Up to 300 mm/s
temperatures: follower plate follower plate - doser nozzle	**recommended:** cold cold cold

For an optimum tack of the adhesive, the parts to bond should be stored at 15°C or higher. In case of an application break longer than 1 hour the mixer should changed.

All Dow Automotive products are primarily developed in co-operation with the automobile manufacturers, according to their needs and their specifications; they are approved for the specific applications as defined by the customer.

The use of the product other than approved application have to be released in written form by the Technical Service of Dow Automotive.

Technical Data:

Basis	component A: epoxy resin / component B: polymeric amines
Colour	A: blue / B: white
Density (23°C)	1.12 g/ml
Mixing Ratio	A:B = 2:1
Viscosity/Yield Point (23°C, Bohlin, Casson)	component A: 140 Pas / 2Pa component B: 2 Pas / 270 Pa
Time to Handle	approx. 1 hour
Curing Condition	ambient temperature: after 2 days 90% of end toughness temperatures up to 180 °C feasible
Standard Curing	60°C / 2 hours, 2 or 7 days at room temperature (Drive away strength after approx. 10 hours)
Tensile Strength (DIN EN ISO 527-1)	29 MPa
Elongation at Break (DIN EN ISO 527-1)	approx. 9 %
E-Modulus (DIN EN ISO 527-1	1700 MPa
Lap Shear Strength (DIN EN 1465) (CRS 14O3, 1.5 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x10 mm)	
2d RT	18 MPa
2h 60°C	20 Mpa
30 min 180°C	18 MPa
(AA6016, pretreated, 1.3 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x10 mm)	
2d RT	18 MPa
2h 60°C	20 MPa
30 min 180°C	21 Mpa
T-Peel Strength (DIN EN ISO 11339) (H340 LAD + Z Daimler 0.8 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x100 mm	6 N/mm
Impact Peel Strength (ISO 11343) (CRS 14O3, 1.0mm, 23°C, 2m/s) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 20x30 mm)	
2d RT	11 N/mm
2h 60°C	13 N/mm
12 Min 120°C + 30 Min 180°C	13 N/mm
Bonding Surface Preparation	Oily surfaces should be cleaned

Application Tool	**Cartridges:** **side by side cartridge**: hand-operated gun with mechanical piston: Mixpac DM 200-01. **Single cartridge** (components one after another): Application with a standard 1-component hand-operated or pneumatic gun with piston bar (**no direct air guns !**). 1-component battery guns may be used, if they are equipped with adjustable feed. **Drums, pails:** With standard 2K-based systems
Application notes	▪ for the Aftermarket (curing temp <=60°C) it is recommended to clean the surface with Betaclean™ 3350 before the application. On oily surfaces lower mechanical properties might be achieved. ▪ If BM 2096™ is applied out of cartridges it is necessary to equalize the filling levels. ▪ for the best performance it is recommended to reject the first few grams of mixed adhesive. ▪ During the storage time a crystallization of the resin may occur. By heating the adhesive to 40 - 50 °C for about 15 to 30 minutes this physical process is reversible. All properties stay on the same level. ▪ Before the application the material temperature of both the resin and the hardener should be at min. 15°C.
eaning	Uncured material can be removed with BETACLEAN 3510. **Attention:** The contact with bonded areas should be avoided.
Containers	Drums: 200kg A-Component / 96.6kg B-Component Pails: 20 kg pails (diameter 280mm) with PE-liner Cartridges: - side by side 0,24 kg (215ml /A+B) -universal single cartridge 0,22 kg (195 ml) / A+B) usable volume: 180ml - side by side 56g (50ml /A+B)
Shelf life	Storable at temperatures between 10 and 30°C for twelve months.

The given data are standard values.

Health and Safety:

- **Bulk Exothermic Reaction**
  The material curing reaction is exothermic. If the material is held in bulk the reaction is accompanied by a rapid build-up of exothermic heat. To avoid the risk of this bulk exothermy, containers of the material should in no circumstances be heated by e.g. hot plates or simple drum heaters. If heating a bulk quantity of the material is considered necessary, advice should be sought.

- **Caution**
  The adhesive resins are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should also be taken to prevent the uncured materials, from coming into contact with skin, since people with particularly sensitive skins may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleaned at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. For further and more detailed precaution measures see the Health and Safety Data Sheet.

Notice:

Quality is our utmost goal. Dow Automotive works according to a modern quality management system conforming to international standard ISO/TS 16949.
All sites of Dow Automotive are certified according to ISO 14001.

All statements, technical information and recommendations contained in this document are based on tests that we deem reliable. However, the customer is responsible to determine the suitability of the product for customer's intended purpose. No freedom from any patent owned by Dow or others is to be interfered.

NO WARRANTIES ARE GIVEN. ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

Dow Automotive Systems Main Offices

The Dow Chemical Company **Customer Information Group Europe** Phone +800 3 6946367 Phone +32 3 450 2240 Italia 800 783 825 Fax +32 3 450 2815	**Dow Automotive Systems World Head Quarter** 1250 Harmon Road Auburn Hills, MI 48326 USA Tel. +1 248 391 63 00 Fax +1 248 391 64 17	**Dow Automotive Systems** Dow Deutschland Anlagengesellschaft GmbH Am Kronberger Hang 4 65824 Schwalbach Germany Tel: +49 6196 566 0 Fax: +49 6196 566 444	**Dow Automotive Systems** Dow Europe GmbH Bachtobelstrasse 3 8810 Horgen Switzerland Tel. +41 44 728 2111 Fax. +41 44 728 2935
Dow Automotive Systems St. George's Way Bermuda Industrial Estate Nuneaton CV10 7QT United Kingdom Tel: + 44 24 7635 7200 Fax: + 44 24 7635 7257	**Dow Automotive Systems** Dow Chemical Ibérica, S.L. Ribera del Loira, 4-6 - Planta 4ª (Edificio IRIS) 28042 Madrid Spain Tel. + 34 91 740 7800 Fax. + 34 91 740 7785	**Dow Automotive Systems** Dow France S.A.S. 23 avenue Jules Rimet 93631 La Plaine St Denis Cedex France Tel: +33 1 49 21 78 78 Fax: +33 1 49 21 79 79	**Dow Automotive Systems** Dow Italia Divisione Commerciale s.r.l. Via F. Albani, 65 20148 Milano Italy Tel: +39 02 482 21 Fax: +39 02 482 241 08