CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

JUNTAS COLADAS MODIFICADAS COM PARTÍCULAS TERMICAMENTE EXPANSÍVEIS

Júlia Cristina Guimarães de Carvalho Bonaldo

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

Orientadora: Doina Mariana Banea
Co orientador: Lucas Filipe Martins da Silva

Rio de Janeiro
Novembro/2017

JUNTAS COLADAS MODIFICADAS COM PARTÍCULAS TERMICAMENTE EXPANSÍVEIS

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

Júlia Cristina Guimarães de Carvalho Bonaldo

Banca Examinadora:

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

Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar (CEFET/RJ)

Professor Dr. João Marciano Laredo dos Reis (UFF)

Rio de Janeiro

Novembro/2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B697 Bonaldo, Júlia Cristina Guimarães de Carvalho
Juntas coladas modificadas com partículas termicamente expansíveis / Júlia Cristina Guimarães de Carvalho Bonaldo.— 2017.
101f. + anexos : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 97-101
Orientadora : Doina Mariana Banea
Coorientador : Lucas Filipe Martins da Silva

1. Juntas (Engenharia). 2. Adesivos. 3. Flexão (Engenharia civil). 4. Engenharia mecânica. I. Banea, Doina Mariana (Orient.). II. Silva, Lucas Filipe Martins da (Coorient.). III. Título.

CDD 621.825

Ao meu pai, André Bonaldo (in memoriam),
meu eterno cientista.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos que contribuiram de alguma forma para a realização deste trabalho, em especial:

- Ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, pelo apoio financeiro durante o mestrado.
- A minha orientadora, profª Doina Mariana Banea, pelos ensinamentos, pela disponibilidade fornecida, pela confiança e pela ótima orientação desde o início.
- Ao meu co orientador, prof. Lucas Filipe Martins da Silva.
- Ao Ricardo Carbas por todo suporte necessário durante a fase experimental.
- Ao Eduardo Marques e Guilherme Viana, do grupo de adesivos da Universidade do Porto (ADFEUP), pela ajuda nas simulações numéricas.
- A todos os colegas do ADFEUP.
- Ao Laboratório de Adesivos, da Universidade do Porto, que possibilitou a realização de toda parte experimental.
- A todos os professores que fizeram parte da minha trajetória e me fizeram crescer como profissional, um agradecimento especial ao prof. Hector Meneses Costa.
- Ao Pedro Affonso, pela ajuda na preparação dos corpos de prova.
- Aos amigos, Rosemere Alves e Daniel Kawasaki, pela ajuda no decorrer do mestrado e pela amizade.
- Ao Thomas Frosio, pelo companheirismo e incentivo.
- À minha família, por estar sempre torcendo pelas minhas conquistas.
- Ao meu irmão, Gustavo Bonaldo, por sempre estar disposto a escutar e me tranquilizar nos momentos mais difíceis.
- Finalmente, à minha mãe, Marcia Bonaldo, por todo suporte, carinho e dedicação, e por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida.

"Ensinaram-me que o caminho do progresso
não é rápido nem fácil."
(Marie Curie)

RESUMO

Juntas coladas modificadas com partículas termicamente expansíveis

Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs) são usadas pela indústria em uma grande variedade de aplicações, principalmente para redução de peso e melhoria da aparência de termoplásticos, tintas e revestimentos. Na colagem, as PTEs foram utilizadas para fins de reciclagem. Além disso, elas podem ser utilizadas a fim de modificar adesivos estruturais para outros novos propósitos, como, por exemplo, aumentar a resistência da junta criando-se um adesivo modificado ao longo da sobreposição e/ou curar o adesivo em caso de dano. O objetivo principal deste projeto foi o uso de PTEs na criação de um adesivo funcionalmente graduado ao longo da sobreposição. Foram utilizadas diferentes quantidades de PTEs ao longo da sobreposição com dois adesivos diferentes utilizados na indústria automotiva. Foi utilizado um teste de tração para avaliar a resistência ao cisalhamento quando se utiliza um adesivo graduado, enquanto os testes de flexão de quatro pontos foram realizados para analisar o comportamento das juntas graduadas quando estas são submetidas à carregamento de flexão. Verificou-se que a resistência ao cisalhamento diminui com o aumento da % em peso de PTEs. Entretanto, as juntas graduadas apresentaram maior resistência (de cisalhamento e de flexão), se comparado às condições homogêneas. Além disso, as condições graduadas, com adesivo Betamate™2096, apresentaram menores picos de tensão na extremidade sob tração. Os resultados experimentais são comparados com um modelo de elementos finitos e reforçam o fato de que a falha ocorre devido a tensões locais na extremidade da sobreposição submetida a esforços de tração.

Palavras-chave: PTEs. Adesivos. Graduadas. Juntas. DCB. Tração. Flexão. Falha.

ABSTRACT

Bonded joints modified with thermally expandable particles

Thermally expandable particles (TEPs) are used by the industry in a wide variety of applications mainly for weight reduction and appearance improvement for thermoplastics, inks, and coatings. In adhesive bonding, TEPs have been used for recycling purposes. Moreover, TEPs might be used to modify structural adhesives for other new purposes, such as, for example to increase the joint strength by creating an adhesive functionally modified along the overlap of the joint and/or to heal the adhesive in case of damage. The main objective of this study was to use thermally expandable particles in order to create a graded adhesive along the overlap by local mixing of the particles. Different amounts of TEPs were used along the overlap with two different adhesives used in automotive industry. Single lap joint test was used in order to evaluate the lap-shear strength when using a functionally graded adhesive, while four-point bending tests were carried out in order to analyse the behaviour of the graded adhesive joints when submitted to bending loading. It was found that the lap-shear strength decreases with the increase of wt% TEPs. However, graded joints presented higher strength (lap-shear and flexure), when compared with homogeneous conditions. In addition, graded conditions, with Betamate™2096 adhesive, exhibited less strains peaks at the end in tension. The experimental results are compared with a finite element model and reinforce the fact that the failure takes place due to local strains at the ends of the overlap in tension.

Keywords: TEPs. Adhesives. Graded. Joints. DCB. Tension. Bend. Failure

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução 19

1.1 Justificativas 20

1.2 Objetivos 21

1.3 Metodologia 21

1.4 Estrutura da Dissertação 22

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica 23

2.1 Adesivos estruturais 23

2.2 Juntas Coladas 26

2.2.1 Tipos de juntas coladas 28

2.2.2 Preparação da superfície 31

2.2.3 Modos de Falha 33

2.3 Juntas Graduadas 34

2.4 Adesivos modificados com Partículas Termicamente Expansíveis 37

2.4.1 Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs) 37

2.4.2 Efeito das partículas nas propriedades mecânicas dos adesivos 43

2.4.3 Análise da descolagem 45

Capítulo 3 – Metodologia Experimental 50

3.1 Materiais 50

3.1.1 Adesivos 50

3.1.2 Partículas Termicamente Expansíveis 51

3.2 Manufatura dos corpos de prova 52

3.2.1 Double Cantilever Beam (DCB) 52

3.2.2 Juntas de sobreposição simples 54

3.2.2.1 Ensaio de tração 55

3.2.2.2 Ensaio de flexão em quatro pontos 57

3.3 Ensaios 59
3.3.1 Double Cantilever Beam (DCB) 59
3.3.2 Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples 59
3.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos 60
Capítulo 4 – Resultados e discussões 61
4.2 Double Cantilever Beam (DCB) 61
4.2.1 Modos de falha 61
4.2.2 Efeito da % de PTEs em modo I de carregamento 61
4.1 Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples 64
4.1.1 Modos de falha 64
4.1.2 Efeito da % de PTEs na resistência ao cisalhamento 65
4.3 Ensaio de flexão em quatro pontos 67
4.3.1 Modos de falha 67
4.3.2 Efeito da % de PTEs na resistência à flexão 70
4.4 Análise de elementos finitos 78
4.4.1 Modelo da Zona Coesiva 81
4.1.3 Comparação entre as forças de ruptura obtidas no experimental e no numérico 83
4.1.4 Distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22}) 87
Capítulo 5 - Conclusões 94
Sugestões para trabalhos futuros 96
Bibliografia 97
ANEXOS 102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das tensões de corte em relação a espessura do adesivo aplicado. [4] 25
Figura 2 – As três disciplinas envolvidas na ciência da adesão. [3]..... 26
Figura 3 – (a) Distribuição de tensões em juntas rebitadas e em (b) juntas coladas. [9] 28
Figura 4 – Tipos de carregamentos existentes em uma junta colada (a) Tração (b) Corte ou cisalhamento (c) Compressão (d) Clivagem (e) Arrancamento. [10, 11]..... 28
Figura 5 – Diferentes tipos de juntas coladas. [12] 29
Figura 6 - Concentrador de tensões nas extremidades - Junta de sobreposição simples. [4] 29
Figura 7 – Desenho esquemático mostrando as forças adesivas e coesivas entre as regiões do adesivo e substrato. [13] 30
Figura 8 – (a) Em uma junta ideal o substrato seria o elo mais fraco. (b) Tendo como exemplo uma corrente, a junta adesiva pode ser dividida entre as regiões: substrato, adesão (que fica entre o substrato e adesivo) e adesivo. [3]..... 31
Figura 9 – Molhabilidade de superfície pode ser analisada de acordo com o ângulo de contato. [11]..... 33
Figura 10 - Camadas presentes em uma junta adesiva. [3] 34
Figura 11 - Tipos de ruptura que podem estar presentes em uma junta colada. (a) Falha adesiva (b) Falha coesiva no adesivo (c) Falha coesiva no substrato. [15]..... 34
Figura 12 – *Single-strap joint* e partículas de vidro com o objetivo de testar o conceito da junta adesiva funcionalmente graduada. [21] 36
Figura 13 - Fotografias da camada adesiva antes do posicionamento do dobrador nas juntas (a) sem partículas, (b) partículas distribuídas de forma uniforme, e (c) partículas distribuídas de forma gradual. [21] 37
Figura 14 - Modelo esquemático exemplificando o mecanismo de expansão da partícula. [32] 38
Figura 15 - Desenho esquemático do mecanismo de separação da junta. [32] 39
Figura 16 – Imagens obtidas via MEV das partículas termicamente expansíveis. (a) Antes da expansão (densidade entre 1 e 1,1 g/cm^3). (b) Após a expansão (densidade entre 0,002 e 0,02 g/cm^3). [31] 39

Figura 17 - Estrutura esquemática da partícula. [36]..... 40
Figura 18 – (a) MC01 antes da expansão (b) MC01 após a expansão a 180°C durante 2 minutos (c) MC02 antes da expansão (d) MC02 após a expansão a 180°C durante 2 minutos. [37]..... 41
Figura 19 - (a) Partículas isoladas (b) Partículas misturadas a uma matriz adesiva (c) Seção transversal da partícula antes da expansão (d) Seção transversal da partícula após a expansão. [25]..... 42
Figura 20 – Imagens via MEV. (a) Amostra adesiva sem a presença de partículas. (b) Amostra adesiva contendo 15% em peso de partículas. [38] 42
Figura 21 - Análise de imagens, através de MEV, do comportamento das partículas em diferentes temperaturas. [29] 42
Figura 22 - Dimensões do corpo de prova pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm). [39] 43
Figura 23 – Amostras “osso de cão” (a) antes (b) e após realização dos testes de tração. [28] 43
Figura 24 – Amostra com dimensões em mm. [26, 27] 44
Figura 25 – Resistência ao cisalhamento média e deslocamento das juntas de sobreposição simples. 45
Figura 26 - Configuração de teste para descolagem, com temperatura controlada. [26, 27] 46
Figura 27 - Representação esquemática do procedimento de avaliação de descolagem das juntas. [26, 27] 47
Figura 28 – Testes de avaliação de descolagem. [26] 48
Figura 29 – Curva Tensão *versus* Deformação dos adesivos Betamate™2096 e SikaForce®7888. [28, 29]. 51
Figura 30 – Máquina jateadora. 53
Figura 31 – Geometria do corpo de prova DCB (dimensões em mm). 53
Figura 32 – Molde utilizado para a confecção dos corpos de prova DCB. 54
Figura 33 – Molde de alumínio utilizado na fabricação das juntas de sobreposição simples. 54
Figura 34 – Misturadora DAC 150.1 FVZ SpeedMixer (Hauschild, Alemanha). 55
Figura 35 – Geometria da junta colada para o ensaio de tração em juntas de sobreposição

simples (dimensões em mm). 55
Figura 36 – Distribuição da % em peso de PTEs ao longo da sobreposição. (a) Condição homogênea com 0% de PTEs (b) Homogênea com 1% de PTEs (c) Homogênea com 0% de PTEs (d) Graduada com 5% de PTEs (e) Graduada com 1% de PTEs. 56
Figura 37 – Aplicação do adesivo com diferentes % em peso de PTEs. 56
Figura 38 - Espaçamento entre as camadas com diferentes % de PTEs para as juntas nas condições graduadas, 1% e 5% de PTEs (dimensões em mm). 56
Figura 39 - Geometria da junta colada para o ensaio de flexão em quatro pontos (dimensões em mm). 57
Figura 40 - Distribuição da % em peso de PTEs ao longo da sobreposição. (a) Condição homogênea com 20% de PTEs (b) com 10% de PTEs (c) com 5% de PTEs (d) com 0% de PTEs (e) Graduada com 10% de PTEs (d) Graduada com 20% de PTEs... 58
Figura 41 – Espaçamento entre as camadas com diferentes % de PTEs para as juntas graduadas. (a) 25 mm (b) 12,5 mm de sobreposição (dimensões em mm). 58
Figura 42 – Ensaio DCB. 59
Figura 43 - Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples. 60
Figura 44 – Modos de falha das amostras DCB. 61
Figura 45 – Curvas, representativas, força-deslocamento em função da % de PTEs para o adesivo Betamate™2096. 62
Figura 46 – Curvas-R, representativas, em função da % em peso de PTEs para o adesivo Betamate™2096. 63
Figura 47 - G_{IC} (média) em função da porcentagem de PTEs. 64
Figura 48 – Superfície de fratura das juntas de sobreposição simples após o ensaio de tração. 65
Figura 49 – Curvas, representativas, força-deslocamento do ensaio de tração em juntas de sobreposição simples. 65
Figura 50 – Gráfico resistência ao cisalhamento média e deslocamento. 66
Figura 51 – Propagação da trinca no ensaio de flexão em quatro pontos. 67
Figura 52 – Modos de falha após o ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo Betamate™2096. 68
Figura 53 – Condição homogênea com 0 % PTEs após o ensaio de flexão em quatro pontos. 68

Figura 54 – Modos de falha após o ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo SikaForce®7888: (a) 12,5 mm (b) 25 mm de comprimento de sobreposição. 69
Figura 55 – Deformação plástica dos substratos após o ensaio de flexão em quatro pontos para: (a) 12,5 mm (b) 25 mm de comprimento de sobreposição. 69
Figura 56 – Curva, representativas, força-deslocamento do ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo Betamate™2096. 70
Figura 57 – Força de ruptura média em função da % de PTEs (Betamate™2096)..... 71
Figura 58 – Resistência à flexão e deslocamento (valores médios), adesivo Betamate™2096. 72
Figura 59 – Curvas, representativas, força-deslocamento para 12,5 mm de sobreposição (SikaForce®7888). 73
Figura 60 – Curvas, representativas, força-deslocamento para 25 mm de sobreposição (SikaForce®7888). 74
Figura 61 – Comparação da força de ruptura média entre os dois comprimentos de sobreposição. 75
Figura 62 – Resistência à flexão e deslocamento médios (adesivo SikaForce®7888 com 12,5 mm de sobreposição). 76
Figura 63 - Gráficos da resistência à flexão e deslocamento médios (adesivo SikaForce®7888 com 25 mm de sobreposição). 77
Figura 64 –Condições de contorno utilizados na análise de elementos finitos para o ensaio de flexão em quatro pontos..... 79
Figura 65 – Malha aplicada para o modelo da zona coesiva (MZC)..... 79
Figura 66 – Lei da tração-separação para o MZC. 82
Figura 67 – Degradação do adesivo (ferramenta *SDEG*) utilizando-se o modelo da zona coesiva. 83
Figura 68 – Curvas força-deslocamento do numérico e experimental para as condições graduadas (10% e 20%), Betamate™2096. 84
Figura 69 - Curvas força-deslocamento do numérico e experimental para as condições graduadas (10% e 20%), SikaForce®7888, 25 mm de sobreposição. 85
Figura 70 – Força máxima obtida na simulação numérica e no experimental (Betamate™2096). 86
Figura 71 - Forças de ruptura obtidas na simulação numérica e no experimental

(SikaForce®7888). 87
Figura 72 – Representação esquemática do *Path* ao longo da sobreposição..... 88
Figura 73 – Detalhe do *Path* na interface adesivo-substrato (superior). 88
Figura 74 – Malha utilizada no modelo elástico para análise da distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22})..... 89
Figura 75 – Simulação da distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (ε_{22}). 89
Figura 76 – Distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (Betamate™2096). 90
Figura 77 - Distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (SikaForce®7888). 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de adesivos estruturais e suas respectivas características e propriedades. [3] 23
Tabela 2 – Principais vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de juntas coladas. [3, 7] 27
Tabela 3 – Efeito da preparação superficial em relação a resistência das juntas coladas. [3] 32
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos adesivos oferecidos pelo próprio fabricante. ... 50
Tabela 5 - Dados característicos das partículas Expancel 031 DU 40. 51
Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos substratos de aço duro. 52
Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos adesivos Betamate™2096 e Betamate™2098. 57
Tabela 8 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo numérico (adesivo Betamate™2096). 81
Tabela 9 - Propriedades mecânicas utilizadas no modelo numérico (SikaForce®7888). 81

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mathbf{T_{início}}$	Temperatura a qual as partículas começam a expandir.
$\mathbf{T_{máximo}}$	Temperatura a qual as partículas atingem a expansão máxima.
$\mathbf{G_{IC}}$	Energia crítica de fratura em modo I.
$\mathbf{a_{eq}}$	Comprimento de fenda equivalente.
b	Largura do corpo de prova DCB.
h	Altura do corpo de prova DCB.
$\mathbf{E_f}$	Módulo de flexão corrigido.
G	Módulo de cisalhamento.
$\boldsymbol{\tau_{méd}}$	Resistência ao cisalhamento.
F	Força máxima.
b	Largura da junta de sobreposição simples.
L	Comprimento de sobreposição da junta de sobreposição simples.
τ	Resistência à flexão.
P	Força máxima.
L	Distância entre os cilindros de suporte.
$\mathbf{L_i}$	Distância entre os cilindros de carregamento.
d	Espessura da junta.
ν	Coeficiente de Poisson do adesivo.
$\boldsymbol{G_n^c}$	$G_{IC.}$
$\boldsymbol{G_s^c}$	$G_{IIC.}$
E	Módulo de Young.
$\boldsymbol{t_n^0}$	Tensão de tração.
$\boldsymbol{t_s^0}$	Tensão de cisalhamento.
$\mathbf{K_m}$	Espessura inicial da interface.
$\mathbf{U_m}$	Deslocamento em modo misto.
$\mathbf{d_m}$	Dano.
$\mathbf{G_n}$	Taxa de liberação de energia normal.
$\mathbf{G_{nc}}$	Valor crítico correspondente da taxa de liberação de energia normal.
$\mathbf{G_t}$	Taxa de liberação de energia tangencial.
$\mathbf{G_{tc}}$	Valor crítico correspondente da taxa de liberação de energia tangencial.

$\boldsymbol{\sigma^m}$	Tensão.
$\boldsymbol{\delta^m}$	Deslocamento.
$\boldsymbol{\delta_c^m}$	Deslocamento crítico em modo misto.
$\boldsymbol{\sigma_c^m}$	Tensão crítica.

Capítulo 1 – Introdução

A colagem foi descoberta a centenas de anos. Sabe-se que em 4000 aC, os mesopotâmicos utilizavam asfalto para fins de construção, enquanto que em 3000 aC os sumérios produziram cola de pele de animais e chamaram o produto de 'Se-gin'. A descoberta de uma estátua em madeira, banhada a ouro, que continha adesivo feito de asfalto indica que a cerca de 1000 anos depois, a cola foi usada para a fabricação de estatuetas. A colagem também era muito utilizada no Egito antigo, quando eles utilizavam colas oriundas de animais.

Recentemente, dentre as diferentes tecnologias utilizadas na união de sólidos, como o uso da soldagem, de rebites, de parafusos e o uso de adesivos na colagem, sem dúvidas, o último é o que vem sendo cada vez mais utilizado, devido, principalmente as inúmeras vantagens que este processo oferece.

O uso de adesivos em juntas de sobreposição tem como principal vantagem unir substratos similares ou dissimilares sem deixar de oferecer rigidez às juntas. Para tanto, é imprescindível conhecer as propriedades do adesivo utilizado, o processo de cura e as condições ambientes. Além disso, tão importante quanto conhecer o adesivo, é necessário conhecer o aderente ou substrato a qual será aplicado o adesivo, pois a condição do aderente influencia diretamente na qualidade da colagem e durabilidade das juntas.

O uso de juntas coladas foi adotado em muitas linhas de montagem, principalmente, devido à redução relativa da concentração de tensões em comparação com a ligação por meio de rebite, soldagem e parafuso. Entretanto, as juntas de sobreposição simples apresentam distribuição de tensões concentrados nas extremidades da sobreposição. Para minimizar este problema, as juntas graduadas surgiram com o objetivo inicial de apresentar uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da sobreposição. Essa capacidade se obter um adesivo graduado, com propriedades mecânicas diferentes ao longo da sobreposição, fornece projetos de montagens estruturais de alto desempenho.

1.1 Justificativas

A descolagem de juntas utilizando-se adesivos estruturais está associada à destruição do material, principalmente devido à grande possibilidade de degradação térmica ou ruptura do adesivo, o que pode significar dano ao substrato. Para tanto, estudos recentes apresentaram uma nova técnica para a descolagem de juntas adesivas, utilizando-se a combinação de um método indutivo e o uso de Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs) misturadas a um adesivo estrutural.

Além das partículas oferecerem um melhor método na descolagem de juntas, elas podem ser utilizadas para oferecerem um aumento das propriedades mecânicas do material, como por exemplo, da resistência mecânica ao longo de toda junta colada, pois o principal problema que envolve, principalmente, o uso de juntas de sobreposição simples, é a presença de concentrações de tensões nas extremidades da camada adesiva, o que pode levar a uma falha prematura nas extremidades da sobreposição, especialmente se o adesivo é quebradiço ou se forem utilizados compósitos ou substratos de baixa resistência.

Por esta razão, uma das principais áreas de investigação que concerne o campo das juntas coladas é desenvolver técnicas que possam reduzir estes concentradores de tensão e, consequentemente uma maior resistência ao longo da sobreposição. Para isso, uma recente pesquisa utilizou juntas de sobreposição simples com adesivo estrutural funcionalmente gradual, adicionando-se um adesivo com diferentes quantidades de partículas ao longo da junta, e consequentemente variando as propriedades mecânicas ao longo da sobreposição criando-se uma junta gradual.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste projeto é propor a confecção de juntas adesivas graduadas utilizando-se Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs).

Os objetivos específicos são:

1. Identificar a combinação mais adequada entre adesivo e PTEs.
2. Desenvolver um processo tecnológico para a obtenção de uma junta adesiva funcionalmente graduada.
3. Realizar ensaios estáticos em juntas graduadas.

1.3 Metodologia

Para se atingir todos os objetivos relacionados acima, a metodologia do trabalho seguiu-se na seguinte ordem:

I. Revisão bibliográfica de todos os assuntos que são englobados neste projeto, como: tipos de adesivos, juntas graduadas, tipos de ensaios e os tipos de juntas;
II. Escolha do adesivo, do tipo de junta e os tipos de ensaios a serem realizados;
III. Fabricação dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio DCB, nos testes de tração e nos ensaios de flexão em quatro pontos;
IV. Realização dos ensaios mecânicos para determinar as propriedades dos adesivos e os resultados que se obtêm quando utilizada uma junta com diferentes porcentagens em peso de PTEs ao longo da sobreposição;
V. Análise numérica via Abaqus dos ensaios de flexão em quatro pontos.

1.4 Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação consiste em 5 capítulos, além de Bibliografia e Sugestões para trabalhos futuros, dividindo-se em Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia Experimental, Resultados e discussões e, por último, Conclusões.

A Introdução mostra a importância no uso de juntas coladas, principalmente, na indústria automobilística nos dias atuais, sobre o método relativamente novo que vem sendo estudado, que é o uso de PTEs misturadas a um adesivo estrutural, justificativas acerca da escolha deste tema e os principais objetivos.

A Revisão Bibliográfica reuniu os principais conceitos relacionados ao que foi estudado e utilizado neste trabalho e dividiu-se em: adesivos estruturais, juntas coladas, juntas graduadas e adesivos modificados com partículas termicamente expansíveis.

A Metodologia Experimental possui tudo que foi realizado neste trabalho, os materiais e os métodos utilizados.

No capítulo de Resultados e discussões, encontram-se todos os resultados obtidos na parte experimental seguido de uma comparação com outros resultados já obtidos anteriormente. Finalmente, em seguida, encerrando-se por Conclusões, Bibliografia e Sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

2.1 Adesivos estruturais

De acordo com a DIN EN 923 [1], um adesivo é definido como um aglutinante não metálico que atua por meio da adesão e da coesão. A ASTM D907-06 [2] define um adesivo como "uma substância capaz de conter os materiais em conjunto por meio da aderência à superfície".

Pode-se dividir os adesivos em dois grandes grupos: os estruturais e os não-estruturais. Os adesivos estruturais possuem como principal característica, elevada resistência. Pois, são capazes de resistir a cargas elevadas sem apresentar grande deformação e oferecer boa ligação às estruturas. [3]

Geralmente, os adesivos estruturais são termoendurecíveis, pois necessitam da adição de um endurecedor e/ou fornecimento de calor. Alguns elastómeros termoendurecíveis resistentes, como os poliuretanos, também podem ser classificados como estruturais. [3]

Na Tabela 1 abaixo encontram-se características e propriedades dos principais adesivos estruturais encontrados no mercado, para efeito comparativo.

Tabela 1 - Tipos de adesivos estruturais e suas respectivas características e propriedades. [3]

Tipos de Adesivos Estruturais	Forma	Método de aplicação	Cura	Temperatura de serviço	Vantagens	Desvantagens
Epóxidos de uma parte	Filme, pasta	Manual	~150°C	-40°C a 180°C	Resistência/ Durabilidade	Armazenamento/ Cura a alta temp.
Epóxidos de duas partes	2 partes em pasta	Manual, mistura e automática	Temp. Amb.	-40°C a 180°C	Resistência/ Durabilidade	Cura lenta/ Mistura susceptível a formação de bolhas

Epóxidos híbridos	---	---	---	60°C a 232°C (depende do tipo)	Boa resistência/ Elevada ductilidade/ Juntas tenazes e duráveis, entre outras	---
Fenólicos	Soluções, pó + líquido, filme	Manual, pincel, filme	Temp. e pressão	-40°C a 180°C	Boa resistência em ambientes diversos	Frágil, elevadas pressões de cura
Fenólicos Híbridos	Filme, pó + líquido, pasta	---	---	70°C a 132°C (depende do tipo)	Boa resistência ao corte, a combustíveis e agentes químicos/ Flexível, entre outros	---
Formaldeído	Pó	---	Temp. elevada ou amb.	-180°C a 175°C	Resistência a água a ferver, óleo, solventes e fungos	Custo elevado
Melamina-formaldeído	Pó	Manual (geralmente misturados a ureia-formaldeído)	90°C	---	Resistência superior à da madeira	Custo elevado
Poliaromáticos de alta temperatura	Filme integrado	Montagem de *sandwich*	290 a 340°C	-40°C a 280°C	Resistência a altas temperaturas	Dificuldade das condições de processamento
Poliuretanos	Soluções, pasta	Cartuchos	Temp. amb.	-200°C a 80°C	Bom desempenho a baixas temperaturas/ Boa tenacidade, molhabilidade,	Curam com umidade/ Baixa resistência à temperatura
Anaeróbios	Líquido + pasta	Automática ou pequeno contentor	Por exclusão de ar (em minutos ou horas a 25°C ou em 10 min a 120°C)	-55°C a 150°C	Preparação da superfície não precisa de ser muito cuidada	Espessuras finas

Cianocrilatos	Uma parte líquida	Pequeno contentor ou aplicação automática	Em presença de humidade no substrato. Cura em sequndos ou minutos a 20°C	-30°C a 80°C	Cura rápida	Cura rápida impede de ligar grandes áreas / Frágil / Baixa capacidade de preencher espaços
Acrílicos modificados	Duas partes	Contentor, misturador, sistemas completamente automatizados	Catalisados por um iniciador que permite uma cura rápida	-40 a 120°C	Pode curar rapidamente / Habilidade em ligar superfícies mal preparadas / Boa resistência ao meio ambiente	A resistência e o módulo são mais baixos se comparado aos epóxidos
Poliésteres	Pasta (de uma ou duas partes)	---	Temp. amb. (o tempo depende do tipo de adesivo)	80°C a 150° (depende do tipo)	Cura rapidamente / Flexível	Corrosão mais fraca se comparado aos epóxidos

É importante ressaltar que numa junta colada, a espessura do adesivo é um fator importantíssimo quando se quer obter um melhor desempenho da junta. As espessuras mais recomendadas pelos fabricantes são entre 0,1 mm e 0,2 mm. Verificou-se em estudos anteriores que a resistência da junta diminui com o aumento da espessura do adesivo. A Figura 1 abaixo mostra a distribuição de tensões ao longo da camada adesiva em relação a espessura do adesivo depositado. [4]

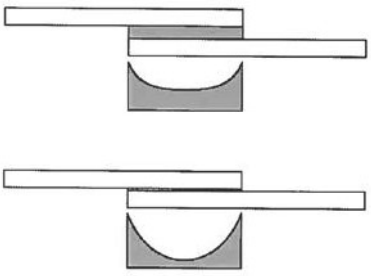


Figura 1 – Distribuição das tensões de corte em relação a espessura do adesivo aplicado. [4]

2.2 Juntas Coladas

A ciência e tecnologia das juntas coladas ou adesivas é uma área bastante multidisciplinar, onde requer o domínio de conceitos fundamentais de diversas áreas de disciplinas científicas. As áreas da física, química e mecânica estão relacionadas, basicamente, ao estudo da ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto de juntas, e estes estão diretamente ligados à reologia dos polímeros e mecânica da fratura, que são muito importantes na ciência da adesão, vide Figura 2. [3]

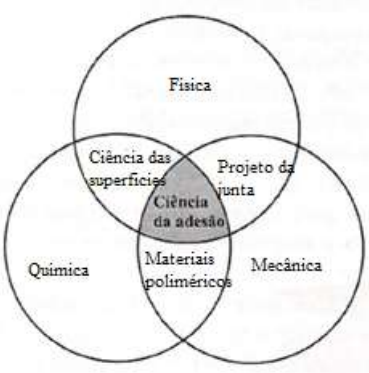


Figura 2 – As três disciplinas envolvidas na ciência da adesão. [3]

Uma vantagem no uso de juntas coladas na indústria automobilística é a possibilidade da redução do peso dos veículos, o que diminui o consumo de combustível, fazendo com que se tenha uma diminuição na emissão de poluentes ao meio ambiente. [5, 6] Segue Tabela 2, abaixo, mostrando algumas das principais vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de juntas coladas.

Tabela 2 – Principais vantagens e desvantagens relacionadas ao uso de juntas coladas. [3, 7]

Vantagens	Desvantagens
Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da junta	Algumas geometrias facilitam a presença de tensões localizadas
Possibilidade da junção de materiais diferentes	Limitada resistência a condições extremas
Amortecimento das vibrações	Necessidade da utilização de ferramentas de fixação
Maior vida em fadiga se comparado a uma junta mecânica	Necessária uma preparação da superfície antes da aplicação do adesivo
Projeto flexível	Os adesivos são frequentemente curados
Permitem ter estruturas com contornos regulares	Difícil controle da qualidade e segurança
Redução de custos	Não há um critério de dimensionamento

Independentemente do tipo de carregamento, a zona unida sempre apresenta uma tensão inicial, devido à pré-tensão, ou tensão residual, devido ao processo de fabricação. Quando ocorre a união, há uma maior concentração de tensão na interface, ou seja, nos pontos de transferência de força. [8]

A concentração de tensões em juntas mecânicas rebitadas é particularmente grande porque a transferência de carga entre os elementos da junta está concentrada em uma fração da área disponível. Juntas coladas são por sua vez estruturalmente mais eficientes pois oferecem um perfil de distribuição de tensões mais uniforme em uma

maior área, ao longo da junta colada, vide Figura 3 abaixo. [8]

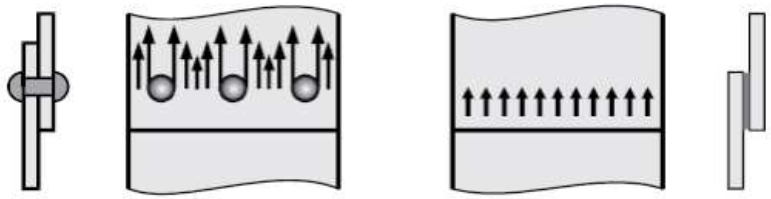


Figura 3 – (a) Distribuição de tensões em juntas rebitadas e em (b) juntas coladas. [9]

As juntas coladas podem estar susceptíveis a diferentes tipos de carregamento: de tração, cisalhamento, de compressão, clivagem e de arrancamento, vide Figura 4. É imprescindível um projeto de ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal problema das juntas adesivas), clivagem e impacto. Quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem e quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento. [3]

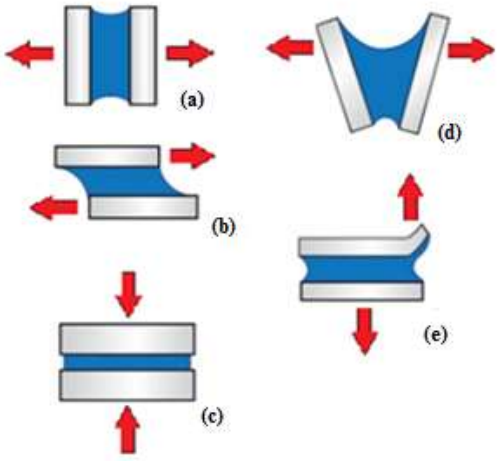


Figura 4 – Tipos de carregamentos existentes em uma junta colada (a) Tração (b) Corte ou cisalhamento (c) Compressão (d) Clivagem (e) Arrancamento. [10, 11]

2.2.1 Tipos de juntas coladas

Existem diversos tipos de juntas coladas, podendo-se citar as: juntas de sobreposição simples (*single lap joints*), juntas de sobreposição dupla (*double lap joints*), juntas em ângulo ou com chanfro (*scarf joints*), em degrau, cobre-junta, topo-a-topo e tubular (vide Figura 5 abaixo).

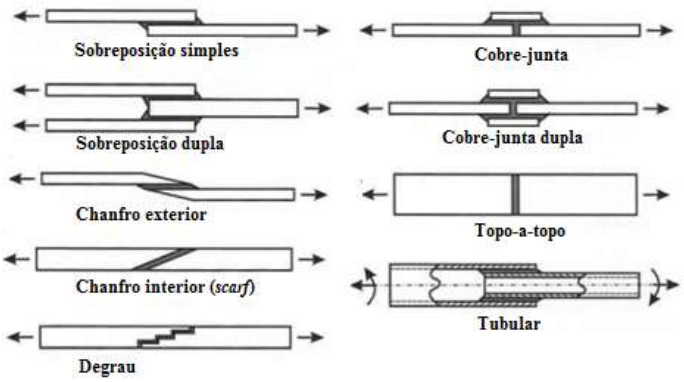


Figura 5 – Diferentes tipos de juntas coladas. [12]

Numa junta de sobreposição simples, as extremidades são as regiões que apresentam um maior concentrador de tensões e sofrem deformação do tipo plástica, vide Figura 6 abaixo. Devido a tensão média ser menor que a das extremidades, essa distribuição não uniforme ao longo da camada adesiva faz com que a rotura ocorra normalmente em valores de carga inferiores aos valores que o adesivo pode vir a suportar. [4]

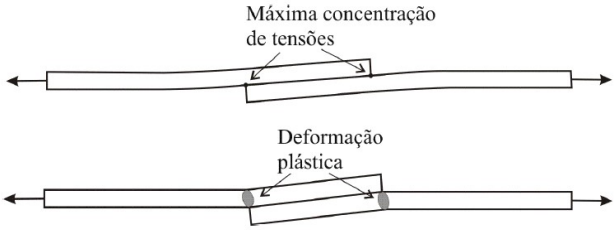


Figura 6 - Concentrador de tensões nas extremidades - Junta de sobreposição simples. [4]

O comprimento de sobreposição é um parâmetro bem importante no que se diz respeito a juntas de sobreposição simples. Para valores pequenos da razão entre o comprimento de sobreposição e a espessura do substrato, a resistência da junta aumenta significativamente. [4]

O aumento do comprimento de sobreposição não se repercute na resistência da junta, a partir de um determinado comprimento, para adesivos frágeis e substratos de aço duro, pois a resistência da junta estará relacionada às características do adesivo. Para o caso de substratos que se deformam plasticamente, o aumento do comprimento de

sobreposição não repercute na resistência da junta, e esta é ditada pelas características do substrato.

Por definição, coesão é a resistência interna de um adesivo como resultado de uma variedade de interações no interior do mesmo e adesão é a ligação de um material a outro, como por exemplo, entre o adesivo e o substrato, devido a uma variedade de interações presentes entre eles. [13] Ambos, adesivos e vedantes funcionam pela propriedade da adesão. [3]

Mais especificamente, coesão só envolve as forças intermoleculares entre uma única substância e a adesão envolve forças intermoleculares entre duas substâncias, causando atração entre elas. Estas forças, são, principalmente, as forças de van de Waals. [3]

A Figura 7 abaixo ilustra as forças de adesão e coesão no interior da região do adesivo e entre o adesivo e o substrato.

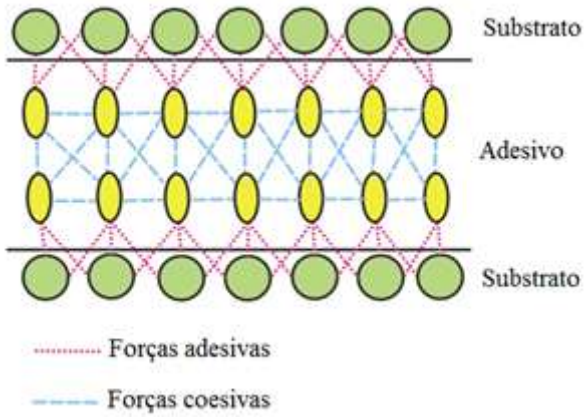


Figura 7 – Desenho esquemático mostrando as forças adesivas e coesivas entre as regiões do adesivo e substrato. [13]

Conhecer os conceitos de adesão e coesão é imprescindível para se ter noção da grande importância que se tem em relação à preparação da superfície do aderente ou substrato antes da aplicação do adesivo, como será explicado a seguir.

2.2.2 Preparação da superfície

O processo de ligação das juntas coladas passa por cinco etapas. A terceira, é referente à preparação da superfície do substrato ou aderente antes da aplicação da camada adesiva. É considerado um dos processos mais importantes, pois está diretamente ligado à adesão do adesivo em relação ao aderente e a resistência final da junta adesiva.

Em uma ligação ideal, é necessário que o elo mais fraco seja o substrato. Porém, na maioria das ligações, o adesivo acaba sendo o elo mais fraco justamente porque as forças de adesão são mais fortes se comparadas as forças de coesão que atuam no adesivo. É importante evitar que a interface se torne o elo mais fraco, pois pode-se resultar em uma baixa força de ruptura, vide Figura 8 abaixo. [3]

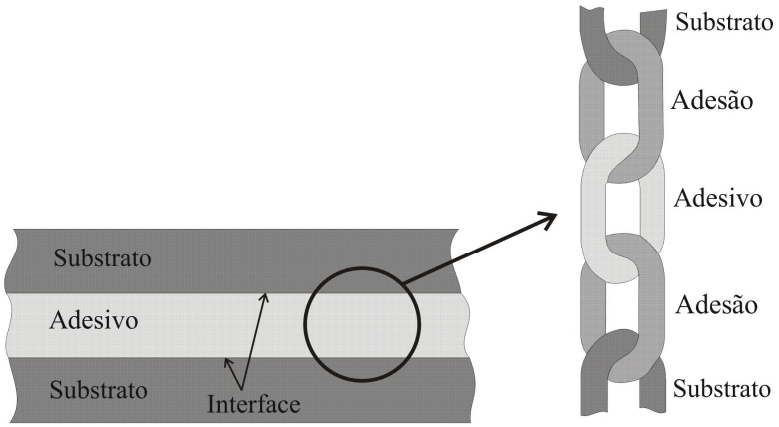


Figura 8 – (a) Em uma junta ideal o substrato seria o elo mais fraco. (b) Tendo como exemplo uma corrente, a junta adesiva pode ser dividida entre as regiões: substrato, adesão (que fica entre o substrato e adesivo) e adesivo. [3]

Com isso, além de ser necessário conhecer o substrato e o adesivo utilizados na colagem, é importante também saber os principais tratamentos de preparação de superfície designados para cada tipo de substrato e consequentemente as propriedades que podem ser obtidas para cada escolha, o que dependerá da aplicação e das condições ambientes. Abaixo, na Tabela 3, encontram-se os principais tratamentos que podem ser utilizados para cada tipo de substrato, o adesivo e a resistência ao corte que pode ser obtida.

Tabela 3 – Efeito da preparação superficial em relação a resistência das juntas coladas. [3]

Substrato	Tratamento	Resistência ao corte (MPa)	Adesivo
Alumínio	Sem tratamento	3,1	Epóxido
	Desengorduramento em vapor	5,8	
	Grenalhagem	12,1	
	Ataque químico	19	
Alumínio	Sem tratamento	16,8	Vinilo-fenólico
	Desengorduramento	18,9	
	Ataque químico	35,7	
Aço Inoxidável	Sem tratamento	36	Vinilo-fenólico
	Desengorduramento	43,5	
	Ataque químico	48,7	
Aço laminado a frio	Sem tratamento	20	Epóxido
	Desengorduramento em vapor	20,1	
	Grenalhagem	29,4	
	Ataque químico	30,8	
Cobre	Desengorduramento em vapor	12,3	Epóxido
	Ataque químico	16,1	
Titânio	Sem tratamento	9,4	Vinilo-fenólico
	Desengorduramento	21,9	
	Ataque químico	46,5	
Titânio	Ataque químico	22	Epóxido
	Decapagem líquida	22,9	
	Polimento por vapor	26,9	
	Ataque químico por ácido	27,6	

A adesão do adesivo em relação a superfície do aderente pode ser também explicada pela questão da molhabilidade, pois o nível de adesão também depende das propriedades da superfície do substrato. Assim, a preparação da superfície do aderente ou substrato é o primeiro cuidado para obtenção de uma superfície adesivada de qualidade e características controladas. Ou seja, quanto melhor for a molhabilidade, melhor será a adesão do substrato. Para saber a molhabilidade de superfície, basta observar uma gotícula de água. Se a mesma não aderir à superfície, significa que há resíduo de óleo. Portanto, quanto mais limpa for a superfície, menor será a resistência da gotícula e, consequentemente, melhor espalhamento (Figura 9). [11]

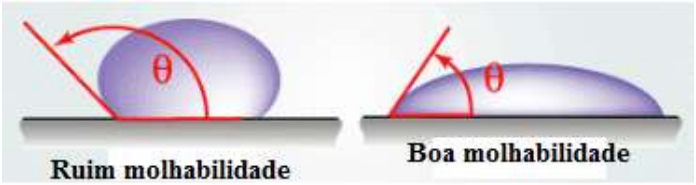


Figura 9 – Molhabilidade de superfície pode ser analisada de acordo com o ângulo de contato. [11]

Pode-se concluir que a limpeza da superfície do substrato antes da aplicação do adesivo garante um aumento da energia superficial, promovendo uma melhor adesão, pois a gordura, por exemplo, tem baixa energia superficial, logo é altamente não desejável pois dificulta o processo de aderência do adesivo. [14]

2.2.3 Modos de Falha

Os modos de falha ou tipos de ruptura são determinados pela quantidade de materiais presentes em cada interface, assim como a geometria e o carregamento pelo qual a junta foi submetida. É importante que seja feita a caracterização da falha a fim de se obter um melhor entendimento das propriedades da junta. [12]

Numa junta colada, a região entre o adesivo e o aderente é chamada de interfase, que é uma fina camada na zona de contato adesivo-aderente. A interfase tem características diferentes da parte maciça do adesivo e aderente e tem grande importância em relação a determinação das propriedades mecânicas de uma ligação adesiva. A interface ou camada limite é o plano de contato entre as superfícies de dois materiais. Primário é a substância presente entre a camada da interfase e a do adesivo com o objetivo de melhorar a adesão ou proteger as superfícies até a aplicação do adesivo. A Figura 10 abaixo mostra as principais diferentes camadas presentes em uma junta adesiva. [3]

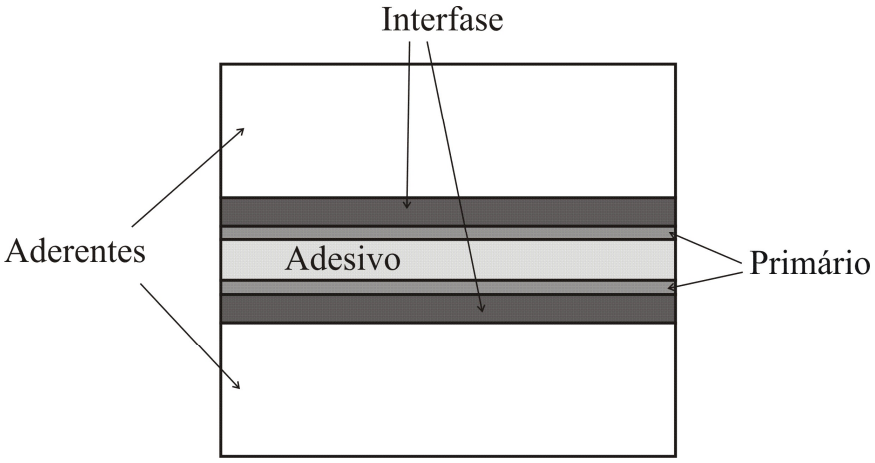


Figura 10 - Camadas presentes em uma junta adesiva. [3]

As juntas podem romper por adesão, coesão ou por uma combinação entre as duas. Na falha adesiva, a ruptura ocorre na interface substrato-adesivo, ou seja, é quando o adesivo apresenta falha ao aderir ao substrato. A falha coesiva pode ocorrer tanto no substrato quanto no adesivo sendo que, quando a ruptura ocorre no substrato, isto significa que o adesivo é mais resistente que o próprio substrato, e quando a ruptura acontece no adesivo isso indica que o substrato é mais resistente que o adesivo, vide Figura 11 abaixo. [3, 4]

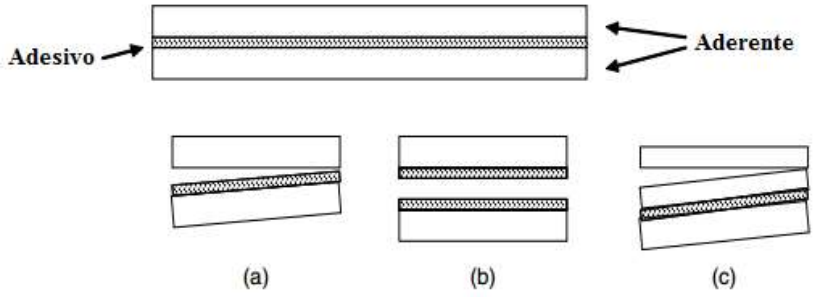


Figura 11 - Tipos de ruptura que podem estar presentes em uma junta colada. (a) Falha adesiva (b) Falha coesiva no adesivo (c) Falha coesiva no substrato. [15]

2.3 Juntas Graduadas

Para minimizar a concentração de tensões nas extremidades da sobreposição em juntas coladas, e fazer com que elas sejam mais uniformes, estudos vêm sendo realizados [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23] utilizando-se juntas adesivas graduadas onde as

propriedades mecânicas do adesivo variam ao longo do comprimento de sobreposição. Além disso, recentemente, Durodola *et al*. [24] realizaram uma revisão com os principais e recentes estudos envolvendo juntas adesivas funcionalmente graduadas.

Existem diversos modos para se obter uma junta adesiva graduada, entre eles, realizando-se uma cura graduada, em que a temperatura de cura varia com o comprimento de sobreposição. Para obtenção deste tipo de junta, o adesivo é aquecido pelo processo de indução nas zonas onde se tem maior concentração de tensão, e consequentemente, esta região obterá uma maior ductilidade e flexibilidade. [24]

Carbas *et al*. [16] obtiveram juntas adesivas funcionalmente graduadas, utilizando-se dois diferentes tipos de adesivos (Araldite® e Loctite Hysol®) aliado a um método de indução de calor oferecendo uma cura gradual ao longo da sobreposição. Verificou-se que a junta funcionalmente graduada obteve uma resistência na sobreposição mais elevada em comparação com os casos em que o adesivo é curado uniformemente a baixa ou alta temperatura.

Kumar [17] desenvolveu uma análise analítica simples para estudar a intensidade das tensões e sua distribuição em uma junta adesiva funcionalmente graduada baseada em um método variacional, que minimiza a energia complementar do sistema ligado. Foi observado que as concentrações de tensões de cisalhamento e arrancamento nas extremidades das juntas graduadas são muito menores quando, se comparado a uma junta adesiva não graduada.

Ademais, além da técnica da cura gradual ao longo da sobreposição para se criar um adesivo com diferentes propriedades mecânicas ao longo da sobreposição, um estudo recente [25] mostra uma técnica de modificação física do adesivo misturando-se partículas ao adesivo. Essa variação gradual pode ser obtida aplicando-se várias camadas de adesivo com diferentes quantidades de partículas e consequentemente variando as propriedades mecânicas ao longo da sobreposição criando-se uma junta gradual.

Carbas *et al*. também [25] desenvolveram juntas que foram fabricadas com adição de 20% em volume de dois tipos de nanopartículas de carbono (Monarch® 120 e Vulcan®) ao adesivo e juntas adesivas sem nanopartículas. Além disso, a cura foi realizada de duas formas: por aquecimento dielétrico e térmico. Foram, então, realizados ensaios de cisalhamento a fim de se comparar as propriedades mecânicas obtidas ao longo

da sobreposição quando se tem adição de nanopartículas de carbono (juntas graduadas) ou não (juntas não graduadas).

Carbas *et al*. [25] puderam concluir que as juntas não graduadas ou com ligação adesiva homogênea apresentaram um pior desempenho (maior carga de falha) se comparado às juntas graduadas. Além disso, as juntas graduadas com ligação reforçada com o adesivo Monarch® 120 e curadas por aquecimento térmico apresentaram um ganho de desempenho de aproximadamente 30% em relação às juntas coladas apenas com adesivo puro (sem nanopartículas).

Stapleton *et al*. [21] estudaram juntas adesivas funcionalmente graduadas do tipo *single-strap joints*, com substratos de material compósito, adicionando-se partículas de vidro em diferentes densidades, estrategicamente distribuídas, ao longo da sobreposição, tendo como principal objetivo a redução das tensões de arrancamento (Figura 12). Foram realizados testes estáticos a fim de se avaliar as propriedades mecânicas do adesivo em três diferentes situações: adesivo sem adição de partículas, partículas distribuídas de maneira uniforme ao longo da sobreposição e partículas distribuídas de forma gradual (Figura 13). Stapleton *et al*. [21] pôde concluir que a concentração da tensão de arrancamento encontrada em juntas adesivas pode ser reduzida utilizando-se um adesivo funcionalmente graduado.

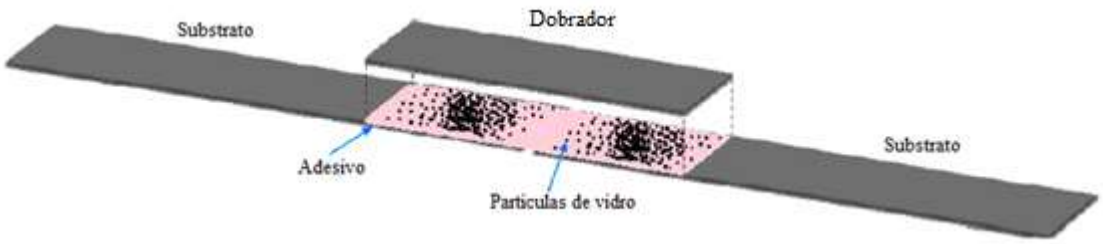


Figura 12 – *Single-strap joint* e partículas de vidro com o objetivo de testar o conceito da junta adesiva funcionalmente graduada. [21]

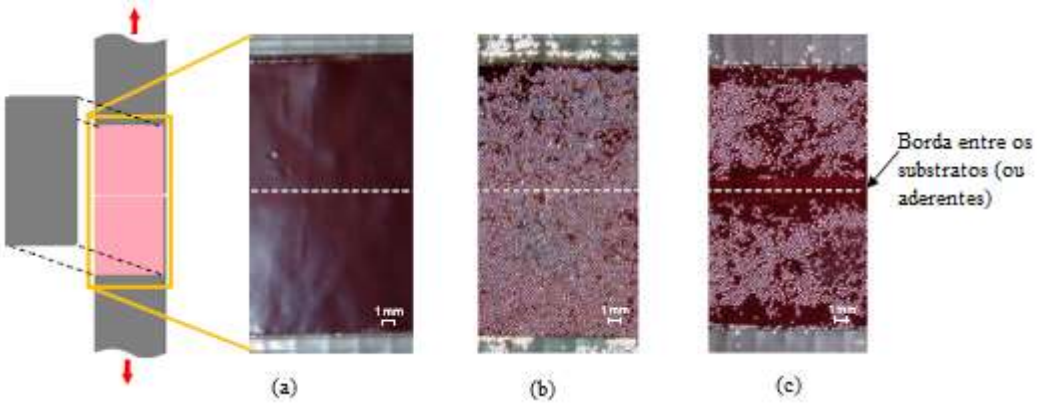


Figura 13 - Fotografias da camada adesiva antes do posicionamento do dobrador nas juntas (a) sem partículas, (b) partículas distribuídas de forma uniforme, e (c) partículas distribuídas de forma gradual. [21]

2.4 Adesivos modificados com Partículas Termicamente Expansíveis

Neste tópico foi feito uma breve introdução a respeito das Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs) seguido dos principais ensaios mecânicos envolvendo o uso de partículas e adesivo que podem ser encontrados na literatura e em recentes estudos.

2.4.1 Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs)

Partículas Termicamente Expansíveis (PTEs), microcápsulas ou microesferas foram desenvolvidas pela empresa *The Dow Chemical Company* no final de 1970 e são formadas por uma casca feita por um material termoplástico e um líquido hidrocarboneto, que funciona como um agente de expansão. Quando aquecidas, a casca amolece, ocorre a gaseificação do líquido contido no interior da partícula e com isso, há o aumento da pressão interna da partícula. Como consequência, a casca expande assim como o líquido interno, fazendo com que a partícula tenha o seu volume aumentado. [26, 27, 28, 29]

Ademais, estas partículas são utilizadas pela indústria, principalmente, para redução do peso e melhoria da aparência para termoplásticos, tintas e revestimentos. Recentemente, estas partículas foram utilizadas em juntas coladas para fins de reciclagem. Contudo, a desmontagem para reciclar é apenas uma das possibilidades que foi estudada. PTEs podem ser utilizadas para modificar adesivos estruturais para novos

fins, tais como: para aumentar a resistência da junta através da criação de um adesivo funcionalmente modificado ao longo da sobreposição (juntas graduadas) e/ou para auto-reparação do adesivo em caso de danos. [30, 26, 27, 28, 29]

Os fatores que determinam, por exemplo, a expansibilidade térmica das microcápsulas ou partículas são a volatilidade do agente encapsulado, a permeabilidade do gás, a viscoelasticidade da casca polímerica e a espessura da mesma. [31]

As partículas utilizadas neste trabalho possuem dimensões entre 10µm e 16µm. A expansão máxima pode ocorrer em temperaturas entre 70°C e 275°C, quando chegam ao seu volume máximo, podem chegar a um valor 50 a 100 vezes maior que o inicial e a um diâmetro de 3 a 5 vezes maior. Quando o calor é removido, a partícula enrijece e permanece na sua forma de expansão com diâmetro podendo chegar a 200µm, conforme mostrado na Figura 14. [26, 27, 28, 29]

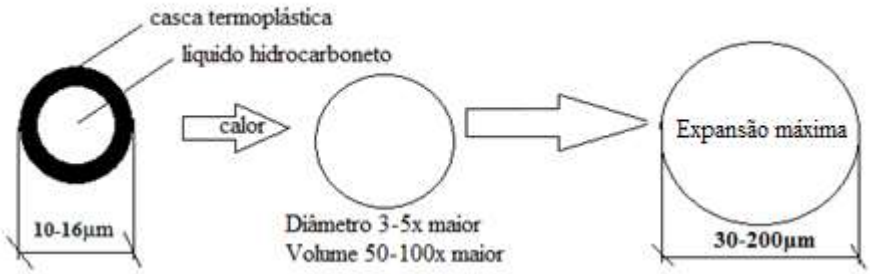


Figura 14 - Modelo esquemático exemplificando o mecanismo de expansão da partícula. [32]

As PTEs podem ser utilizadas para descolagem de juntas quando combinadas a um método de aplicação de calor. Em estudos propostos por *Nishiyama* e *Sato*, uma junta adesiva pode ser facilmente descolada em temperaturas acima de 100°C, como visto na Figura 15. [32, 33]

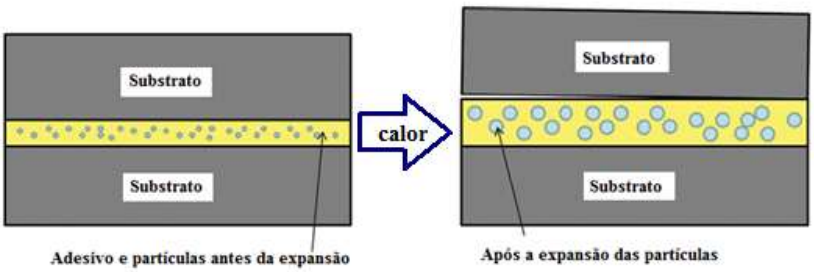


Figura 15 - Desenho esquemático do mecanismo de separação da junta. [32]

Kawaguchi e Oishi estudaram quanto à sua densidade de reticulação e propriedades expansíveis, partículas com tamanho entre 17,4µm e 25,4µm. Foi necessária uma proporção de aumento entre 20-25 para as partículas atingirem sua expansão máxima sem ocorrer ruptura. [34]

Masuda *et al*. estudaram partículas com uma média de tamanho entre 1µm e 100µm, que foram aquecidas e a uma temperatura não inferior à sua temperatura inicial de expansão, que contêm menos de 5% em peso de microesferas agregadas e coeficiente de expansão igual a 100%. [35]

Em outro estudo de Kawaguchi *et al*., foram utilizadas partículas com dimensões entre 10µm e 40µm. Para avaliar a capacidade de expansão das partículas, foi realizada uma Análise Termomecânica (TMA) e para se obter as propriedades viscoelásticas, foram calculados o módulo de armazenamento (G') e o módulo de perda (G''). Além disso, foram obtidas imagens, via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), antes e após a expansão das partículas. De acordo com a Figura 16, abaixo, pode-se observar que, antes da expansão, o diâmetro médio é de 20µm e a densidade, entre 1 e 1,1 g/cm^3. Após a expansão, o diâmetro aumentou para 100µm e a densidade foi reduzida para entre 0,002 e 0,02 g/cm^3. [31]

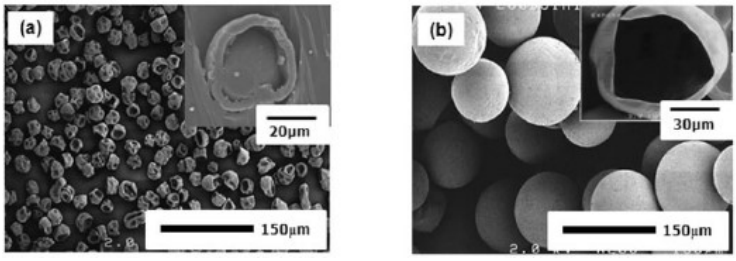


Figura 16 – Imagens obtidas via MEV das partículas termicamente expansíveis. (a)

Antes da expansão (densidade entre 1 e 1,1 g/cm^3). (b) Após a expansão (densidade entre 0,002 e 0,02 g/cm^3). [31]

Fujino *et al.*, desenvolveram um modelo matemático para descrever o comportamento de expansão das partículas presentes no ar e em uma matriz polimérica. O modelo foi utilizado para determinar os fatores fundamentais no aumento da expansão das partículas quando submetidas a determinadas temperaturas. Foram levados em conta, para obtenção do modelo, as propriedades viscoelásticas da casca polimérica e a capacidade de evaporação do gás e o comportamento de difusão do líquido hidrocarboneto no interior da partícula. Vide Figura 17 esquemática, abaixo, da estrutura da partícula para obtenção do modelo matemático. [36]

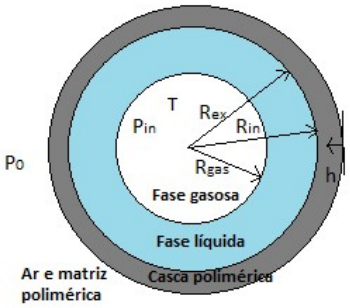


Figura 17 - Estrutura esquemática da partícula. [36]

Hu *et al.*, estudaram os tamanhos das microesferas e a distribuição de tamanho das partículas termicamente expansíveis em quatro diferentes amostras contendo diferentes proporções de três tipos de monômeros. Foram realizadas Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIV) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) a fim de se caracterizar, principalmente, a morfologia das microcápsulas obtidas, como pode ser observado na Figura 18 abaixo. [37]

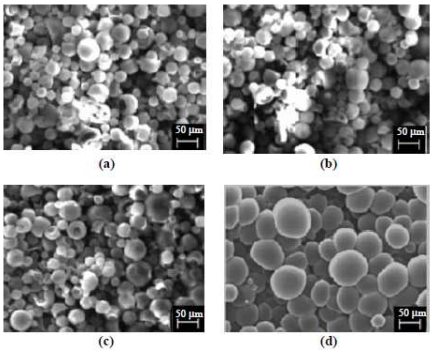


Figura 18 – (a) MC01 antes da expansão (b) MC01 após a expansão a 180°C durante 2 minutos (c) MC02 antes da expansão (d) MC02 após a expansão a 180°C durante 2 minutos. [37]

Banea *et al*. estudaram PTEs, em diferentes proporções por peso, misturadas a adesivos estruturais: Betamate^{TM}2098 (fabricado por Dow Automotive, Dow Europe, Suíça) e/ou SikaForce®7888 (fabricado por Sika, Portugal). Na Figura 19 abaixo encontram-se as imagens obtidas via MEV das partículas isoladas, misturadas a matriz adesiva e sua seção transversal antes e após a expansão. [26, 27, 28, 29] Na Figura 20, mostram-se imagens, também via MEV, de uma amostra com adesivo puro e outra com 15% em peso de partículas. [38]

Ademais, mostra-se na Figura 21 imagens de morfologias de amostras térmicas a diferentes temperaturas, antes dos ensaios, com expansão máxima (T_{max} = 100 °C) e depois de ensaios a 150 ° C. Pode ser observado que acima da temperatura à máxima expansão (T_{max} = 100 ° C), as partículas começam a deteriorar-se. A degradação da casca polimérica é um parâmetro que não pode ser negligenciado quando se utilizam adesivos modificados com PTEs em algumas aplicações, uma vez que são por vezes necessárias temperaturas de cura superiores a 100°C ou as juntas adesivas são expostas a temperaturas elevadas em serviço. [29]

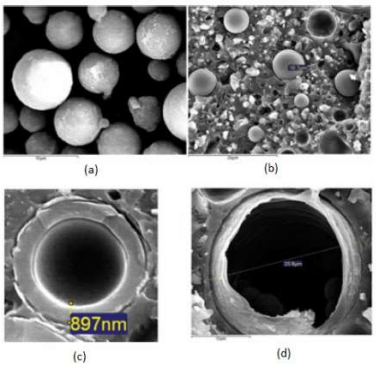


Figura 19 - (a) Partículas isoladas (b) Partículas misturadas a uma matriz adesiva (c) Seção transversal da partícula antes da expansão (d) Seção transversal da partícula após a expansão. [27]

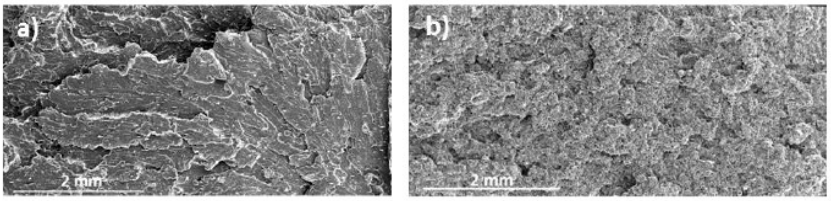


Figura 20 – Imagens via MEV. (a) Amostra adesiva sem a presença de partículas. (b) Amostra adesiva contendo 15% em peso de partículas. [38]

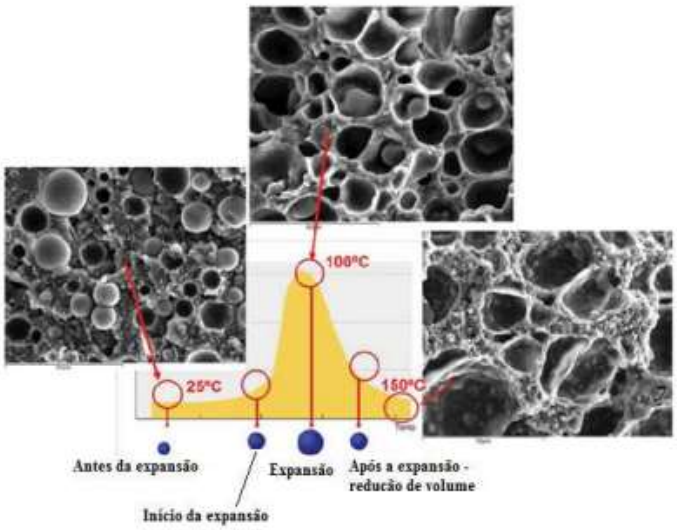


Figura 21 - Análise de imagens, através de MEV, do comportamento das partículas em diferentes temperaturas. [29]

2.4.2 Efeito das partículas nas propriedades mecânicas dos adesivos

Os ensaios com adesivos são utilizados para a determinação das propriedades à tração, ao cisalhamento e à compressão. No caso de ensaios de tração, estes devem obedecer à norma francesa NF T 76-142 [26], que especifica que o corpo de prova deve ter o formato de um "osso de cão", com as dimensões indicadas na Figura 22. [39]

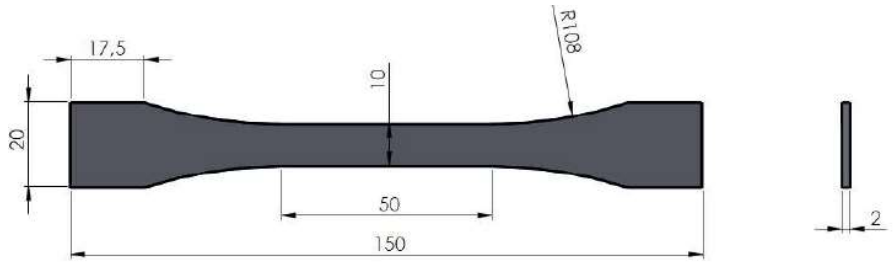


Figura 22 - Dimensões do corpo de prova pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm). [39]

Em estudo de 2014 proposto por Banea *et al.* [28], foram fabricados corpos de prova do tipo "osso de cão" (Figura 23) utilizando-se um adesivo estrutural a base de poliuretano misturado a PTEs com diferentes concentrações em peso (0%, 5% e 10%). Ensaios de tração foram realizados em amostras com e sem adição de PTEs com o objetivo se se obter as propriedades mecânicas dos adesivos, enquanto testes DCB (Double Cantilever Beam) foram realizados com o intuito de se analisar a resistência ao modo I de carregamento.



Figura 23 – Amostras "osso de cão" (a) antes (b) e após realização dos testes de tração. [28]

Banea *et al.* puderam concluir, de um modo geral, que a tenacidade do adesivo aumenta com a adição de PTEs. Porém, foi observado também uma diminuição significativa na resistência do adesivo com o aumento da % em peso de PTEs. Isso pode ser explicado, principalmente, devido ao fato das PTEs ocuparem um certo volume e atuarem como concentradores de tensão, fazendo com que a estrutura adesiva sofra drásticas alterações. [28, 29]

Banea *et al*. [26, 27] estudaram, quanto às suas propriedades mecânicas, juntas de sobreposição simples contendo um adesivo estrutural (Betamate™2098 e SikaForce®7888), misturado a PTEs. As dimensões das juntas podem ser observadas na Figura 24.

Foram realizados ensaios de tração e modos de falha foram avaliados de forma visual. Ao menos três juntas com diferentes quantidades de partículas foram estudadas (0, 5, 10, 15, 20 e 25%).

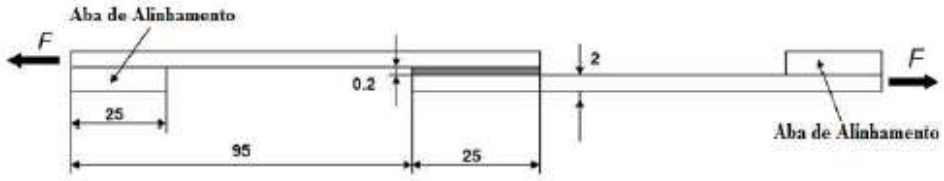


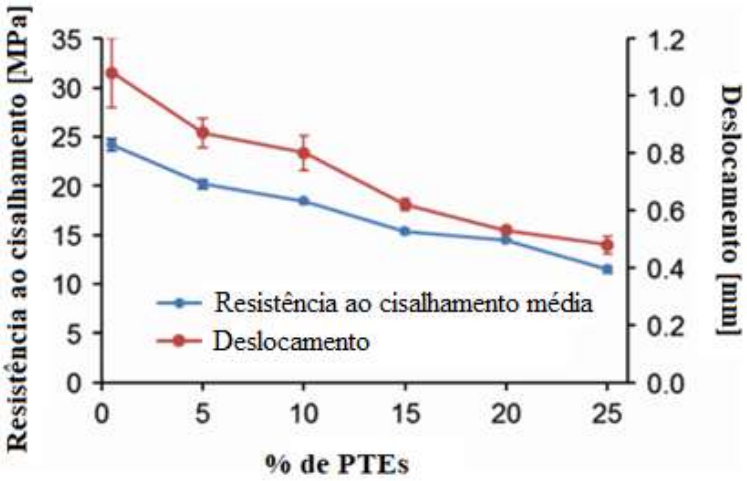
Figura 24 – Amostra com dimensões em mm. [26, 27]

Com isso, Banea *et al*. concluíram que a resistência ao cisalhamento das juntas com o adesivo SikaForce®7888, na condição com 5% de PTEs diminuiu, aproximadamente, 16% em comparação com as amostras com adesivos sem partículas (i.e. 0% de PTEs), para as amostras com 10% de PTEs, a resistência diminuiu em aproximadamente 24%, enquanto os testes com amostras com 15% de PTEs mostraram uma redução da resistência ao cisalhamento em aproximadamente 36%. Finalmente, para 20 e 25% em peso de partículas, a redução foi de aproximadamente 40% e 53%, respectivamente, como mostrado na Figura 25 (a). [26]

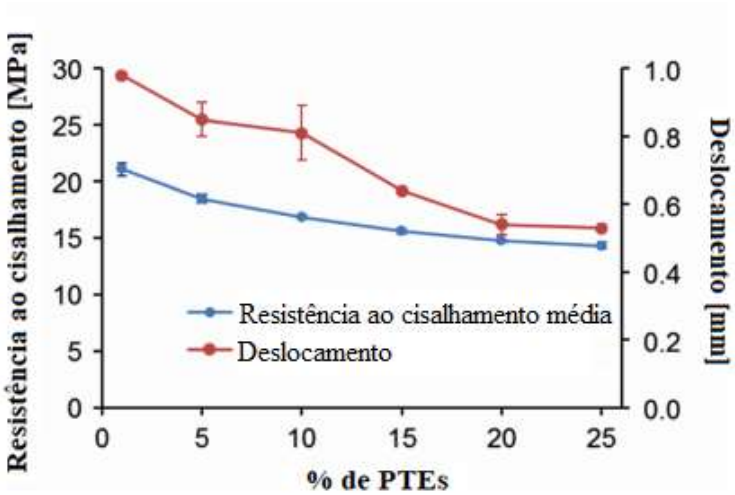
Já para o adesivo Betamate™2098, na condição com 5% de PTEs, pôde-se concluir que a resistência ao cisalhamento, diminuiu 14% em relação as amostras sem adição de partículas (i.e. 0% de PTEs), para as amostras com 10% de PTEs, a resistência diminuiu em aproximadamente 21%, enquanto os testes com amostras com 15% de PTEs

mostraram uma redução da resistência ao cisalhamento em aproximadamente 27%. Para as condições com 20 e 25% em peso de partículas, a redução foi de aproximadamente 31% e 33%, respectivamente, como mostrado na Figura 25 (b). [26]

Pôde-se, então, concluir que as propriedades mecânicas dependem diretamente da % de PTEs utilizada, para ambos adesivos investigados.



(a) Adesivo Sikaforce®7888



(b) Adesivo Betamate™2098

Figura 25 – Resistência ao cisalhamento média e deslocamento das juntas de sobreposição simples. [26]

2.4.3 Análise da descolagem

Em estudos recentes propostos por Banea *et al*., no que concerne a utilização de juntas coladas, a avaliação da descolagem foi realizada expondo as juntas de sobreposição simples a um campo eletromagnético (as amostras foram expostas ao calor através de um

método de indução eletromagnético), vide Figura 26. A maior vantagem da técnica de indução de calor é que o calor pode ser concentrado em um ponto mais especifico da camada adesiva. [26, 27]



Figura 26 - Configuração de teste para descolagem, com temperatura controlada. [26, 27]

Quando configurado corretamente, o processo se torna bastante repetitivo e controlável. As amostras foram colocadas no dispositivo dentro da bobina de indução e uma carga de 100 N foi aplicada. O perfil de aquecimento foi medido utilizando-se uma câmera termográfica. Esta configuração permite determinar diretamente as temperaturas às quais os adesivos modificados são submetidos. Quando a fonte de alimentação é ligada, o temporizador é iniciado para medir o tempo de falha para cada junta testada. [26, 27]

O procedimento seguido utilizado para avaliação da descolagem está resumido no esquema apresentado na Figura 27, abaixo. Se a junta "falhou", então os parâmetros de descolamento (isto é, temperatura e tempo até a falha) foram medidos. Se a junta não "falhou", a tensão residual foi medida. Pelo menos três juntas foram testadas para cada % em peso de PTEs (0 a 25 %). [26, 27]



Figura 27 - Representação esquemática do procedimento de avaliação de descolagem das juntas. [26, 27]

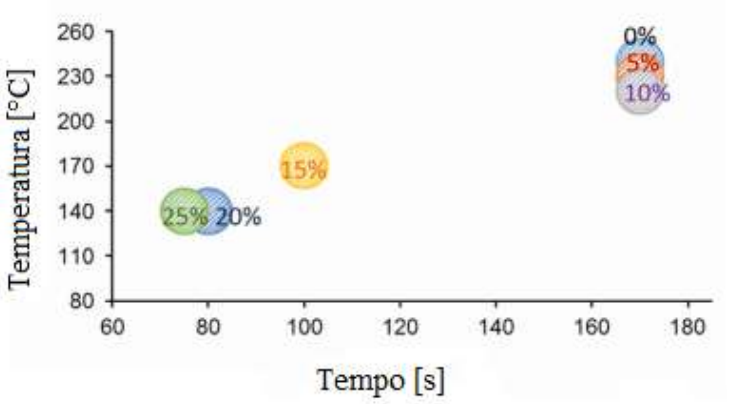
Banea *et al*. [26] verificaram que uma taxa de aquecimento demasiadamente elevada não permite que as partículas se expandam e consequentemente separem a junta, pois com 40 kA a descolagem ocorreu a 240°C após 40 segundos, devido à degradação térmica adesiva, enquanto que com 30 kA a junta falhou a 140°C após 80 segundos. Por outro lado, com apenas 20 kA, aproximadamente 7 minutos foram necessários para a descolagem das juntas. Assim, o equipamento foi configurado para 30 kA e a frequência do campo eletromagnético para 360 kHz.

A influência da espessura da junta adesiva foi investigada testando-se 20% em peso de PTEs misturado ao adesivo Sika-Force®7888 (a base de poliuretano) com 1,5 mm e 2 mm de espessura. A temperatura de descolagem foi idêntica para as duas espessuras de adesivo estudadas, sendo como única diferença o tempo de falha. A descolagem com o adesivo de espessura de 1,5 mm ocorreu após 60s, enquanto que para a de 2 mm, a junta falhou após 80s. [26]

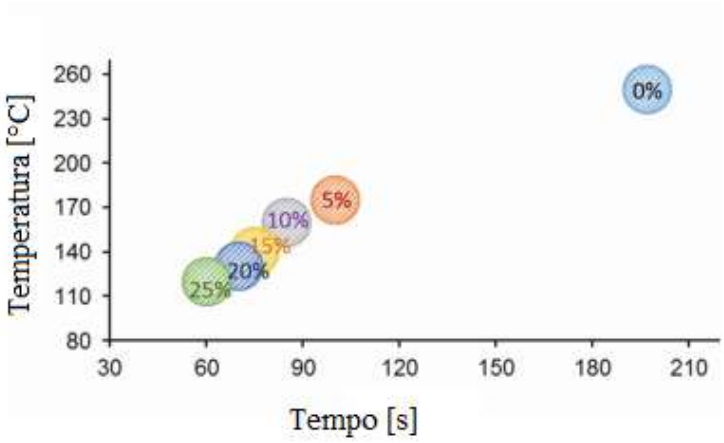
Banea *et al*. [26] puderam, então, concluir que isto já era esperado pois a transferência de energia do aquecimento por indução depende da profundidade de penetração. Assim, a espessura do adesivo irá influenciar diretamente na transferência de calor para o adesivo a fim de se produzir a expansão de PTEs, tendo como resultado o tempo de descolagem.

Pode-se observar na Figura 28, gráficos temperatura em função do tempo para cada condição (sem e com PTEs). A descolagem das juntas, para as condições sem adição

de PTEs, só foi possível com aquecimento por indução, a 230°C para o adesivo SikaForce®7888, e a 250°C para o adesivo Betamate™2098. [26]



(a) SikaForce®7888



(b) Betamate™2098

Figura 28 – Testes de avaliação de descolagem. [26]

Além disso, pôde-se observar que, a adição de 5% e 10% em PTEs no adesivo SikaForce®7888 mostrou que um insignificante efeito da temperatura de descolagem, que permaneceu quase a mesma para as juntas sem adição de PTEs (~230ºC). Já para juntas com 15% em PTEs, a temperatura de descolagem diminuiu para, aproximadamente, 170°C. E finalmente, para juntas com 20% e 25% de PTEs, a descolagem ocorreu a 140°C.

Assim sendo, pôde-se concluir que para este adesivo (SikaForce®7888), as ótimas condições para descolagem de juntas são: para condições com mais de 20% em PTEs e temperatura de descolagem acima de 140ºC. [26]

Em contraste com o adesivo SikaForce®7888, com a adição de 5% e 10% em PTEs no adesivo Betamate™2098, a temperatura de descolagem e o tempo decresceram.

Para 5% de PTEs, a temperatura de descolagem foi igual a 175°C. Para 10%, igual a 160°C. Com 15% de PTEs, a descolagem das juntas ocorreu a temperatura de 145°C, enquanto para 20% em PTEs, a 130°C.

Finalmente, para 25% em PTEs, a descolagem ocorreu a uma temperatura de 120°C em 60 segundos. Pôde-se, então, concluir que, para o adesivo Betamate™2098, as as ótimas condições para descolagem de juntas são: para condições com mais de 15% em PTEs e temperatura de descolagem acima de 120ºC. [26]

Capítulo 3 – Metodologia Experimental

Seguem abaixo, em tópicos, todos os materiais utilizados neste projeto e a metodologia realizada.

3.1 Materiais

3.1.1 Adesivos

Neste projeto foram utilizados um adesivo estrutural poliuretano de dois componentes, SikaForce®7888 (desenvolvido pela Sika, Portugal), um adesivo também estrutural de dois componentes, mas do tipo epóxi, Betamate™2096 (desenvolvido por Dow Europe, Suíça), para os ensaios de tração em juntas de sobreposição simples, Double Cantilever Beam (DCB) e ensaio de flexão em quatro pontos. Na Tabela 4 abaixo, encontram-se as propriedades mecânicas, fornecidas pelos próprios fabricantes, de ambos adesivos.

Estes adesivos são utilizados na indústria automobilística e fazem parte de uma nova geração de adesivos que combinam dois quesitos: alta resistência e deformação. Testes de tração já foram realizados anteriormente [28, 29] em amostras do tipo "osso de cão" com o objetivo de se obter suas propriedades de tração, como mostrado na Figura 29 abaixo.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos adesivos oferecidos pelo próprio fabricante.

Adesivo	Resistência ao arrancamento (N/mm)	Módulo de Young (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação (%)
Betamate™2096	6	1,7	29	9
SikaForce®7888	20	2,5	30	46

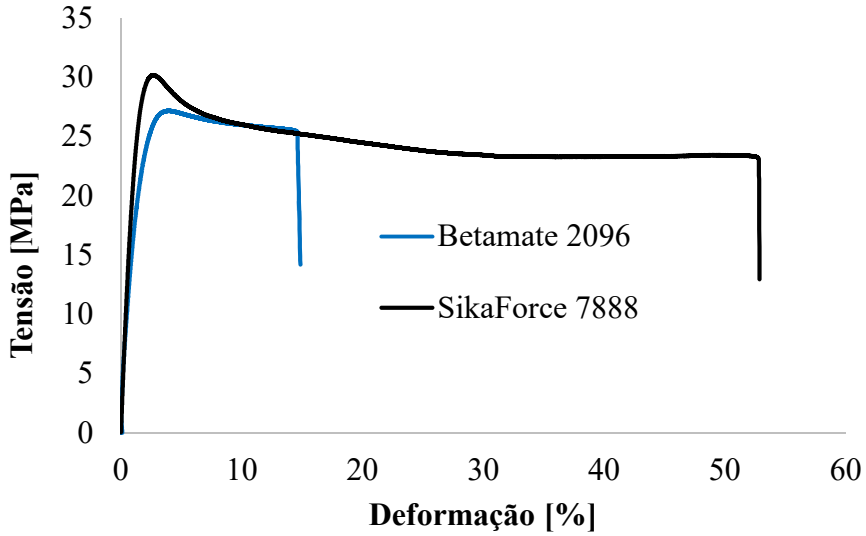


Figura 29 – Curva Tensão *versus* Deformação dos adesivos Betamate™2096 e SikaForce®7888. [28, 29].

3.1.2 Partículas Termicamente Expansíveis

Foram selecionadas microesferas *Expancel 031 DU 40*, fabricadas pela *Expancel Nobel Industries* (Suécia). De acordo com o próprio fabricante, o diâmetro destas partículas varia entre 10 e 16 µm e possuem densidade inferior a 12 kg/cm^3. Na Tabela 5 abaixo podem ser encontrados dados adicionais fornecidos pela empresa.

Tabela 5 - Dados característicos das partículas Expancel 031 DU 40.

Tamanho da partícula (µm)	10-16
$T_{início}$ [(a)] (°C)	80-95
$T_{máximo}$ [(b)] (°C)	120-135

Nota:

[(a)] = Temperatura a qual as partículas começam a expandir.

[(b)] = Temperatura a qual as partículas atingem a expansão máxima.

3.2 Manufatura dos corpos de prova

Todos os corpos de prova (DCB e juntas de sobreposição simples), foram fabricados no Laboratório de Adesivos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), em Portugal.

3.2.1 Double Cantilever Beam (DCB)

Para o ensaio DCB, foram utilizados substratos de aço duro DIN 40CrMnMo7 com o objetivo de se garantir um comportamento elástico dos aderentes. As propriedades mecânicas dos substratos são dadas na Tabela 6, abaixo. Em um estudo anterior proposto por Banea *et al*. [28], foram realizados ensaios DCB para o adesivo SikaForce®7888 com o objetivo de se avaliar a resistência ao modo I de propagação de trinca em amostras sem adição de partículas (adesivo puro) e com adição de partículas (0%, 5%, 10% e 15%). Portanto, neste trabalho foram realizados apenas ensaios DCB utilizando-se o adesivo Betamate™2096.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos substratos de aço duro.

Resistência à tração [MPa]	1000-1068
Limite de escoamento [MPa]	861-930
Deformação [%]	14-17
Módulo de Young, E [GPa]	205

As superfícies dos corpos de prova DCB passaram pelo processo de jateamento com partículas de sílica, vide Figura 30, e em seguida limpas com acetona para posterior aplicação do adesivo Betamate™2096. A geometria do corpo de prova e a posição dos carregamentos podem ser visualizados na Figura 31 abaixo. O adesivo possui espessura igual a 0.2 mm, e para tal foram inseridos espaçadores entre os aderentes antes da aplicação do mesmo com o objetivo de controlar essa espessura.



Figura 30 – Máquina jateadora.

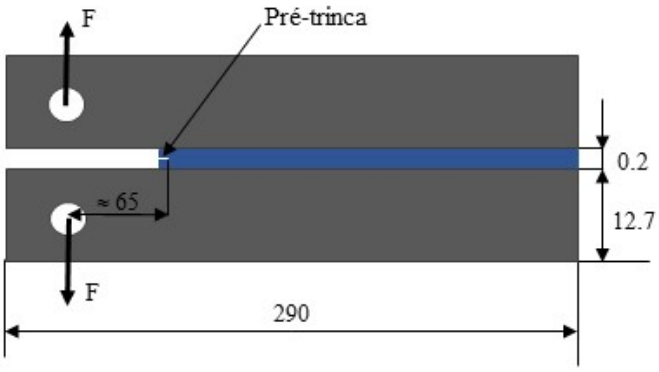


Figura 31 – Geometria do corpo de prova DCB (dimensões em mm).

As amostras de DCB foram curadas durante sete dias em temperatura ambiente. Ao menos três juntas DCB foram manufaturadas para cada % em peso de PTEs (0%, 5% e 10%). Não foram utilizadas amostras com mais de 10% de PTEs, como no trabalho anterior [28], pois após 10% de PTEs, não foram encontradas significativas diferenças na energia específica de fratura em modo I (G_{IC}).

Finalmente, após a cura completa do adesivo, os espaçadores foram removidos. Um molde foi utilizado para o correto alinhamento dos substratos [40], vide Figura 32 abaixo. Para a pré-trinca, foi posicionada uma lâmina de 0.2 mm entre os dois aderentes.

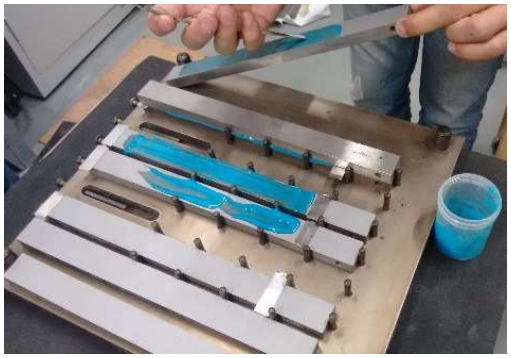


Figura 32 – Molde utilizado para a confecção dos corpos de prova DCB.

3.2.2 Juntas de sobreposição simples

Foram fabricadas juntas de sopreposição simples para os testes de tração e flexão em quatro pontos, utilizando-se substratos de aço de alta resistência DIN 55Si7 tratado, caracterizados por possuir alta resistência à tração, com 2 mm de espessura e 25 mm de largura. Os substratos possuem um Módulo de Young igual a 210GPa, 1100 Mpa de limite de escoamento e 0,3 de coeficiente de Poisson.

As superfícies das juntas foram jateadas com partículas de sílica e limpas com acetona antes da aplicação do adesivo. Todas as amostras foram curadas for sete dias a temperatura ambiente. Um molde de alumínio foi utilizado para o correto alinhamento das juntas [40], vide Figura 33. A espessura do adesivo foi garantida com a presença de espaçadores.

O adesivo sem e com adição de partículas foram misturados na máquina SpeedMixer (DAC 150.1 FVZ Speedmixer, Hauschild, Alemanha) por 60s a 2500 ver/min, como mostrado na Figura 34 abaixo. Isso permitiu uma eficiente e dispersão homogênea, criando-se uma mistura livre de bolhas [38]. Todas as amostras foram manufaturadas de acordo com a norma ASTM D1002.

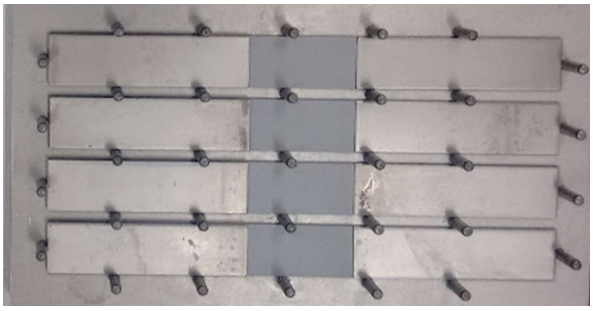


Figura 33 – Molde de alumínio utilizado na fabricação das juntas de sobreposição

simples.



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

3.2.2.1 Ensaio de tração

No ensaio de tração em juntas de sobreposição simples, foi utilizado o adesivo Betamate™2096 com 0.2 mm de espessura de adesivo e 50 mm de tamanho de sobreposição, como mostrado na Figura 35.

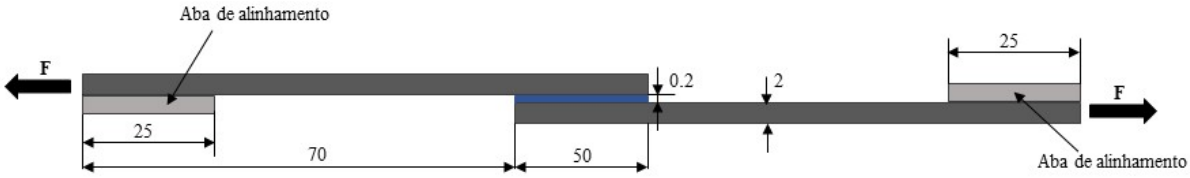


Figura 35 – Geometria da junta colada para o ensaio de tração em juntas de sobreposição simples (dimensões em mm).

Foram fabricadas pelo menos três juntas com diferentes porcentagens em peso de PTEs (0%, 1% e 5%), nas condições graduada e homogênea, como mostrado na Figura 36. A aplicação do adesivo foi feita com auxílio de uma espátula (Figura 37), garantindo-se a distribuição do adesivo com diferentes % em peso de PTEs ao longo da sobreposição, em camadas equidistantes umas das outras, como mostrado nas Figura 38.

A fim de se obter uma maior uniformidade de tensões ao longo da sobreposição, para as juntas graduadas, foram utilizadas maiores concentrações de PTEs (5% e 1%) nas extremidades com maiores de concentradores de tensões e menos % de PTEs conforme se aproxima do centro da junta.

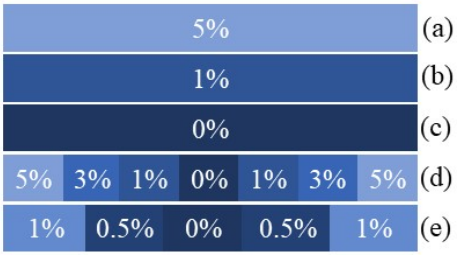


Figura 36 – Distribuição da % em peso de PTEs ao longo da sobreposição. (a) Condição homogênea com 0% de PTEs (b) Homogênea com 1% de PTEs (c) Homogênea com 0% de PTEs (d) Graduada com 5% de PTEs (e) Graduada com 1% de PTEs.



Figura 37 – Aplicação do adesivo com diferentes % em peso de PTEs.

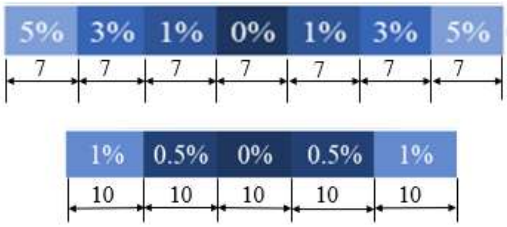


Figura 38 - Espaçamento entre as camadas com diferentes % de PTEs para as juntas nas condições graduadas, 1% e 5% de PTEs (dimensões em mm).

Em projetos anteriores [26, 27], já foram testadas juntas de sobreposição simples utilizando-se os adesivos Betamate™2096 e SikaForce®7888, com 25 mm de tamanho de sobreposição com diferentes porcentagens em peso de PTEs (0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 25%), a fim de se analisar o processo de descolagem das juntas.

Além disso, o uso de um tamanho de sobreposição igual a 50 mm está relacionado, principalmente, ao fato de que para juntas de sobreposição simples com comprimento de sobreposição menores (12,5 mm e 25 mm), a fratura da junta está diretamente relacionada

às propriedades do adesivo utilizado. Já para maiores comprimentos de sobreposição (50 mm), a fratura da junta se deve à concentração de tensão nas extremidades, por isso o uso de um adesivo funcionalmente graduado neste ensaio.

Ademais, foram utilizadas juntas com até 5% em peso de PTEs, pois em estudos anteriores [26, 27], para o adesivo Betamate™2098, foram encontrados um decréscimo significativo na resistência do adesivo com o aumento da % em peso de PTEs. Isto se deve ao fato de que as partículas ocupam volume e mudam a estrutura do adesivo ou alteram as características da área colada. Vale ressaltar que este adesivo (Betamate™2098) possui propriedades bastante semelhantes ao adesivo Betamate™2096 (Tabela 7).

Tabela 7 – Propriedades mecânicas dos adesivos Betamate™2096 e Betamate™2098.

Adesivo	Resistência ao cisalhamento (MPa)	Resistência ao arrancamento (N/mm)	Módulo de Young (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação (%)
Betamate™2096	18	6	1700	29	9
Betamate™2098	23	9	1100	22	20

3.2.2.2 Ensaio de flexão em quatro pontos

Para o ensaio de flexão em juntas de sobreposição simples, foram manufaturadas juntas com o adesivo SikaForce®7888 com dois tamanhos de sobreposição (12,5 mm e 25 mm), e com o adesivo Betamate™2096, utilizando-se apenas um tamanho de sobreposição (25 mm), como mostrado na Figura 39.

Foram utilizadas juntas contendo diferentes % em peso de PTEs (0%, 5%, 10% e 20%), para as condições homogênea e graduada, como mostrado na Figura 40.

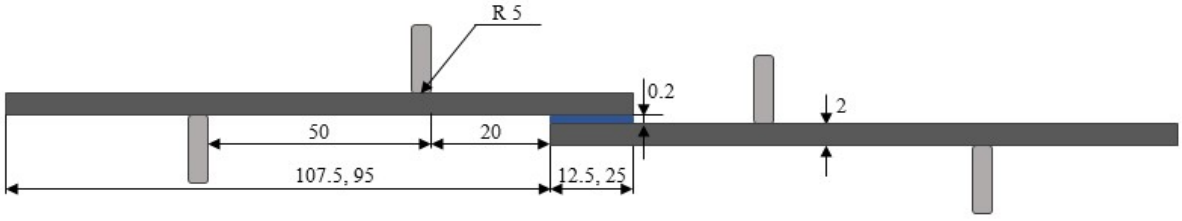


Figura 39 - Geometria da junta colada para o ensaio de flexão em quatro pontos (dimensões em mm).

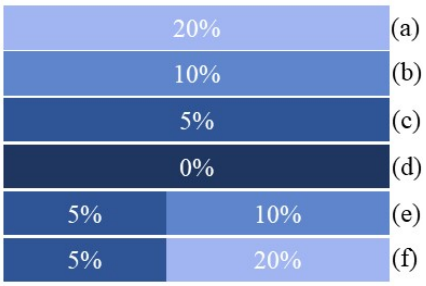


Figura 40 - Distribuição da % em peso de PTEs ao longo da sobreposição. (a) Condição homogênea com 20% de PTEs (b) com 10% de PTEs (c) com 5% de PTEs (d) com 0% de PTEs (e) Graduada com 10% de PTEs (d) Graduada com 20% de PTEs.

Para as juntas graduadas, a aplicação do adesivo foi feita com auxílio de uma espátula tentando-se garantir um determinando comprimento entre as duas misturas (5% mais 10% ou 20%), como mostrado na Figura 41.

A fim de se obter uma maior uniformidade de tensões ao longo da sobreposição, para as juntas graduadas, foram utilizadas menores % de PTEs na extremidade sob tração (5%) e maiores % de PTEs na extremidade sob compressão (10 e 20%).

Além disso, em estudos anteriores [26], para os adesivos Betamate™2098 e SikaForce®7888, foi concluído que a condição ótima para descolagem é utilizando-se mais de 15% de PTEs.

Ademais, em estudos recentes [29, 28] foi observado um aumento significativo da ductilidade para juntas com 5% de PTEs, com os adesivos Betamate™2098 e SikaForce®7888.

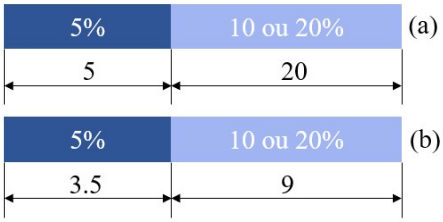


Figura 41 – Espaçamento entre as camadas com diferentes % de PTEs para as juntas graduadas. (a) 25 mm (b) 12,5 mm de sobreposição (dimensões em mm).

Por fim, o principal objetivo na escolha destas combinações foi obter um adesivo que possa oferecer uma maior uniformidade de tensões ao longo da sobreposição,

principalmente devido ao fato de que neste ensaio, os maiores concentradores de tensão estão localizados na extremidade da junta sob tração.

3.3 Ensaios

3.3.1 Double Cantilever Beam (DCB)

O ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB) foi conduzido a temperatura ambiente com uma velocidade constante de 0.2 mm/min, e foi realizado no laboratório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Portugal. Foi utilizada a servo-hidráulica INSTRON, Norwood-EUA, modelo 3367, que possui 30 kN de carga máxima. Foram testados quatro corpos de prova para cada condição (0%, 5% e 10% de PTEs). Na Figura 42 abaixo pode ser visto o posicionamento do corpo de prova na máquina. Para este ensaio, foi seguida a norma D3433-99.



Figura 42 – Ensaio DCB.

Vale lembrar que as partículas misturadas ao adesivo, para o ensaio DCB, foram distribuídas de forma homogênea ao longo do corpo de prova. O objetivo deste ensaio foi obter as propriedades do adesivo Betamate™2096 em modo I de carregamento.

3.3.2 Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples

O ensaio de tração em juntas de sobreposição simples foi realizado no laboratório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Portugal, e foi conduzido a temperatura ambiente com uma velocidade constante de 1 mm/min utilizando-se também

a máquina INSTRON, Norwood-EUA, modelo 3367. Na Figura 43, abaixo é possível visualizar o posicionamento da junta colada na máquina durante o ensaio. O teste foi realizado de acordo com a norma ASTM D 1002.

Para este teste foram utilizadas juntas de 120 mm de comprimento e comprimento de sobreposição igual a 50 mm. Foram testadas pelo menos 3 amostras para cada condição: homogênea (0, 1 e 5% de PTEs) e graduada (1 e 5% de PTEs).



Figura 43 - Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples.

3.3.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

O ensaio de flexão em quatro pontos também foi realizado no laboratório da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em Portugal, e foi conduzido a temperatura ambiente com uma velocidade constante de 5 mm/min utilizando-se também a máquina INSTRON, Norwood-EUA, modelo 3367. Foram utilizados quatro cilindros de contato com um raio de 5 mm cada, seguindo-se a norma ASTM E855.

Para este teste foram utilizadas juntas de 120 mm de comprimento e comprimento de sobreposição igual a 25 mm (para os adesivos Betamate™2096 e SikaForce®7888) e de 12,5 mm (para o adesivo SikaForce®7888).

Foram testadas pelo menos 3 amostras para cada condição, para cada adesivo e para cada tamanho de sobreposição: condição homogênea (0, 5, 10 e 20% de PTEs) e graduada (10 e 20% de PTEs).

Capítulo 4 – Resultados e discussões

4.2 *Double Cantilever Beam* (DCB)

4.2.1 Modos de falha

Após o ensaio DCB, todas as superfícies das amostras foram analisadas visualmente. Não houve deformação plástica nos substratos e todas as amostras apresentaram falhas do tipo coesiva, como mostrado na Figura 44 abaixo.



Figura 44 – Modos de falha das amostras DCB.

4.2.2 Efeito da % de PTEs em modo I de carregamento

A partir dos quatro corpos de prova DCB ensaiados para cada condição (0%, 5% e 10%), obtiveram-se curvas, representativas, da força-deslocamento em função da % em peso de PTEs (Figura 45). Pode-se observar que a carga máxima se deu à condição com 5% de PTEs, quase se igualando a condição sem adição de partículas. Além disso, foi observado um aumento do deslocamento para as condições a 5% e 0% em peso de PTEs, em relação a condição com 10% de PTEs.

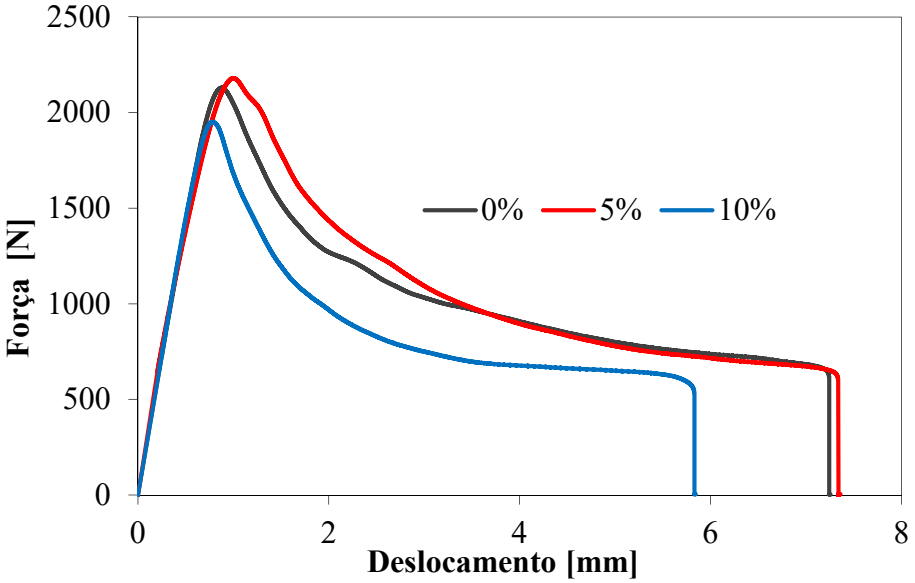


Figura 45 – Curvas, representativas, força-deslocamento em função da % de PTEs para o adesivo Betamate™2096.

A energia crítica de fratura em modo I, G_{IC}, foi encontrada utilizando-se o método *Compliance Based Beam Method* (CBBM), que foi desenvolvido por Moura *et al*. [41, 42], e é baseado na utilização do conceito de comprimento de fenda equivalente, calculado a partir da flexibilidade do corpo de prova durante o ensaio. A principal vantagem deste método é a não necessária monitorização do comprimento de fenda durante o ensaio.

G_{IC} pode ser obtido a partir da expressão:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{b^2 h}\left(\frac{2a_{eq}^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G}\right) \quad (1)$$

Onde 'a_{eq}' é o comprimento de fenda equivalente (diferente do comprimento de fenda real), 'b' é a largura do corpo de prova, 'h' a sua altura, E_f o módulo de flexão corrigido para explicar todos os fenômenos que afetam a curva força-deslocamento, assim como as concentrações de tensão na ponta da fenda e a variabilidade de rigidez entre os corpos de prova. G é o módulo de cisalhamento.

Curvas-R, representativas, que mostram o crescimento da trinca em função da % de PTEs podem ser observadas na Figura 46.

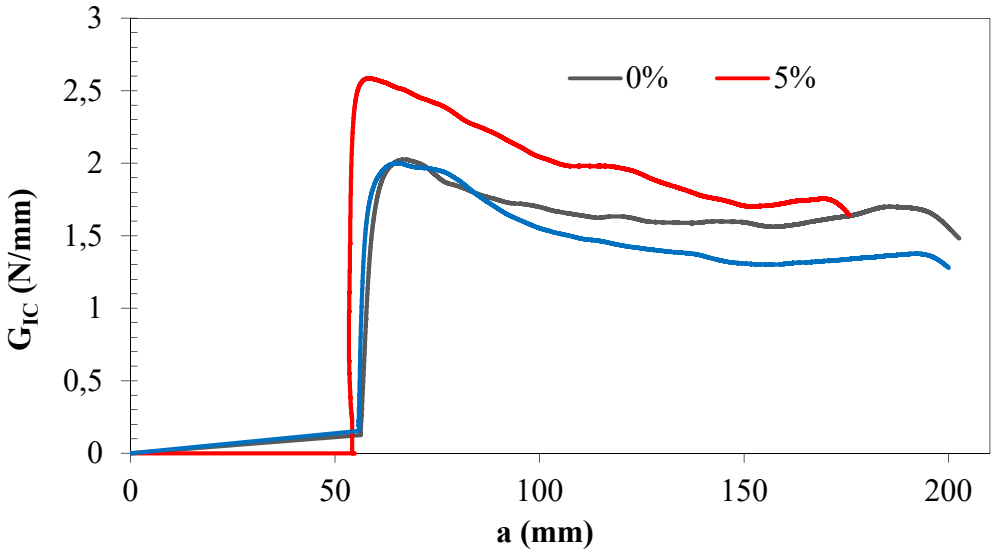


Figura 46 – Curvas-R, representativas, em função da % em peso de PTEs para o adesivo Betamate™2096.

A Figura 47 apresenta a média da energia crítica de fratura em modo I, G_{IC}, em relação a % em peso de PTEs. Para a condição com 5% de PTEs, G_{IC} (média) apresentou um aumento de 7,2%. Entretanto, para a condição a 10% de PTEs, G_{IC} (média) teve um decréscimo de aproximadamente 14%. O decréscimo da resistência média para a condição com 10% de PTEs pode ser explicado pelo fato de que o aumento da adição de partículas deixa o adesivo mais denso e frágil, causando uma deformação plástica na ponta da trinca.

Pôde-se, então, concluir que a máxima resistência ao modo I (média) se deu a condição com 5% de PTEs, para o adesivo Betamate™2096.

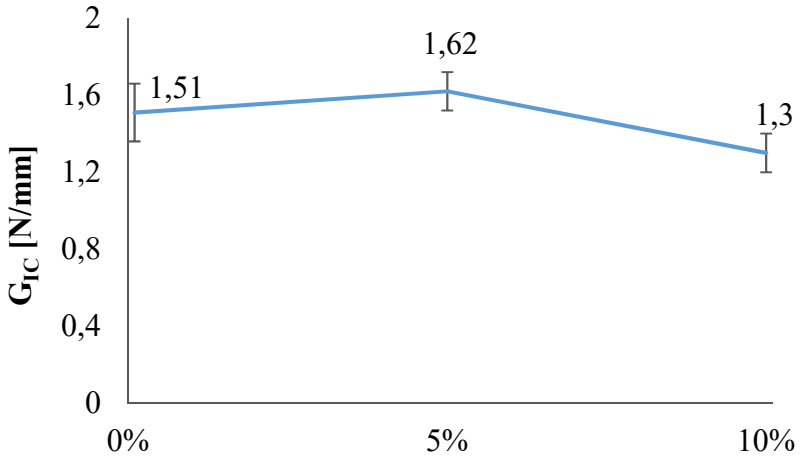


Figura 47 - G_{IC} (média) em função da porcentagem de PTEs.

Em um estudo anterior [28] utilizando-se o adesivo SikaForce®7888, foi encontrado um aumento de, aproximadamente 152% para a condição com 5% de PTEs, 57% para a condição com 10% de PTEs e 37% para a condição com 15% de PTEs.

Essa diferença nos resultados (entre os adesivos SikaForce®7888 e Betamate™2096) se deve ao fato de que no presente estudo foi utilizada uma espessura de 0,2 mm de adesivo e no anterior, 1 mm. Além disso, o adesivo SikaForce®7888 apresenta um maior comportamento dúctil, quando comparado ao adesivo Betamate™2096.

4.1 Ensaio de tração em juntas de sobreposição simples

Investigou-se a influência das partículas em diferentes porcentagens ao longo da junta. Foram comparados resultados de juntas sem adição de partículas, com adição (mas em uma distribuição homogênea) e em diferentes concentrações ao longo da sobreposição. O principal objetivo aqui foi investigar os tipos de falhas obtidos em cada condição e a resistência ao cisalhamento quando utilizado o adesivo Betamate™2096 funcionalmente graduado.

4.1.1 Modos de falha

Após o ensaio de tração (ou *SLJs test*) todas as superfícies das amostras foram analisadas visualmente. Não houve deformação plástica nos substratos e todas as

amostras apresentaram falhas do tipo coesiva, vide Figura 48.

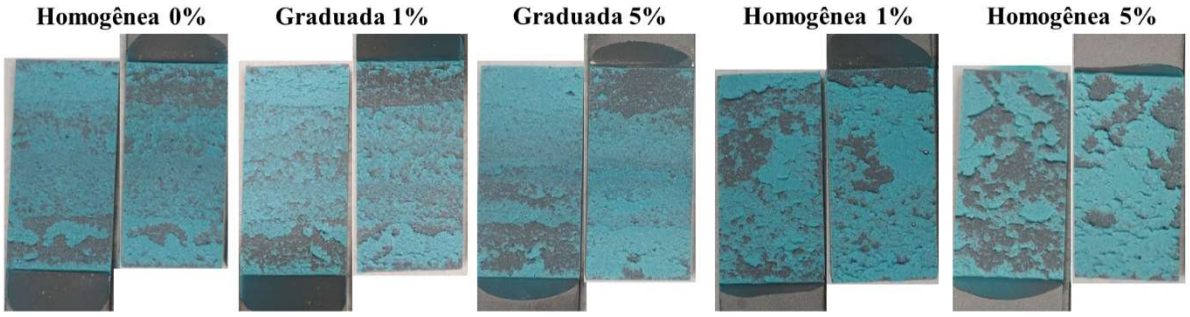


Figura 48 – Superfície de fratura das juntas de sobreposição simples após o ensaio de tração.

4.1.2 Efeito da % de PTEs na resistência ao cisalhamento

A partir das três juntas de sobreposição simples ensaiadas para cada condição (homogênea e graduada), obtiveram-se curvas, representativas, da força-deslocamento em função da % em peso de PTEs (Figura 49).

Pode ser observado que a força máxima diminuiu com o aumento da % de PTEs e que as condições homogênea e graduada, com a mesma % de PTEs, não apresentaram significativas diferenças em relação a força de ruptura e em sua rigidez.

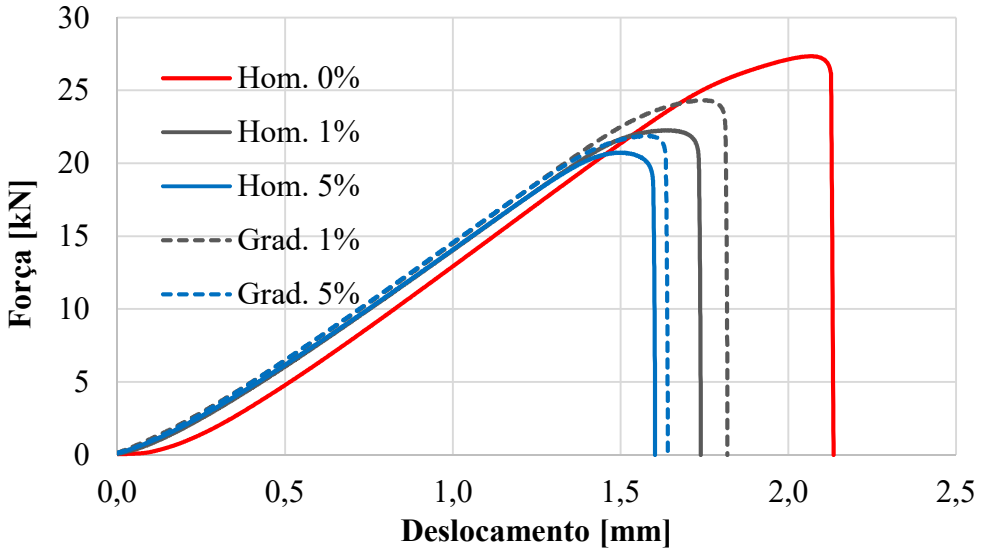


Figura 49 – Curvas, representativas, força-deslocamento do ensaio de tração em juntas de sobreposição simples.

A resistência ao cisalhamento média e o deslocamento das juntas de sobreposição simples para as condições homogênea a graduada, em função da % de PTEs, são apresentadas na Figura 50. A resistência ao cisalhamento é dada por:

$$\tau_{méd.} = \frac{F}{b \cdot L}, \tag{2}$$

Onde,

F = Força máxima;

b = Largura da junta;

L = Comprimento de sobreposição da junta.

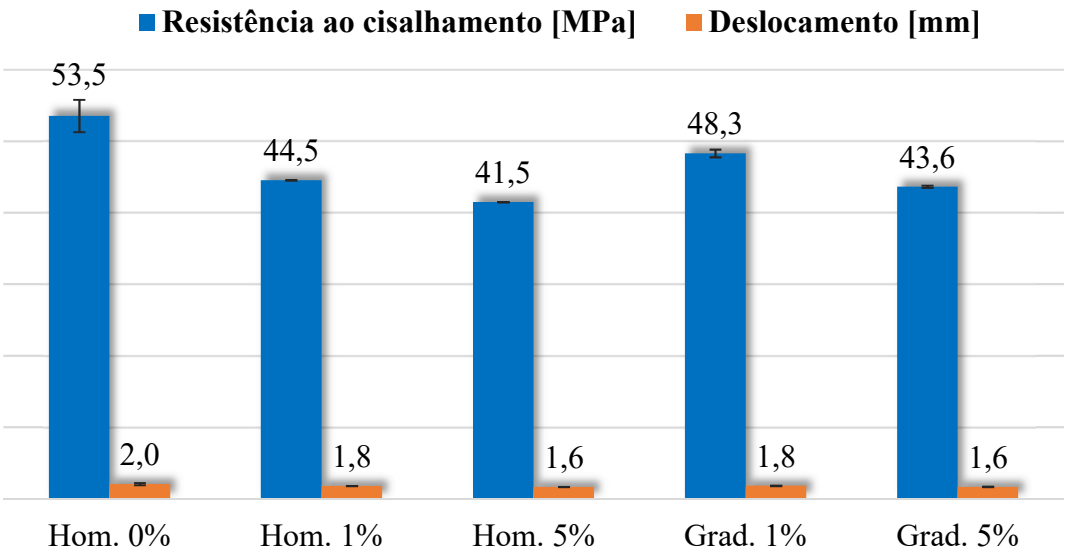


Figura 50 – Gráfico resistência ao cisalhamento média e deslocamento.

A partir dos resultados obtidos, para as condições homogêneas, pôde-se concluir que a 5% de PTEs, foi encontrado um decréscimo da resistência ao cisalhamento (média) em aproximadamente 22,5% e para 1% de PTEs, um decréscimo de aproximadamente 16,8%.

Entretanto, as condições graduadas com 1% e 5% de PTEs apresentaram um aumento em aproximadamente 9% e 5% na resistência ao cisalhamento (média), respectivamente, se comparado as condições homogêneas com a mesma % de PTEs.

Banea *et. al* [26] realizaram testes de tração em juntas de sobreposição simples para amostras homogêneas a: 0, 5, 10, 15 20 e 15% de PTEs com os adesivos

SikaForce®7888 e o Betamate™2098. Para o adesivo SikaForce®7888, pôde-se concluir que as juntas com 5% de PTEs tiveram uma queda de 16% na resistência se comparado as juntas com 0% de PTEs. Para 10% de PTEs, houve um decréscimo de 24% e para 15% de PTEs, um decréscimo de 36%. Para 20 e 25% de PTEs, houve uma queda de, aproximadamente, 40% e 53%, respectivamente.

Para o Betamate™2098, as juntas com 5% de PTEs tiveram uma queda de 14% na resistência, sem comparado a juntas com 0% de PTEs. Para 10 e 15% de PTEs, uma queda de 21% e 27%, respectivamente. Já para 20 e 25% de PTEs houve um decréscimo de, aproximadamente, 31% e 33%.

4.3 Ensaio de flexão em quatro pontos

Neste item serão apresentados as superfícies de fratura e os resultados do ensaio de flexão em quatro pontos para os adesivos SikaForce®7888, utilizando-se dois tamanhos de sobreposição (12,5 mm e 25 mm), e o Betamate™2096, com 25 mm de comprimento de sobreposição. O principal objetivo foi investigar os tipos de falhas obtidos em cada condição e a resistência a flexão quando utilizado um adesivo graduado.

4.3.1 Modos de falha

a) Betamate™2096

A fratura começa na extremidade que é submetida a esforços de tração e propaga-se a extremidade em compressão. A propagação da trinca ocorreu bem próxima da interface do substrato superior, como esperado. O processo do início da fratura e propagação da trinca pode ser visto na Figura 51.

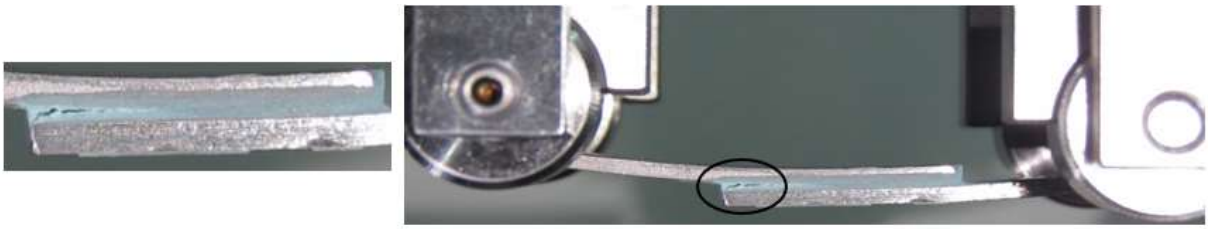


Figura 51 – Propagação da trinca no ensaio de flexão em quatro pontos.

A fratura de superfície de todas as amostras foi coesiva próxima a superfície do substrato superior, como mostrado na Figura 52. A condição sem PTEs foi a única que apresentou uma baixa deformação plástica nos substratos, Figura 53, (i.e. homogênea 0

% PTEs).

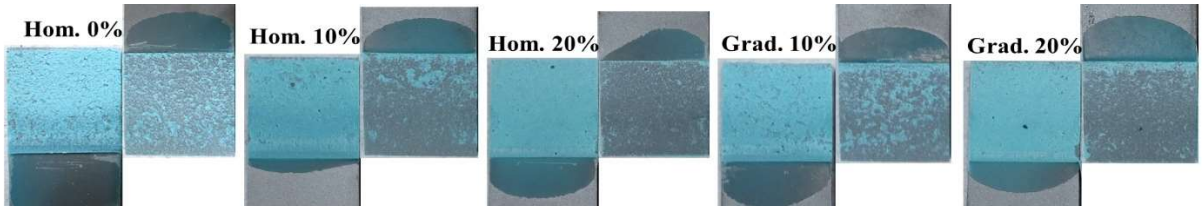


Figura 52 – Modos de falha após o ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo Betamate™2096.



Figura 53 – Condição homogênea com 0 % PTEs após o ensaio de flexão em quatro pontos.

b) SikaForce®7888

O modo de falha das amostras foi coesivo para todos os casos, como mostrado na Figura 54. Algumas partes das amostras apresentaram uma coloração mais clara na superfície, que possivelmente pode ser explicado pelo fato de que essas áreas tiveram uma deformação plástica, indicando que a parte mais clara representa a extremidade submetida a esforços de tração, e a mais escura, submetida a esforços de compressão.

As superfícies de fratura das amostras com 12,5 mm de comprimento de sobreposição foram avaliadas visualmente, como mostrado na Figura 54 (a). Diferentemente das amostras com 25 mm de sobreposição, apenas a condição sem PTEs (i.e. homogênea, com 0% de PTEs) apresentou deformação plástica nos substratos, Figura 55 (a).

Não houve falha das juntas para a condição homogênea com 5 % de PTEs, com 25 mm de sobreposição, sugerindo que esta é a melhor combinação quando as amostras são submetidas a esforços de flexão. As superfícies de fratura das amostras com 25 mm de comprimento de sobreposição também foram avaliadas visualmente, como mostrado na Figura 54 (b).

Todas as juntas com 25 mm de sobreposição apresentaram deformação plástica nos substratos, Figura 55 (b), e isto pode ser explicado devido ao fato de que o adesivo

SikaForce®7888 apresenta um comportamento mais dúctil, se comparado ao adesivo Betamate™2096.

A máxima deformação foi observada para as juntas com 5 e 10% de PTEs (homogênea). Isto pode ser explicado pelo fato de que estas porcentagens de PTEs apresentam um aumento significativo do G_{IC} (taxa de dissipação de energia crítica para modo I), de acordo com o estudo anterior [28], se comparado com as condições sem adição de partículas (0 % de PTEs) e com 15 % de PTEs.

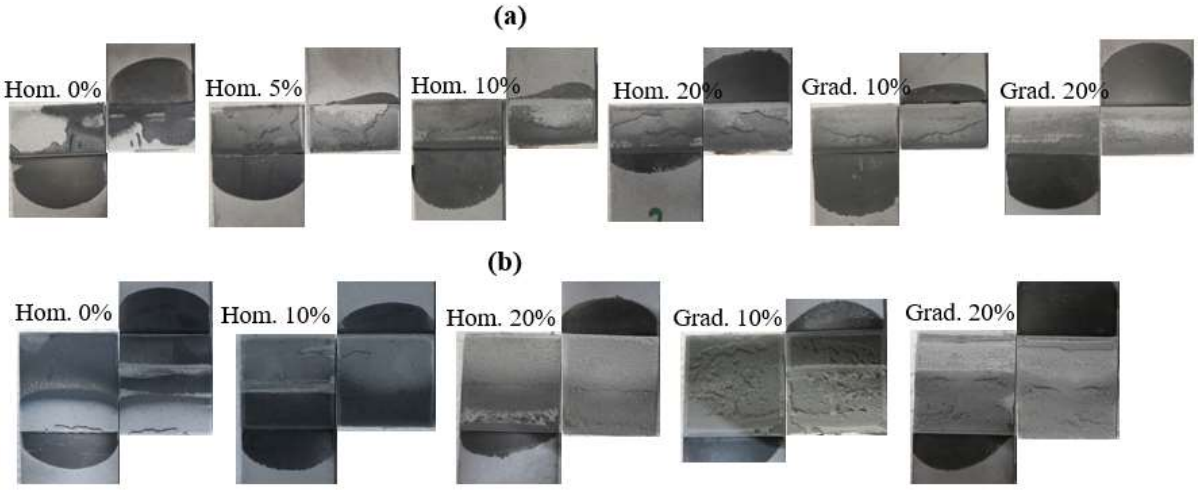


Figura 54 – Modos de falha após o ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo SikaForce®7888: (a) 12,5 mm (b) 25 mm de comprimento de sobreposição.

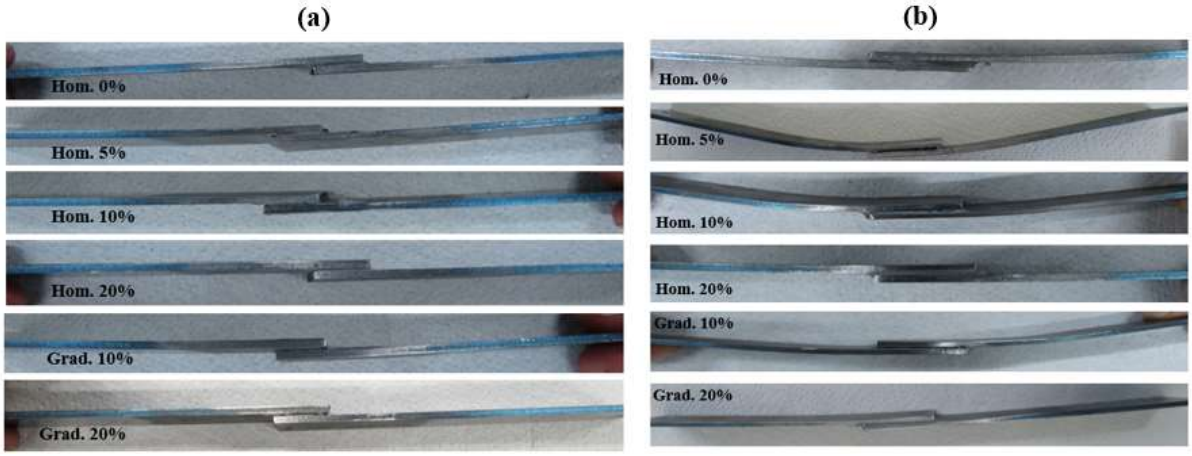


Figura 55 – Deformação plástica dos substratos após o ensaio de flexão em quatro pontos para: (a) 12,5 mm (b) 25 mm de comprimento de sobreposição.

4.3.2 Efeito da % de PTEs na resistência à flexão

a) Betamate™2096

Curvas, representativas, força-deslocamento para o adesivo Betamate™2096 em função das condições graduada e homogênea com diferentes % de PTEs, e comprimento de sobreposição igual a 25 mm, após o ensaio de flexão em quatro pontos são apresentadas na Figura 56.

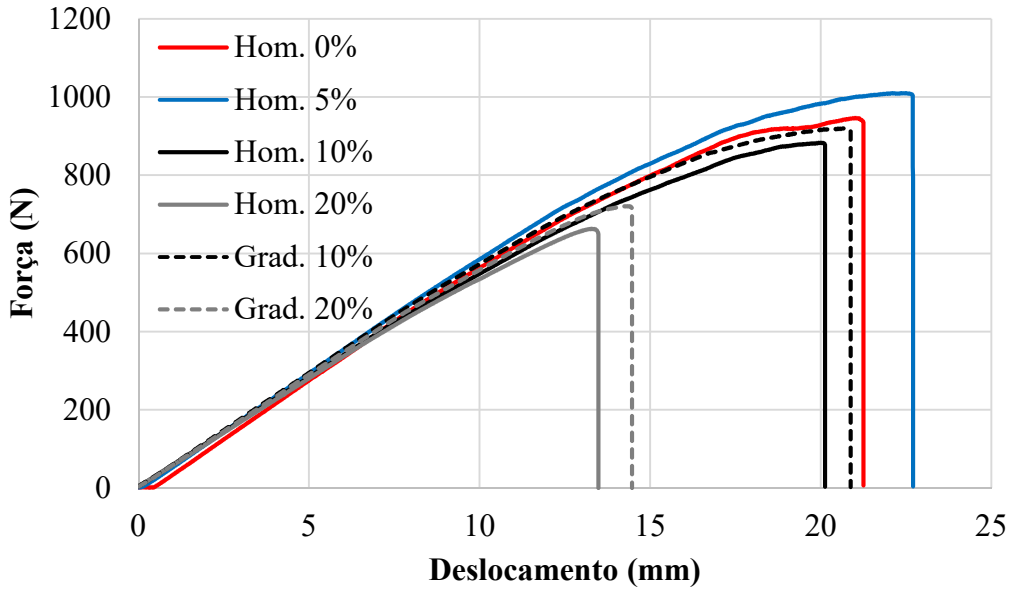


Figura 56 – Curva, representativas, força-deslocamento do ensaio de flexão em quatro pontos para o adesivo Betamate™2096.

A Figura 57 apresenta os valores da força de ruptura média em relação às condições homogênea e graduada com diferentes % de PTEs. Não houve significativas diferenças entre as condições graduadas e homogêneas, com a mesma % de PTEs. As condições graduada e homogênea com 20 % de PTEs apresentaram os menores valores força de ruptura e deslocamento, devido ao fato de que o aumento da % de PTEs altera as propriedades do adesivo, tornando-o mais frágil.

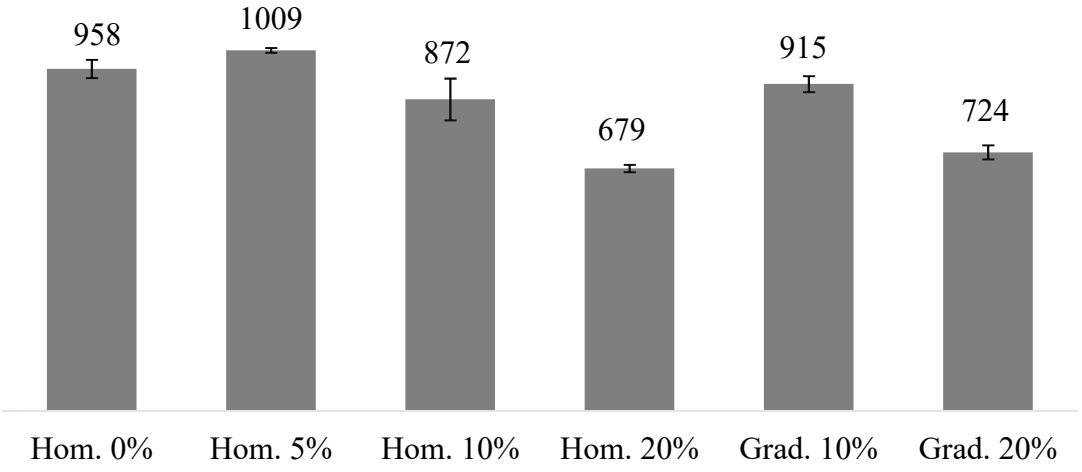
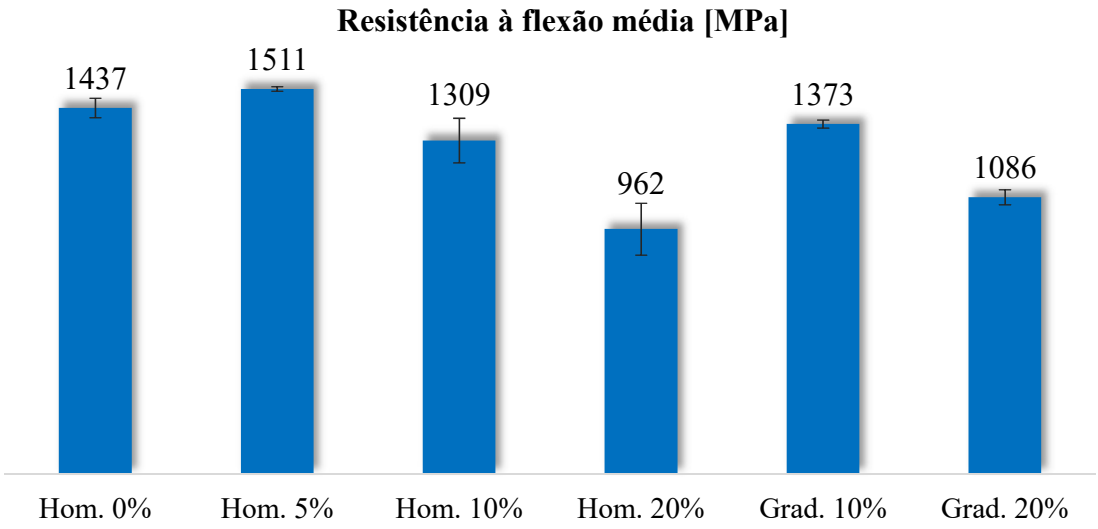


Figura 57 – Força de ruptura média em função da % de PTEs (Betamate™2096).

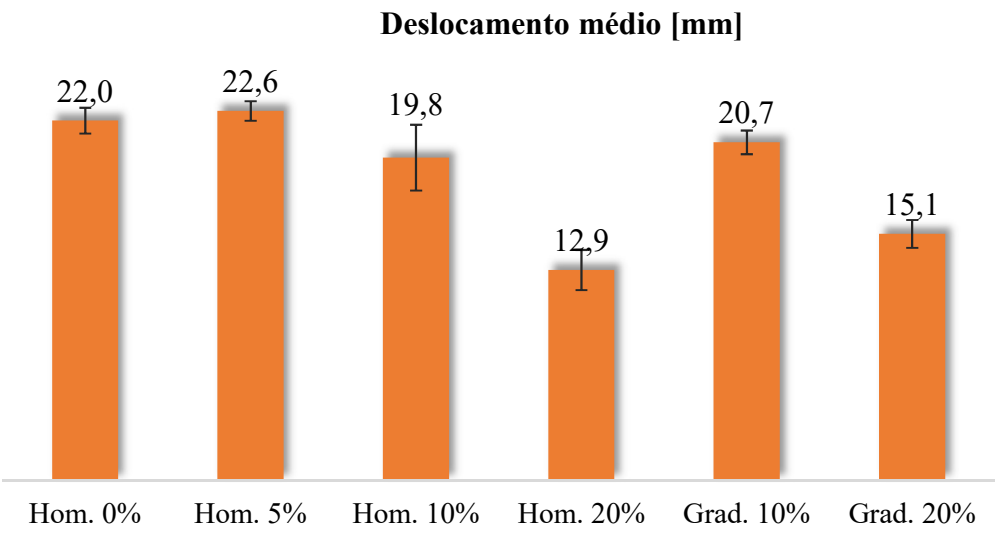
A resistência média de flexão e deslocamento das juntas de sobreposição simples, em função da proporção de PTEs, para as condições homogênea e graduada são apresentadas na Figura 58. A resistência à flexão é dada por [43]:

$$\tau = {3P(L - L_i)}\Big/{2(b \cdot d^2)} \tag{3}$$

Onde P é a força máxima, b a largura da junta, L a distância entre os cilindros de suporte, L_i a distância entre os cilindros de carregamento, e d a espessura da junta.



(a) Resistência à flexão média.



(b) Deslocamento médio.

Figura 58 – Resistência à flexão e deslocamento (valores médios), adesivo Betamate™2096.

Em comparação com as amostras sem adição de partículas (i.e. homogênea, com 0% de PTEs), pôde-se observar que para a condição homogênea com 5% de PTEs, a resistência a flexão média aumentou aproximadamente 5,1%. Enquanto que para as condições graduada e homogênea com 10 % de PTEs, a resistência a flexão média diminuiu aproximadamente 4,5% e 8,9%, respectivamente. Para as condições graduada e homogênea com 20% de PTEs, a resistência a flexão média diminuiu aproximadamente 24,5% e 33,1%, respectivamente.

Entretanto, as condições graduadas apresentaram um aumento de, aproximadamente 5% e 13%, da resistência à flexão média, para 10% e 20% de PTEs, respectivamente, se comparado às condições homogêneas com a mesma % de PTEs.

Os resultados aqui demonstrados reforçam a ideia de se adicionar 5% de PTEs na extremidade submetida a maiores concentrações de tensão (região sob tração), pois foi a condição que apresentou maior resistência à flexão. Além da adição de 10% e 20% na extremidade sob compressão, pois foram as condições que apresentaram menor resistência à flexão, com o objetivo de se obter um maior equilíbrio na distribuição de tensões ao longo da sobreposição.

b) SikaForce®7888

Curvas, representativas, força-deslocamento para o adesivo SikaForce®7888 com 12,5 mm de tamanho de sobreposição, após o ensaio de flexão em quatro pontos são apresentadas na Figura 59. Pôde-se observar que as forças de ruptura, assim como o deslocamento, são relativamente maiores se comparado às condições homogêneas, com a mesma % de PTEs (principalmente, com 10%).

Entretanto, pôde-se observar que a condição sem presença de PTEs (i.e., homogênea com 0% de PTEs) apresentou os maiores valores de força de ruptura e deslocamento, seguida da condição homogênea com 5% de PTEs.

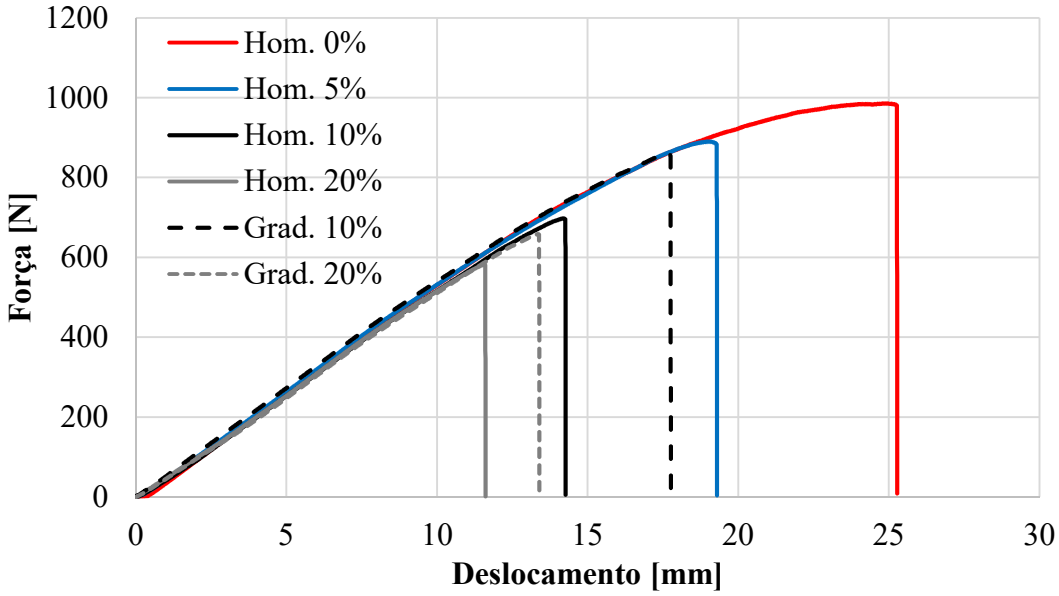


Figura 59 – Curvas, representativas, força-deslocamento para 12,5 mm de sobreposição (SikaForce®7888).

Curvas, representativas, força-deslocamento para o adesivo SikaForce®7888 com 25 mm de tamanho de sobreposição, após o ensaio de flexão em quatro pontos são apresentadas na Figura 60. Pôde-se observar que não houve significativas diferenças em relação à força de ruptura entre as condições.

Porém, a condição homogênea com 5% de PTEs foi a que apresentou o maior deslocamento, e nenhuma junta falhou, sugerindo que esta é a melhor combinação quando estas são submetidas a esforços de flexão. E, assim como para as juntas com 12,5 mm, as

amostras com maior comprimento de sobreposição demonstram que o aumento da % de PTEs diminui, significativamente, a rigidez do adesivo.

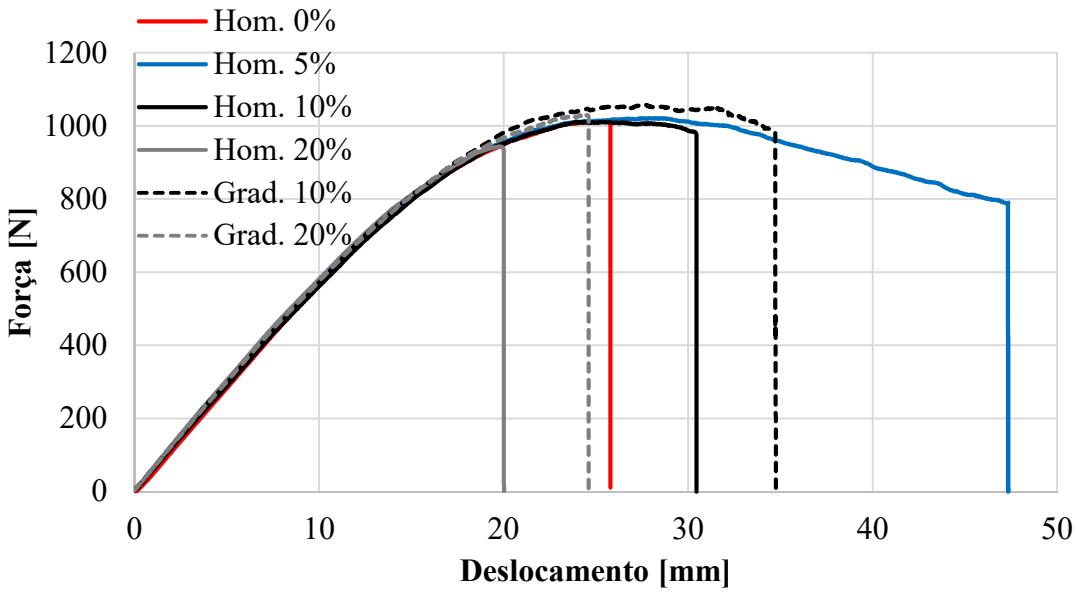


Figura 60 – Curvas, representativas, força-deslocamento para 25 mm de sobreposição (SikaForce®7888).

A Figura 61 apresenta a comparação da força de ruptura entre os dois tamanhos de sobreposição. Pôde-se observar que as juntas com maior tamanho de sobreposição (25 mm) apresentaram maiores valores de força máxima, porém muito semelhantes se comparado entre todas as condições, o que pôde ser melhor avaliado após a análise dos valores de resistência à flexão.

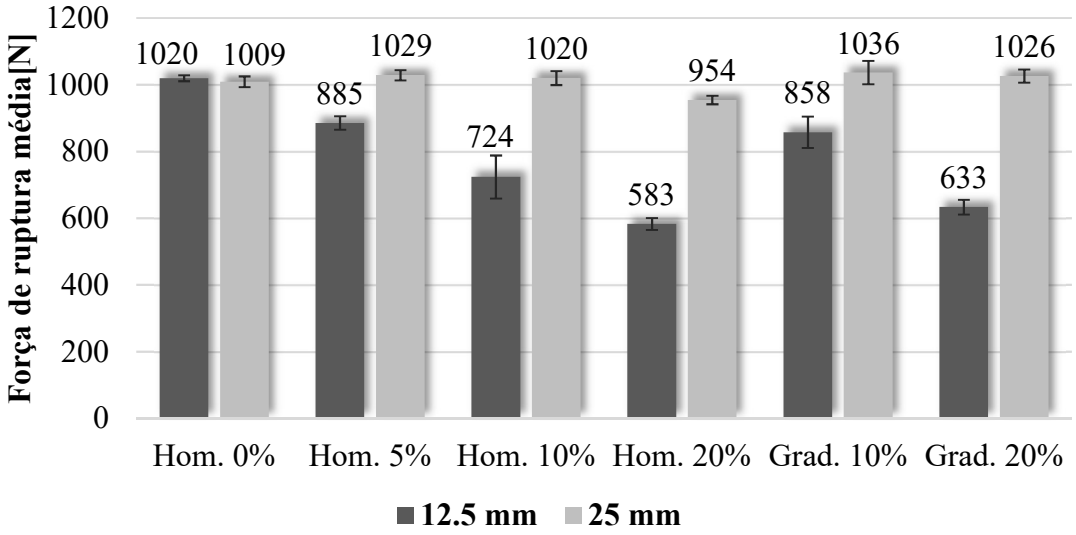
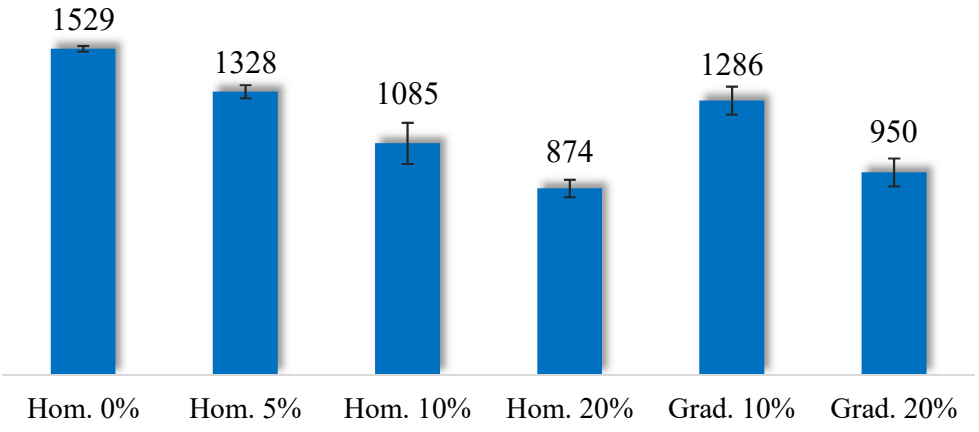


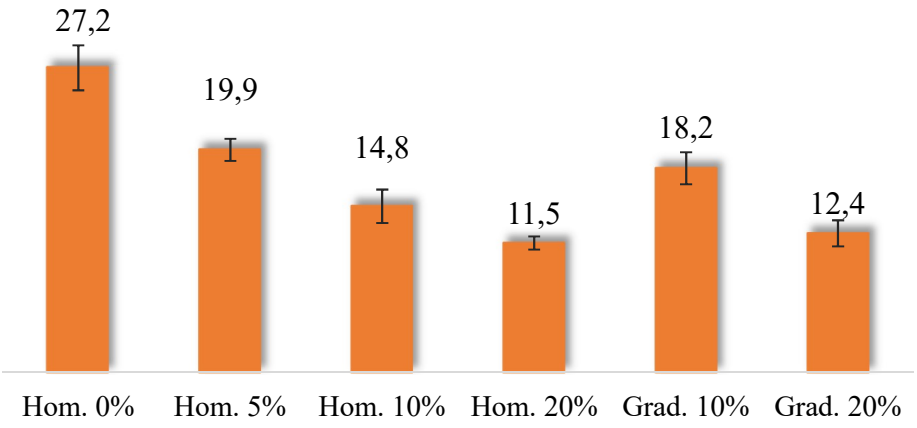
Figura 61 – Comparação da força de ruptura média entre os dois comprimentos de sobreposição.

Gráficos de resistência à flexão e deslocamento em função da % de PTEs, para 12,5 mm de sobreposição, são apresentadas na Figura 62. As condições homogêneas com 5% de PTEs mostraram um decréscimo de 13,2% da resistência a flexão, e para 10% de PTEs, um decréscimo de aproximadamente 29,1%. Para 20% de PTEs, a resistência diminuiu 42,9%.

Entretanto, as condições graduadas apresentaram um aumento de, aproximadamente, 18,5% e 8,6%, da resistência à flexão, para 10% e 20% de PTEs, respectivamente, se comparado às condições homogêneas com a mesma % de PTEs.



(a) Resistência à flexão média.



(b) Deslocamento médio.

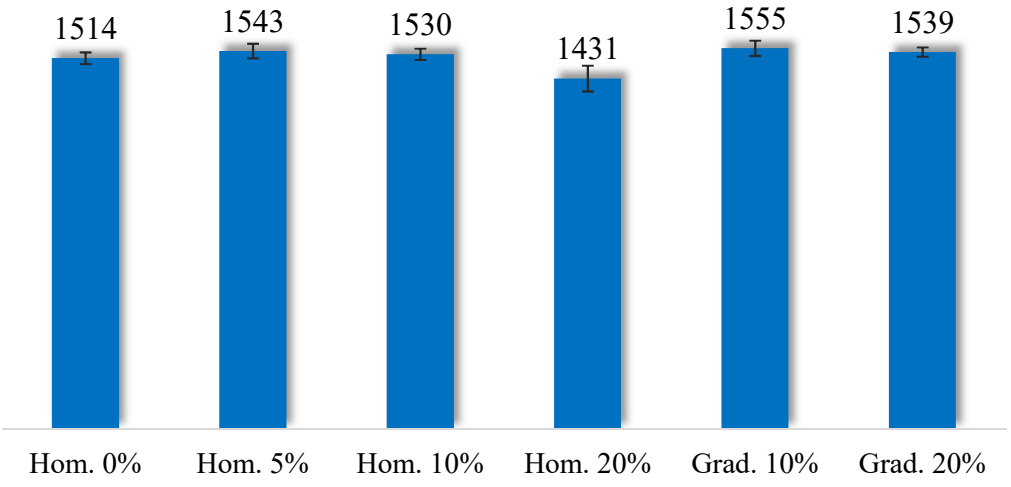
Figura 62 – Resistência à flexão e deslocamento médios (adesivo SikaForce®7888 com 12,5 mm de sobreposição).

A Figura 63 apresenta os valores médios da resistência à flexão e deslocamento para as juntas com 25 mm de sobreposição. Para a condição homogênea com 5% e 10% de PTEs, apresentou-se um pequeno aumento de aproximadamente 1,9% e 1% na resistência a flexão, respectivamente, se comparado à condição sem adição de PTEs (i.e, homogênea 0%). Enquanto que para 20% de PTEs, a resistência a flexão teve um decréscimo de, aproximadamente, 5,5%.

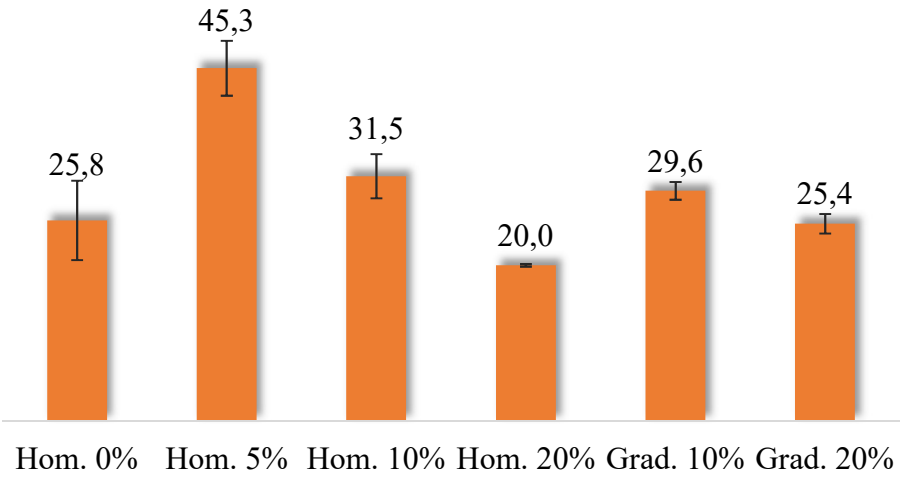
Além disso, as condições graduadas, com 10% de PTEs, a resistência a flexão aumentou aproximadamente 2,7%, e a condição com 20% de PTEs, um decréscimo de 1,6%, aproximadamente.

Além disso, para as condições graduadas com 10% e 20% de PTEs, a resistência a flexão aumentou, aproximadamente, 1,6% e 7,5%, respectivamente, se comparado com as condições homogêneas com a mesma % de PTEs.

Ademais, o fato de que a resistência permaneceu praticamente uniforme para as juntas com 25 mm de sobreposição, em todos tamanhos de sobreposição, se deve ao fato de que as propriedades do aço afetaram os valores de resistência encontrados. Ou seja, para maiores tamanhos de sobreposição, não é possível obter uma melhor análise das propriedades do adesivo já que o mesmo possui grande plasticidade. Por isso, foi necessária a fabricação de juntas com menor tamanho de sobreposição (12,5 mm).



(a) Resistência à flexão média.



(b) Deslocamento médio.

Figura 63 - Gráficos da resistência à flexão e deslocamento médios (adesivo SikaForce®7888 com 25 mm de sobreposição).

Foi possível observar as diferenças da resistência a flexão para ambos comprimentos de sobreposição para as condições com adição de PTEs. Em comparação com as juntas de 12,5 mm de sobreposição, para as condições homogêneas (5%, 10% e 20% de PTEs) com 25 mm de sobreposição, a resistência a flexão aumentou, aproximadamente, 16,1%, 41% e 63,7%, respectivamente. Para as condições graduadas (10% e 20% de PTEs), foi encontrado um aumento de 20,9% e 62% da resistência à flexão.

Sendo assim, foi possível concluir que as juntas com 25 mm de sobreposição são levemente mais resistentes se comparado a junta com tamanho de sobreposição menor (12,5 mm), especialmente quando se há um aumento da % de PTEs.

Grant *et al*. [44] realizaram testes de flexão em quatro pontos utilizando-se substratos de aço macio e um adesivo mais rígido, ESP110. Verificou-se que quando os substratos se deformam plasticamente, como foi o caso do aço macio com a espessura utilizada, é impossível, nestes casos fraturar o adesivo no ensaio de flexão em quatro pontos. Os substratos se deformam localmente em torno dos pontos de suporte e de carga, tornando impossível aplicar um momento de flexão suficientemente grande nas extremidades da junta ao ponto de descolar o adesivo.

Além disso, foi mostrado na literatura que o comprimento da sobreposição não tem efeito significativo na resistência a flexão das juntas. Isto se deve ao fato de que a transferência de carga ocorre em uma área bem pontual próxima as extremidades da sobreposição, tendo a fratura governada por mecanismos de arrancamento. Por isto, a condição sem adição de PTEs (i.e, homogênea 0% de PTEs) não apresentou diferenças significativas na resistência entre os dois tamanhos de sobreposição. [45]

4.4 Análise de elementos finitos

O modelo numérico para juntas de sobreposição simples foi desenvolvido no software ABAQUS 6.14 (Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA). Foi feita uma análise de elementos finitos utilizando-se um modelo de duas dimensões com o objetivo de se analisar o comportamento de juntas de sobreposição simples para o ensaio de flexão em quatro pontos, realizado no experimental.

Para os substratos, para as simulações utilizando-se o adesivo Betamate™2096, assumiu-se comportamento elástico e como sendo material isotrópico, enquanto que os substratos utilizando-se o adesivo SikaForce®7888 (para 25 mm de sobreposição), assumiu-se também comportamento plástico, pois nos ensaios experimentais todas as juntas sofreram deformações plásticas.

Para se obter um modelo utilizando-se um adesivo gradual, a sobreposição foi dividida em duas diferentes regiões, como anteriormente mostrado na seção 3.2.2.2. As condições de contorno, como o posicionamento dos carregamentos, dos pontos de suporte

e o ponto de restrição no centro da junta são mostrados na Figura 64 abaixo.

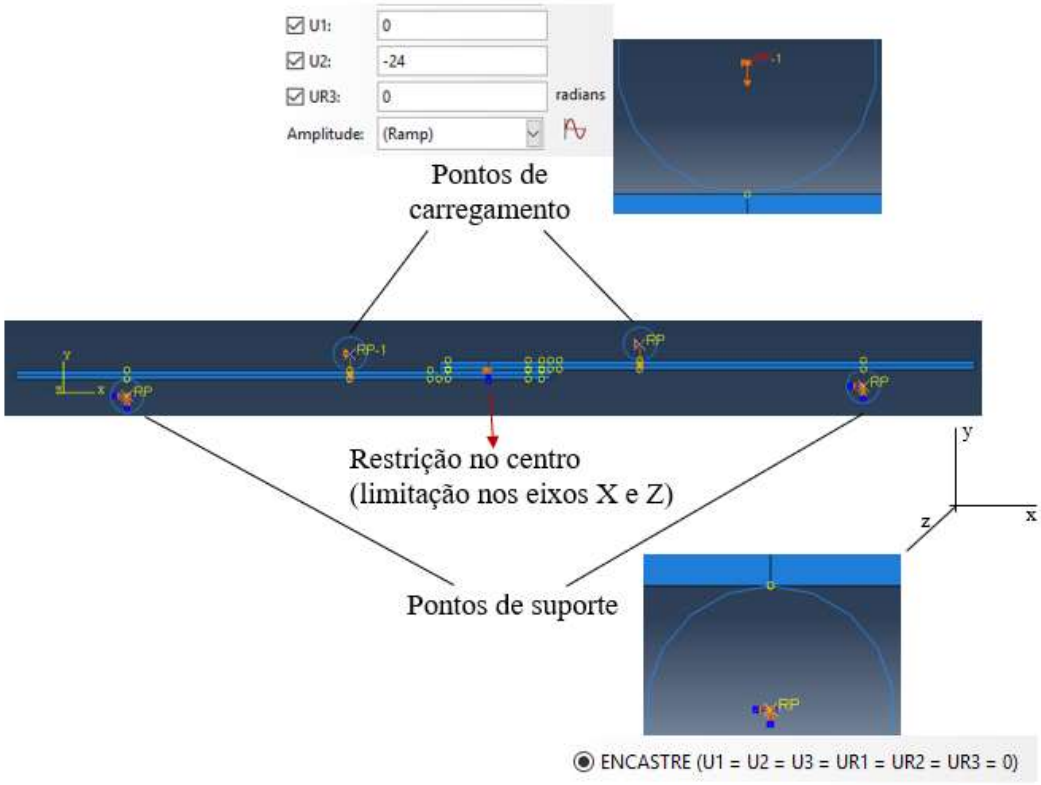


Figura 64 –Condições de contorno utilizados na análise de elementos finitos para o ensaio de flexão em quatro pontos.

Primeiramente, foi criado um modelo bidimensional (2D) admitindo-se um estado plano de deformação, e utilizado elementos sólidos de interpolação bilinear com 4 pontos de integração, CPE4, de acordo com a terminologia do programa ABAQUS®.

Também foram adicionados elementos coesivos (COH2D4) na camada adesiva. Além disso, foi utilizada uma malha mais refinada nas extremidades devido aos concentradores de tensão, mais refinada próxima a região da sobreposição, e já na região do substrato, foi utilizada uma malha mais grosseira, como mostrado na Figura 65.

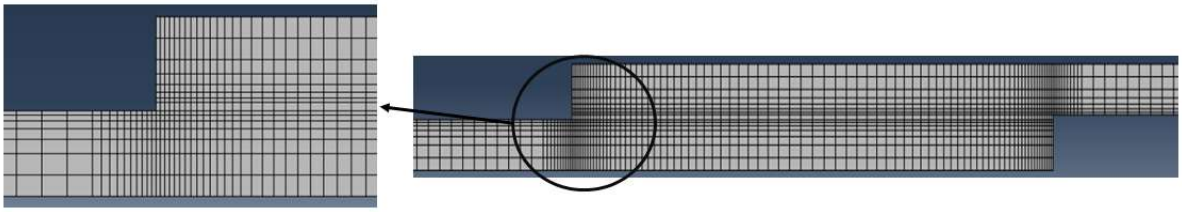


Figura 65 – Malha aplicada para o modelo da zona coesiva (MZC).

A distribuição das propriedades mecânicas (E) ao longo da sobreposição foi convertida em módulo de cisalhamento (G), com a seguinte equação:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \tag{4}$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson do adesivo (foi utilizado um valor igual a 0,33 para ambos adesivos). As Tabelas 8 e 9 apresentam as propriedades mecânicas dos adesivos utilizadas na simulação numérica.

Para as propriedades do adesivo Betamate™2096, levou-se em consideração os valores de 'G_n^c' obtidos no ensaio DCB. 't_n^0' e o módulo de Young já foram encontrados em ensaios de tração anteriormente, mas apenas para 0% de PTEs.

Para 5%, 10% e 20% de PTEs, levou-se em conta que em um estudo anterior, foi encontrado um decréscimo do 't_n^0' em 19,32%, 27,65% e 28,7%, respectivamente, para o adesivo Betamate™2098. O mesmo seguiu para o cálculo do Módulo de Young, que também já foi calculado anteriormente. [29]

Vale ressaltar que já foi demonstrado anteriormente, na Tabela 7, que ambos adesivos (Betamate™2096 e Betamate™2098) possuem propriedades bastante semelhantes.

'G_s^c' foi aproximado (quatro vezes 'G_n^c'). Os valores de 't_s^0' foram deduzidos de 't_n^0', utilizando-se o critério de Von Mises ($t_n^0 = t_s^0/\sqrt{3}$).

Para as propriedades do adesivo SikaForce®7888, 't_n^0' e o módulo de Young já foram encontrados em ensaios de tração [28]. 'G_n^c' e 'G_s^c' foram calculados anteriormente para a condição com 0% de PTEs [46].

Levando-se em conta que o 'G_n^c' também já foi calculado para todas as condições (0, 5, 10 e 15% de PTEs), em ensaios DCB com corpos de prova com 1 mm de espessura [28], e foram encontrados um aumento da resistência à fratura em 152% para 5% de PTEs, 57% para 10% de PTEs e 37% para 15% de PTEs, utilizou-se a mesma proporção para 'G_n^c' e 'G_s^c' nas condições com: 5%, 10% e 20% de PTEs.

Os valores de 't_s^0' foram deduzidos de 't_n^0', utilizando-se o critério de Von Mises ($t_n^0 = t_s^0/\sqrt{3}$).

Tabela 8 – Propriedades mecânicas utilizadas no modelo numérico (adesivo Betamate™2096).

Propriedades	**0%**	**5%**	**10%**	**20%**
E [MPa]	1515	1415	1415	1415
G [MPa]	569,55	531,95	531,95	531,95
t_n^0 [MPa]	27,21	21,95	19,69	19,4
t_s^0 [MPa]	15,71	12,67	11,37	11,20
G_n^c [N/mm]	1,51	1,61	1,30	0,98
G_s^c [N/mm]	6,04	6,44	5,20	3,92

Tabela 9 - Propriedades mecânicas utilizadas no modelo numérico (SikaForce®7888).

Propriedades	**0%**	**5%**	**10%**	**20%**
E [MPa]	2530	2270	2130	2210
G [MPa]	951,13	853,38	800,75	830,83
t_n^0 [MPa]	31,12	19,55	19,01	17,99
t_s^0 [MPa]	17,97	11,29	10,98	10,39
G_n^c [N/mm]	1,20	3,02	1,88	1,64
G_s^c [N/mm]	8,52	21,47	13,38	11,67

4.4.1 Modelo da Zona Coesiva

No Modelo da Zona Coesiva (MZC), os elementos coesivos são inseridos nas interfaces entre pares de elementos adjacentes na malha de elementos finitos, e cuja forma determina a taxa de liberação de energia durante a propagação de falhas. [47] Neste caso, a lei triangular foi considerada neste trabalho.

Nestes modelos, o crescimento do dano é permitido pela introdução de uma

possível descontinuidade no campo de deslocamento, uma vez que uma ou múltiplas interfaces/regiões de fratura podem ser introduzidas nas estruturas. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tração-separação (abordadas como leis CZM) para modelar interfaces ou regiões finitas. [48, 47]

A lei da tração-separação é dada pela fórmula: $P_m = K_m \cdot U_m(1 - d_m)$, onde d_m é denominado como o dano (que varia entre 0 e 1 ou δ_l^m e δ_c^m). 'K_m' é a espessura inicial da interface e 'U_m' o deslocamento em modo misto.

O critério de fratura é dado por: $\frac{G_n}{G_{nc}} + \frac{G_t}{G_{tc}} = 1$, onde '$G_n$' e '$G_t$' são as taxas de liberação de energia, normal e tangencial, respectivamente. Já 'G_{nc}' e 'G_{tc}', são os valores críticos correspondentes da taxa de liberação de energia. [47]

Como pode ser visto na Figura 66, a relação tração-deslocamento é representada por um triângulo, e a área de cada triângulo é a resistência à fratura no estado estacionário da interface. Ademais, δ_c^m representa o deslocamento crítico em modo misto para além do qual a trinca inicia sua propagação, e σ_c^m é a tensão crítica, ou seja, representa a tração máxima que o adesivo pode suportar. [47]

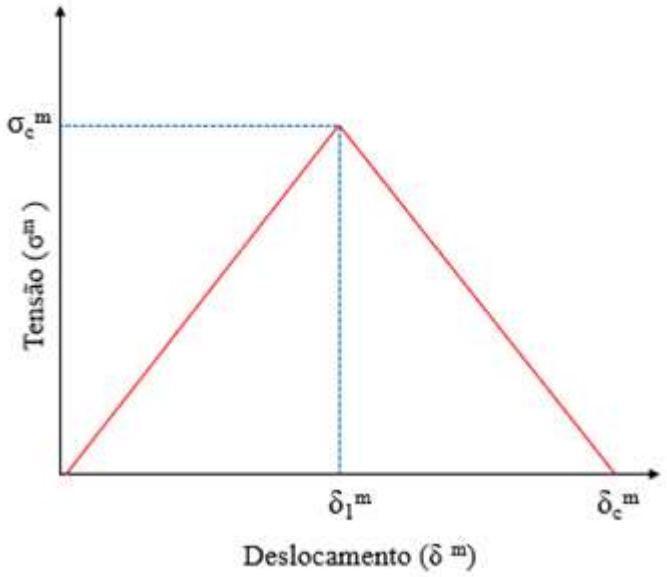


Figura 66 – Lei da tração-separação para o MZC.

Quando utilizado o modelo da zona coesiva, torna-se possível analisar a degradação do adesivo ao longo da sobreposição, utilizando-se a ferramenta do Abaqus

chamada *SDEG*, como mostrado na Figura 67 abaixo, que foi obtida durante a simulação do ensaio de flexão em quatro pontos, reforçando o fato de que a propagação da trinca começa na extremidade da junta sob tração e se estende até a outra extremidade submetida a esforços de compressão.

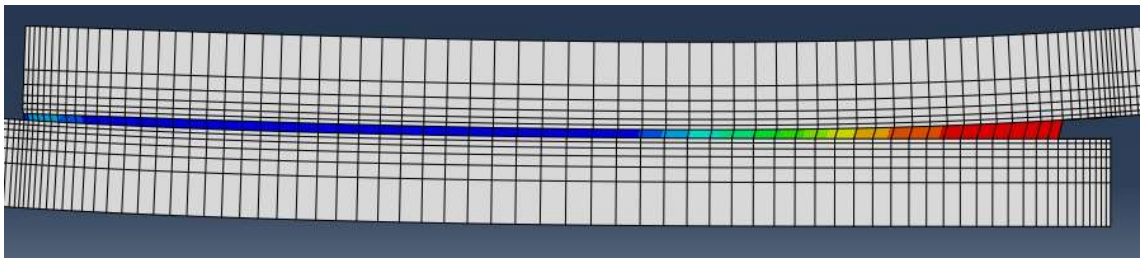
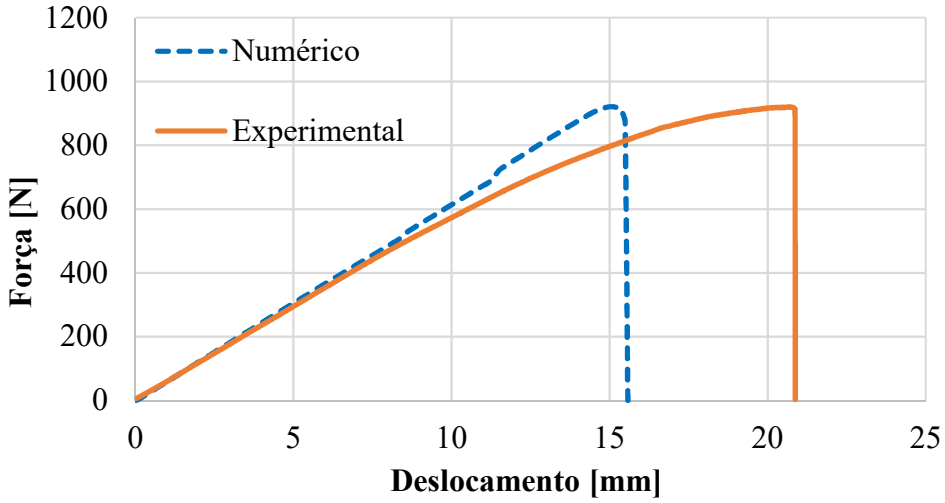


Figura 67 – Degradação do adesivo (ferramenta *SDEG*) utilizando-se o modelo da zona coesiva.

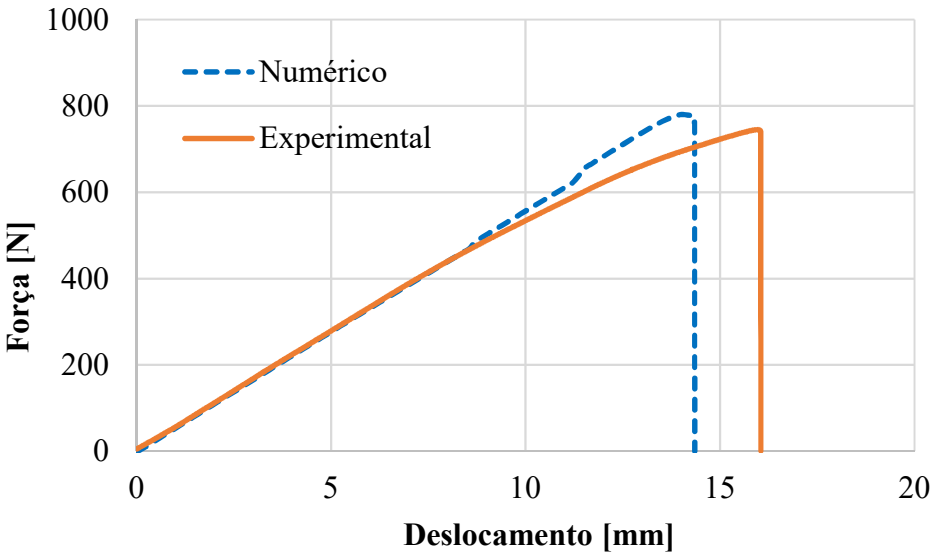
4.1.3 Comparação entre as forças de ruptura obtidas no experimental e no numérico

A Figura 70 mostra curvas representativas força-deslocamento dos resultados obtidos no numérico e experimental. Pôde-se observar que há uma diferença significativa do deslocamento encontrado no numérico, em relação ao experimental, mas isso se deve ao fato de que estes adesivos apresentam comportamento dúctil, por isso este comportamento da curva já era esperado.

Entretanto, pôde-se observar que para as condições com 20% de PTEs, observou-se uma maior proximidade do deslocamento entre o numérico e experimental, e isto se deve ao fato de que o adesivo para esta % de PTEs é considerado mais frágil, se comparado a outra condição com 10% de PTEs.

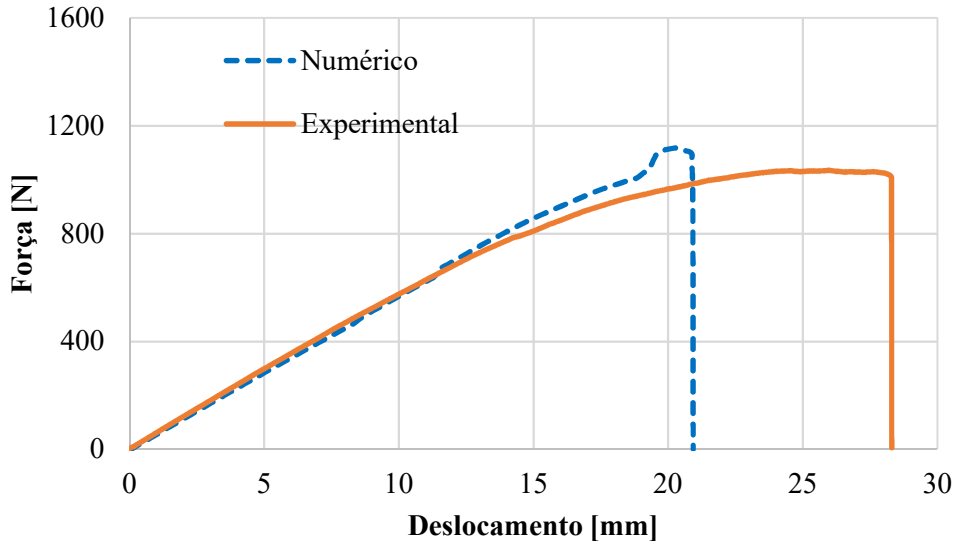


(a) Graduada com 10% de PTEs.

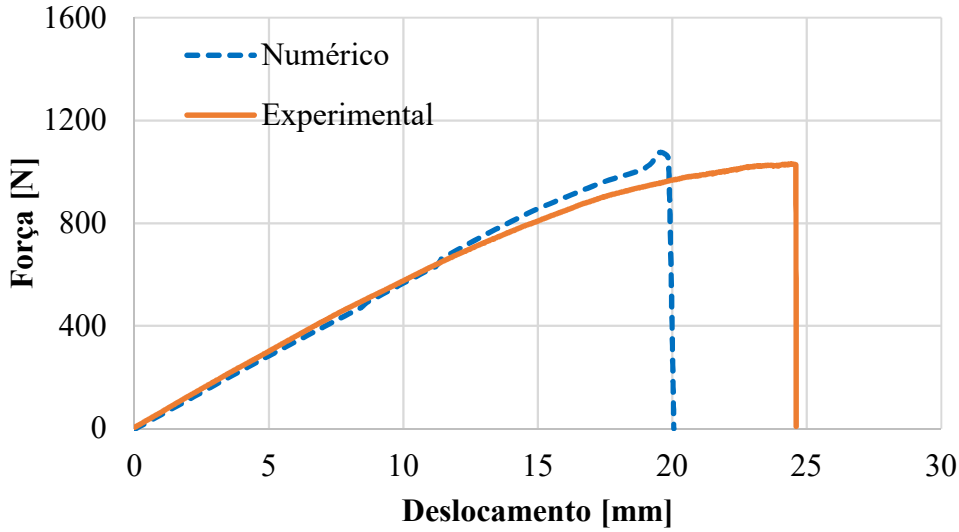


(b) Graduada com 20% de PTEs.

Figura 68 – Curvas força-deslocamento do numérico e experimental para as condições graduadas (10% e 20%), Betamate™2096.



(a) Graduada com 10% de PTEs.



(b) Graduada com 20% de PTEs

Figura 69 - Curvas força-deslocamento do numérico e experimental para as condições graduadas (10% e 20%), SikaForce®7888, 25 mm de sobreposição.

A partir dos valores encontrados no numérico, para todas as condições, pôde-se comparar as forças de ruptura encontradas, a fim de se comparar com os resultados obtidos no experimental.

A Figura 70 abaixo representa comparações das cargas máximas obtidas no experimental e no numérico para o adesivo Betamate™2096 (com 25 mm de sobreposição), e na Figura 71, para o adesivo SikaForce®7888 (com 12,5 e 25 mm de sobreposição). Pode-se observar, então, que os resultados da simulação numérica estão

muito semelhantes aos dados experimentais, para o adesivo Betamate™2096.

Já para o adesivo SikaForce®7888, a explicação para o fato de que as diferenças entre os valores obtidos são maiores, é que este adesivo possui uma grande plasticidade, que não é modelada com precisão pelas leis triangulares, que foram consideradas nesta análise. No entanto, é possível se obter uma ideia geral do comportamento das juntas.

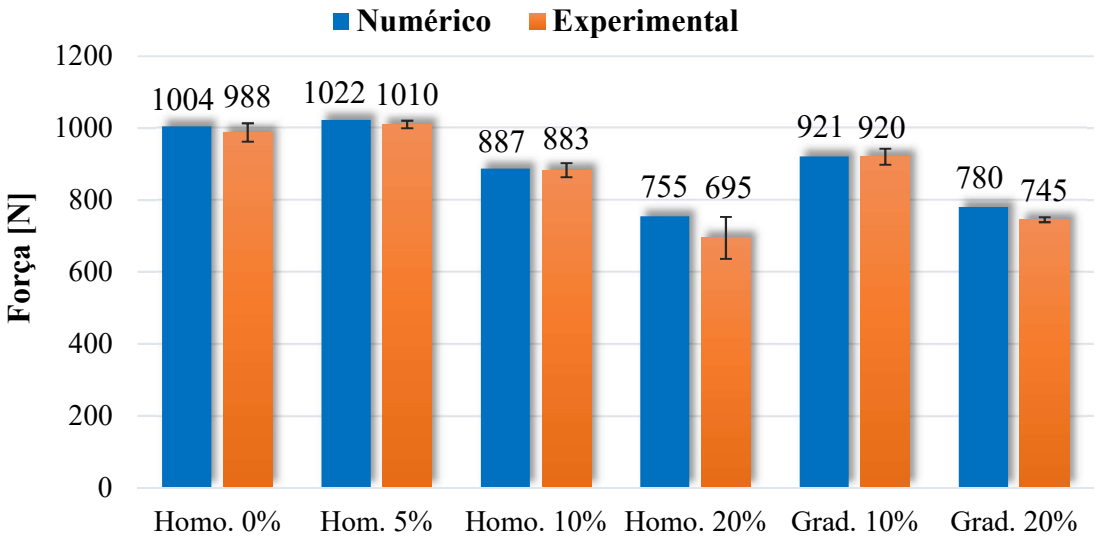
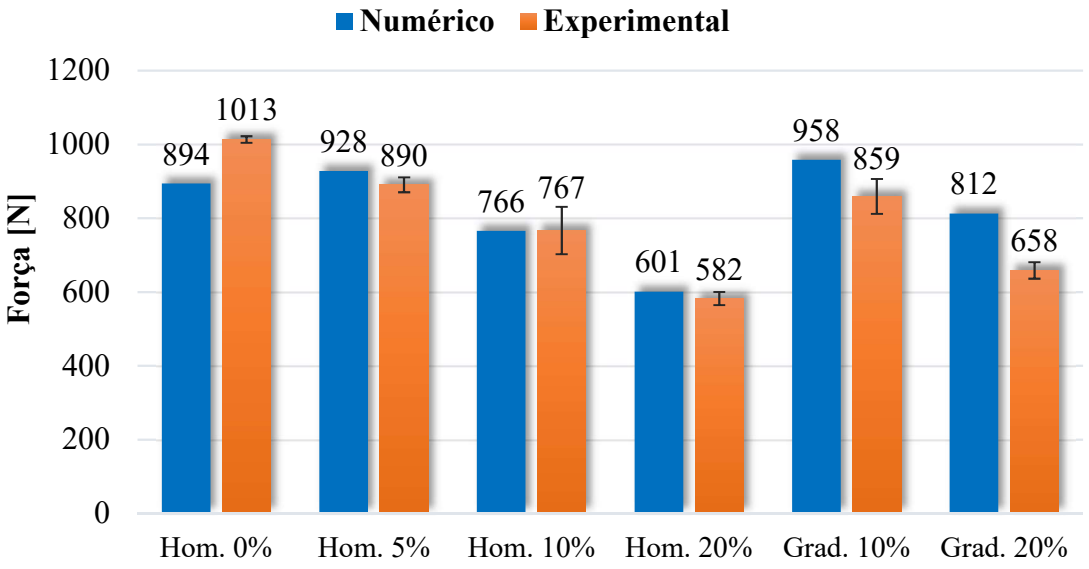
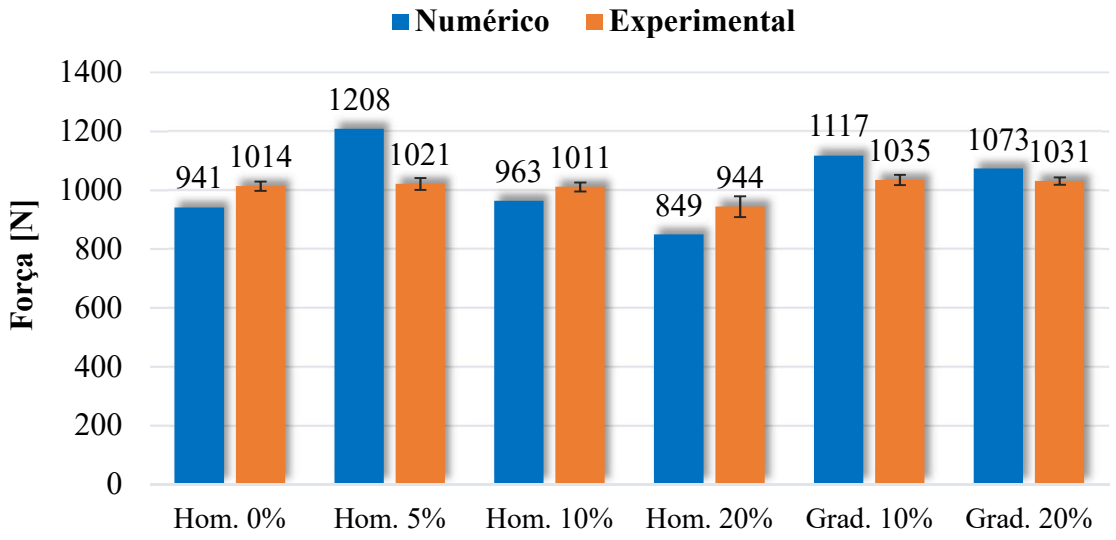


Figura 70 – Força máxima obtida na simulação numérica e no experimental (Betamate™2096).



(a) 12,5 mm de sobreposição



(b) 25 mm de sobreposição

Figura 71 - Forças de ruptura obtidas na simulação numérica e no experimental (SikaForce®7888).

4.1.4 Distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22})

As tensões de arrancamento (ε_{22}) são obviamente muito importantes na análise da fratura das juntas, nos ensaios de flexão, principalmente quando se trata da extremidade submetida a esforços de tração. Elas são as responsáveis pelo início de propagação da trinca.

Para se analisar a distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22}) ao longo da sobreposição, utilizou-se a ferramenta *Path*, do Abaqus, onde foi possível traçar uma reta ao longo da interface (superior) adesivo-substrato (Figura 72), pois, de acordo com Karachalios et. al. [45], esta é região mais susceptível a propagação da trinca durante o ensaio de flexão em quatro pontos.

Na Figura 73 pode-se visualizar mais detalhadamente a marcação do *Path* no adesivo.

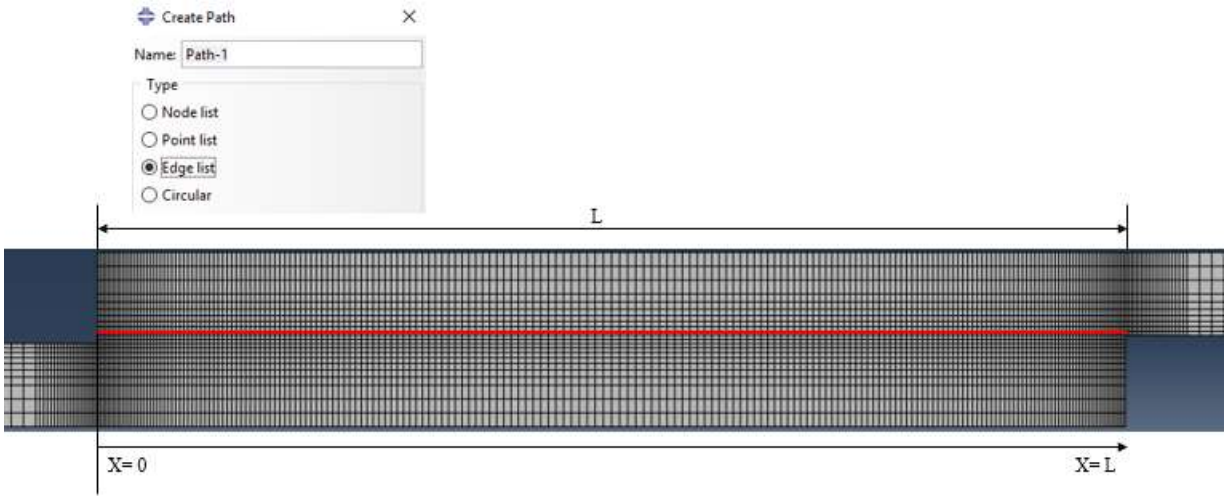


Figura 72 – Representação esquemática do *Path* ao longo da sobreposição.

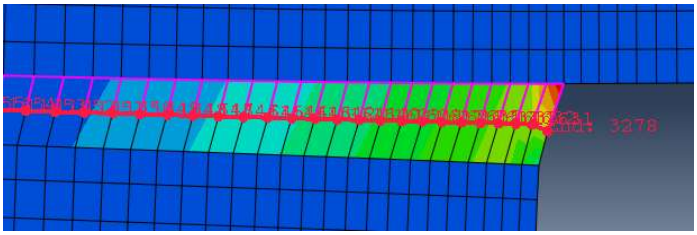


Figura 73 – Detalhe do *Path* na interface adesivo-substrato (superior).

O início (comprimento de sobreposição igual a zero no eixo x), corresponde a extremidade submetida a esforços de compressão, e o final (último ponto da sobreposição), corresponde a extremidade submetida a esforços de tração. Este modelo, diferentemente do anterior, considerou-se todo o sistema como modelo elástico, retirando-se todos os elementos coesivos do adesivo.

Além disso, para se obter uma melhor análise da distribuição de tensões, foi necessário um melhor refinamento da malha do modelo, principalmente nas extremidades da junta e na região próxima ao adesivo, vide Figura 74.

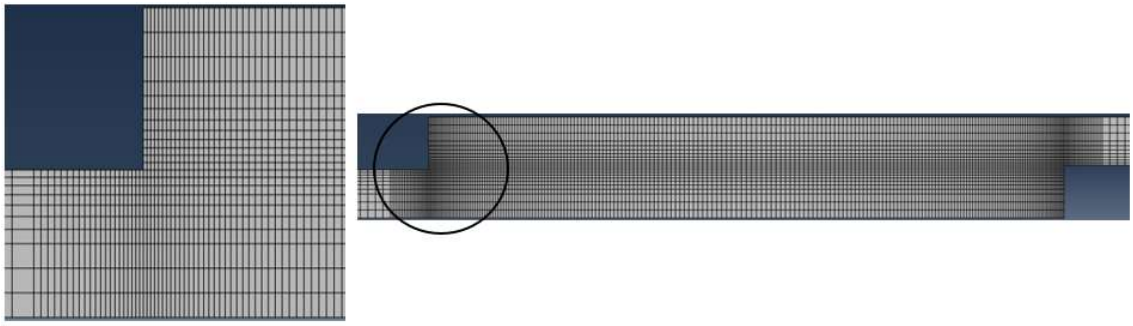


Figura 74 – Malha utilizada no modelo elástico para análise da distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22}).

A Figura 75 abaixo apresenta uma das simulações realizadas no Abaqus para a distribuição das tensões de arrancamento (ε_{22}) ao longo da sobreposição, e mostram que as tensões (de tração e compressão) estão localizadas bem nos extremos.

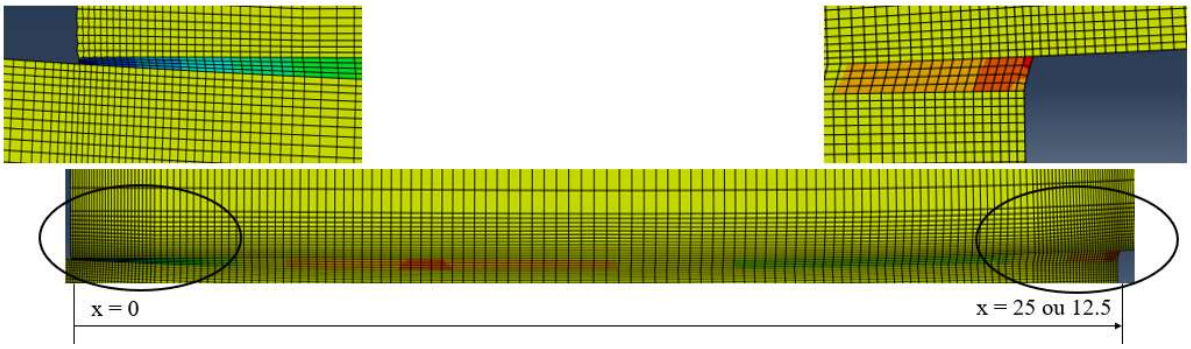


Figura 75 – Simulação da distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (ε_{22}).

O gráfico com a variação das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição podem ser vistas na Figura 76, para o adesivo Betamate™2096 e na Figura 77 para o adesivo SikaForce®7888.

Para obtenção do gráfico da distribuição das tensões de arrancamento, fez-se necessário calcular primeiramente a média de todos os valores positivos e negativos obtidos no Abaqus.

Em relação ao adesivo Betamate™2096, as condições graduadas (10% e 20% de PTEs) foram as que apresentaram um comportamento mais uniforme na distribuição de tensões ao longo da sobreposição, se comparado às condições homogêneas, que apresentaram grandes picos ao longo da camada adesiva.

Apesar de terem mostrado maiores picos de tensão na extremidade sob compressão, a extremidade sob tração obteve menores concentradores de tensão. As condições homogêneas (5% e 10% de PTEs) apresentaram as maiores tensões de arrancamento, principalmente na extremidade sob tração.

Em relação às forças de fratura, analisadas anteriormente, as condições graduadas foram as que apresentaram maior resistência à flexão, se comparado as condições homogêneas com a mesma % de PTEs.

Pôde-se, então, concluir que, a partir dos resultados aqui analisados faz-se interessante o uso de juntas graduadas, principalmente, com o objetivo de se obter uma redução das tensões de arrancamento na extremidade sob tração e uma maior resistência da junta.

Para utilização como método de descolagem, seria interessante aliar também a um método de indução de calor em conjunto, mas pode-se prever inicialmente que a condição graduada com 20% de PTEs seria uma boa condição para utilização deste método, pois já foi provado anteriormente que acima de 15% de PTEs, é considerada ótima condição para uso de descolagem.

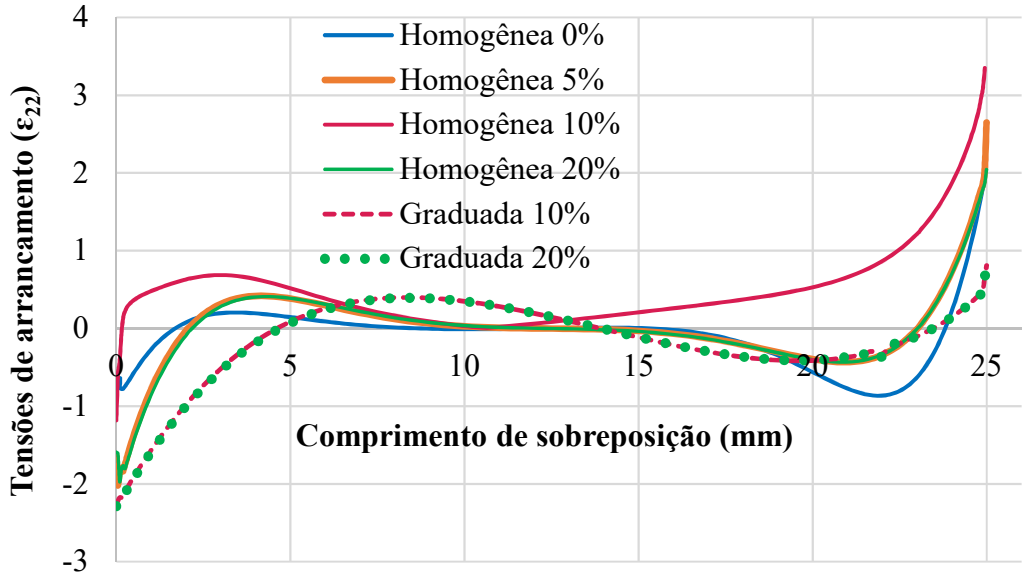
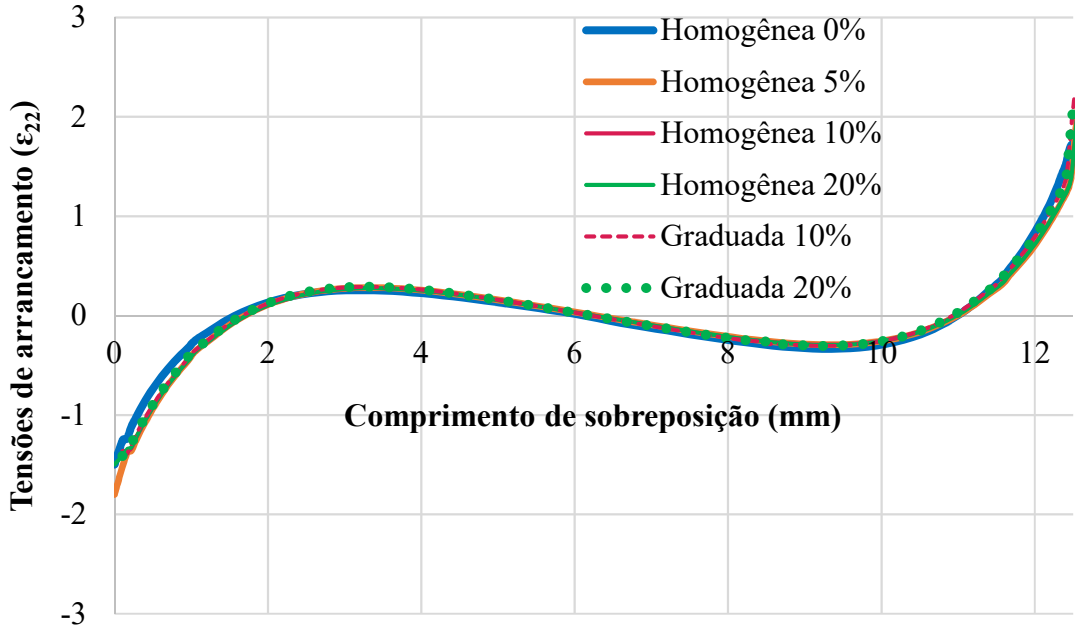


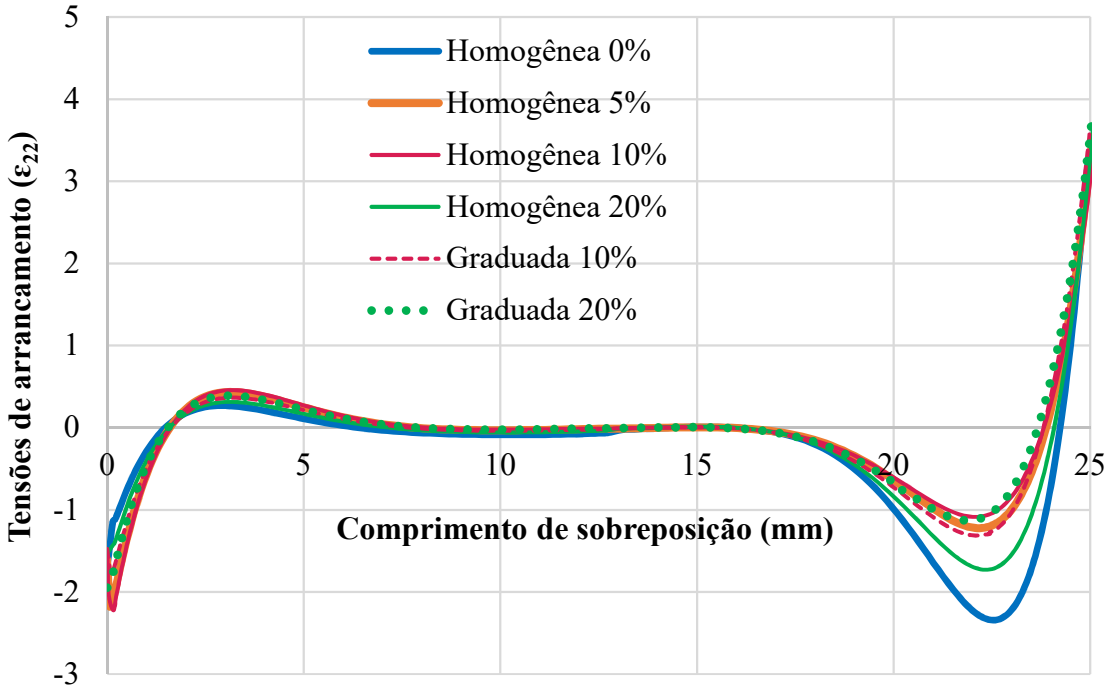
Figura 76 – Distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (Betamate™2096).

Em relação ao adesivo SikaForce®7888, não houve significativas diferenças na distribuição de tensões, em todas as condições, principalmente para 12,5 mm de sobreposição, devido ao fato de que este adesivo possui grande plasticidade, o que não se torna possível uma melhor análise das tensões, mesmo com a adição de PTEs.

Entretanto, pôde-se observar que as juntas com tamanho de sobreposição igual a 25 mm apresentaram, no geral, maiores valores de tensão de arrancamento, se comparado com as juntas de 12,5 mm de sobreposição.



(a) 12,5 mm de sobreposição



(b) 25 mm de sobreposição

Figura 77 - Distribuição das tensões de arrancamento ao longo da sobreposição (SikaForce®7888).

Os resultados experimentais são comparados com um modelo de elementos finitos e reforçam o fato de que a falha ocorre devido a tensões locais na extremidade da sobreposição submetida a esforços de tração.

Karachalios *et. al* [45] fizeram uma análise das tensões de arrancamento em juntas de sobreposição simples utilizando-se um modelo de ensaio de quatro pontos, no ABAQUS®. Foram utilizados aço de alta resistência como substrato e um adesivo estrutural epóxi, AV119. Foi observado que o aumento do pico de tensões de arrancamento próximo às extremidades não é linear com o carregamento. Conforme a força aumenta, o aumento correspondente da tensão é muito maior, indicando que uma condição instável é atingida e a falha deve ser esperada.

Também foram plotados gráficos utilizando-se o mesmo carregamento para diferentes espessuras de substrato (1,6 mm, 2 mm e 3 mm). Foram encontrados maiores picos de tensões para a espessura de 1,6 mm, indicando que quanto menor a espessura do substrato, menor serão os picos de tensões de arrancamento, e mais resistente será a junta.

Também foram notadas que existe uma assimetria na magnitude da deformação nas duas extremidades de sobreposição, tendo a extremidade sob tração tensões mais elevadas. Isto ocorre porque o adesivo é modelado usando o critério Raghava, [49, 50] que depende do componente de tensão hidrostático. Como conseqüência, o adesivo se comporta de maneira diferente em tração e compressão e, portanto, essa assimetria nas duas extremidades diferentes da sobreposição é esperada.

Capítulo 5 - Conclusões

Neste trabalho, PTEs foram utilizadas com o objetivo de se obter uma junta colada graduada adicionando-se partículas com diferentes % em peso ao longo da sobreposição. Foram utilizados dois tipos diferentes de adesivos estruturais, comumente usados na indústria automobilística. Testes de tração e ensaio de flexão em quatro pontos foram desenvolvidos em juntas de sobreposição simples, com substrato de aço de alta resistência. No final, foi possível chegar às seguintes conclusões:

1) Em relação ao ensaio DCB, para as concentrações aqui investigadas (0%, 5%, 10%), a máxima resistência a fratura em modo I, média, se deu à condição com 5% de PTEs.
2) A resistência ao cisalhamento das juntas, decresce com o aumento da % de PTEs, mesmo para pequenas concentrações (i.e. 1 e 5%). Porém, as condições graduadas com 1% e 5% de PTEs apresentaram um aumento em aproximadamente 9% e 5% na resistência ao cisalhamento, respectivamente, se comparado às condições homogêneas com a mesma % de PTEs.
3) No ensaio de flexão em quatro pontos, para as condições sem PTEs (i.e., homogênea com 0% de PTEs), não houve significativa diferença entre a resistência à flexão para diferentes comprimentos de sobreposição (12,5 mm e 25 mm). Entretanto, as condições graduadas apresentaram maior resistência, se comparado às condições homogêneas com a mesma % de PTEs.
4) O substrato deforma nos pontos de carregamento, para condições com 5% de PTEs e, portanto, evita que qualquer aumento da carga cause fratura da junta. Semelhante ao modo I de carregamento, esta condição apresenta a força de ruptura mais alta quando submetida a esforços de flexão.
5) As juntas graduadas com adesivo Betamate™2096, apresentaram menores picos de tensões de arrancamento (ε_{22}) nas extremidades sob tração, se comparado às condições homogêneas.
6) A partir dos resultados aqui analisados faz-se interessante o uso de juntas graduadas, principalmente, com o objetivo de se obter uma redução das tensões de arrancamento na extremidade sob tração e uma maior resistência à flexão da junta.

7) Já o adesivo SikaForce®7888, não apresentou diferenças entre as tensões de arrancamento, em todas as condições, para ambos tamanhos de sobreposição devido ao fato deste adesivo possuir grande plasticidade.
8) Os resultados experimentais, comparando-se com o modelo de elementos finitos, reforçam o fato de que a falha ocorre devido a tensões locais na extremidade da sobreposição submetida a esforços de tração.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Obter um modelo analítico do ensaio de flexão em quatro pontos realizado neste projeto.
2. Aliar o método de indução de calor e a técnica de um adesivo funcionalmente graduado, com adição de PTEs, para avaliar a descolagem das juntas.
3. Fabricar juntas graduadas com partículas de menor diâmetro e realizar ensaios estáticos.

Bibliografia

[1] *DIN EN 923:2008-06 (E), Adhesives - Terms and definitions (includes Amendment A1:2008),* 2008.

[2] *ASTM D907-06, Standard Terminology of Adhesives,* 2006.

[3] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães and M. F. de Moura, Juntas Adesivas Estruturais, Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2007.

[4] R. Carbas, *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi,* Porto: Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2008.

[5] M. Cunha, *Análise da influência da taxa de deslocamento no comportamento das juntas de cisalhamento,* Rio de Janeiro: Tese de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (UFF), 2012.

[6] S. Budhe, M. Banea, S. de Barros and L. da Silva, "An updated review of adhesively bonded joints in composite materials," *International Journal of Adhesion and Adhesives,* 2016.

[7] M. Ribeiro, *Programa para análise de juntas coladas: compósito/compósito e metal/compósito,* São Carlos: Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), 2009.

[8] E. Marchezin, L. Pardini and V. Guimarães, "Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi," *Revista Matéria,* vol. 17, p. 889 – 900, 2012.

[9] *EAA Aluminium Automotive Manual – Joining - 9. Adhesive bonding,* European Aluminium Association, 2015.

[10] R. Nashett, *Structural Bonding Alternatives for Plastics,* Henkel Corporation, 2014.

[11] J. Morris, *The Effect of Flaws on the Strength of Adhesive Joints,* Edinburgh: MEng Individual Project, University of Edinburgh, 2009.

[12] G. de Souza and B. da Silva, *Efeito do adesivo e do comprimento de sobreposição em juntas coladas,* Rio de Janeiro: Dissertação de graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), 2015.

[13] Adhesive and Sealant Council (ASC), "Adhesives.org and Sealants.org," 2008. [Online]. Available: http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion/adhesion-cohesion. [Accessed 28 março 2017].

[14] A. Ferreira, L. Linhares, P. Gustavo and V. Branco, *Efeito do comprimento de sobreposição na resistência de juntas adesivas de simples sobreposição,* Porto: U.C. Processos de Fabrico II, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2013.

[15] W. Andrew, Adhesives Technology Handbook, New York: Sina Ebnesajjad, 2008.

[16] R. Carbas, L. da Silva and G. Critchlow, "Adhesively bonded functionally graded joints by induction heating," *International Journal of Adhesion & Adhesives,* pp. 110-118, 2013.

[17] S. Kumar, "Analysis of tubular adhesive joints with a functionally modulus graded bondline subjected to axial loads," *International Journal of Adhesion & Adhesives,* p. 785–795, 2009.

[18] R. Bretoa, A. Chiminellia, E. Duviviera, M. Lizaranzua and M. Jiméneza, "Finite Element Analysis of Functionally Graded Bond-Lines for Metal/Composite Joints," *The Journal of Adhesion,* 2014.

[19] S. Kawasaki, G. Nakajima, K. Haraga and C. Sato, "Functionally Graded Adhesive Joints Bonded by Honeymoon Adhesion using Two Types of Second Generation Acrylic Adhesives of Two Components," *The Journal of Adhesion,* 2015.

[20] G. Viana, *Functionally Graded Adhesive Patch Repairs in Civil Applications,* Porto: Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2013.

[21] S. Stapleton, A. Waas and S. Arnold, "Functionally graded adhesives for composite joints," *International Journal of Adhesion & Adhesives,* p. 36–49, 2012.

[22] R. Carbas, L. da Silva, M. Madureira and G. Critchlow, "Modelling of Functionally Graded Adhesive Joints," *The Journal of Adhesion,* pp. 698-716, 2014.

[23] N. Stein, P. Weißgraeber and W. Becker, "Stress solution for functionally graded adhesive joints," *International Journal of Solids and Structures,* pp. 1-12, 2016.

[24] J. Durodola, "Functionally graded adhesive joints - A review and prospects,"

International Journal of Adhesion and Adhesives, pp. 1-7, 2017.

[25] R. Carbas, L. da Silva and L. Andrés, "Functionally graded adhesive joints by graded mixing of nanoparticles," *International Journal of Adhesion and Adhesives,* 2017.

[26] D. Banea, L. M. da Silva and R. Carbas, "Debonding on command of adhesive joints for the automotive industry," *International Journal of Adhesion & Adhesives,* pp. 14-20, 2015.

[27] D. Banea, L. da Silva, R. Carbas and S. de Barros, "Debonding on command of multi-material adhesive joints," *The Journal of Adhesion,* 2016.

[28] D. Banea, R. Carbas and R. Campilho, "Mechanical and thermal characterization of a structural polyurethane adhesive modified with thermally expandable particles," *International Journalof Adhesion & Adhesives,* pp. 191-199, 2014.

[29] D. Banea, L. da Silva, R. Carbas and R. Campilho, "Structural adhesives modified with thermally expandable particles," *The Journal of Adhesion,* pp. 823-840, 2015.

[30] D. Banea and L. da Silva, "Adhesively bonded joints in composite materials: an overview," *Part L: J. Materials: Design and Applications,* vol. 223, 2008.

[31] Y. Kawaguchi, D. Ito, Y. Kosaka, M. Okudo, T. Nakachi, H. Kake, J. Kim, H. Shikuma and M. Ohshima, "Thermally Expandable Microcapsules for Polymer Foaming—Relationship Between Expandability and Viscoelasticity," *Polymer Engineering and Science,* 2010.

[32] D. Banea, L. da Silva, R. Campilho and C. Sato, "Smart Adhesive Joints: An Overview of Recent Developments," *The Journal of Adhesion,* pp. 16-40, 2014.

[33] Y. Nishiyama and C. Sato, "Behavior of Dismantlable Adhesives Including Thermally Expansive Microcapsules," *Adhesion – Current Research and Application,* pp. 555-568, 2006.

[34] Y. Kawaguchi and T. Oishi, "Synthesis and Properties of Thermoplastic Expandable Microspheres: The Relation Between Crosslinking Density and Expandable Property," *Journal of Applied Polymer Science,* vol. 93, p. 505–512, 2004.

[35] T. Masuda, J. Osaka, T. Fujie, I. Takahara, I. Yosejima and K. Miki, "Thermally

Expandable Microsphere, process for producing the same, thermally expandable microsphere and use thereof". United States Patent US 2007/0154711 A1, 5 Julho 2007.

[36] M. Fujino, T. Taniguchi, Y. Kawaguchi and M. Ohshima, "Mathematical models and numerical simulations of a thermally expandable microballoon for plastic foaming," *Chemical Engineering Science,* pp. 220-227, 2013.

[37] J. Hu, Z. Zheng, F. Wang, W. Tu and L. Lin, "Synthesis and characterisation of thermally expandable microcapsules by suspension polymerisation," *Pigment & Resin Technology,* vol. 38, pp. 280-284, 2009.

[38] D. Banea, L. da Silva and R. Campilho, "Study on Microstructure Characteristics of TEPs-modified Adhesives," *Microscopy Society of America,* pp. 7-8, 2015.

[39] S. Pinto, *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis,* Porto: Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

[40] D. Banea, L. F. da Silva and R. Campilho, "Moulds design for adhesive bulk and joint specimens," *Assembly Automation,* vol. 32, no. 3, pp. 284 - 292, 2012.

[41] M. de Moura, R. Campilho and J. Gonçalves, "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," *Composites Science and Technology,* vol. 68, no. 10-11, pp. 2224-2230, 2008.

[42] M. de Moura, J. Gonçalves, J. Chousal and R. Campilho, "Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints," *International Journal of Adhesion and Adhesives,* vol. 28, no. 8, pp. 419-426, 2008.

[43] M. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Elsevier, 2011.

[44] L. Grant, R. Adams and L. da Silva, "Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry," *International Journal of Adhesion & Adhesives,* vol. 29, p. 405–413, 2008.

[45] E. Karachalios, R. Adams and L. F. M. da Silva, "The behaviour of single lap joints under bending loading," *Journal of Adhesion Science and Technology,* vol. 27, p. 1811–1827, 2013.

[46] D. Banea, L. da Silva, R. Carbas and R. Campilho, "Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry," *Journal of Adhesion Science and Technology,* 2016.

[47] A. Prathuru, N. Faisal, S. Jihan, J. A. Steel and J. Njuguna, "Stress analysis at the interface of metal-to-metal adhesively bonded joints subjected to 4-point bending: finite element method," *The Journal of Adhesion,* pp. 1545-5823, 2016.

[48] W. Filho, *Suporte topológico em paralelo para malhas de elementos finitos em análises dinâmicas de fratura e fragmentação,* PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil: Tese de doutorado, 2011.

[49] R. Raghava and R. Caddell, "A macroscopic yield criterion for crystalline polymers," *International Journal of Mechanical Sciences,* vol. 15, pp. 967-974, 1973.

[50] R. Raghava, C. R. and G. Yeh, "The macroscopic yield behaviour of polymers," *Journal of Materials Science,* vol. 8, p. 225–232, 1972.

[51] T. B. De Castro and G. W. Branco, *Juntas adesivadas em aços de alta resistência,* Rio de Janeiro: XXIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da PUC-Rio, 2015.

[52] L. Teixeira, *Caracterização do Comportamento Mecânico de Juntas de Sobreposição Simples Coladas com Adesivos Estruturais,* vol. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto: Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2000.

[53] *The First Aftermarket Structural Adhesive with the Strength and Durability for OEM-quality Repairs.,* Betamate 2098, Dow Automotive.

[54] W. Brockmann, P. Geiß, J. Klingen and B. Schroder, Adhesive Bonding: Materials, Applications and Technology, Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

ANEXOS

Dados Técnicos dos Adesivos

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

SikaForce® -7888 L10

Adesivo altamente estrutural de cura rápida para assemblagem

Industry

Dados técnicos do produto

Propriedades	Componente A SikaForce® 7888 L10 A	Componente B SikaForce® 7888 L10 B
Base química	Poliol, com cargas	Derivados de isocianatos sem cargas
Cor	Preto	Ligeiramente colorado
Cor – mistura	Preto	
Mecanismo de cura	Poli Adição	
Densidade (CQP 006-5)	1,66 g/cm^3 aprox.	1,18 g/cm^3 aprox.
Conteúdo de sólidos	100 %	100 %
Viscosidade 25ºC (CQP 538-1)	18 000 mPas aprox.	18 000 mPas aprox.
Viscosidade mistura (CQP 536-1)	65 000 mPas aprox.	
Rácio de mistura em volume em peso	100 100	100 70
Temperatura de aplicação	15 a 35°C	
Propriedades de Não Abatimento	Boa	
Tempo mistura[1] (CQP 536-3)	10 min. aprox.	
Desenvolvimento de força e velocidade de cura	Ainda não determinado	
Dureza Shore D[2] (CQP 53505 / CQP 537-1)	70 D aprox.	
Resistência à tracção[2] [4] (CQP 545-1 / ISO 527)	20 MPa aprox.	
Alongamento à ruptura[2][3] (DIN EN 1465 / CQP 546-1)	40 % aprox.	
Resistência ao arrancamento[2][3] (DIN EN 1465 / CQP 546-1)	20 MPa aprox.	
Temperatura de transição vítrea (CQP 509-1)	40ºC	
Prazo de validade (armazenagem entre 15 e 30 ºC)	6 meses	

[1] Tempo para a viscosidade aumentar até 150 000 mPas no reomato

[2] +23ºC e 50% H.R.

[3] Substrato: chapa de $AlCuMg_2$; espessura: 1,0mm

[4] Espessura nas amostras de ensaio: 4mm

Descrição

O SikaForce®-7888 L10 é um adesivo de assemblagem bi-componente altamente estrutural, que cura por reacção química de dois componentes para formar um polímero durável.

Os dois componentes são aplicados através do cartucho de forma manual ou com pistola de aplicação pneumática, ou através de um equipamento de mistura e aplicação. SikaForce®-7888 L10 é produzido de acordo com as normas de qualidade ISO 9001/14001 e com o programa de actuação responsável.

Vantagens

- Não cria fio
- Boas propriedades de não abatimento
- Tempo de abertura adequado para assemblagem e com cura rápida
- Altamente estrutural
- Alto alongamento (alta resistência ao impacto)
- Capaz de suportar altas tensões dinâmicas
- Boa aderência na maior parte dos substratos
- Boa resistência ao envelhecimento
- Não-condutivo electricamente
- Livre de solvente e PVC

Campos de Aplicação

O SikaForce®-7888 L10 é indicado para juntas estruturais que estão sujeitas a forças dinâmicas, e onde o desenvolvimento de elevada força inicial é uma exigência. O SikaForce®-7888 L10 é ideal como adesivo de colagem de variados substratos. Substratos utilizáveis são os plásticos e metais, particularmente alumínio (incluindo alumínio anodizado), aço (incluindo fosfatado, cromatado e galvanizado), ferro com primário ou pintado, SMC ou peças em fibra de vidro, madeira e materiais cerâmicos.

Devem ser tidos em consideração os plásticos transparentes e os fenómenos de stress cracking.

Mecanismo de cura

A cura do SikaForce®-7888 L10 desenvolve-se por reacção química dos dois componentes. Temperaturas superiores aceleram a reacção assim como temperaturas inferiores aumentam o tempo de cura.

Resistência química

O SikaForce®-7888 L10 tem uma excelente resistência à humidade.
A resistência química depende do tipo e condição do substrato, concentração química, tempo de exposição à temperatura. Ensaio da adaptação do adesivo ao projecto é aconselhável.
Sem exposição do adesivo aos produtos químicos a resistência do adesivo à temperatura pode chegar aos 100ºC. Para tempos de exposição curtos, a temperatura até pode ser superior.
No caso de exposição a agentes químicos ou temperatura, aconselhamos a realização de testes. Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Método de Aplicação

Preparação de superfície
As superfícies devem estar limpas, livres de gordura, óleos e pó.
Por favor contacte os nossos serviços técnicos para aconselhamento em aplicações específicas.

Aplicação
Cartuchos bi-componenente:
Recomenda-se a utilização manual ou equipamento pneumático.
Utilizar os bicos de aplicação Static Mixer Sulzer Quadro 8,7z.
Antes da aplicação nos substratos deve ser deitado fora cerca de 30cm de cordão da mistura de adesivo para uma mistura com qualidade assegurada.
Baldes:
O SikaForce®-7888 L10 é dispensado dos baldes através de equipamento pneumático ou hidráulico com sistemas de mistura dinâmicos ou misturadores estáticos.
Não aplicar a temperaturas inferiores a 15ºC ou superiores a 30ºC. A temperatura óptima do substrato é entre 15 e 30ºC.
Contactar os nossos serviços técnicos para aconselhamento.

Remoção
O SikaForce®-7888 L10 não curado, pode ser removido das ferramentas e equipamentos com Sika Remover 208, isopropanol, acetona, etc. Uma vez curado, o material apenas pode ser retirado mecanicamente.
Em caso de contacto com as mãos, lavar de imediato com os toalhetes Sika® Handclean e água. Não usar solventes.

Condições de armazenamento
O componente deve ser mantido entre +5°C e +30°C num lugar seco. O componente B deve ser guardado a uma temperatura entre os 15 e os 30ºC. Não expor à luz directa ou geada. Após abertura da embalagem o conteúdo deve ser protegido da humidade atmosférica. A temperatura mínima durante o transporte é de 0º C por um período máximo de 3 dias.

Outras informações

Cópias das seguintes publicações estão disponíveis quando pedidas:
- Ficha de Segurança

Embalagem

Componente A Resina	
Componente A	Balde 25 Kg
Componente B	Balde 20 kg
Cartucho bi-componente + Static Mixer 8,7z	600ml (componente A+B)

Componente B – Endurecedor	
Lata	1 kg
Lata	5 Kg
Balde	20 Kg
Tambor	250 kg
IBC	1200 kg

Valores base

Todos os valores apresentados nesta ficha de produto são baseados em testes de laboratório. Valores obtidos podem variar devido a circunstâncias fora do nosso controle.

Informação Higiene e Segurança

Para informações e aconselhamento sobre segurança no manuseamento, armazenamento e disposição dos produtos químicos, os utilizadores devem ter em conta as folhas de segurança que contém dados, relativos a segurança, físicos, ecológicos, toxicológicos e outros.

Informação Legal

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais, de acordo com as recomendações da Sika. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. O produto deve ser ensaiado para aferir a adequabilidade do mesmo à aplicação e fins pretendidos. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar a versão mais recente da nossa Ficha de Produto específica do produto a que diz respeito, que será entregue sempre que pedida.

Informação adicional disponível em:
www.sika.pt
www.sika.com

Sika Portugal SA
Divisão Indústria
Rua Santarem, 113
4400-292 V.N.Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 377 69 77

ACTUAÇÃO RESPONSÁVEL

Implementado na fábrica de Ovar