

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**EFEITO DE UM PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL NA
RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS ADESIVAS
EXPOSTAS À UMIDADE SATURADA E NÉVOA SALINA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DILSON SAVARIS CORTELINI JUNIOR

RIO GRANDE, RS

2025

DILSON SAVARIS CORTELINI JUNIOR

**EFEITO DE UM PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL NA RESISTÊNCIA
MECÂNICA DE JUNTAS ADESIVAS EXPOSTAS À UMIDADE SATURADA E
NÉVOA SALINA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Mecânica” – Área de Concentração: Simulação, Controle e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi

Coorientador: Prof. Dr. Diego Tolotti

RIO GRANDE, RS

2025

Ficha Catalográfica

C828e Cortelini Junior, Dilson Savaris.

Efeito de um processo de pintura industrial na resistência mecânica de juntas adesivas expostas à umidade saturada e névoa salina / Dilson Savaris Cortelini Junior. – 2025.

102 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2025.

Orientador: Dr. Kleber Eduardo Bianchi.

Coorientador: Dr. Diego Tolotti.

1. Junta adesiva 2. Adesivo epóxi 3. Umidade 4. Névoa salina
5. Temperatura 6. Pintura I. Bianchi, Kleber Eduardo II. Tolotti, Diego
III. Título.

CDU 621

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPGEMec



Ata nº **04/2025** da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos dezoito dias do mês de março de dois mil e vinte e cinco, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às oito horas e trinta minutos, online via plataforma Teams, a que se submeteu o mestrando **DILSON SAVARIS CORTELINI JUNIOR**, de nacionalidade brasileira, dissertação ligada à linha de pesquisa de Simulação e Controle de Processos de Fabricação, com o seguinte título: **EFEITO DE UM PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS ADESIVAS EXPOSTAS À UMIDADE SATURADA E NÉVOA SALINA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Kleber Eduardo Bianchi, Diego Tolotti de Almeida, Carlos Eduardo Marcos Guilherme e o convidado Vagner Braga sob a presidência do Professor Kleber Eduardo Bianchi. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADO
2. Diego Tolotti de Almeida: APROVADO
3. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: APROVADO
4. Vagner Braga: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1.	_____		Documento assinado digitalmente KLEBER EDUARDO BIANCHI Data: 18/03/2025 11:48:05-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
	CPF: 440.783.230-49			
2.	_____		Documento assinado digitalmente DIEGO TOLOTTI DE ALMEIDA Data: 18/03/2025 12:16:42-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
	CPF: 010.687.950-26			
3.	_____		Documento assinado digitalmente CARLOS EDUARDO MARCOS GUILHERME Data: 19/03/2025 17:03:16-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
	CPF: 732.846.700-25			
4.	_____		Documento assinado digitalmente VAGNER BRAGA Data: 19/03/2025 17:22:11-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br	_____
	CPF: 029.029.730-39			

 Documento assinado digitalmente
DILSON SAVARIS CORTELINI JUNIOR
Data: 19/03/2025 23:01:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dilson Savaris Cortelini Junior: _____

AGRADECIMENTOS

A Deus por cada etapa concluída na vida.

Aos meus pais Hilda Savaris e Dilson Cortelini, bem como minhas irmãs Thais Savaris Cortelini e Millene Savaris Cortelini, pelo incentivo e apoio durante toda minha trajetória acadêmica.

Ao Prof. Dr. Kleber Bianchi e Dr. Diego Tolotti pela orientação e acompanhamento durante todo o período de pós-graduação.

Aos amigos que sempre me suportaram durante o desenvolvimento deste trabalho, sua compreensão e aconselhamento permitiram que esta etapa fosse concluída.

Aos colegas de trabalho, principalmente do setor de pesquisa, desenvolvimento e inovação, pelo auxílio na realização deste trabalho e participação em todas as etapas do estudo.

À Bruning Tecnometal pelo incentivo e apoio à educação de seus colaboradores, bem como por fornecer os materiais e equipamentos necessários para que este trabalho acontecesse.

À Universidade Federal do Rio Grande – FURG por permitir o acesso à educação de qualidade.

*“Whatever you are not changing, you
are choosing” - Laurie Buchanan*

EFEITO DE UM PROCESSO DE PINTURA INDUSTRIAL NA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE JUNTAS ADESIVAS EXPOSTAS À UMIDADE SATURADA E NÉVOA SALINA

RESUMO

A crescente utilização de adesivos nos setores da mobilidade se deve à necessidade de desenvolver veículos e implementos cada vez mais leves. As juntas adesivas oferecem características notáveis no que diz respeito à união de materiais, como a distribuição uniforme de tensões e a capacidade de unir diferentes substratos. No entanto é essencial caracterizar as alterações das propriedades das juntas causadas pela exposição a condições adversas, como altas temperaturas, umidade e ambientes corrosivos. Tal exposição ocorre ao longo da vida em operação da peça, bem como em algumas etapas de fabricação posteriores à confecção da junta. A ausência de modelos que representem a perda de propriedades decorrentes da exposição a ambiente agressivo, seja na produção ou na operação das peças, representa um importante desafio para projetistas, tendo limitado uma maior adoção de adesivos estruturais. Este trabalho tem como primeiro objetivo analisar o comportamento de juntas sobrepostas simples metálicas, unidas por dois tipos de adesivos estruturais epóxi, após exposição a diferentes condições de cura: em laboratório e em estufas pertencentes a uma linha de pintura industrial. São detalhados os efeitos das temperaturas de exposição, tempos de cura e suas relações com a resistência mecânica das amostras. Após esta análise preliminar, corpos de prova do adesivo que se mostrou mais adequado foram submetidos a testes de envelhecimento acelerado, em câmara úmida e névoa salina. Os resultados obtidos na primeira etapa, relacionada ao processo de pintura, revelaram uma redução significativa da resistência das juntas adesivas. O mesmo ocorreu na segunda etapa, de envelhecimento acelerado, onde nova redução foi observada. Por fim uma peça agrícola de protótipo foi construída para validar a viabilidade de processamento industrial de juntas adesivas.

Palavras-chave: junta adesiva; adesivo epóxi; umidade; névoa salina; temperatura; pintura.

EFFECT OF AN INDUSTRIAL PAINTING PROCESS ON MECHANICAL STRENGTH OF EPOXY-BASED ADHESIVE JOINTS EXPOSED TO CONDENSATION HUMIDITY AND SALT-SPRAY

ABSTRACT

The increasing use of adhesives in the mobility sector is driven by the necessity to create lighter vehicles and equipment. Adhesive joints provide significant advantages when joining materials, including uniform stress distribution and the ability to bond different substrates. However, it is crucial to identify how exposure to challenging conditions - such as high temperatures, humidity, and corrosive environments - affects the properties of these joints. Such exposure can occur during the operational life of the component as well as at various manufacturing stages after the joint is created. The lack of models representing property loss due to aggressive environments poses a significant challenge for designers, restricting the wider use of structural adhesives. The main objective of this study is to analyze the behavior of metallic single lap joints bonded using two types of epoxy structural adhesives. This analysis is conducted after exposing the joints to different curing conditions: in a laboratory oven and in industrial painting line curing ovens. The study details the effects of exposure temperatures and curing times, as well as their relationships with the mechanical strength of the samples. After the initial analysis, the adhesive deemed most suitable for the painting process underwent accelerated aging tests in a humid chamber and salt spray. The initial stage results concerning the painting process showed a significant reduction in the resistance of the adhesive joints. A similar trend was observed in the second stage, which involved accelerated aging, where an additional reduction was noted. A prototype agricultural part was developed to validate industrial adhesive processing feasibility.

Keywords: adhesively bonded joints; epoxy adhesive; humidity; salt spray; temperature; painting process

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diversas tecnologias de união aplicadas na construção de um veículo Audi A4.....	20
Figura 2 – Modos de falha de juntas coladas com adesivo: (a) falha no substrato (incluindo falha por arrancamento de fibras e por ruptura do material); (b) falha coesiva (incluindo falha coesiva de camada fina); (c) falha adesiva; (d) falha mista.....	23
Figura 3 - Modelos de juntas adesivas comumente utilizados.	25
Figura 4 - Modos de carregamento principais: (a) Modo I: abertura, (b) Modo II: cisalhamento no plano, (c) Modo III: cisalhamento externo ao plano (rasgamento)...	26
Figura 5 – Resultados de resistência reportados por Houjou <i>et al.</i> (2022), em condições como curado, após 2 dias e após 30 dias.	28
Figura 6 - Diagrama tensão vs. deformação para corpos de prova com e sem tensões residuais causadas pelo aquecimento.	29
Figura 7 – Resistência ao cisalhamento em função do envelhecimento em água a 70°C para juntas adesivas epoxy com substrato de alumínio.	30
Figura 8 - Curva tensão vs. deformação dos adesivos: a) XNR 6852-1 e b) SikaPower 4720, em função do meio de envelhecimento (temperatura de teste: 23°C).....	31
Figura 9 - Efeito da exposição de adesivo epóxi EA929 aos produtos químicos: A) Gasolina a 75°F, B) Óleo para engrenagens a 250°F, C) Água destilada a 75°F, D) Água de torneira a 212°F, e) 38% Shellzone (Fluído de refrigeração e anticongelante) a 250°F.....	32
Figura 10 - Efeito da exposição a névoa salina na resistência ao <i>lap-shear</i> de juntas adesivas	35
Figura 11 - Efeito da exposição a umidade na resistência ao cisalhamento de juntas sobrepostas simples.....	36
Figura 12 - Fluxograma metodológico do trabalho realizado	38
Figura 13 - Fluxograma do processo de pré-tratamento com fosfato tricatiônico.....	39
Figura 14 – Fluxograma do processo de pintura e-coat.	40
Figura 15 – Fluxograma do processo de pintura líquida.	41
Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no trabalho e seus componentes.....	44
Figura 17 – a) Aplicação do adesivo estrutural sob o corpo de prova, b) Fixação dos	

corpos de prova com grampos em sua respectiva gancheira.	45
Figura 18 - Corpos de prova antes (a) e após (b) a fixação dos alinhadores por processo de solda ponto por resistência.....	48
Figura 19 – Térmógrafo utilizado na criação do perfil de tempo vs. temperatura nas estufas de cura dos processos de pintura.	49
Figura 20 - Sensores e termógrafos posicionados nos corpos de prova antes da entrada na estufa de cura de pintura líquida.	49
Figura 21 – Máquina de tração utilizada no ensaio (a) e espécime em ensaio (b).....	50
Figura 22 – Lupa modelo Dino-Lite AM4113ZT utilizado para registro das macrografias.	50
Figura 23 – Corpos de prova preparados para os ensaios de intemperismo. a) espécime pintado nos processos <i>e-coat</i> + líquida, b) espécime curado na estufa <i>e-coat</i> com substrato recoberto por cera, c) espécime recoberto com cera antes do teste de <i>salt spray</i> , d) espécime recoberto com cera após dias de exposição ao <i>salt spray</i>	52
Figura 24 – Espécimens do teste de adesão da tinta sob o adesivo curado: a) substrato metálico, b) adesivo aplicado antes da cura, c) espécime após pintura <i>e-coat</i> , d) espécime com camada de adesivo lixada, e) espécime após pintura líquida.	54
Figura 25 – a) Representação 3D do para-lama utilizado como protótipo, b) Esquema de aplicação de adesivos estrutural e pontos de fixação até a cura.	56
Figura 26 – Janela de cura proposta para o adesivo monocomponente A.	57
Figura 27 - Termografia de corpos de prova em forno estufa do laboratório de testes.	58
Figura 28 - Termografia de corpos de prova em estufa de cura do processo de pintura por eletrodeposição.....	59
Figura 29 – Termografia de corpos de prova em estufa de cura do processo de pintura industrial com tinta líquida.....	60
Figura 30 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em estufa estacionária de laboratório.....	61
Figura 31 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em estufa estacionária de laboratório agrupados: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	61
Figura 32 - Ensaio de tração cisalhante dos Corpos de Prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i>	62

Figura 33 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i> : a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	62
Figura 34 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i> e posterior pintura líquida.	63
Figura 35 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i> e posterior pintura líquida: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	63
Figura 36 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura apenas na estufa de cura do processo de pintura <i>e-coat</i>	64
Figura 37 - Imagens da amostra do Monocomponente A após cura na estufa do processo <i>e-coat</i> : a) antes do ensaio de tração cisalhante, b) após o ensaio.	64
Figura 38 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura em estufa de laboratório: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	65
Figura 39 - Ensaio de tração cisalhante dos Corpos de Prova do adesivo bicomponente B após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i>	66
Figura 40 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura no processo completo de pintura <i>e-coat</i> : a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	66
Figura 41 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo bicomponente B após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i> e posterior pintura líquida.	67
Figura 42 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura em processo completo de pintura <i>e-coat</i> e posterior pintura líquida: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	67
Figura 43 - Matriz de escolha do adesivo mais adaptado ao processo.	68
Figura 44 – Média de resistência do adesivo monocomponente A aos diferentes processos submetidos.	69
Figura 45 – Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina.	70
Figura 46 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura	

após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	71
Figura 47 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina.	71
Figura 48 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) antes do ensaio de tração cisalhante, b) após o ensaio de tração cisalhante.....	72
Figura 49 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina.	72
Figura 50 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	73
Figura 51 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina.	73
Figura 52 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	74
Figura 53 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina.	74
Figura 54 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	75
Figura 55 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina. (Dados de deslocamento e deformação específica do CP5 devem ser desconsiderados devido ao escorregamento durante o teste de tração).	75
Figura 56 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	76
Figura 57 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo	

monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina (Deve-se desconsiderar o resultado de deformação do CP3).....	77
Figura 58 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	77
Figura 59 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina (Necessário desconsiderar valores de deformação do CP4).	78
Figura 60 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	78
Figura 61 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.....	79
Figura 62 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	79
Figura 63 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.....	80
Figura 64 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	80
Figura 65 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada (Desconsiderar dados de deformação do CP2).	81
Figura 66 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	81
Figura 67 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.....	82
Figura 68 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio	

de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	82
Figura 69 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap-shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada.....	83
Figura 70 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	83
Figura 71 - Ensaio de tração cisalhante (<i>lap shear</i>) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada (Desconsidera valores de deformação do CP2).	84
Figura 72 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	84
Figura 73 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada.....	85
Figura 74 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.	85
Figura 75 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada.....	86
Figura 76 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.....	86
Figura 77 – Resultado de resistência e dispersão encontrados nos testes de tração cisalhante conforme o tempo de envelhecimento aplicado em ensaio de névoa salina.	87
Figura 78 - Resultado de resistência e dispersão encontrados nos testes de tração cisalhante conforme o tempo de envelhecimento aplicado em ensaio de câmara úmida.	88
Figura 79 – Espécimens com a menor resistência nos grupos de controle e após 1000h de envelhecimento. a) estufa e-coat (sem envelhecimento), b) pintura e-coat + líquida (sem envelhecimento), c) estufa e-coat submetido a 1000h de névoa salina, d) pintura	

e-coat + líquida submetido a 1000h de névoa salina, e) estufa *e-coat* submetido a 1000h de umidade saturada, f) Pintura *e-coat* + líquida submetido a 1000h de umidade saturada. 89

Figura 80 – Corpos de prova após realização do teste de aderência por fita. A) Ferramentas utilizadas, b) e c) corpos de prova não preparados, d) corpo de prova preparado por lixamento. 90

Figura 81 – Fabricação do para-lamas substituindo solda ponto e MAG por adesivo estrutural. a) Aplicação do adesivo no suporte da sinaleira, b) aplicação do adesivo no reforço do para-lama e c) solda ponto por projeção para manter estrutura do para-lama durante a pintura. 91

Figura 82 – Para-lamas após fabricação com adesivo estrutural carregados no sistema de pintura. A) Par de para-lamas carregados nos carros do sistema de pintura *e-coat* por eletrodeposição e b) Para-lama após o processo de pintura por eletrodeposição. 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos adesivos estruturais com base em sua composição química.....	22
Tabela 2 - Tempo até a falha de juntas expostas a condição de estresse hidrotermal.	33
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1008 segundo norma SAE J403.	42
Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas dos adesivos utilizados neste trabalho.	43
Tabela 5 - Matriz decisória com os principais requisitos almejados nos adesivos e seu respectivo grau de relevância na análise.	51
Tabela 6 – Quantidade e tipos de corpos de prova submetidos aos ensaios de névoa salina.....	53
Tabela 7 - Quantidade e tipos de corpos de prova submetidos aos ensaios de câmara de umidade saturada.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos Gerais.....	19
1.2	Objetivos Específicos.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Adesivos Estruturais	20
2.1.1	Classificação dos adesivos	21
2.1.2	Teorias de adesão.....	22
2.1.3	Modos de falha.....	23
2.2	Desempenho de juntas adesivas	24
2.2.1	Configurações geométricas	24
2.3	Durabilidade de juntas adesivas	26
2.3.1	Efeitos da temperatura	27
2.3.2	Efeito da umidade.....	30
2.3.3	Efeito de contato com produtos químicos.....	31
2.3.4	Efeitos compostos	32
2.4	Ensaio de envelhecimento	33
2.4.1	Ensaio de salt spray	34
2.4.2	Ensaio em câmara de umidade saturada	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Descrição do problema	37
3.1.1	Sistemas de pintura eletrostática (e-coat) e pintura líquida.....	37
3.2	Material utilizado	41
3.2.1	Substrato	41
3.2.2	Adesivos estruturais	42
3.3	Fabricação dos corpos de prova.....	43
3.3.1	Projeto dos corpos de prova.....	43
3.3.2	Preparo das amostras	45
3.3.3	Processo de cura.....	46
3.4	Solda ponto dos alinhadores.....	48
3.5	Termografias.....	48

3.6	Ensaios mecânicos e análise do modo de falha	49
3.6.1	Macrografia das falhas	50
3.6.2	Matriz decisória do adesivo	51
3.7	Ensaios de envelhecimento acelerados.....	52
3.7.1	Ensaio de névoa salina (Salt spray)	53
3.7.2	Ensaio de câmara de umidade saturada (Condensation atmosphere with constant humidity)	53
3.8	Teste de aderência de tinta.....	54
3.9	Fabricação de protótipo (amostra para campo)	55
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	57
4.1	Termografias dos processos de pintura	57
4.1.1	Estufa de cura estacionária de laboratório	57
4.1.2	Estufa de cura do processo de pintura por eletrodeposição por imersão	58
4.1.3	Estufa de cura do processo de pintura industrial com tinta líquida.....	59
4.2	Avaliação do adesivo mais relevante ao processo	60
4.2.1	Adesivo monocomponente A (base epóxi de cura a quente)	60
4.2.2	Adesivo bicomponente B (base epóxi de cura a temperatura ambiente)	64
4.3	Matriz de decisão	67
4.4	Avaliação da resistência do adesivo epóxi monocomponente após ensaios de intemperismo.....	68
4.4.1	Resistência mecânica após ensaio de névoa salina	70
4.4.2	Resistência mecânica após ensaio de câmara de umidade saturada.....	78
4.4.3	Comparação de resultados obtidos nos testes de envelhecimento.....	87
4.5	Teste padrão para avaliação de aderência por fita	89
4.6	Fabricação de um protótipo	91
5	CONCLUSÕES	93
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	95
7	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias e dos processos de fabricação, as juntas adesivas têm conquistado um papel crescente entre os métodos tradicionais de união. A busca por veículos mais leves e eficientes, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono, exige a união de chapas mais finas e a substituição do aço por materiais alternativos. Essa evolução em materiais e processos torna essencial o desenvolvimento de novos métodos de união, destacando-se, nesse contexto, a utilização de adesivos estruturais. Segundo Costa et al. (2016), as juntas adesivas se destacam por sua capacidade de redução de peso em estruturas, principalmente quando combinadas ao uso de materiais mais leves, como alumínio e compósitos.

A união por adesivo também possui por característica uma melhor distribuição de tensões, em comparação aos métodos convencionais de união, o que garante uma maior rigidez e transmissão de carga. Adicionalmente, as uniões por adesivos apresentam maior amortecimento e resistência à fadiga, devido a sua natureza polimérica (SILVA; ÖCHSNER; ADAMS, 2018). Já as juntas soldadas a arco elétrico, segundo Petrie (2000), requerem um grande aporte de calor, sendo comumente utilizadas na união de chapas de metal relativamente espessas. Quando possível, sua eventual aplicação na união de chapas finas pode causar distorções acentuadas. Por fim, a terceira alternativa comumente observada em ambiente industrial são as juntas parafusadas ou rebitadas, as quais apresentam a vantagem de ser produzidas sem necessidade de aporte de calor. Por outro lado, devido à característica de atuação pontual, bem como à alteração que provocam no fluxo de forças da peça, as juntas parafusadas representam pontos de concentração de tensões (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Embora o uso de adesivos estruturais seja atrativo do ponto de vista de processo, o projeto de peças envolvendo adesivos é um grande desafio. Os modelos de análise clássicos são muito específicos, podendo ser aplicados apenas em geometrias de junta muito simples, ao passo que a modelagem numérica é complexa, envolvendo custos cuja proporção é inaceitável à maioria das empresas. Por fim, quaisquer que sejam os modelos empregados na análise da junta em projeto, esses modelos devem levar em consideração a degradação do adesivo em face do ambiente em que opera, e das cargas às quais é submetido. Boa parte dos recentes estudos focados em uniões por adesivos abordam tais questões (VIANA et al., 2016; LI et al., 2016 e FAY; MADDISON, 1990).

Este estudo de natureza exploratória visa entender como o processo de pintura em ambiente industrial pode afetar a resistência de juntas adesivas. Para tal foram elaborados experimentos que incluíram a exposição de corpos de prova a um processo de pintura industrial. Também foram realizados testes de envelhecimento em névoa salina e câmara úmida. A justificativa para o estudo decorre do interesse em utilizar adesivos estruturais em substituição à solda em peças do setor agrícola. Os diversos conjuntos de corpos de prova, os quais foram sujeitos a condições de ambiente e temperatura distintas, foram posteriormente submetidos a testes de tração, cujos resultados permitiram uma avaliação comparativa de efeito.

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem por objetivo avaliar dois tipos de adesivos estruturais disponíveis no mercado, buscando entender qual apresenta as melhores características para aplicação na união de componentes metálicos do setor da mobilidade, que necessariamente passam por processo de pintura como forma de proteção à corrosão. O método de auxílio à decisão leva em conta aspectos de ordem geral, como resistência mecânica, facilidade de fabricação e custos. Após a escolha do adesivo mais adequado, busca-se avaliar a influência da temperatura, umidade e ambientes corrosivos na resistência das uniões.

1.2 Objetivos Específicos

Com o intuito de entender melhor a influência do processo de pintura nas propriedades dos adesivos analisados, foram estabelecidas as seguintes metas:

- Realizar uma avaliação comparativa, baseada numa matriz decisória, de duas formulações de adesivos que podem vir a ser empregadas para substituir a união por soldagem.
- Avaliar a resistência do adesivo com melhor performance na etapa anterior, porém expondo os corpos de prova, antes da realização dos testes de tração, à névoa salina (*salt spray*) e saturação úmida.
- Avaliar a contribuição dos processos de pintura na mitigação da deterioração do adesivo submetido aos testes acelerados em ambientes úmidos, quentes e corrosivos.
- Implementação da união por adesivos como substituição da solda em um protótipo de testes, utilizando o conceito de juntas híbridas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

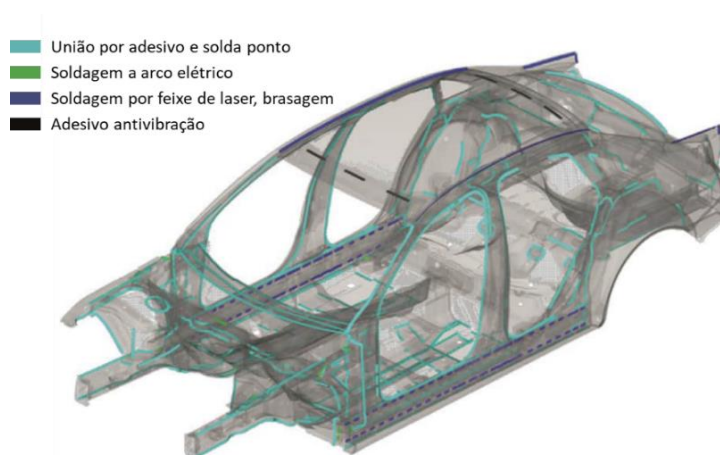
Esta sessão dispõe informações relevantes acerca do objeto do trabalho, bem como sobre os processos e procedimentos utilizados nas análises. De modo geral é abordada a forma como o adesivo se comporta como método de união, e quais os fatores que demandam maior atenção por parte dos projetistas.

2.1 Adesivos Estruturais

Os adesivos estruturais se diferenciam dos adesivos comuns e dos selantes por sua resistência e pela natureza da aplicação, sendo capazes de substituir os métodos usuais de união, como rebites, porcas e solda. Para Petrie (2000) o termo adesivo estrutural é geralmente utilizado para definir um adesivo cuja resistência é fator necessário à integridade da estrutura.

O uso de adesivos estruturais como alternativa para fixadores vem ganhando espaço na indústria, principalmente no setor da mobilidade. A busca por estruturas cada vez mais leves gera a necessidade de união de peças finas, dissimilares e de geometria complexa. A Figura 1 apresenta a imagem de uma estrutura monobloco de veículo, sobre a qual estão delineadas as diversas técnicas de união empregadas em sua fabricação. O uso crescente de adesivos na área da mobilidade se deve a um conjunto de fatores, boa parte dos quais descritos nesta seção.

Figura 1 – Diversas tecnologias de união aplicadas na construção de um veículo Audi A4.



Fonte: Adaptado de Dilger (2021, p.631).

Segundo Her (1999), grande parte das estruturas que utilizamos são construídas pela união de diferentes componentes. Quando o método de união escolhido envolve um adesivo estrutural, este é depositado entre os aderentes, formando-se uma via de transmissão da carga. Em relação a outras técnicas de união, as juntas adesivas apresentam maior área de contato, o que garante uma melhor distribuição das tensões. Nesta mesma linha, quando comparadas especificamente às uniões parafusadas, as juntas com adesivo não requerem orifícios, os quais também representam pontos de concentração de tensão. Como já citado, os adesivos também permitem a união de materiais dissimilares, resultando em juntas mais leves, sendo capazes de unir matérias com finas espessuras (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Os adesivos estruturais também se destacam por suas propriedades de amortecimento de vibrações, característica que apresenta um amplo potencial de aplicação. A melhoria do amortecimento em estruturas pode contribuir significativamente para o aumento do conforto dos usuários na área da mobilidade e a ampliação da vida útil em fadiga. Além disso, o uso de adesivos estruturais no controle de vibrações possibilita a criação de juntas combinando diferentes materiais, como compósitos, que apresentam maior capacidade de dissipação de energia em comparação aos metais, resultando em desempenho estrutural aprimorado (HILDEBRAND; ADAMS, 2021).

2.1.1 Classificação dos adesivos

Os adesivos estruturais podem ser classificados segundo diversos aspectos, porém a composição química talvez seja o mais comum. Dentre as principais famílias de adesivos há os epóxis (mono e bicomponentes), os acrílicos (bicomponentes), os uretanos (bicomponentes) e os ciano acrilatos (adesivos instantâneos) (WEI et al., 2024).

A formulação química do adesivo é de grande importância na avaliação de sua viabilidade num projeto. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais atributos dos adesivos estruturais, permitindo um delineamento dos respectivos nichos de aplicação.

Tabela 1 - Comparação dos adesivos estruturais com base em sua composição química

Características de utilização	Epóxi	Acrílico	Uretano	Cianoacrilato
Junta sobreposta em cisalhamento - Metais	Melhor	Baixo até alto	Moderado	Baixo (uniões de longo prazo)
Junta sobreposta em cisalhamento - Plásticos	Moderado	Melhor	Moderado	Alto
Junta sobreposta em cisalhamento - Compósitos	Melhor	Alto	Alto	Moderado
Tensão normal de descasque "Peel"	Baixo até melhor	Baixo até alto	Bom	Baixo
Resistência ao impacto e tenacidade	Inferior até melhor	Inferior até bom	Bom	Baixo
Flexibilidade	Inferior até melhor	Inferior até bom	Excelente	Baixo
Espectro de resistência à temperatura	Melhor	Moderado	Moderado	Baixo
Resistência a solventes	Melhor	Moderado	Alto	Baixo

Fonte: Adaptado de Wei et al. (2024).

2.1.2 Teorias de adesão

Os mecanismos que provocam a adesão têm sido vastamente estudados, gerando teorias e modelos de análise. Contudo tais mecanismos ainda não foram suficientemente comprovados, o que limita a aplicabilidade dos modelos. Para facilitar a compreensão, os mecanismos são explicados de forma individual; contudo, durante um processo real de adesão, esses mecanismos atuam de forma concomitante. Dentre as teorias que explicam o fenômeno da adesão temos: a teoria mecânica, da adsorção, da difusão e a eletrostática.

A teoria mecânica fundamenta-se no ancoramento do adesivo nas rugosidades do substrato. Durante a aplicação, o adesivo líquido penetra nas cavidades do substrato, o que gera inúmeros pontos de ligação mecânica entre o adesivo e o substrato. Este mecanismo é particularmente relevante para materiais como madeira e alumínio anodizado.

Já a teoria da adsorção sugere que a proximidade entre as moléculas do adesivo e do substrato promove a formação de ligações físicas secundárias, como forças de *van der Waals*, e químicas, incluindo interações ácido-base, ligações de hidrogênio e ligações primárias. A eficiência desse processo está diretamente relacionada à boa molhabilidade (*wetting*) do adesivo na superfície do substrato.

A teoria da difusão, por sua vez, descreve a adesão como um processo no qual

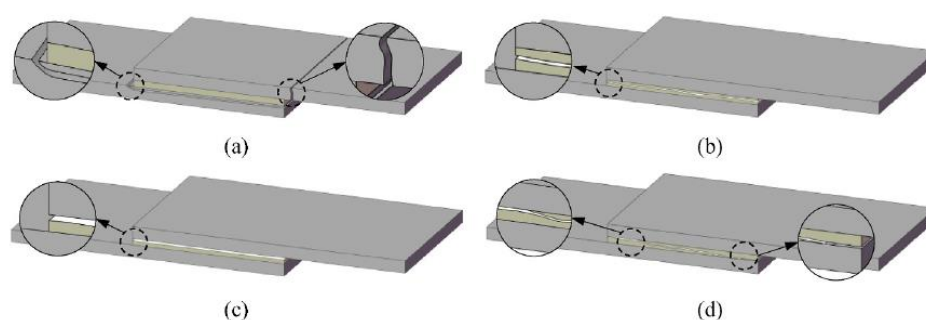
moléculas do adesivo difundem para dentro do substrato, enquanto moléculas do substrato difundem para o adesivo, resultando numa ligação mútua. O mecanismo é fortemente influenciado pelas condições de processamento da junta adesiva e pelas propriedades dos materiais utilizados, exigindo compatibilidade química. Tal mecanismo é muito comum na adesão de polímeros.

Por fim, a teoria eletrostática propõe que a adesão é decorrente da transferência de carga elétrica ao longo da interface entre o adesivo e o substrato, fenômeno que explicaria por que altas taxas de carregamento aumentam a resistência adesiva em comparação a taxas mais baixas. Durante os carregamentos abruptos não há tempo suficiente para a dissipação das cargas, o que ocasiona essa maior resistência. No entanto, a teoria eletrostática ainda enfrenta limitações em sua comprovação experimental e na quantificação de sua contribuição para a adesão (MARQUES *et al.*, 2021; PETRIE, 2000; PACKHAM, 2018; WEI *et al.*, 2024).

2.1.3 Modos de falha

Os modos de falha possíveis numa junta adesiva são classificados em quatro categorias distintas, as quais são ilustradas na Figura 2.

Figura 2 – Modos de falha de juntas coladas com adesivo: (a) falha no substrato (incluindo falha por arrancamento de fibras e por ruptura do material); (b) falha coesiva (incluindo falha coesiva de camada fina); (c) falha adesiva; (d) falha mista.



Fonte: Adaptado de Wei *et al.* (2024).

A falha do substrato – Modo (a) – ocorre quando este substrato apresenta baixa resistência mecânica. A falha coesiva – Modo (b) – se caracteriza pelo colapso do adesivo, de forma que, após a ruptura, ambas as faces do substrato conservam uma camada intacta de adesivo. Eventualmente pode ocorrer o modo coesivo de camada fina, quando a camada aderida num dos substratos é mais esbelta que a oposta. O

Modo (c), por sua vez, é conhecido como falha adesiva e ocorre quando os mecanismos de adesão não foram eficazes. Mesmo que essa falha possa decorrer da escolha errada do adesivo, os motivos mais comuns são a preparação inadequada das superfícies ou o emprego de um procedimento de fabricação inapropriado. Por fim, a falha mista – Modo (d) – é a combinação dos outros modos.

Neste trabalho iremos tratar o modo de falha coesivo como sendo o ideal, uma vez que a ruptura ou deformação do substrato poderiam influenciar no resultado dos testes, que buscam avaliar a resistência dos adesivos. O modo coesivo é escolhido por descartar os problemas de adesão e utilizar a resistência completa do adesivo. Atualmente já existem modelos que podem auxiliar a determinar qual será a resistência da camada adesiva, por falha coesiva, com base nas propriedades prevista dos adesivos utilizados (MARQUES *et al.*, 2021).

2.2 Desempenho de juntas adesivas

A avaliação do desempenho de juntas adesivas ainda é um grande desafio para projetistas, pois pontos como configuração geométrica, tipo de carregamento e meio de exposição têm grande influência na vida da junta. Os autores Banea e Silva (2009), em sua revisão sobre juntas adesivas em materiais compósitos declaram que, tendo em vista a extensa área de aplicação de adesivos estruturais, a definição do melhor modelo de falha muitas vezes é incerto. Além disso, tais modelos não apresentam a robustez e confiabilidade encontrada, por exemplo, no procedimento de dimensionamento de peças estruturais convencionais. Contudo a correta estimativa da resistência mecânica de uma junta adesiva é crucial para que não ocorra superdimensionamento, desta forma reduzindo os custos de material e a quantidade de testes para validação do projeto.

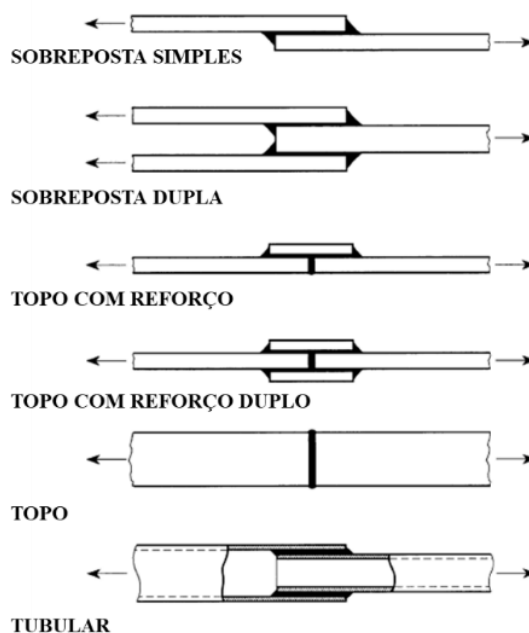
2.2.1 Configurações geométricas

Cabe salientar de antemão que, quaisquer que sejam as peças a unir por meio de adesivo, essas devem apresentar regiões planas sobrepostas. Portanto as juntas contendo adesivos provocam desvio no fluxo das forças e, portanto, concentração de tensões. Tal afirmação não contradiz colocações anteriores, segundo as quais as uniões por adesivos apresentam menor concentração de tensão em relação, por exemplo, às uniões parafusadas. Ou seja, trata-se de uma questão de intensidade do

efeito concentrador, que é menor nas juntas adesivas.

A geometria tem, juntamente com as propriedades dos materiais envolvidos, grande influência sobre a resistência da junta. Na Figura 3 são apresentados alguns dos modelos de juntas adesivas comumente utilizados.

Figura 3 - Modelos de juntas adesivas comumente utilizados.

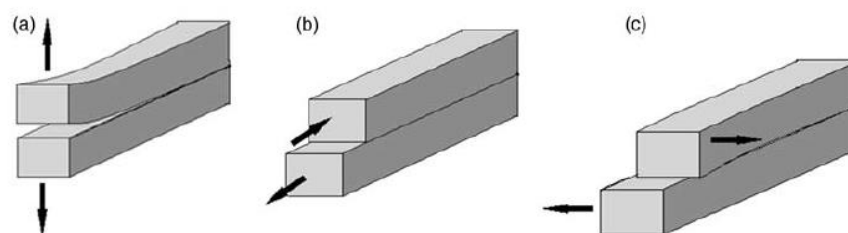


Fonte: Adaptado de Van Straalen *et al.* (1998).

A influência da geometria na resistência mecânica se dá pela forma como a distribuição de tensões ocorre na junta e ao tipo de carregamento ao qual estará submetida. Os autores Wei *et al.* (2024), citam que o tipo de configuração geométrica de junta escolhido pode resultar em diferentes estados de estresse e modos de falha das juntas adesivas, sendo estes fatores primordiais para o projeto da junta.

Há três modos principais de carregamento sobre uma junta, os quais representados na Figura 4. No modo I, em que ocorre a abertura da união, as propriedades de tração do adesivo são responsáveis pela resistência mecânica. Já nos modos II e III a resistência ao cisalhamento é fator chave para o desempenho (PETHRICK, 2015).

Figura 4 - Modos de carregamento principais: (a) Modo I: abertura, (b) Modo II: cisalhamento no plano, (c) Modo III: cisalhamento externo ao plano (rasgamento).



Fonte: Pethrick (2015, p. 10).

Por fim, a espessura do adesivo constitui um parâmetro geométrico relevante para a resistência da junta. Qian e Akisanya (1998) observaram um impacto significativo desse fator na resistência de juntas angulares submetidas a diferentes temperaturas de cura e ângulos de cunha. Seus resultados indicaram que a resistência à tração aumenta com o incremento do ângulo da junta e a redução da espessura da camada adesiva. Ademais, verificou-se uma relação inversamente proporcional entre a resistência e a temperatura de cura, em que um aumento de 40% na temperatura resultou em uma redução de 80% na resistência.

Corroborando essa tendência, Silva et al. (2006) investigaram juntas sobrepostas simples (*single lap joints* – SLJ) por meio de análises de elementos finitos e ensaios experimentais, demonstrando que a resistência ao cisalhamento aumenta à medida que a espessura do adesivo é reduzida.

2.3 Durabilidade de juntas adesivas

Para que um adesivo estrutural seja viável, obviamente deve ser capaz de resistir aos carregamentos impostos em serviço. Contudo, como as condições a que são expostas as estruturas podem ser muito agressivas, é importante que o adesivo mantenha propriedades mínimas durante todo o ciclo de vida do produto. Os fatores mais relevantes para a durabilidade de juntas adesivas são a exposição à temperatura, umidade e agentes químicos. O efeito desses fatores é agravado quando a junta sofre carregamento e vários fatores incidem concomitantemente.

Não há padrão ou modelo estabelecido que quantifique o impacto da temperatura e da umidade na resistência de uma junta adesiva. Tal impacto é influenciado pelo tipo de adesivo, tempo de exposição e tensões residuais preexistentes na junta, dentre outros fatores. Os autores Costa et al. (2016), que realizaram uma revisão bibliográfica

acerca da influência do ambiente sobre o ciclo de vida de juntas com adesivo, ressaltam que tal influência ainda não foi totalmente elucidada. Os resultados nem sempre revelam uma tendência identificável, o que tem motivado novos estudos.

2.3.1 *Efeitos da temperatura*

Devido à natureza polimérica da maioria dos adesivos, estes são suscetíveis à degradação quando expostos a temperaturas extremas, não apenas em curtos períodos ou durante sua cura, mas em toda a vida de serviço. A temperatura pode ser um problema tanto quando for alta ou baixa, havendo aplicações em que seu espectro é muito grande, o que acaba por restringir o processo de escolha do adesivo àqueles que podem confrontar tal situação.

No caso de exposição a altas temperaturas, o adesivo pode perder resistência pelos fenômenos de pirólise e oxidação. Além disso, na interface podem ocorrer alterações físico-químicas, tanto no adesivo como no substrato, o que compromete as resistências coesiva e adesiva. O autor Petrie (2000), cita que os adesivos reticulados (por exemplo, os termofixos), quando expostos a altas temperaturas, podem sofrer quatro efeitos principais, quais sejam: *i)* cisão das cadeias, o que gera decaimento do peso molecular e consequente redução da resistência coesiva, bem como a geração de subprodutos; *ii)* reticulação contínua, que gera a fragilização da junta e o encolhimento da camada de adesivo, *iii)* evaporação dos plastificantes, que também provoca a fragilização da união; e *iv)* oxidação, devido à presença de oxigênio ou óxidos metálicos, que causa decaimento da resistência coesiva.

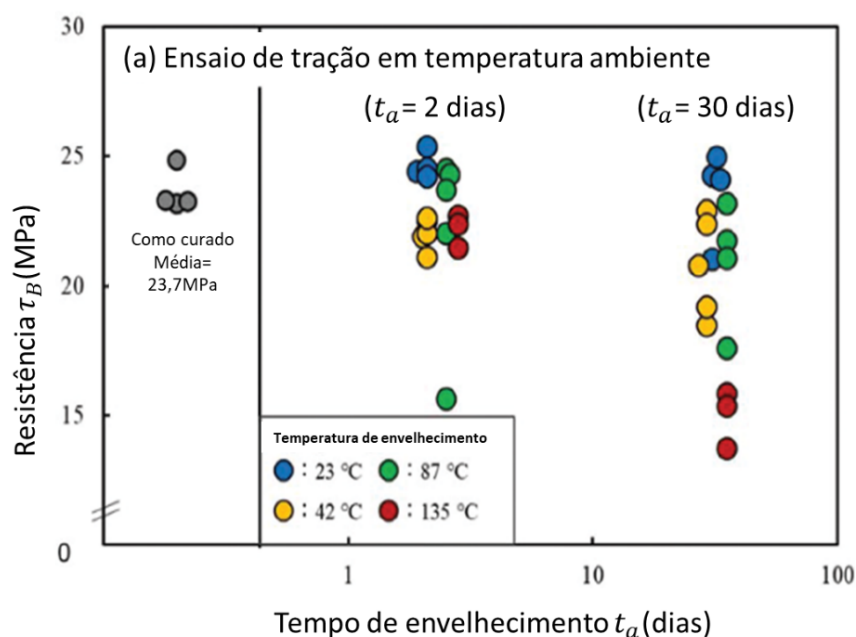
Alguns adesivos são especificamente formulados para operar em altas temperaturas, por exemplo, os cerâmicos, cujas propriedades são mantidas em ambientes acima de 300°C. Porém a maioria dos adesivos começa a degradar em temperaturas próximas a 200°C. A temperatura de transição vítrea do adesivo (TG), também é relacionada com o desempenho de adesivos em altas temperaturas. Acima da TG, os adesivos tendem a apresentar maior flexibilidade e menor resistência, ao passo que abaixo da TG, são mais resistentes e apresentam maior módulo de elasticidade (MARQUES et al., 2014).

Devido ao efeito pronunciado da temperatura sobre as juntas adesivas, diversos estudos sobre o tema foram realizados. Os autores Marques *et al.* (2014), em sua revisão sobre juntas adesivas para baixas e altas temperaturas, cita que a característica polimérica dos adesivos representa uma grande limitação de desempenho em relação a outros processos de fixação, como os fixadores mecânicos.

Todavia o autor também afirma que, com os últimos avanços em materiais, modelos e métodos de simulação, já é possível projetar juntas adesivas seguras e eficientes.

Houjou *et al.* (2022), em seu estudo sobre o efeito da temperatura na resistência ao cisalhamento e à fadiga de juntas de sobreposição dupla (*double lap joints*), com substrato de alumínio e adesivo epóxi, percebeu que o aquecimento das juntas em diferentes temperaturas causou efeitos distintos na resistência do adesivo. Quando comparados ao grupo de controle, os corpos de prova que foram submetidos ao envelhecimento por 30 dias a 23°C não apresentaram grande diferença de resistência. Já os corpos de prova envelhecidos a 42°C e 87°C apresentaram pequena redução na resistência. Porém nas amostras expostas a 135°C (acima da TG) a resistência caiu significativamente. A Figura 5 apresenta o quadro resumo dos resultados encontrados pelos autores.

Figura 5 – Resultados de resistência reportados por Houjou *et al.* (2022), em condições como curado, após 2 dias e após 30 dias.

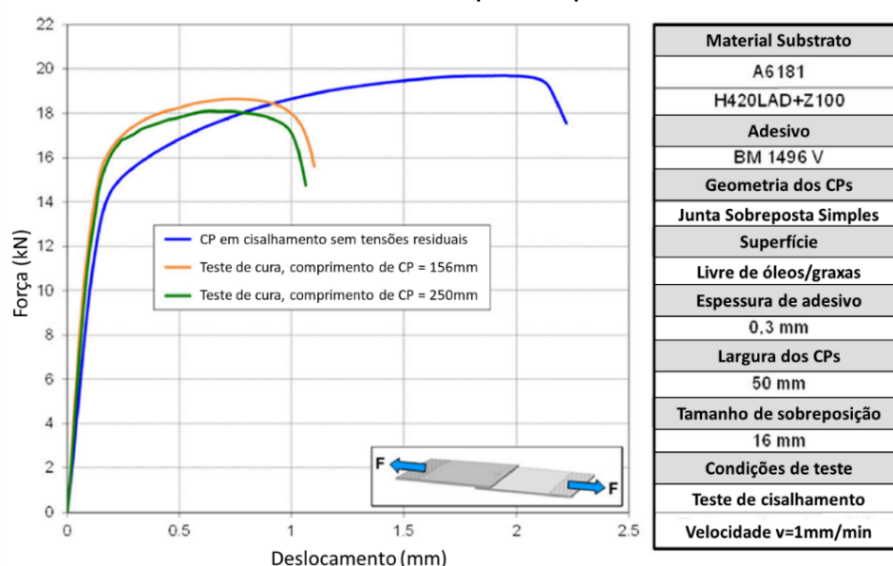


Fonte: Adaptado de Houjou *et al.* (2022).

No caso de adesivos curados a quente, a temperatura de cura também é uma variável que precisa ser avaliada. Os autores Mechut, Hahn e Teutenberg (2014), estudaram a influência que o processo de cura possui na resistência de juntas sobrepostas simples (*single lap joints* - SLJ) fabricadas com dois metais distintos e em teste de cisalhamento com aderente espesso (*thick adherend shear specimen* - TASS) unidas por um adesivo monocomponente epóxi de cura a quente. O trabalho destaca

que, num meio automotivo de produção, o corpo dos veículos precisa ser aquecido para garantir a cura do adesivo aplicado, o que ocasiona diferentes níveis de dilatação das peças, de acordo com suas expansibilidades térmicas. Os autores citam que as expansões podem ser elevadas, a ponto de causar deformação plástica na região das juntas. Os corpos de prova analisados pelos autores foram submetidos aos parâmetros de tempo e temperatura típicos de um processo de pintura por imersão eletroforética (*E-coat*), quais sejam: temperatura de 180°C por 30 minutos. Observou-se uma influência significativa da deformação relativa durante a cura do adesivo no comportamento mecânico da junta colada. A Figura 6 apresenta a diferença da curva tensão vs. deformação para os corpos de prova utilizados no trabalho, mostrando a influência das tensões residuais geradas pelo aquecimento.

Figura 6 - Diagrama tensão vs. deformação para corpos de prova com e sem tensões residuais causadas pelo aquecimento.



Fonte: Adaptado de Mechut, Hahn e Teutenberg (2014).

Em resumo, a temperatura se trata de fator ambiental e de processo a ser considerado no projeto de juntas adesivas, pois pode alterar diretamente as propriedades mecânicas do adesivo, bem como acelerar outros processos, como a difusão de água para dentro da união. Portanto o projeto de peças unidas por adesivos deve compreender a averiguação das temperaturas às quais essas peças serão expostas durante seu ciclo de vida, bem como a avaliação do consequente impacto na resistência mecânica.

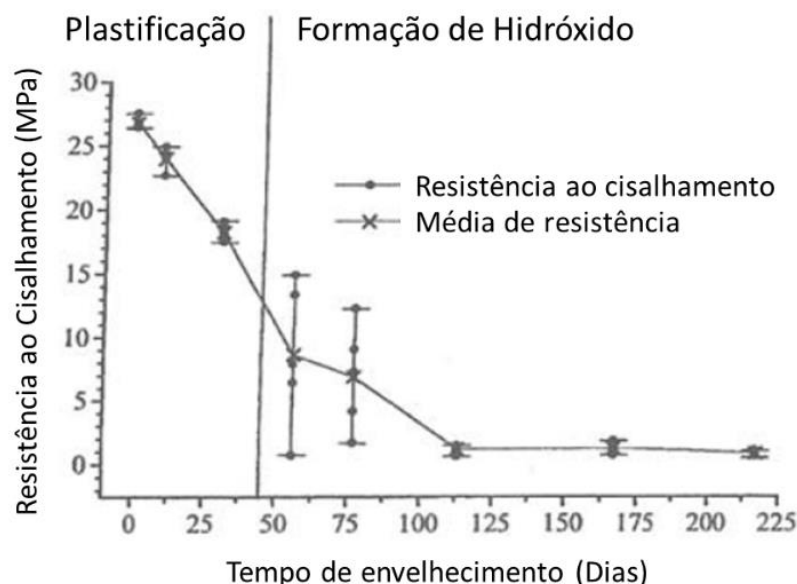
2.3.2 Efeito da umidade

A presença de água ou a exposição a ambientes de alta umidade afeta consideravelmente a resistência de juntas adesivas. O ingresso de água para dentro do adesivo pode ser previsto analiticamente e por meio de experimentos. Para tal, muitos trabalhos têm proposto modelos matemáticos que descrevem o comportamento do adesivo quando exposto à água.

A água ou a elevada umidade podem degradar a adesão ao substrato, ou mesmo atacá-lo, caso seja suscetível. A degradação da capacidade de adesão ocorre principalmente pela absorção de água na estrutura do polímero, o que ocasiona a redução da temperatura de transição vítrea (TG) e, conseqüentemente, a redução da força entre as moléculas. A absorção de água também induz a formação de trincas e causa a hidrólise, que corresponde à reação entre água e adesivo, cujo efeito é a quebra das ligações moleculares deste. Todos estes fatores culminam numa redução da resistência mecânica e do módulo de elasticidade do adesivo (PETRIE, 2000).

A Figura 7 mostra medições de resistência realizadas em juntas que sofreram envelhecimento imersas em água.

Figura 7 – Resistência ao cisalhamento em função do envelhecimento em água a 70°C para juntas adesivas epoxy com substrato de alumínio.



Fonte: Adaptado de Halliday, Banks e A Pethrick (1999).

Os autores que elaboraram o gráfico da Fig. 7 observaram uma queda da resistência num período inicial de aproximadamente 45 dias, a qual foi atribuída à plastificação causada pelo contato com a água e à conseqüentemente queda da TG. A

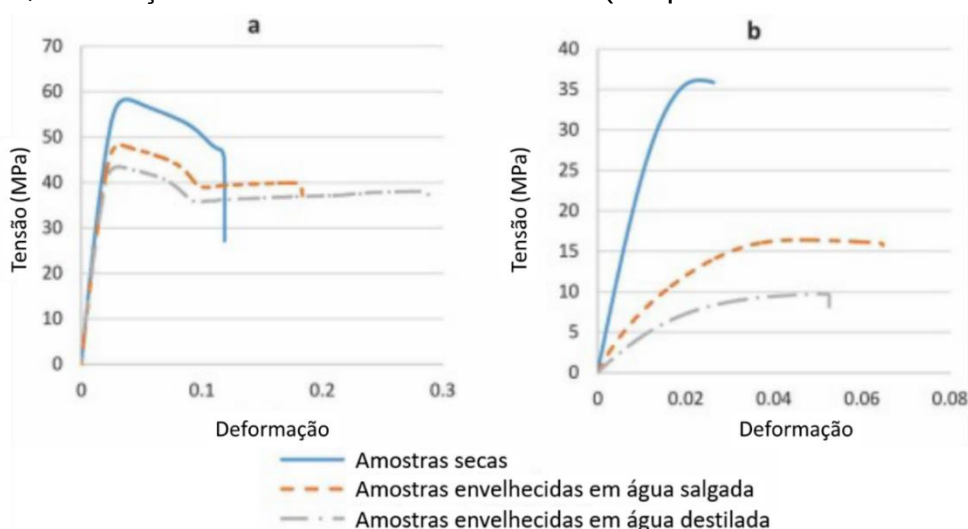
partir de então os autores observaram a corrosão progressiva da camada adesiva. Análises de difração de raio-X indicaram a formação de hidróxidos na interface.

Já o efeito da umidade na região de interface adesivo/substrato representa a forma mais comum da redução de resistência da junta. A água permeia o adesivo e migra para a região da interface, tomando a posição do adesivo e reduzindo a área de interação. Também pode ocorrer a hidratação ou corrosão da camada de óxido metálico do substrato, gerando uma camada limite fraca e problemas de adesão (PETRIE 2000).

O impacto da exposição do substrato à presença de água depende principalmente do material e de suas propriedades. Devido à relevância do efeito da água na interface, foram desenvolvidos métodos de tratamento superficial do substrato que podem auxiliar na mitigação do problema (ASHCROFT; COMYN; MUBASHAR, 2018).

A Figura 8 apresenta a curva tensão vs. deformação de corpos de prova puramente adesivos de tipo *dog-bone* envelhecidos durante um ano em água destilada e água salgada, após submetidos a ensaio de tração. Nela pode ser observada a queda no limite de escoamento e no módulo de elasticidade, o que se mostrou mais evidente no adesivo SikaPower 4720 envelhecido em água destilada. Isto pode ter sido causado por uma temperatura de teste acima da TG.

Figura 8 - Curva tensão vs. deformação dos adesivos: a) XNR 6852-1 e b) SikaPower 4720, em função do meio de envelhecimento (temperatura de teste: 23°C).



2.3.3 Efeito de contato com produtos químicos

Em aplicações onde produtos químicos possam entrar em contato com o adesivo,

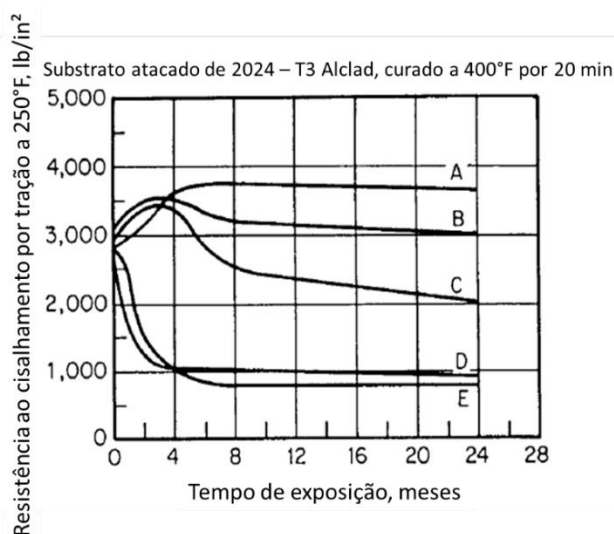
este deve ter a característica de elevada reticulação, o que ocorre na maioria nos termofixos, como os epóxis, fenólicos, poliuretanos e acrílicos modificados. É importante que esta exposição ocorra abaixo da temperatura de transição vítrea (TG). Para um melhor desempenho da junta nessas condições, a área de exposição deve ser a menor possível. Também é importante que os substratos não sejam permeáveis (PETRIE, 2000). Devido às peculiaridades de cada produto químico são necessários testes para avaliar a susceptibilidade do adesivo, nas condições de operação da peça.

2.3.4 Efeitos compostos

Ainda que os efeitos de degradação tenham sido apresentados de forma separada, a probabilidade de superposição de fatores durante a aplicação real do produto é significativa, o que pode causar drástica redução das propriedades da junta. Por exemplo, a difusão de água para dentro dos adesivos segue a equação de Arrhenius, na qual a taxa de difusão aumenta consideravelmente com a exposição à temperatura (ASHCROFT; COMYN; MUBASHAR, 2018).

Da mesma forma, a temperatura também potencializa a difusão de produtos químicos e, portanto, o envelhecimento do adesivo (PETRIE, 2000). A Figura 9 apresenta o efeito da imersão de um adesivo epóxi a diferentes produtos químicos.

Figura 9 - Efeito da exposição de adesivo epóxi EA929 aos produtos químicos: A) Gasolina a 75°F, B) Óleo para engrenagens a 250°F, C) Água destilada a 75°F, D) Água de torneira a 212°F, e) 38% Shellzone (Fluído de refrigeração e anticongelante) a 250°F.



Fonte: Adaptado de Dexter Corp. Tech Bull A5 – 129 *apud* Petrie, 2000, pg.721.

Outro fator que se superpõe aos efeitos do ambiente sobre a junta é o carregamento imposto. Os autores Davis e Fay (1993), realizaram um trabalho investigativo de três anos para avaliar a durabilidade de juntas adesivas (Epóxi) metálicas sob condições tropicais, utilizando a estufa do *Royal Botanical Gardens*, em Londres, para simular um ambiente mais próximo ao real. Todos os corpos de prova, com substratos eletro galvanizados ou revestidos com zinco-níquel, foram pintados num sistema e-coat de processo produtivo e, desta forma, apresentavam a condição de peças industriais. Um sistema de fixação com molas foi utilizado para impor os carregamentos de 1,5 kN e 3 kN durante o envelhecimento, tendo sido empregado também um grupo de controle, não carregado. Os resultados revelaram que, em ambos os substratos, o tempo médio de falhas reduziu de forma proporcional à tensão imposta.

A Tabela 2, retirada do trabalho de Fay e Maddison (1990), apresenta o tempo até a falha em juntas com cinco tipos diferentes de revestimentos, expostas a temperatura variando entre 42 e 48°C com uma umidade relativa de 100%, mostrando o impacto da combinação entre carregamento, umidade e temperatura.

Tabela 2 - Tempo até a falha de juntas expostas a condição de estresse hidrotermal.

Tratamento	Carga aplicada (kN)	Dias até a falha		
		1°	2°	3°
Livre de óleo/Graxa	0.4	72	86	86
	1.0	44	44	44
	2.0	25	28	28
Oleado	0.4	62	66	70
	1.0	24	25	25
	2.0	0	0	0
Accomet C	0.4	254	>1121	>1121
	1.0	89	103	110
	2.0	18	18	19
Silane	0.4	>1121	>1121	>1121
	1.0	124	126	128
	2.0	26	28	28
EP 2005	0.4	96	99	125
	1.0	62	63	64
	2.0	12	12	12

Fonte: Adaptado de Fay e Maddison (1990).

2.4 Ensaios de envelhecimento

Atualmente não existem métodos simples para determinar a resistência em longo

prazo de juntas adesivas, sendo difícil relacionar os testes acelerados com os mecanismos de degradação presentes no ambiente. Todavia, os testes realizados *in loco* são caros e tendem a levar anos para sua conclusão, sendo os testes acelerados uma base inicial e superestimada dos efeitos da degradação nos adesivos (ASHCROFT; COMYN; MUBASHAR, 2018). Como os principais fatores que prejudicam a resistência de uma junta são a temperatura e contato com a água, os testes acelerados de névoa salina e câmara úmida são comumente empregados.

2.4.1 Ensaio de salt spray

Este ensaio, também conhecido como teste de névoa salina ou de corrosão, tem caráter destrutivo, tendo por objetivo avaliar o grau e a taxa de corrosão sofridos por materiais e revestimentos. Amostras de materiais são inseridas dentro de uma câmara fechada, onde são expostas a uma fina névoa de solução salina, durante um período predeterminado de ensaio.

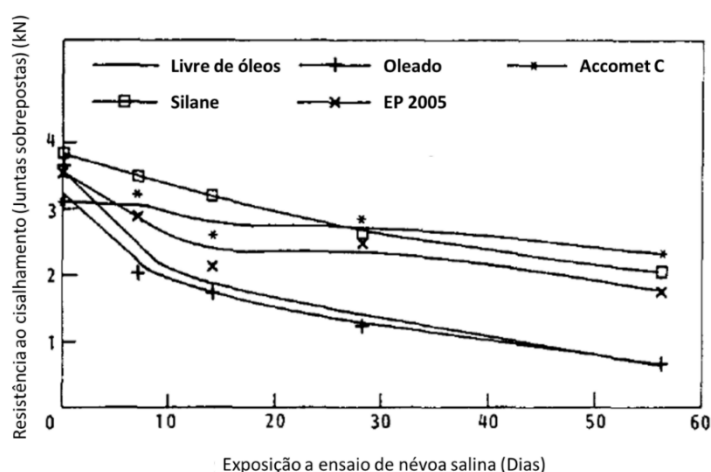
A norma ISO (2017), 9227 - *Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests*, enumera três processos de *salt spray* utilizados na avaliação da resistência à corrosão de metais, com ou sem proteção. O primeiro é o teste de névoa salina neutra (*Neutral Salt Spray - NSS*), o qual utiliza uma solução neutra de cloreto de sódio em concentração de 5%. Este tipo de ensaio é empregado em materiais metálicos e suas ligas, sem ou com revestimento. Neste último caso estão incluídos os revestimentos metálicos anódicos e catódicos, de conversão, de óxido anódico e orgânicos. O segundo é o teste de névoa salina de ácido acético (*Acetic Salt Spray – AASS*), no qual é empregada uma solução de ácido acético e cloreto de sódio com concentração de 5%. O teste é aplicado na avaliação de recobrimentos decorativos de cobre-níquel-cromo ou níquel-cromo, bem como proteções anódicas e orgânicas em alumínio. Já o terceiro é o teste de *spray* de sal de ácido acético acelerado por cobre (CASS), que também utiliza uma solução de cloreto de sódio à 5%, com adição de ácido acético e cloreto de cobre. Sua utilização também é indicada para recobrimentos decorativos, de mesma forma como no AASS.

A presença combinada de umidade e temperatura num ambiente corrosivo, aplicado no teste de névoa salina, permite avaliar a suscetibilidade à degradação de juntas adesivas e a certificação de eficiência dos processos protetivos aplicados, sendo um destes o recobrimento por pintura.

O trabalho realizado por Fay e Maddison (1990), com juntas adesivas de aço BS1449:CR1E e um adesivo epóxi curado a quente, utilizando diferentes condições de

superfície e expostas a teste de névoa salina por 7,14, 24 e 56 dias, revelaram um significativo impacto na resistência das juntas. Após 56 dias de exposição, as juntas oleadas (“Como recebidas” em uma condição industrial) e as juntas limpas mantiveram apenas 18% e 21% de sua resistência inicial, respectivamente. Estes resultados são mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Efeito da exposição a névoa salina na resistência ao *lap-shear* de juntas adesivas



Fonte: Adaptado de Fay e Maddison (1990).

Li *et al.* (2016), elaboraram um modelo numérico-experimental para caracterizar o efeito do *salt spray* numa junta adesiva e prever sua resistência. Os resultados mostraram que a resistência das juntas sobrepostas simples (SLJ), caiu rapidamente e de forma constante ao longo do tempo de exposição a névoa salina, chegando a uma redução de 47% após 720 horas de exposição. Os fatores listados que mais influenciaram a queda de resistência foram a plastificação da camada de adesivo pela absorção de água e a corrosão leve da superfície do substrato metálico.

2.4.2 Ensaio em câmara de umidade saturada

Este ensaio utiliza uma câmara na qual é produzida uma atmosfera controlada úmida e quente, simulando ambientes com umidade relativa elevada. De semelhante forma ao teste de névoa salina, seu objetivo é acelerar a degradação de amostras metálicas ou não metálicas, com ou sem revestimentos protetivos, buscando avaliar a durabilidade em peças acabadas, testes os quais levariam muito tempo para ser realizados no ambiente convencional.

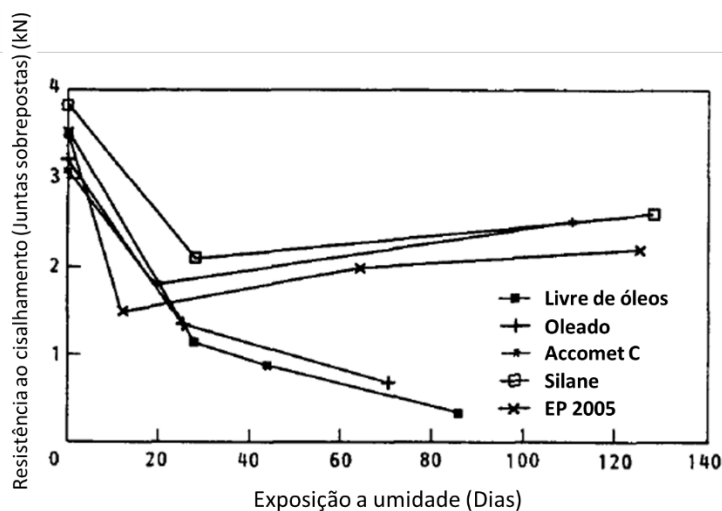
A norma ISO (2005), 6270 – *Procedure for exposing test specimens in*

condensation-water atmospheres, que trata sobre a resistência à umidade de tintas e vernizes, apresenta o procedimento a ser seguido para testes em atmosferas com condensação de água. Seu objetivo é mapear o comportamento dos espécimes em atmosferas úmidas e apontar quaisquer defeitos na proteção dos espécimes contra corrosão, não necessariamente apresentando dados acerca da vida útil.

Os testes citados pela norma podem ser realizados de três maneiras distintas. O primeiro meio de exposição é o de atmosfera de condensação com umidade constante (*CH - Condensation atmosphere with constant humidity*), no qual a temperatura e a umidade são mantidas constantes do início até o fim do ensaio. O segundo é o de atmosfera de condensação com alternância de umidade e temperatura do ar (*AHT - Condensation atmosphere with alternating humidity and air temperature*), no qual ocorre a alternância da umidade e temperatura do ar durante os ciclos de envelhecimento. Por fim, a atmosfera de condensação com temperatura do ar alternada (*AT - Condensation atmosphere with alternating air temperature*), na qual apenas a temperatura do ar é variada durante o teste.

Fay e Maddison (1990) realizaram testes com corpos de prova seguindo a norma BS3900 Part F2 (*Methods of test for paint. Durability tests on paint films. Determination of resistance to humidity (cyclic condensation)*), que também trata da determinação da resistência à umidade em condições de condensação. Os autores observaram uma redução da resistência dos corpos de prova com o passar do tempo. Os resultados encontrados podem ser observados na figura 11.

Figura 11 - Efeito da exposição a umidade na resistência ao cisalhamento de juntas sobrepostas simples



Fonte: Adaptado de Fay e Maddison (1990).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia seguida durante a realização deste trabalho, desde a concepção dos corpos de prova até os equipamentos e processos utilizados em sua fabricação e testes. A Figura 12 apresenta o fluxograma metodológico empregado. No total foram fabricados e ensaiados 136 corpos de prova, dos quais 56 foram usados na avaliação do efeito dos processos de pintura sobre dois adesivos. Os demais corpos de prova (oitenta) foram fabricados com o adesivo de melhor desempenho na etapa anterior, tendo sido posteriormente ensaiados em ambiente de corrosão acelerada.

3.1 Descrição do problema

3.1.1 *Sistemas de pintura eletrostática (e-coat) e pintura líquida*

A empresa do ramo metalmeccânico, onde foi realizada a parte experimental do trabalho, possui em seu ambiente industrial um sistema de pintura composto por diversas linhas de pintura, por vezes complementares. Neste trabalho foram utilizadas duas instalações: a) pintura por eletrodeposição (e-coat) e b) pintura líquida. Tal conjunto é comum em várias empresas do setor, com os mais diversos graus de automação.

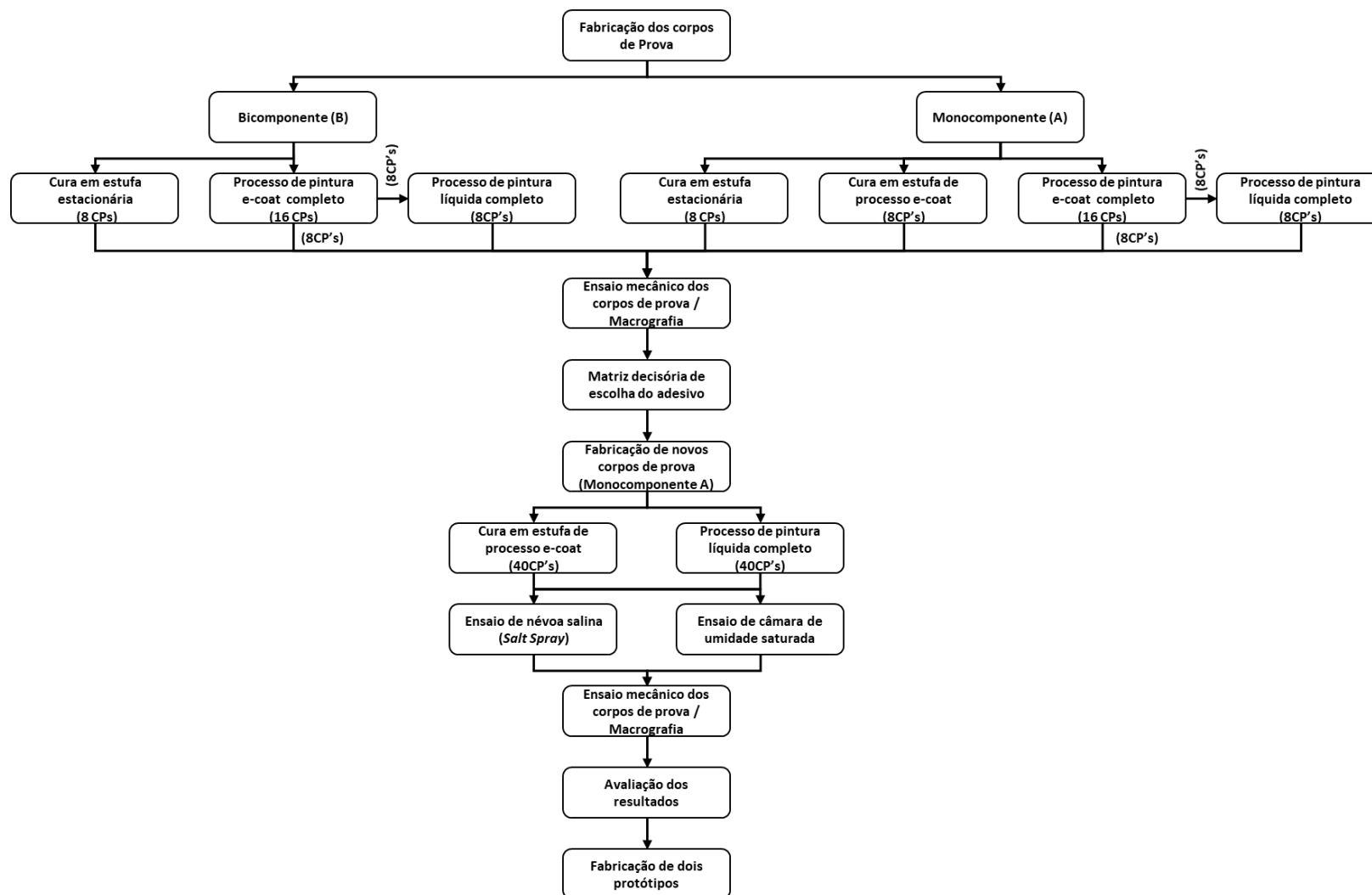
3.1.1.1 *Processo de pintura e-coat*

O processo de pintura por eletrodeposição tem por objetivo fornecer a proteção contra a corrosão de componentes metálicos. O aspecto final das peças, ao final do processo, usualmente é enegrecido.

Existem diversos sistemas de processamento por pintura e-coat disponíveis no mercado. O utilizado neste estudo foi por imersão, que apresenta as seguintes características: 1) todas as etapas (com exceção do pré-desengraxe e estufa), envolvem a imersão das peças e, 2) consequentemente partes de difícil acesso como, por exemplo, paredes internas de tubos, conseguem ser atingidas.

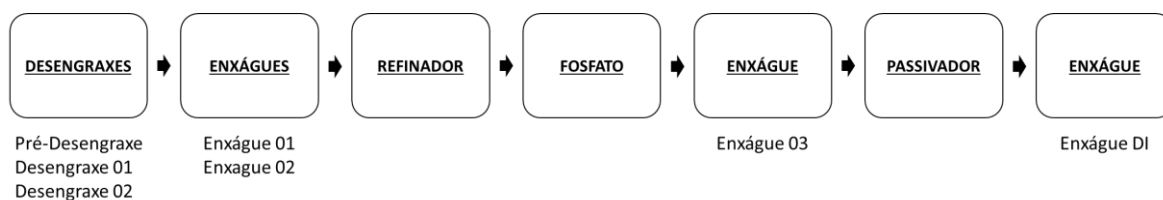
O sistema compreende duas macro-fases, de pré-tratamento das peças e da pintura em si. O processo de pré-tratamento tem por objetivo preparar a superfície que irá receber a tinta, de forma a permitir uma ancoragem adequada entre a peça e as camadas de pintura depositadas. O fluxo do processo de pré-tratamento é apresentado na figura 13.

Figura 12 - Fluxograma metodológico do trabalho realizado



Fonte: O Autor.

Figura 13 - Fluxograma do processo de pré-tratamento com fosfato tricatiônico.



Fonte: O Autor.

O processo de pré-desengraxe tem como função a remoção de sujidades e particulados da superfície das peças. Em seguida, os estágios de desengraxe 01 e 02 são empregados para eliminar resíduos de óleos e graxas pesadas provenientes do processo de fabricação. Esses estágios operam a uma temperatura de $75 \pm 10^\circ\text{C}$, com as peças submersas em cada tanque por um período de 0,5 a 3 minutos.

Os enxágues 01 e 02 têm a finalidade de remover o excesso de agente desengraxante residual, prevenindo a contaminação dos estágios subsequentes. O tempo mínimo de imersão em cada enxágue é de 60 segundos.

Na etapa seguinte, o banho refinador atua como um agente condicionador, preparando a superfície metálica para a aplicação do fosfato tricatiônico. O processo permite a formação de uma camada de fosfato densa e uniforme. O banho refinador opera a uma temperatura de $38 (+2; -3)^\circ\text{C}$, com um tempo mínimo de 10 s.

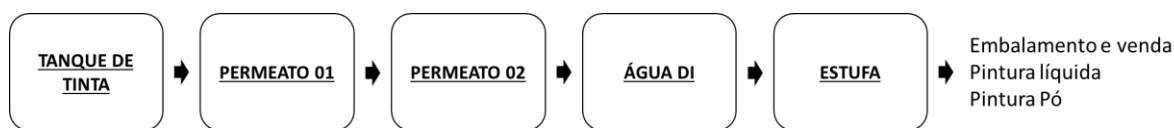
O banho de fosfatização tem como objetivo a formação de uma camada microcristalina de fosfato de zinco sobre a superfície metálica, promovendo o aumento da resistência à corrosão e melhorando a aderência da tinta. Esse estágio ocorre a uma temperatura de $37 (-2; +3)^\circ\text{C}$, com um tempo mínimo de imersão de 60 segundos.

Após a fosfatização, as peças passam pelo enxágue 03, cujo objetivo é remover o excesso de fosfato da superfície. Esse processo é realizado por imersão, com duração mínima de 1 minuto. Posteriormente, as peças são submetidas a um banho de passivação, que tem a finalidade de aumentar sua vida útil ao conferir maior resistência à corrosão. Esse estágio ocorre a $22 (-17; +18)^\circ\text{C}$, com tempo mínimo de imersão de 1 minuto.

Por fim, as peças passam pelo enxágue 04, que remove os sais residuais da superfície e evita a contaminação do tanque de tinta. Esse último enxágue é realizado por imersão em um tanque, com tempo mínimo de 1 minuto.

O processo de pintura em si compreende as etapas ilustradas na Figura 14. A exposição à temperatura da estufa é a etapa de maior influência sobre a junta adesiva, sendo responsável por sua cura no caso de adesivos curados a quente.

Figura 14 – Fluxograma do processo de pintura e-coat.



Fonte: O Autor.

O tanque de tinta tem a função de eletro depositar uma camada de revestimento sobre a superfície metálica, conferindo proteção anticorrosiva após sua cura. Esse processo ocorre em um banho com temperatura de 22 (-17; +18) °C, no qual as peças devem permanecer submersas por aproximadamente 3,5 minutos.

Após a eletrodeposição, as peças passam por uma sequência de enxágues em banhos de permeato 01, permeato 02 e água deionizada (DI), cuja finalidade é remover o excesso de tinta da superfície. Cada uma dessas etapas possui um tempo mínimo de processamento de 20 segundos. Por fim, para eliminar o excesso de água, um fluxo de ar comprimido é aplicado manualmente sobre as peças, antes que estas sejam encaminhadas à estufa, onde então ocorre a cura do revestimento.

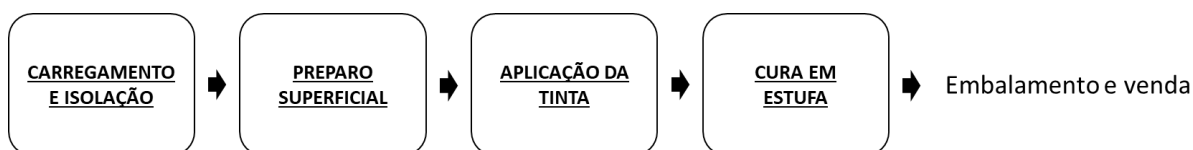
Os documentos de processo estabelecem que a estufa utilizada na pintura por eletrodeposição deve operar a uma temperatura de 215°C (+10, -50°C), com um tempo mínimo de permanência de 48 minutos. Entretanto, em equipamentos industriais projetados para atender a uma ampla variedade de produtos, o tempo de permanência de cada peça na estufa não é rigidamente controlado. Isso ocorre porque as peças são transportadas em dispositivos de deslocamento contínuo, onde novas peças impulsionam as anteriores, resultando em um fluxo dinâmico e relativamente aleatório. Para garantir a cura completa da camada de pintura em todas as peças, o sistema é projetado de forma que o tempo mínimo de permanência seja sempre excedido.

3.1.1.2 Processo de pintura líquida

Mesmo que o processo de pintura e-coat tenha qualidades irrefutáveis, a camada de pintura obtida tem por função última a proteção contra a corrosão. De forma adversa as peças não têm a qualidade estética necessária a produtos de mercado. Tal aspecto é obtido por processo posterior de pintura líquida ou pó, o qual, além do aspecto estético, propicia proteção contra os fatores agressivos presentes no ambiente em que a peça irá operar.

O processo de pintura líquida empregado neste trabalho consiste nas etapas descritas na Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma do processo de pintura líquida.



Fonte: O Autor.

O sistema de pintura líquida apresenta um menor número de variáveis em comparação ao processo de *e-coat* e todo o processo se dá em uma monovia de velocidade constante com 1,46 m/min. O processo tem início com o carregamento das peças, etapa na qual são inspecionadas quanto a defeitos superficiais. Além disso, regiões que não podem ser pintadas, como roscas e furações, são devidamente isoladas por meio de componentes reutilizáveis de silicone ou metálicos.

Em seguida, a preparação da superfície é realizada por meio de lixamento, seguido de limpeza com pano seco e ar comprimido para a remoção de impurezas. Por fim, a tinta é aplicada manualmente utilizando duas pistolas convencionais e duas eletrostáticas em 4 cabines separadas, garantindo uma cobertura uniforme. As tintas utilizadas são geralmente a base de poliuretano (Tinta PU) e bicomponentes, sendo necessário a mistura da tinta a um catalizador para que a cura aconteça.

Após a aplicação, as peças são direcionadas à estufa de secagem, onde a cura do revestimento é acelerada. A estufa trabalha com uma temperatura de 85°C na entrada e 115°C na saída, temperaturas inferiores ao processo de *e-coat*, mas acima da temperatura de transição vítrea (TG) de ambos os adesivos estudados neste trabalho.

3.2 Material utilizado

3.2.1 Substrato

O material utilizado na fabricação dos corpos de prova foi o aço SAE 1008 com 2,65 mm de espessura. A escolha deste aço se deve ao fato de ser o mesmo utilizado na fabricação de diversos componentes do setor agrícola, incluindo o objeto de protótipo no final do trabalho. A composição química do aço é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1008 segundo norma SAE J403.

Código SAE	% Carbono (C)	% Manganês (Mn)	% Silício (Si)	% Fósforo (P)	% Enxofre (S)
1008	0,10 (máx)	0,30 - 0,50	--	0,03 (máx)	0,05 (Max)

Fonte: Adaptado de SAE J403, (2001, p.3).

3.2.2 Adesivos estruturais

Para este trabalho foram utilizados dois tipos de adesivos estruturais recomendados pelo fabricante para a união de chapas metálicas, substituindo outros métodos de união. O primeiro adesivo, denominado “A”, é um monocomponente de base epóxi com cura a quente, ao passo que o adesivo “B” é um bicomponente, também de base epóxi, mas de cura em temperatura ambiente.

O adesivo “A” foi desenvolvido pelo fornecedor para a união de lâminas metálicas em geral, incluindo os casos em que a peça seja posteriormente submetida a processo de pintura industrial. Nestes casos a cura do adesivo ocorre dentro da própria estufa de pintura. Esse adesivo tem por característica a boa aderência a substratos oleados, além de aceitar solda ponto em suas uniões e conter microesferas de vidro para o controle de espessura da camada adesiva. A resistência de referência presente na ficha técnica do produto para ensaio de tração cisalhante com velocidade de 10 mm/minuto é de 28 MPa. Durante o processo de cura a quente o substrato deve atingir uma temperatura entre 160°C (mínimo) e 180°C (ideal) por 15 min (mínimo) a 30 min (ideal). A ficha técnica do fabricante também alerta que, neste processo de cura em estufa industrial, a temperatura de 210°C não pode ser excedida por período maior que 10 minutos.

Já o adesivo B foi desenvolvido para uso em juntas estruturais nas quais é necessária alta resistência mecânica, tendo sido empregado principalmente na união de substratos metálicos e compósitos. Trata-se de um adesivo de cura rápida a temperatura ambiente. Assim como no caso anterior, o adesivo B também possui microesferas de vidro para controle da espessura de junta e pode ser empregado em juntas híbridas, em combinação com soldas ponto e rebites. Para união com este adesivo é recomendado que as faces da junta estejam livres de óleo ou outros contaminantes. O processo de cura decorre da reação entre dois componentes a temperatura ambiente, mas pode ser acelerado pela aplicação de calor. Contudo a ficha técnica do fabricante não especifica as temperaturas e tempos de exposição recomendados. Na Tabela 4 é apresentado um comparativo de algumas propriedades

dos adesivos objetos de análise deste estudo.

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas dos adesivos utilizados neste trabalho.

PROPRIEDADES DOS ADESIVOS		
	(A)	(B)
Característica	Monocomponente	Bicomponente
Base química	Epóxi híbrido	Epóxi / Amina
Proporção de mistura (volume)	-	100:100
Densidade	1,3 kg/l	1,26kg/l ¹
Resistência a tração (ISO 527)	30 MPa ²	22 MPa ³
Tensile lap-shear strength (ISO 4587)	28 MPa ⁴	23 MPa ^{2/5}
Módulo de elasticidade (ISO 527)	1 600 MPa ²	2 100 MPa ³
Glass transition temperature (ISO 6721)	110°C ⁶	77 °C ⁷

¹ Adesivo misturado (Calculado)

² Ensaio a 2mm/min

³ 23°C/ 50% r.h. e curado por 1 semana a 23°C

⁴ Aço HDG H420 com 1,2mm, Camada de adesivo com 0,2mm à 10mm/min

⁵ Camada de adesivo de 25x12,5x0,3 em aço

⁶ Tensão de vibração, frequência 1 Hz, deformação est./din. 0,3/0,05 %, taxa de aquecimento 1 K/min

⁷ Curado por 1 semana a 23°C

Fonte: Adaptado da ficha técnica do fabricante.

3.3 Fabricação dos corpos de prova

Devido ao volume considerável de corpos de prova, a geometria escolhida foi a junta sobreposta simples (SLJ). Esta apresenta baixo custo de fabricação e facilidade de ensaio, tendo como ponto negativo a excentricidade gerada durante o teste de tração cisalhante, efeito que foi mitigado pela solda de alinhadores nas extremidades dos corpos de prova.

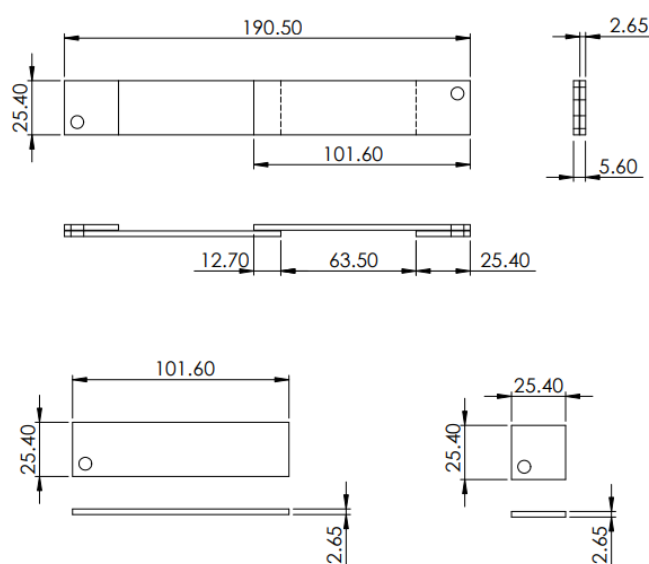
3.3.1 Projeto dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fabricados seguindo as dimensões recomendadas pela norma ASTM (2019), *D1002 - Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loadign (metal-to-metal)*, utilizando uma sobreposição de 12,7 mm. A espessura do substrato utilizado (2,65 mm), difere do recomendado na norma, contudo por se tratar de um ensaio de avaliação do processo, a norma permite a utilização de outras espessuras em desenvolvimentos, como é o caso. Porém, para isso, todos os corpos de prova comparados devem ter as mesmas dimensões.

Como já mencionado, o meio de mitigar a excentricidade intrínseca ao ensaio *lap-shear* consistiu na soldagem de placas alinhadoras nas extremidades do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 16. O procedimento visou reduzir, durante o ensaio de tração cisalhante, o momento fletor secundário ocasionado pela

excentricidade da junta sobreposta. Esse momento fletor gera uma força de abertura da junta (Modo I), também denominada de esforço de descasque ou *peel*.

Figura 16 – Dimensões dos corpos de prova utilizados no trabalho e seus componentes.



Fonte: O Autor.

Por fim é relevante mencionar que o teste é realizado em máquinas de ensaio convencionais, programadas de forma semelhante a um teste de tração simples. Contudo, devido à geometria sobreposta, o efeito sobre a junta é de cisalhamento da camada adesiva. Além disso, mesmo que o efeito do momento fletor secundário tenha sido mitigado nos testes aqui reportados, o projetista deve levar em consideração que peças reais, quando em operação, efetivamente sofrem o efeito desse momento.

3.3.1.1 Cálculo do Máximo Comprimento de Sobreposição dos corpos de prova

A norma ASTM (2019), sugere um tamanho máximo de sobreposição nos corpos de prova. Caso contrário, no ensaio de tração cisalhante, a tensão de escoamento do substrato pode ser excedida. O valor de sobreposição máxima pode ser calculado segundo a equação (1).

$$L = F_{ty} * \frac{t}{\tau} \quad (1)$$

Na qual L é o máximo comprimento de sobreposição, F_{ty} é a tensão de escoamento do substrato, t é a espessura deste substrato, e τ corresponde a 50% da

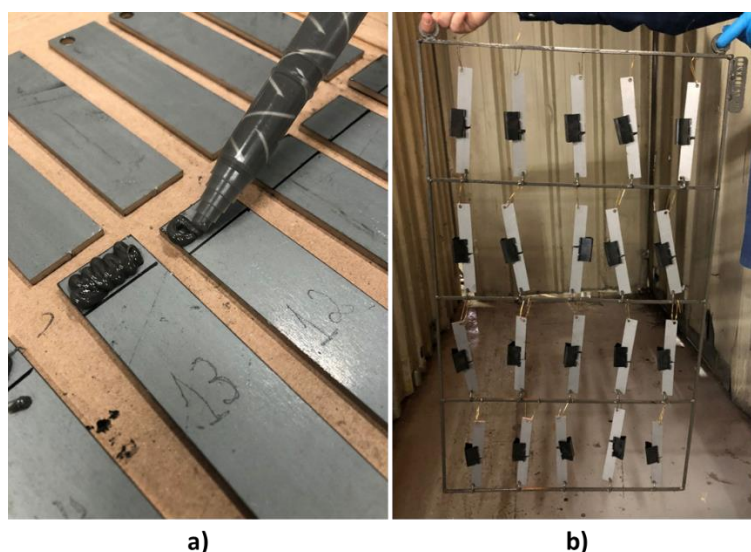
resistência ao cisalhamento média estimada na união adesiva. Cabe observar que as orientações da norma estão em unidades do Sistema Imperial.

Utilizando como base a tensão de escoamento do aço SAE 1008 como 230 MPa (33,3 ksi), a espessura de substrato de 2,65 mm (0,1 in) e 50% da resistência ao cisalhamento como 14 MPa (2 ksi), com base na tabela de dados do fabricante, foi obtido um tamanho de sobreposição máximo de ~3,4 pol ou 87 mm. Desta forma a sobreposição de 12,7 mm, adotada neste trabalho, foi validada.

3.3.2 *Preparo das amostras*

Após o corte e ajuste das peças metálicas, as juntas foram fabricadas manualmente por meio da aplicação do adesivo diretamente da bsnaga sobre o substrato, sem preparações anteriores, visto que o objetivo era avaliar o processo de forma semelhante ao que poderia ocorrer em ambiente industrial. Na união dos substratos, o tamanho de sobreposição foi garantido com o auxílio de um paquímetro. Foram utilizados grampos de papel para manter as peças imobilizadas até que o processo de cura fosse concluído. Os corpos de prova foram fixados em suportes em forma de gancho, por meio dos furos presentes em suas extremidades, sendo então imediatamente enviados para cura nas condições expostas na próxima seção. A Figura 17 apresenta uma imagem da fabricação dos corpos de prova e sua fixação nos suportes do processo de pintura.

Figura 17 – a) Aplicação do adesivo estrutural sob o corpo de prova, b) Fixação dos corpos de prova com grampos em sua respectiva gancheira.



Fonte: O Autor.

3.3.3 Processo de cura

Esta seção visa complementar informações anteriormente apresentadas no fluxograma do trabalho. Os processos de cura ocorreram numa das seguintes condições:

- i. em estufa de laboratório: 8 corpos de prova para cada adesivo.
- ii. os corpos foram depositados na estufa de processo *e-coat*, desta forma sendo expostos apenas à temperatura, sem passar pelas etapas de desengraxe, enxágue, e outros presentes na Figura 13 e desviando o processo de pintura, passando diretamente na última etapa da Figura 14, que é a estufa de cura: 8 corpos de prova para o adesivo A, buscando entender o impacto dos processos de pré-tratamento e pintura na resistência das juntas, como será explicado nas próximas seções.
- iii. passagem pela pintura *e-coat*, portanto sofrendo o efeito da temperatura e, concomitantemente, de todos os banhos e processos que a compõem: 8 corpos de prova para cada adesivo,
- iv. passagem pelo processo completo de pintura: *e-coat* + pintura líquida, como se fossem peças comuns de produção (8 corpos de prova para cada adesivo).

Os detalhes de cada condição serão apresentados nas próximas seções.

Como já mencionado, após ter sido escolhido o adesivo mais adequado, foram fabricados mais 80 corpos de prova, curado em duas condições: a) na estufa de processo *e-coat* e b) processo completo de pintura *e-coat* + pintura líquida.

As próximas subseções expõem os detalhes acerca dos diferentes processos de cura dos adesivos empregados.

3.3.3.1 Cura em estufa laboratorial

Com o objetivo inicial de criar grupo de controle, 8 corpos de prova de cada adesivo foram submetidos a cura num forno estufa com aquecimento por resistência, onde foi possível adotar uma temperatura e um tempo de exposição para os corpos de prova conforme escolha da equipe.

Os parâmetros utilizados tomaram por base alcançar as recomendações do fabricante para a cura do adesivo monocomponente A, quais sejam: uma temperatura do ar na estufa em 190°C e manutenção por 30 minutos. Os corpos de prova foram inseridos na estufa previamente estabilizada nessa temperatura, assegurando que o substrato atingisse a condição térmica especificada durante o tempo de exposição.

A fixação dos corpos de prova no interior da estufa foi realizada por meio de

suportes próprios do sistema de pintura, denominados gancheiras, que permitiram a fixação por meio do furo presente no substrato. Ao término do período de exposição, a estufa foi aberta, e os corpos de prova foram mantidos em ambiente controlado até atingirem a temperatura ambiente.

3.3.3.2 Cura em estufa do processo e-coat

Buscando entender a influência dos banhos de pré-tratamento de processo e-coat um grupo de 8 corpos de prova do adesivo “A” foi inserido manualmente dentro da estufa de cura do processo e-coat, evitando assim que os corpos de prova tivessem contato com os banhos de pré-tratamento e submetendo os mesmos apenas ao regime de temperatura sofrido por uma peça em processo.

O regime de tempo e temperatura imposto aos corpos de prova corresponde ao anteriormente descrito na seção 3.1.1.1, qual seja: uma temperatura teórica de 215°C (+10, -50°C), por um tempo mínimo de 48 minutos.

Cabe lembrar que o grupo de corpos de prova correspondente a este caso não fazia parte do primeiro planejamento de experimentos. Sua preparação teve por objetivo permitir a comparação entre os casos: a) ‘apenas temperatura do processo e-coat’ e b) ‘temperatura + banhos e etapas compreendidas no e-coat’.

3.3.3.3 Processo completo de pintura e-coat

Simulando o processo completo de pintura e-coat, os corpos de prova foram carregados juntamente com outras peças produzidas pela empresa. Isto foi possível porque o sistema de movimentação de peças atende a diversas formas e tamanhos. Desta forma os corpos de prova passaram por todas as etapas de pré-tratamento, pintura e posterior cura na estufa. Assim como ocorre nas peças correntemente produzidas, após saírem da estufa de cura, os corpos de prova ficaram expostos à temperatura ambiente até que resfriassem.

3.3.3.4 Processo completo de pintura e-coat e líquida

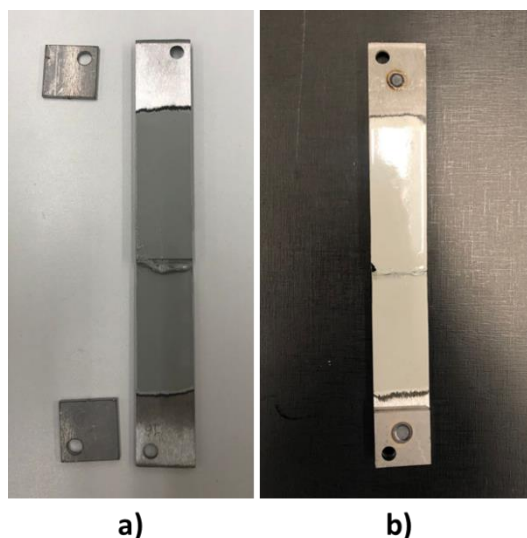
Para este grupo de corpos de prova, o processo inicial de pintura e-coat seguiu o mesmo procedimento descrito no tópico anterior, durante o qual ocorreu simultaneamente a cura da tinta e do próprio adesivo. Em sequência os corpos de prova foram submetidos ao ciclo completo de pintura líquida, no qual foi aplicada uma

tinta à base de poliuretano na cor cinza. Tal processo incluiu as etapas de carregamento, preparação da superfície, aplicação da tinta e uma nova cura em estufa com uma temperatura de 85°C na entrada e 115°C na saída, como anteriormente descrito no tópico 3.1.1.2.

3.4 Solda ponto dos alinhadores

Com o objetivo de mitigar a excentricidade nos ensaios de tração, optou-se por realizar a solda ponto por resistência de placas alinhadoras nos corpos de prova. O processo foi realizado após a cura do adesivo, evitando que impactasse nas dimensões dos corpos de prova. Nos corpos de prova pintados foi necessário o lixamento de uma pequena área nas extremidades, para permitir que o processo de soldagem acontecesse, conforme apresentado na figura 18.

Figura 18 - Corpos de prova antes (a) e após (b) a fixação dos alinhadores por processo de solda ponto por resistência.



Fonte: O autor.

3.5 Termografias

Para compreender o efeito da temperatura dos processos de pintura sobre os corpos de prova, foram realizadas termografias em todas as estufas utilizadas no trabalho. Para isto foi utilizado o equipamento Datapaq EasyTrack3, que permite criar uma curva tempo vs. temperatura dentro de fornos e estufas por meio de sensores dispostos em pontos sobre os corpos de prova. Também foi utilizado um sensor para

captar a temperatura do ar dentro das estufas. O termógrafo é mostrado na Figura 19. Já a Figura 20 mostra os sensores e o termógrafo numa das medições realizadas neste trabalho, imediatamente antes das peças entrarem na estufa de cura da pintura líquida. É possível perceber o posicionamento dos sensores em diferentes pontos das amostras, que é realizado por meio de sua base magnética. Devido à temperatura das estufas o equipamento fica protegido dentro de uma caixa isolada, permanecendo em exposição direta apenas os sensores.

Figura 19 – Termógrafo utilizado na criação do perfil de tempo vs. temperatura nas estufas de cura dos processos de pintura.



Fonte: O autor.

Figura 20 - Sensores e termógrafos posicionados nos corpos de prova antes da entrada na estufa de cura de pintura líquida.



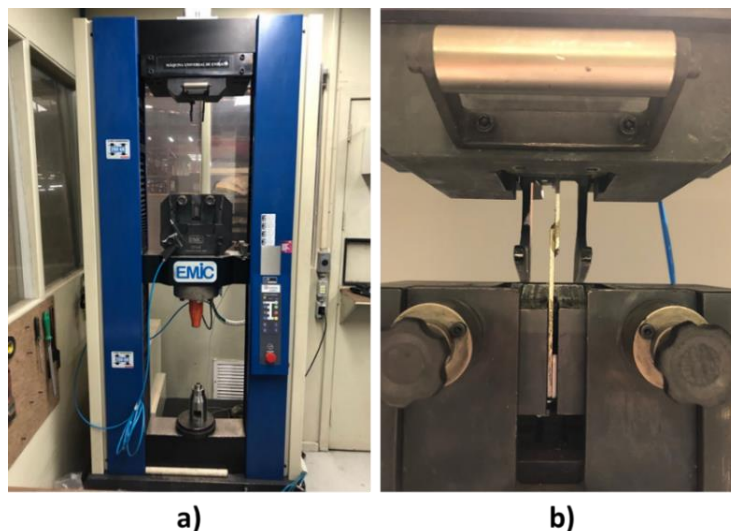
Fonte: O autor.

3.6 Ensaios mecânicos e análise do modo de falha

Para a análise de resistência dos corpos de prova, por meio de ensaios de tração cisalhante (*lap shear*), foi empregada uma máquina universal da marca EMIC, modelo

DL 200, com capacidade para 200 kN. A velocidade de ensaio utilizada foi de 1,3 mm/min, conforme definido na norma ASTM (2019). A Figura 21 mostra o equipamento utilizado, bem como um corpo de prova em ensaio.

Figura 21 – Máquina de tração utilizada no ensaio (a) e espécime em ensaio (b).



Fonte: O autor.

3.6.1 Macrografia das falhas

Após o rompimento dos corpos de prova, com objetivo de registrar o tipo de falha resultante e relacioná-lo com a resistência, ambas as superfícies de falha dos corpos de prova foram analisadas com o auxílio de uma lupa modelo Dino-Lite AM4113ZT com base MS-35B, utilizando uma magnificação de 12,2 vezes. A Figura 22 apresenta este equipamento.

Figura 22 – Lupa modelo Dino-Lite AM4113ZT utilizado para registro das macrografias.



Fonte: O autor.

3.6.2 Matriz decisória do adesivo

A primeira parte deste trabalho vislumbrava entender qual o adesivo mais adaptado ao processo produtivo, para então evoluir para os ensaios acelerados de degradação. Com o objetivo de facilitar e criar uma metodologia para definir o melhor adesivo, foi criada uma tabela com as principais características almejadas para o adesivo a ser aplicado no processo, com um viés de metodologia de projeto. O grau de relevância de cada um dos tópicos levantados foi gerado numa reunião de *brainstorming* com as pessoas envolvidas no projeto (Tabela 5).

Tabela 5 - Matriz decisória com os principais requisitos almejados nos adesivos e seu respectivo grau de relevância na análise.

	Requisito	Sentido almejado	Grau de relevância
Processo	Facilidade de aplicação do adesivo	↑	50
	Tempo até movimentação (<i>Handling time</i>)	↓	75
	Necessidade de sistema de ancoragem	↓	75
	Aceitação à solda ponto por resistência	↑	75
	Necessidade de limpeza do substrato	↓	100
Projeto	Facilidade de controle de espessura	↑	75
	Resistência mecânica	↑	75
	Desvio padrão de resistência mecânica	↓	75
	Manutenção de propriedades após pintura	↑	75
	Temperatura de serviço	↑	75
	Segurança e saúde ocupacional	↑	100
Custo	Custo do adesivo	↓	100
	Custo do sistema de aplicação do ades.	↓	50
	Facilidade de adaptação do processo atual	↑	75

Fonte: O autor.

A tabela consiste num conjunto de requisitos separados por macro tópicos. O primeiro dele se trata de requisitos do processo produtivo, o segundo de requisitos de projeto e por fim os requisitos de custo. Junto dos requisitos existe uma coluna que indica qual o sentido almejado para cada um dos mesmos, sendo quanto maior melhor ou quanto menor melhor. Após a separação em requisitos e sentidos foi criado um grau de relevância para cada um deles, em uma escala de 0 a 100, onde 0 significava uma relevância nula e 100 significava uma relevância extrema.

Por fim cada adesivo recebeu uma nota, também variando de 0 a 100, para o quanto atendiam a cada um dos requisitos, permitindo assim a quantificação do conjunto de resultados.

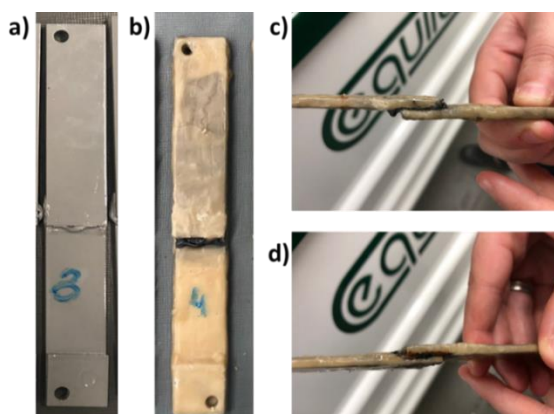
3.7 Ensaios de envelhecimento acelerados

Após ter sido escolhido o adesivo mais adequado ao processo produtivo, deu-se início aos ensaios de envelhecimento, com o objetivo de avaliar como esse adesivo se comportaria. Para tal foram utilizados equipamentos de teste de névoa salina (*salt spray*) e o ensaio em câmara de umidade saturada (*Condensation atmosphere with constant humidity*).

A primeira etapa de ensaios revelou claramente que os corpos de prova que passavam pelo processo completo de pintura por eletrodeposição e posterior pintura líquida eram os mais afetados. Desta forma os ensaios de intemperismos foram realizados com corpos de prova em duas condições: a) curados apenas em estufa do processo *e-coat* e b) com processo completo de pintura *e-coat* mais líquida. No total 80 corpos de prova foram ensaiados nesta segunda fase do trabalho, igualmente divididos entre as duas condições de cura.

Como o objetivo do ensaio era avaliar a resistência das juntas em face às intempéries, no caso dos corpos de prova apenas curados em *e-coat*, em que o substrato não possuía nenhuma proteção, foi aplicada uma camada de cera de abelha, conforme sugerido nas normas de avaliação de peças a ambientes corrosivos ASTM (2008), D1654 (*Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments*), e ABNT (2015) NBR 8092 (Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada - Método de ensaio). Apenas a área do adesivo e sua interface com o substrato foram mantidas expostas. A Figura 23 mostra o aspecto dos espécimes envolvidos.

Figura 23 – Corpos de prova preparados para os ensaios de intemperismo. a) espécime pintado nos processos *e-coat* + líquida, b) espécime curado na estufa *e-coat* com substrato recoberto por cera, c) espécime recoberto com cera antes do teste de *salt spray*, d) espécime recoberto com cera após dias de exposição ao *salt spray*.



Fonte: O autor.

3.7.1 Ensaio de névoa salina (Salt spray)

O ensaio de névoa salina é um teste realizado em laboratório que tem por objetivo detectar descontinuidade, poros e danos em revestimentos, além de ser bastante útil para avaliar a corrosão de materiais metálicos com e sem revestimento.

Os testes foram realizados numa câmara de corrosão *salt spray* tradicional da marca Equilam, conforme a norma ISO (2017), 9227 (*Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests*). Os parâmetros utilizados foram uma temperatura de $35 \pm 2^\circ\text{C}$, uma concentração de sódio de (50 ± 5) g/l e um pH controlado entre 6,5 e 7,2.

Como o objetivo era avaliar como a degradação acontecia com a evolução da exposição ao ambiente corrosivo, os corpos de prova com pintura e-coat + líquida e apenas curados em estufa do processo e-coat, foram submetidos aos seguintes regimes de exposição: 250, 500, 750 e 1000 horas. A Tabela 6 mostra a distribuição dos corpos de prova nos casos de estudo. Posteriormente os dados obtidos foram comparados com aqueles obtidos nos grupos de controle, que não haviam sido expostos às intempéries.

Tabela 6 – Quantidade e tipos de corpos de prova submetidos aos ensaios de névoa salina.

CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE NÉVOA SALINA				
	250h	500h	750h	1000h
Pintura completa ecoat e líquida	5	5	5	5
Cura em estufa e-coat recoberto cera	5	5	5	5
Total	40			

Fonte: O autor.

3.7.2 Ensaio de câmara de umidade saturada (Condensation atmosphere with constant humidity)

O ensaio de câmara de umidade saturada simula um ambiente com condições extremas de umidade, variando entre 95% e 100%, porém sem poluição ou sais. Esta concentração de umidade é capaz de acelerar a corrosão de metais, decompor revestimentos e desintegrar estruturas. Além disso, como já salientado, a água é um grande inimigo dos adesivos estruturais.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ISO (2005), 6270 – 2 (*Paints and varnishes — Determination of resistance to humidity - Part 2: Procedure for exposing test specimens in condensation-water atmospheres*), com uma temperatura do ar de $40^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, uma umidade de 98% com condensação nos corpos de prova e tempos de

exposição de 250, 500, 750 e 100 horas. A Tabela 7 resume estas condições.

Tabela 7 - Quantidade e tipos de corpos de prova submetidos aos ensaios de câmara de umidade saturada.

CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE CÂMARA DE UMIDADE SATURADA				
	250h	500h	750h	1000h
Pintura completa ecoat e líquida	5	5	5	5
Cura em estufa e-coat recoberto cera	5	5	5	5
Total	40			

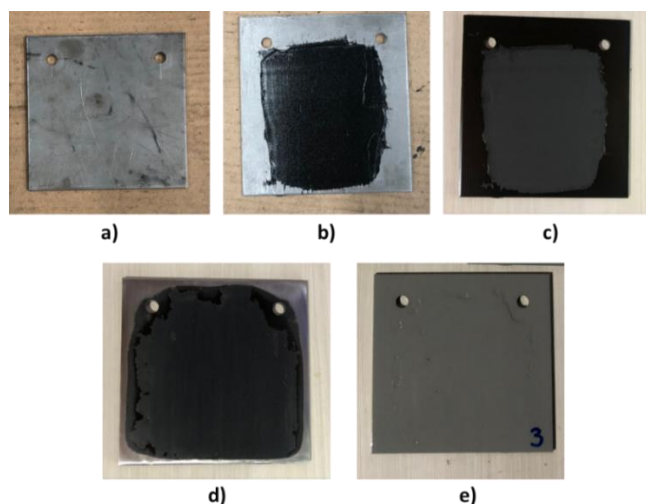
Fonte: O autor.

O equipamento utilizado foi uma câmara de umidade, da marca Equilam.

3.8 Teste de aderência de tinta

Inicialmente foi estabelecida a hipótese, a ser comprovada ou refutada, de que a camada de tinta servisse como uma barreira protetiva para a passagem da umidade, desta forma contribuindo para um melhor desempenho nos testes de envelhecimento. Para avaliar a efetividade na adesão da tinta sobre o adesivo estrutural, foi realizado um teste de aderência de tinta. Para tal foram fabricados três painéis, obtidos pela deposição de uma fina camada de adesivo sobre uma base. Esses corpos de prova foram submetidos ao processo completo de pintura e-coat + tinta líquida. A figura 24 mostra imagens das amostras.

Figura 24 – Espécimens do teste de adesão da tinta sob o adesivo curado: a) substrato metálico, b) adesivo aplicado antes da cura, c) espécime após pintura e-coat, d) espécime com camada de adesivo lixada, e) espécime após pintura líquida.



Fonte: O autor.

Dentre os três painéis, dois não foram lixados após a pintura *e-coat*, sendo diretamente encaminhados ao processo de pintura líquida. O outro painel foi lixado manualmente com o auxílio de um taco de lixamento com medidas 7x13 cm, seguindo a seguinte granulometria de lixas 100, 180, 220, 320, 400 e 600, obtendo como resultado a imagem “d)” da figura 24.

O teste de aderência em grade tomou por base as diretrizes da norma ASTM (2023), *D3359 – 23 (Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test*, utilizando o método de teste B – *Test Method B*), que é recomendado para espessuras de tinta inferiores a 125 µm. A norma D3359 é designada para avaliar a resistência de adesão da tinta em substratos metálicos, mas cita que o método também tem sido empregado para avaliar a adesão de coberturas orgânicas sobre substratos plásticos e madeiras.

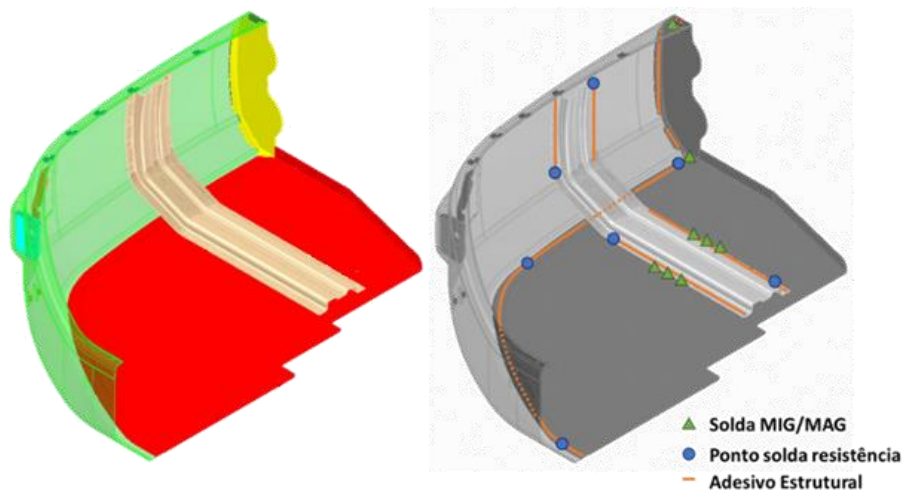
3.9 Fabricação de protótipo (amostra para campo)

Com forma de validar a utilização do adesivo em peças sujeitas ao processo de pintura, um para-lama agrícola real foi adaptado para receber uma junta híbrida. Para tal foi empregada a mesma estrutura e dispositivos utilizados na fabricação convencional do componente, a qual envolve solda MIG/MAG e solda ponto das diversas partes que formam a peça.

Como a cura do adesivo escolhido deve ocorrer na estufa do processo de pintura, dentro da qual as peças são suspensas e movidas por corrente, a equipe de projeto optou pela aplicação de pontos de solda e MAG em locais estratégicos, para que as partes unidas se mantivessem suficiente firmes ao longo do processo. Portanto a opção por juntas híbridas não visou atender a requisitos de operação do produto, mas à sua produção. Além disso, como o componente é vendido apenas com o processo de pintura por eletrodeposição, sem camada líquida de acabamento, apenas o processo de *e-coat* foi aplicado. A Figura 25, apresenta os pontos onde foram utilizados o adesivo estrutural e os pontos para fixação até o processo de pintura.

Após a realização dos testes a peça foi inspecionada pelas pessoas do projeto e foi realizada uma análise de custos, com objetivo de avaliar a viabilidade comercial da substituição da solda por adesivos no componente em específico.

Figura 25 – a) Representação 3D do para-lama utilizado como protótipo, b) Esquema de aplicação de adesivos estrutural e pontos de fixação até a cura.



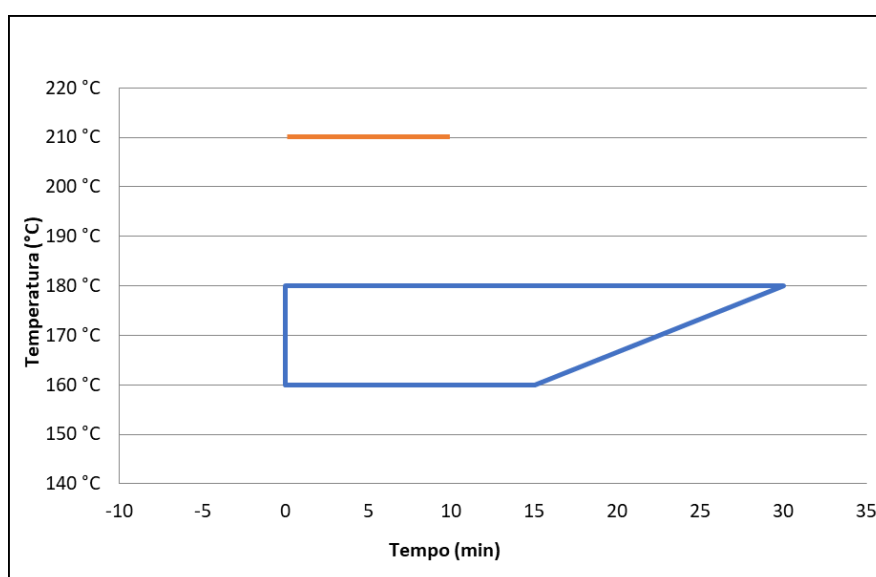
Fonte: O autor.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Termografias dos processos de pintura

A temperatura de cura recomendada no *datasheet* do fabricante para o adesivo monocomponente A é um mínimo de 15 minutos a uma temperatura de 160°C e um máximo de 30 minutos numa temperatura de 180°C. Também é recomendado que uma temperatura limite de 210°C não seja ultrapassada por mais de 10 minutos. A Figura 26 mostra a janela de cura recomendada para o adesivo, bem como a linha limite correspondente à temperatura de 210°C. Nas próximas seções será mostrado que, ao longo do processo de cura em estufa de pintura industrial, a temperatura ultrapassou tais parâmetros limites.

Figura 26 – Janela de cura proposta para o adesivo monocomponente A.



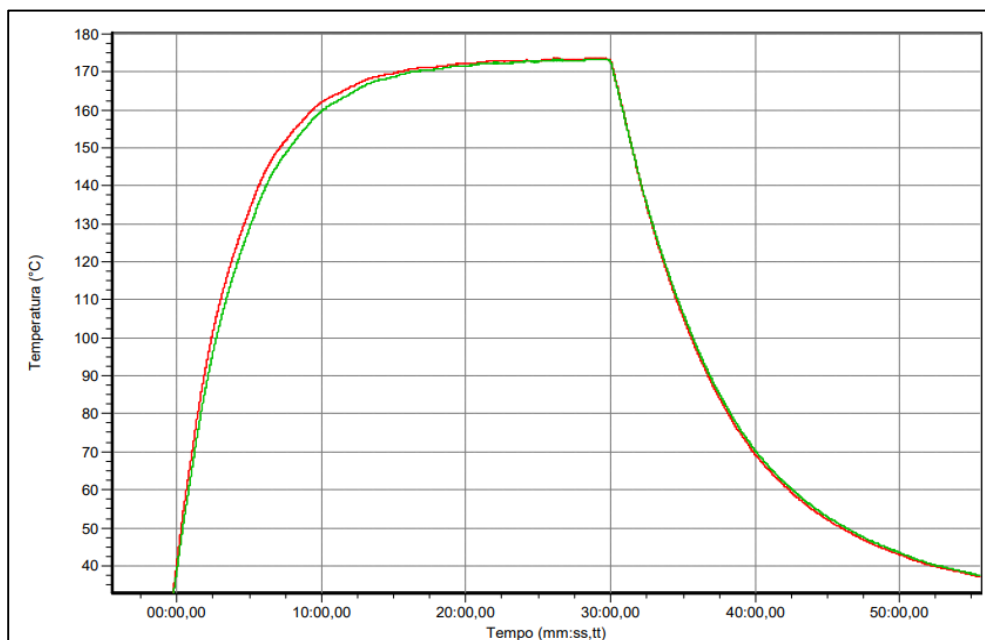
Fonte: O autor.

4.1.1 Estufa de cura estacionária de laboratório

Para o processo de cura em estufa estacionária, o equipamento foi configurado para uma temperatura de 190°C por 30 minutos. Os corpos de prova foram inseridos após a temperatura atingir o valor determinado e ficaram dentro da estufa pelo período delimitado. A Figura 27 mostra o gráfico gerado pelo termógrafo a partir das sondas fixadas no substrato. A temperatura máxima atingida foi de 173°C, tendo as peças

permanecido acima de 170°C por aproximadamente 15 min.

Figura 27 - Termografia de corpos de prova em forno estufa do laboratório de testes.



Fonte: Extraído e adaptado do software Datapaq Insight EasyTrack Professional v8,501

Copyright (C) Datapaq 2002-2017.

É importante destacar que esta faixa de temperatura está dentro da janela de cura sugerida pela ficha técnica do fabricante para o adesivo monocomponente A, apresentado na seção 3.2.2.

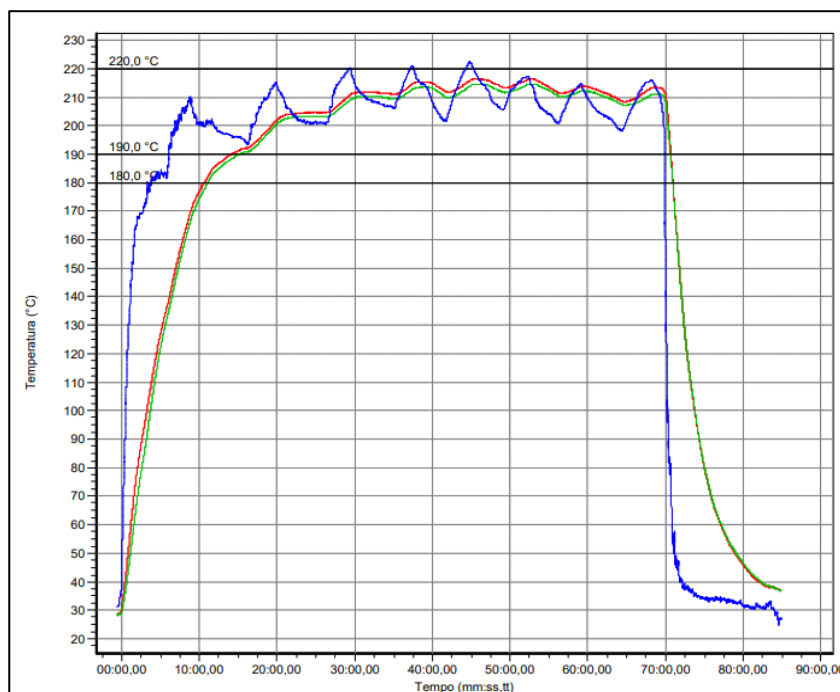
Para o adesivo bicomponente B não se tem informações da influência que a temperatura teria sobre a resistência do adesivo, uma vez que este é fabricado para cura a temperatura ambiente.

4.1.2 Estufa de cura do processo de pintura por eletrodeposição por imersão

O processo de cura na estufa do processo e-coat não possui um tempo de permanência exato, pois depende das peças em produção e das interrupções naturais do processo.

A Figura 28 mostra o regime de temperatura ao qual os corpos de prova foram submetidos. As linhas verde e vermelha correspondem aos sensores #1 e #2, fixados sobre corpos de prova. Já o sensor #3 foi propositalmente posicionado de forma a medir a temperatura do ar dentro da estufa.

Figura 28 - Termografia de corpos de prova em estufa de cura do processo de pintura por eletrodeposição.



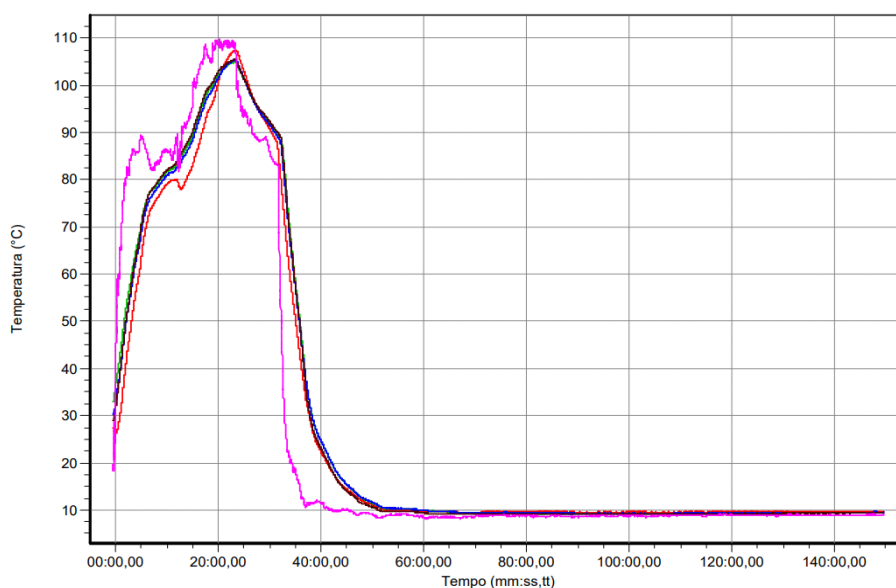
Fonte: Extraído e adaptado do software Datapaq Insight EasyTrack Professional v8,501 Copyright (C) Datapaq 2002-2017.

Os dados encontrados mostram que os corpos de prova avaliados ficaram aproximadamente 70 minutos na estufa de cura, onde permaneceram acima dos 190°C por aproximadamente 1 hora. Além disso o limite estabelecido pelo fabricante dos adesivos, segundo o qual o período máximo numa temperatura de 210°C seria de 10 min, foi excedido, tanto no que se refere ao tempo como à temperatura em si.

4.1.3 Estufa de cura do processo de pintura industrial com tinta líquida

Os corpos de prova que foram submetidos ao processo de pintura líquida sofreram dois regimes de aquecimento: no processo e-coat e no próprio processo de pintura líquida. É possível constatar por meio da Figura 29 que a temperatura da pintura líquida é aproximadamente metade daquela atingida na pintura e-coat. Cabe salientar que o adesivo já havia sido completamente curado ao entrar no processo de pintura líquida. Por outro lado, as temperaturas de transição vítrea dos adesivos correspondem a 110°C para o monocomponente A e 77°C para o bicomponente B. Portanto a temperatura da estufa é próxima à temperatura de transição do adesivo A e superior àquela do adesivo B.

Figura 29 – Termografia de corpos de prova em estufa de cura do processo de pintura industrial com tinta líquida.



Fonte: Extraído e adaptado do software Datapaq Insight EasyTrack Professional v8,501

Copyright (C) Datapaq 2002-2017.

O diagrama termográfico também revela que os corpos de prova permaneceram cerca de 35 min dentro da estufa. Ao contrário da pintura por eletrodeposição a pintura líquida é realizada numa monovia com velocidade constante, portanto o tempo de exposição não é alterado durante o processo, a menos que ocorra uma parada emergencial do sistema. Também foi possível constatar que o corpo de prova ficou acima da temperatura de transição vítrea do adesivo B (77°C) por aproximadamente 25 min.

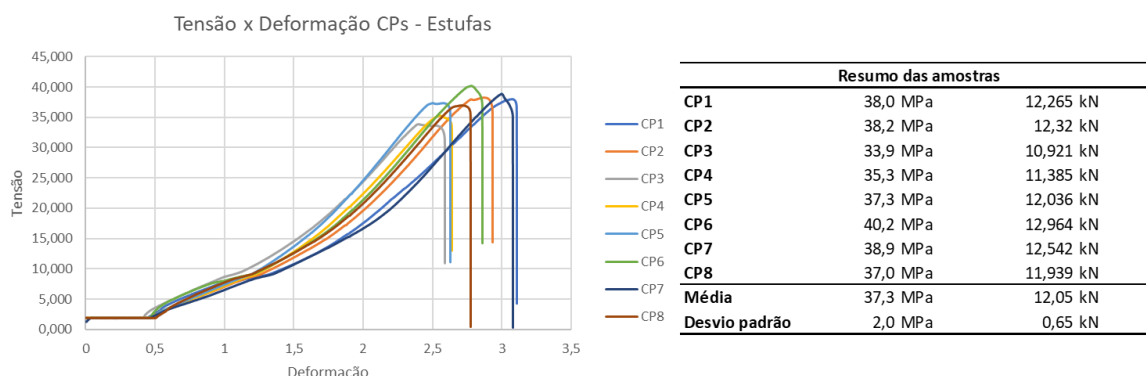
4.2 Avaliação do adesivo mais relevante ao processo

4.2.1 Adesivo monocomponente A (base epóxi de cura a quente)

4.2.1.1 Ensaios de tração sobre amostra curada em estufa de laboratório

Como já mencionado, foram ensaiados 8 corpos de prova. Os resultados indicaram uma resistência média de 12,05 kN (ou 37,36 MPa, considerando a área adesiva dos corpos de prova) e um desvio padrão de 0,64 kN (ou 2 MPa). Esses dados estão detalhados no relatório gerado pela máquina de ensaio de tração, conforme ilustrado na Figura 30.

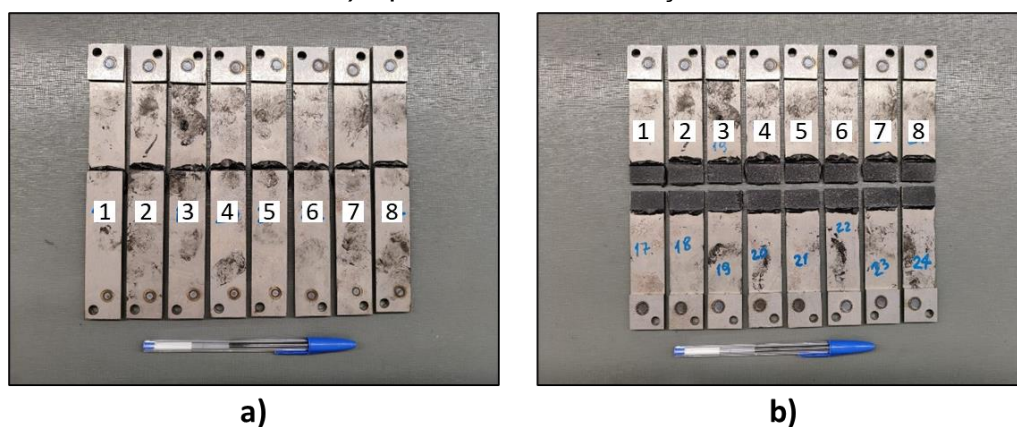
Figura 30 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em estufa estacionária de laboratório.



Fonte: O autor.

Os modos de falha observados foram predominantemente coesivos, exceto para o CP 3, onde foi evidenciado uma pequena área com falta de adesivo. Esta lacuna resultou numa resistência 4% inferior ao segundo menor resultado (CP 4 do relatório) e 9% inferior à média dos CPs ensaiados. A Figura 31 mostra imagens dos corpos de prova antes e após os ensaios.

Figura 31 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em estufa estacionária de laboratório agrupados: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.

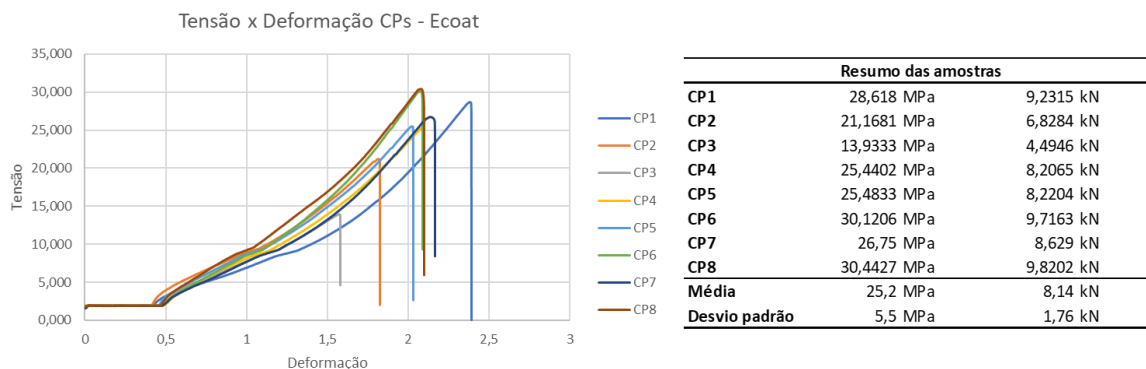


Fonte: O autor.

4.2.1.2 Corpos de prova submetidos ao processo completo de pintura e-coat

Neste caso também foram empregados 8 corpos de prova. A resistência média obtida foi de 8,14 kN (25,2 MPa), apresentando um desvio padrão de 1,76 kN (5,47 MPa). A Figura 32 apresenta o detalhamento destes resultados.

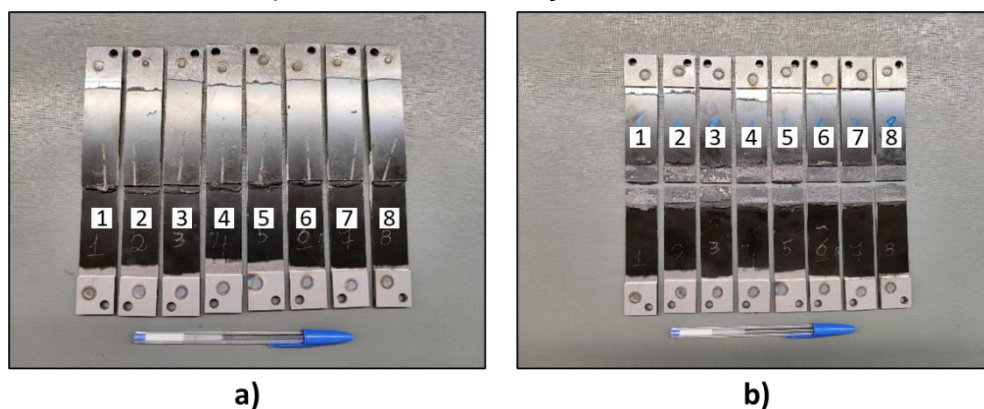
Figura 32 - Ensaio de tração cisalhante dos Corpos de Prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura e-coat.



Fonte: O autor.

Os modos de falha observados neste caso apresentaram menor uniformidade, incluindo falhas coesivas, coesivas de camada fina e pequenos pontos de falha adesiva. No caso do CP 3, que apresentou baixa resistência, foi possível observar um percentual considerável de falha adesiva. Como informação adicional os CPs 2 e 3 apresentaram, em sua análise de macrografia, pontos que se assemelham a pequenas bolhas de ar, que podem ter sido gerados no processo de manufatura ou pintura. A Figura 33 mostra imagens dos corpos de prova.

Figura 33 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura e-coat: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



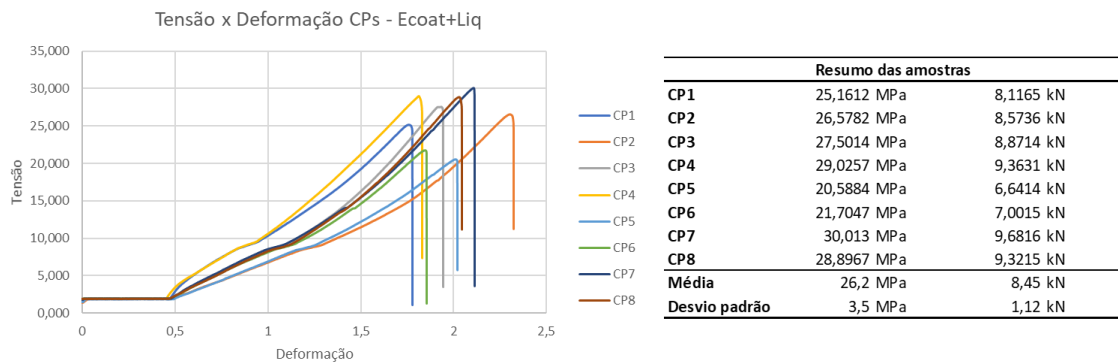
Fonte: O autor.

4.2.1.3 Corpos de prova submetidos ao processo completo de pintura e-coat e posterior pintura líquida

Neste caso a amostra apresentou uma resistência média de 8,46 kN (26,18 MPa) e um desvio padrão de 1,12 kN (3,47 MPa). A figura 34 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração.

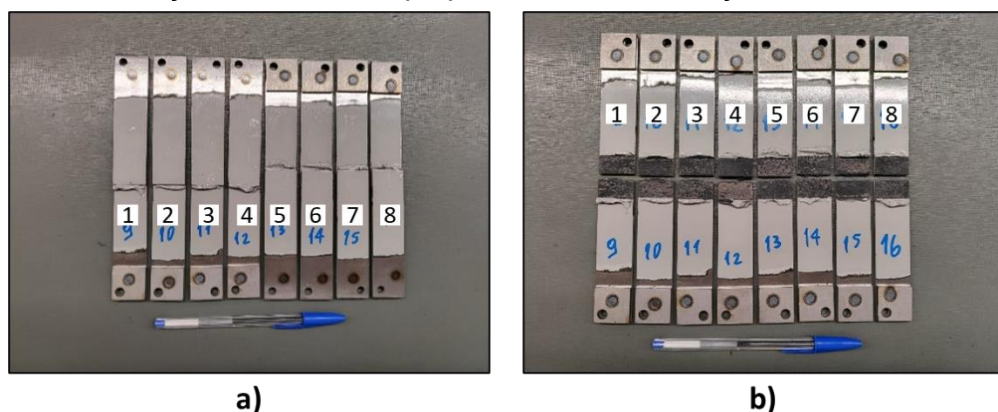
Os modos de falha observados, de forma semelhante aos CPs que passaram apenas pelo processo *e-coat*, apresentaram menor uniformidade em comparação às amostras curadas em estufa de laboratório. Predominaram as falhas do tipo coesiva e coesiva de camada fina, com pontos de falha adesiva em alguns corpos de prova. Durante a avaliação da macroscopia das falhas, também foram observados pequenos vazios nos CPs 1, 5 e 6, que podem ter sido gerados no processo de manufatura ou durante sua pintura. A Figura 35 mostra imagens do grupo de corpos de prova.

Figura 34 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura *e-coat* e posterior pintura líquida.



Fonte: O autor.

Figura 35 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura em processo completo de pintura *e-coat* e posterior pintura líquida: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



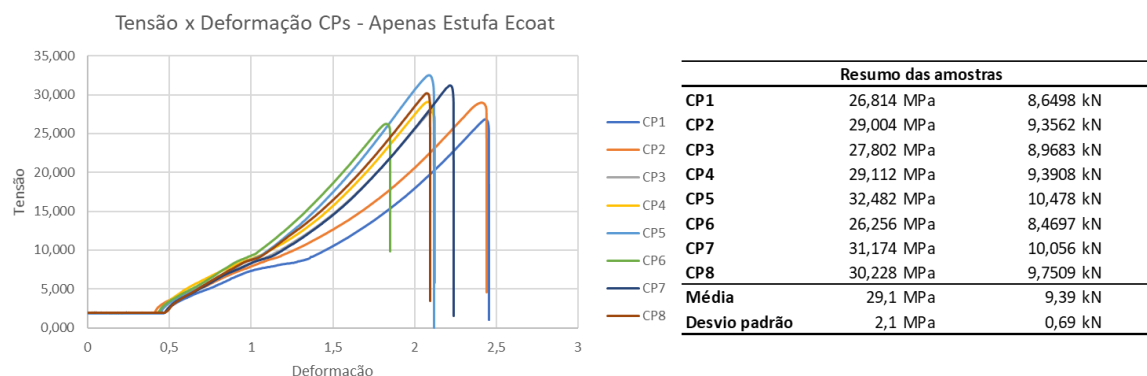
Fonte: O autor.

4.2.1.4 Corpos de prova submetidos apenas ao processo de cura em estufa do processo de pintura *e-coat*

A avaliação dos 8 corpos de prova do adesivo monocomponente A, submetidos apenas à cura em estufa do processo *e-coat*, sem a pintura líquida posterior, resultou

numa resistência média de 9,39 kN (29,11 MPa), com um desvio padrão de 0,68 kN (2,14 MPa). A figura 36 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração.

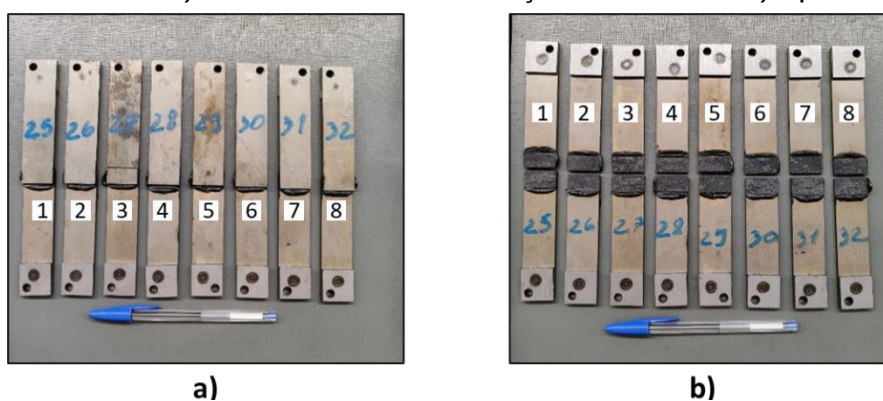
Figura 36 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A após cura apenas na estufa de cura do processo de pintura e-coat.



Fonte: O autor.

Os modos de falha observados para os corpos de prova foram homogêneos, predominando falhas coesivas, com alguns pontos de falha coesiva de camada fina, como apresentado na figura 37.

Figura 37 - Imagens da amostra do Monocomponente A após cura na estufa do processo e-coat: a) antes do ensaio de tração cisalhante, b) após o ensaio.



Fonte: O Autor.

4.2.2 Adesivo bicomponente B (base epóxi de cura a temperatura ambiente)

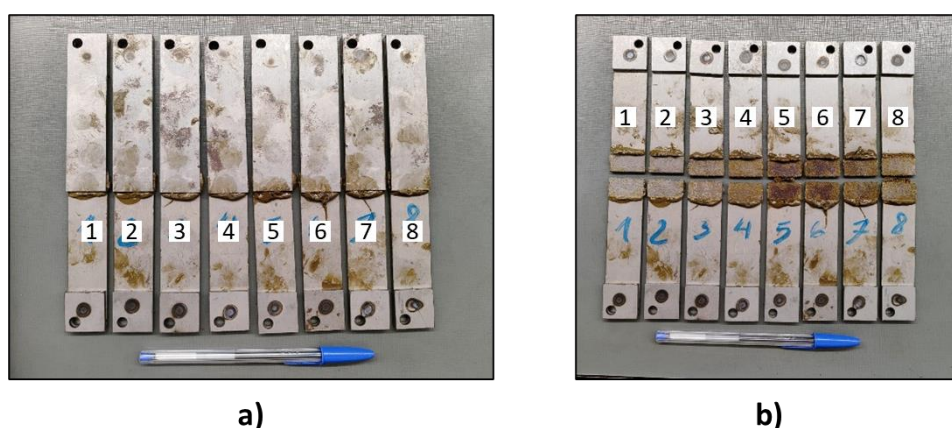
4.2.2.1 Corpos de prova submetidos apenas ao processo de cura em estufa de laboratório

O adesivo monocomponente B, curado em estufa estacionária no laboratório de

ensaios, não teve corpos de prova avaliados, uma vez que todos os espécimes romperam durante a aplicação da pré-carga na máquina de tração, indicando uma resistência significativamente baixa. Cabe destacar que os corpos de prova deste adesivo não foram submetidos à cura em temperatura ambiente, sendo encaminhados à estufa imediatamente após a união, visando simular as condições do processo produtivo.

A Figura 38 mostra imagens dos corpos de prova deste caso. A análise das superfícies de falha das juntas revelou aspectos de degradação. A equipe técnica do fabricante, em reunião para discussão dos resultados, observou certa contração do adesivo em alguns corpos de prova

Figura 38 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura em estufa de laboratório: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O autor.

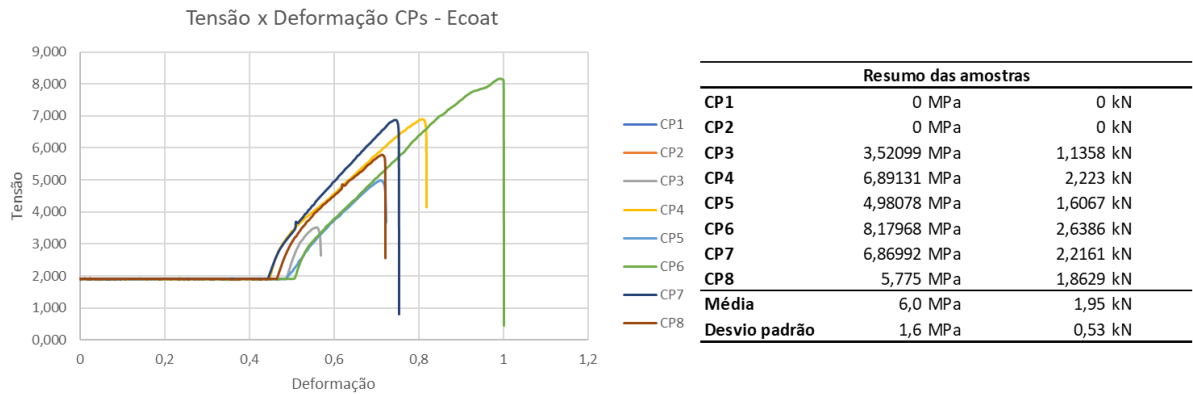
4.2.2.2 Corpos de prova submetidos ao processo completo de pintura e-coat

Neste caso foram avaliados 6 corpos de prova, uma vez que 2 espécimes romperam durante o manuseio. A resistência média obtida foi de 1,94 kN (6,04 MPa), com desvio padrão de 0,53 kN (1,64 MPa). Os resultados encontrados no ensaio de tração podem ser avaliados na figura 39.

Os modos de falha encontrados, de difícil classificação, foram entendidos como mistos apresentando falhas parcialmente coesivas e adesivas. As fraturas apresentaram sinais de degradação, especialmente nos dois espécimes que se romperam durante o manuseio. O corpo de prova 3, mostrado na Figura 40, exibiu um pequeno deslocamento durante o processo de pintura, enquanto o corpo de prova 5, apresentou

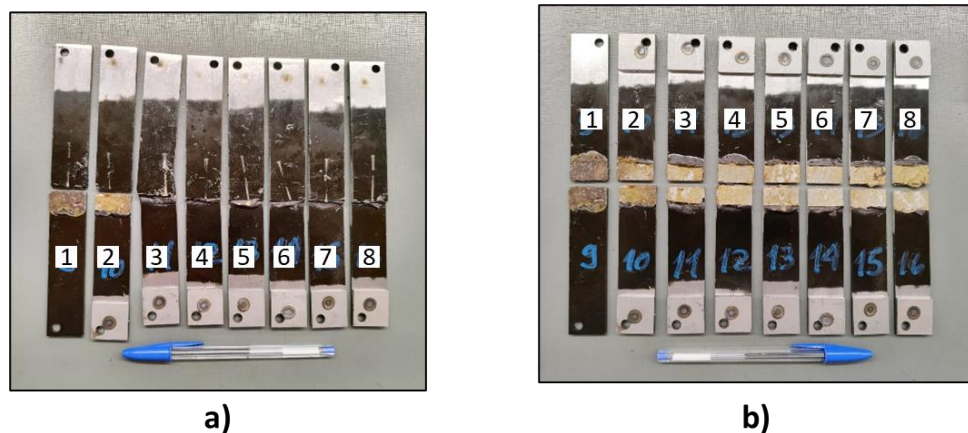
vazios numa área significativa da amostra.

Figura 39 - Ensaio de tração cisalhante dos Corpos de Prova do adesivo bicomponente B após cura em processo completo de pintura e-coat.



Fonte: O autor.

Figura 40 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura no processo completo de pintura e-coat: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



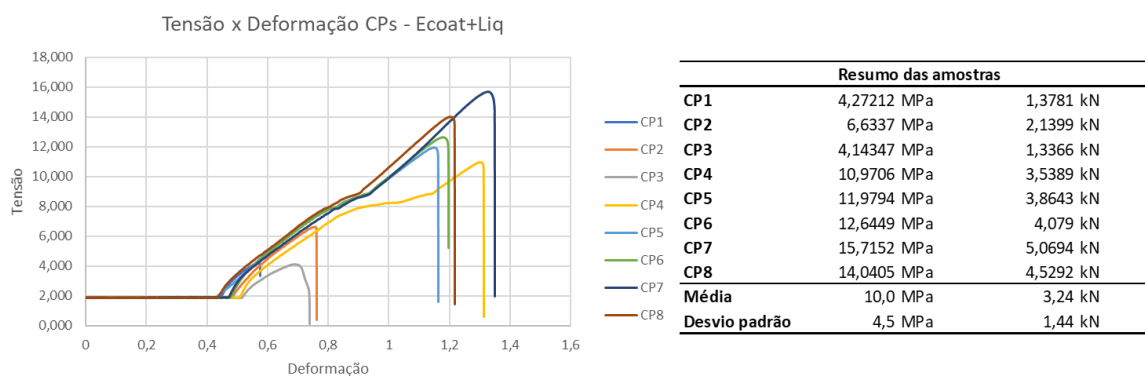
Fonte: O autor.

4.2.2.3 Corpos de prova submetidos ao processo completo de pintura e-coat e posterior pintura líquida

O adesivo monocomponente B, submetido ao processo de pintura e cura e-coat, seguido pela aplicação de pintura líquida, foi avaliado por meio de ensaios em 8 corpos de prova. Os resultados obtidos indicaram uma resistência média de 3,24 kN (10,05 MPa) e um desvio padrão de 1,44 kN (4,46 MPa), conforme detalhado na Figura 41. Os modos de falha observados nos corpos de prova foram classificados como mistos,

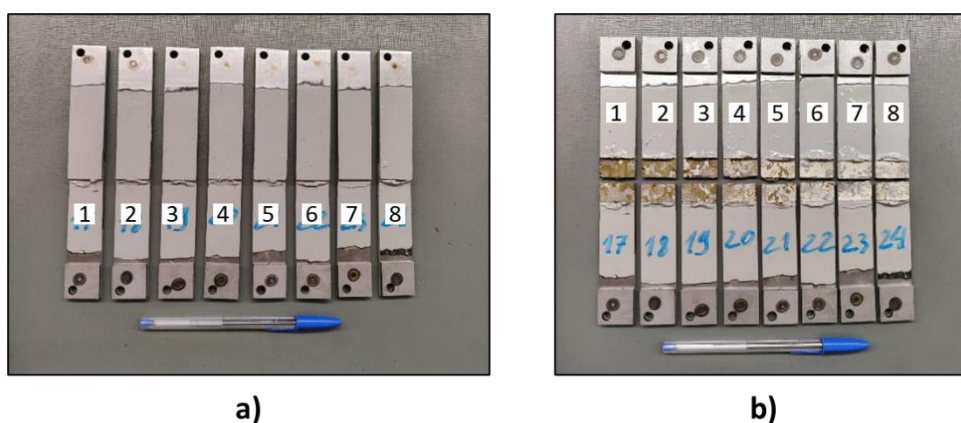
apresentando componentes de falha coesiva e adesiva. Parte dos corpos de prova exibiu sinais de degradação, como evidenciado nos corpos de prova 3 e 5, nos quais foram identificados pequenos vazios e estão apresentados na figura 42.

Figura 41 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo bicomponente B após cura em processo completo de pintura e-coat e posterior pintura líquida.



Fonte: O autor.

Figura 42 - Imagem dos corpos de prova do adesivo Bicomponente B após cura em processo completo de pintura e-coat e posterior pintura líquida: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

4.3 Matriz de decisão

Após os ensaios iniciais realizados com os dois adesivos epóxis, mono e bicomponente, foi criada uma matriz de decisão que busca avaliar qual adesivo é o mais adaptado ao processo produtivo existente.

Como descrito nos materiais e métodos a matriz foi criada com base nos interesses da empresa e no entendimento da equipe do projeto. As notas foram dadas em reunião com a equipe de projeto e são apresentadas na Figura 43.

Figura 43 - Matriz de escolha do adesivo mais adaptado ao processo.

	Requisito	Sentido almejado	Grau de relevância	Nota de desempenho	
				Adesivo (A)	Adesivo (B)
Processo	Facilidade de aplicação do adesivo	↑	50	50	75
	Tempo até movimentação (<i>Handling time</i>)	↓	75	0	25
	Necessidade de sistema de ancoragem	↓	75	0	25
	Aceitação à solda ponto por resistência	↑	75	75	75
	Necessidade de limpeza do substrato	↓	100	75	25
Projeto	Facilidade de controle de espessura	↑	75	75	75
	Resistência mecânica	↑	75	75	50
	Desvio padrão de resistência mecânica	↓	75	50	25
	Manutenção de propriedades após pintura	↑	75	75	0
	Temperatura de serviço	↑	75	75	25
	Segurança e saúde ocupacional	↑	100	50	50
Custo	Custo do adesivo	↓	100	75	25
	Custo do sistema de aplicação do ades.	↓	50	25	75
	Facilidade de adaptação do processo atual	↑	75	50	50
				59375	43750

Fonte: O Autor.

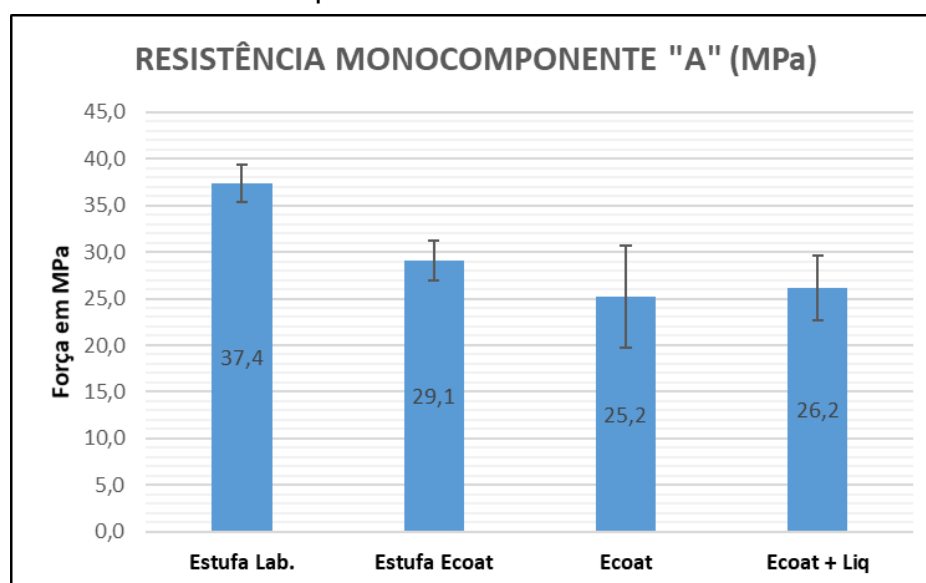
Como mencionado anteriormente, nesta análise foram avaliadas três macro áreas relevantes: adequação ao processo produtivo, propriedades relevantes no projeto e, por fim, custos. Na área de adequação ao processo, os adesivos obtiveram nota final semelhante, mesmo com desempenhos distintos no atendimento aos requisitos. O adesivo bicomponente B apresenta facilidade de aplicação e processo de cura mais simples, o que elevou sua nota. Já o adesivo monocomponente A possui a vantagem de não necessitar de limpeza do substrato. Por fim, nos tópicos projeto e custo, o adesivo monocomponente A atingiu nota superior, por ter preservado resistência considerável após os processos de pintura, e por apresentar custo inferior. A utilização desta ferramenta gerou uma nota final de 59375 para o adesivo monocomponente, que se mostrou mais adequado em relação ao bicomponente B, cuja pontuação final foi 43750.

4.4 Avaliação da resistência do adesivo epóxi monocomponente após ensaios de intemperismo

Após concluído o processo decisório abordado na seção anterior, o adesivo

monocomponente A foi alvo de avaliação mais detalhada. A Figura 44 mostra um diagrama de barras contendo as médias de resistência obtidas em cada condição de cura.

Figura 44 – Média de resistência do adesivo monocomponente A aos diferentes processos submetidos.



Fonte: O Autor.

Observa-se que os corpos de prova do adesivo monocomponente A, quando curados em estufa de laboratório e dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante, proporcionaram uma resistência média de 37 MPa, valor superior aos 28 MPa informados na relação de propriedades da Tab. 4. Os corpos de prova curados na estufa do processo de pintura *e-coat*, portanto sujeitos ao regime apresentado na Fig. 28, propiciaram uma resistência de 29 MPa, valor acima do indicado pelo fabricante, mas 22% abaixo do grupo curado em laboratório. Por fim, os corpos de prova submetidos ao processo completo de pintura *e-coat*, bem como aqueles sujeitos ao processo completo *e-coat* + pintura líquida, apresentaram uma diminuição de aproximadamente 12% na resistência mecânica. Tal decaimento de propriedades pode ser atribuído aos tratamentos químicos compreendidos nos processos, que não estavam presentes nos outros modos de cura.

Com o intuito de mapear a influência dos processos de pintura e sua correlação com os testes posteriores de envelhecimento acelerado, optou-se por prosseguir os experimentos em apenas duas amostras, nas seguintes condições: 1) corpos de prova curados na estufa do processo *e-coat* (portanto sem camada de tinta protetiva) e 2) corpos de prova que passaram pelo processo completo de pintura por eletrodeposição

com posterior pintura líquida (condição normal de venda de uma peça do setor agrícola).

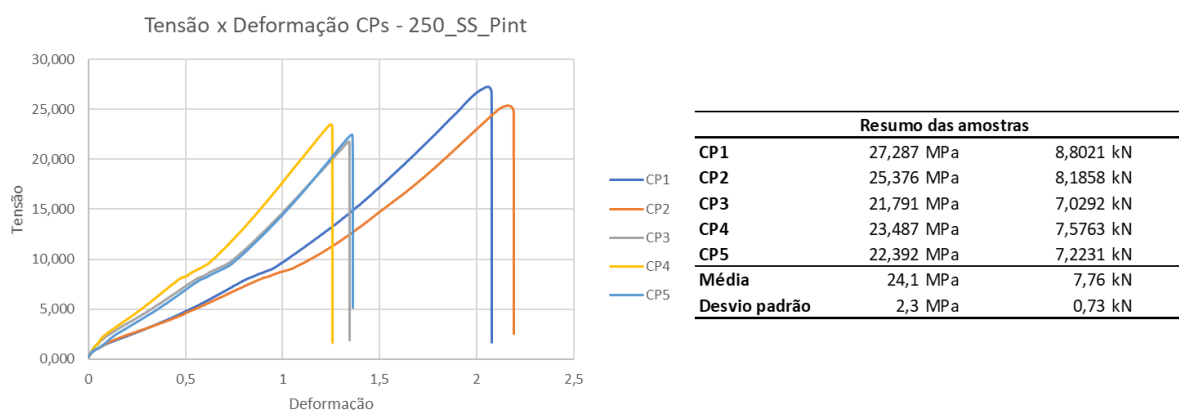
4.4.1 Resistência mecânica após ensaio de névoa salina

Cabe lembrar que os 40 corpos de prova designados para o ensaio de névoa salina foram igualmente subdivididos para os casos *e-coat* e *e-coat* + pintura líquida. Cada subgrupo foi então repartido em amostras contendo 5 corpos de prova, que viriam a ser testadas num dos seguintes tempos de exposição: 250, 500, 750 e 1000 horas.

4.4.1.1 Ensaio de névoa salina com exposição de 250 h

Os primeiros corpos de prova avaliados foram aqueles que receberam a camada protetiva de pintura e ficaram expostos a 250 h em ambiente de névoa salina. A Figura 45 mostra os resultados obtidos, os quais mostraram-se relativamente promissores. De forma geral, a resistência média foi de 24,1 MPa, com desvio padrão de 2,3 MPa. Em relação aos corpos de prova não submetidos ao envelhecimento, representados pela coluna *E-coat* + liq da Fig. 44, cujo valor médio é 26,2 MPa, houve uma queda de 8% na resistência mecânica.

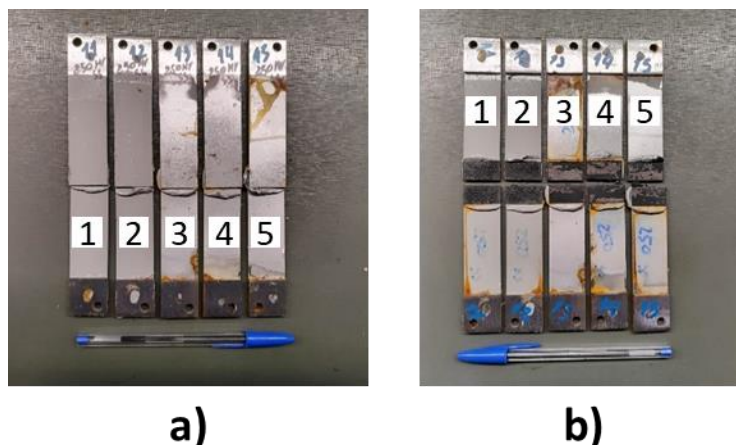
Figura 45 – Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina.



Fonte: O Autor.

Ao observar os modos de falha, os corpos de prova 1 e 2 da Figura 46, apresentaram falha coesiva, a qual propicia maiores valores de resistência mecânica. Já os corpos de prova 3, 4 e 5 apresentaram um modo de falha coesivo de camada fina.

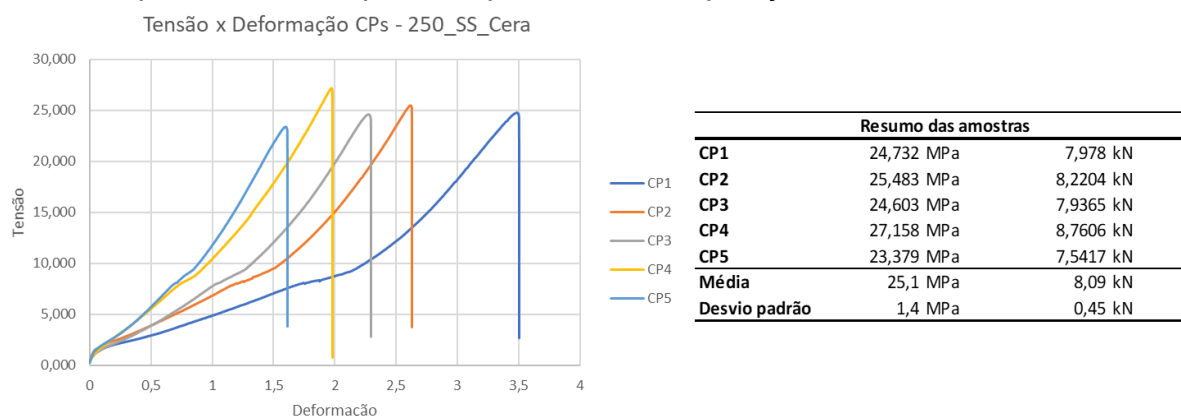
Figura 46 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

A Figura 47 mostra os resultados obtidos no caso da cura em estufa do processo e-coat. Observou-se melhor desempenho e menor dispersão em relação aos corpos de prova que passaram pelos processos completos de pintura. O corpo de prova de maior resistência atingiu 27 MPa, com a resistência média próxima a 25 MPa.

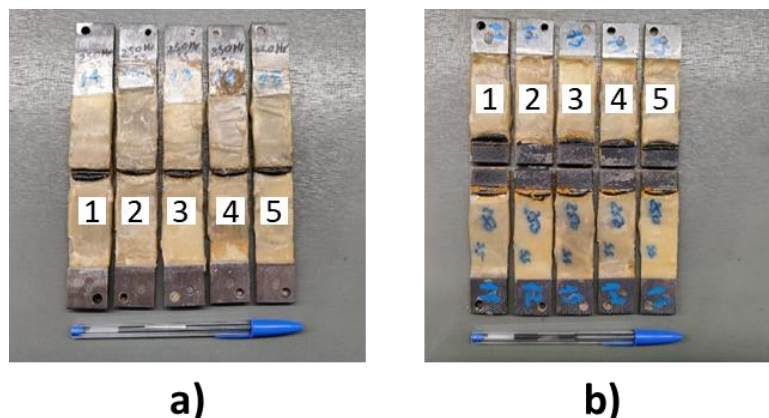
Figura 47 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina.



Fonte: O Autor.

Os modos de falha observados nestes corpos de prova, os quais são mostrados na figura 48, foram o coesivo e o coesivo de camada fina. O corpo de prova 1 apresentou um modo de falha puramente coesivo, para os demais o modo de falha encontrado foi coesivo, com regiões de coesivo de camada fina. Dentre os corpos de prova o que apresentou maior área de falha coesiva de camada fina (CP 4), propiciou resistência superior aos demais espécimes.

Figura 48 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) antes do ensaio de tração cisalhante, b) após o ensaio de tração cisalhante.

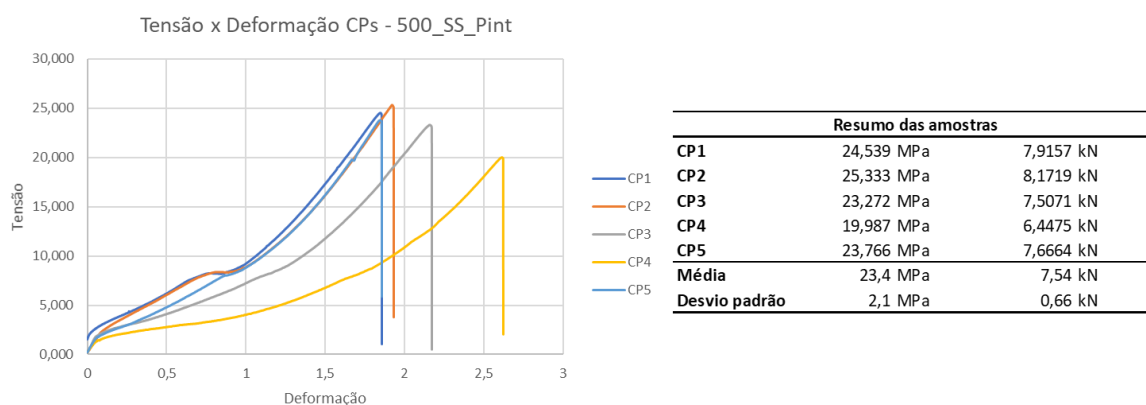


Fonte: O Autor.

4.4.1.2 Ensaio de névoa salina com exposição de 500h

Os corpos de prova submetidos aos processos completos de pintura e posteriormente expostos à névoa salina durante 500 h, apresentaram uma resistência média de 23 MPa. O corpo de prova 4 apresentou menor resistência em relação aos demais, contribuindo para a redução da média. O desvio padrão dos ensaios foi de 2,1 MPa. Os resultados são mostrados na Fig. 49.

Figura 49 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina.



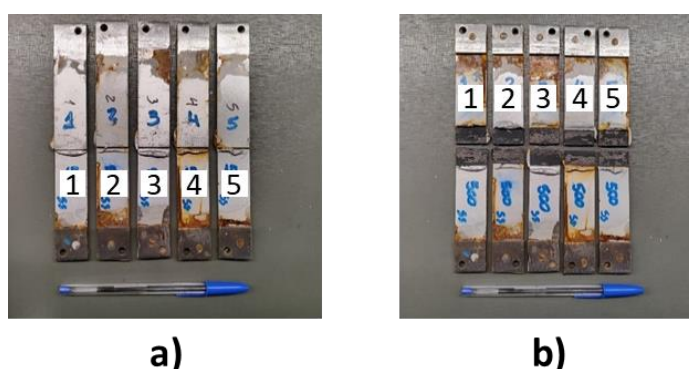
Fonte: O Autor.

A Figura 50 mostra imagens dos corpos de prova. Os modos compreenderam uma mistura de falha coesiva e coesiva de camada fina. A amostra 1 apresentou uma parte pontual de falha adesiva que pode ser decorrente do processo de fabricação, não

sendo o suficiente para influir expressivamente em sua resistência. No CP4, que apresentou resistência inferior em relação aos demais, foi observada uma falha coesiva de camada fina bastante disruptiva.

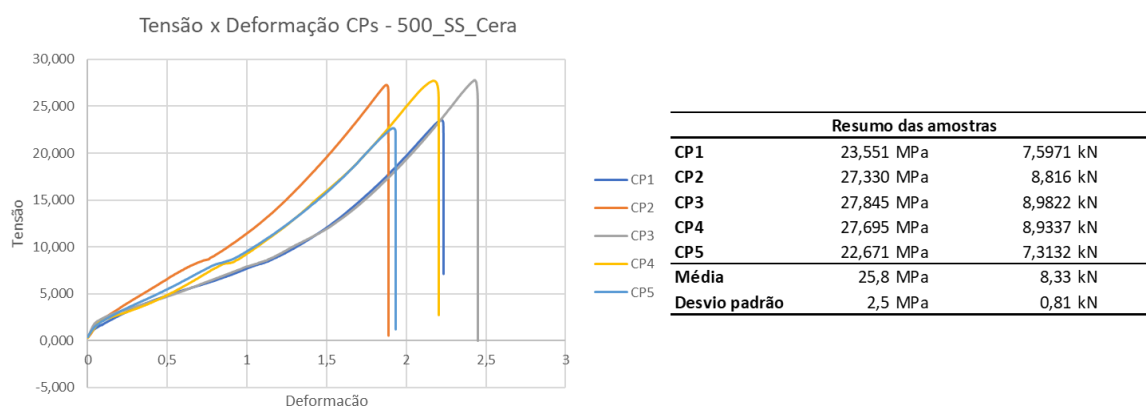
Os corpos de prova que não foram pintados apresentaram uma resistência média de 25,8 MPa. Os corpos de prova 1 e 5 demonstraram resistência significativamente inferior aos demais. O desvio padrão encontrado foi de 2,5 MPa (Figura 51).

Figura 50 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

Figura 51 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina.

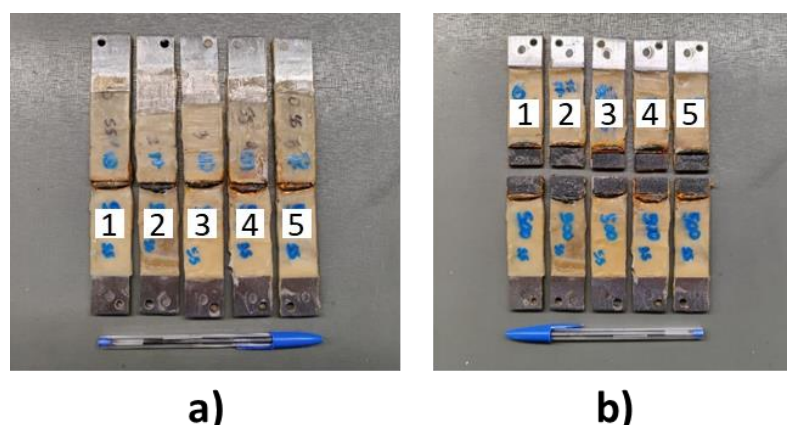


Fonte: O Autor.

A Figura 52 mostra imagens dos corpos de prova. Os modos de falha encontrados nestes corpos de prova também foram em sua maioria coesivo e coesivo de camada fina, exceto para o corpo de prova 3, que apresentou pequenos pontos de falha adesiva nas extremidades, fato que não afetou significativamente a resistência. Os corpos de

prova 1 e 5, que apresentaram os menores valores de resistência, apresentaram modo de falha coesivo com áreas de camada fina, mas sem maiores alterações.

Figura 52 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.

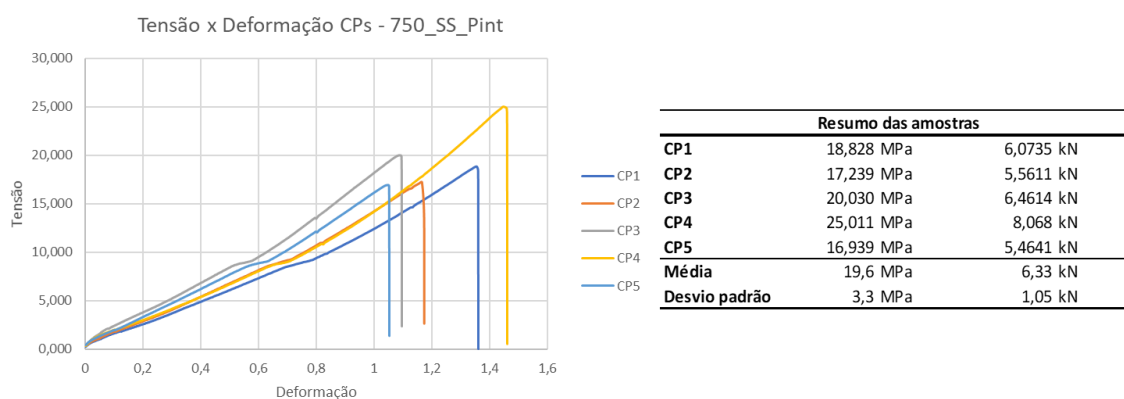


Fonte: O Autor.

4.4.1.3 Ensaio de Névoa Salina Com Exposição de 750 h

O terceiro tempo de exposição foi de 750h. No caso dos corpos de pintados, foi observado incremento significativo na dispersão de resultados em relação aos ensaios anteriores. A resistência média caiu para 19,6 MPa e os desvio padrão subiu para 3,3 MPa. Nesta amostra o corpo de prova 4 apresentou uma resistência superior, de cerca de 25 MPa, enquanto os corpos de prova 5 e 2 apresentaram uma resistência inferior, de 16,9 e 17,2 MPa, respectivamente. Os resultados podem ser observados na figura 53.

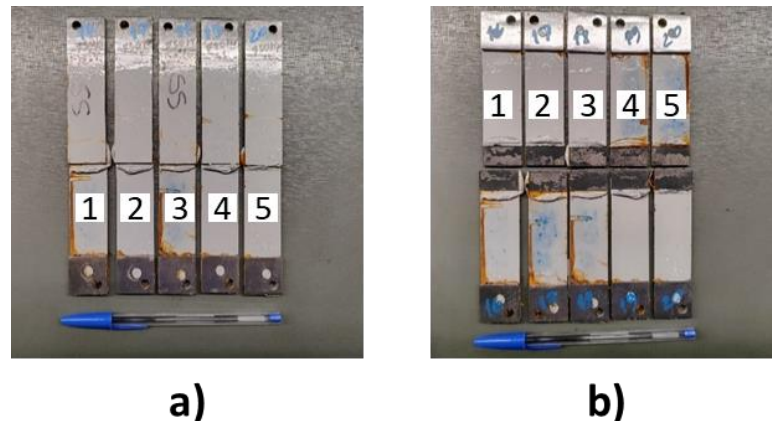
Figura 53 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina.



Fonte: O Autor.

Ao analisar os modos de falha, verificou-se que todos apresentaram falha coesiva de camada fina, sem diferenças significativas entre os espécimens. Os corpos de prova estão ilustrados na Figura 54.

Figura 54 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.

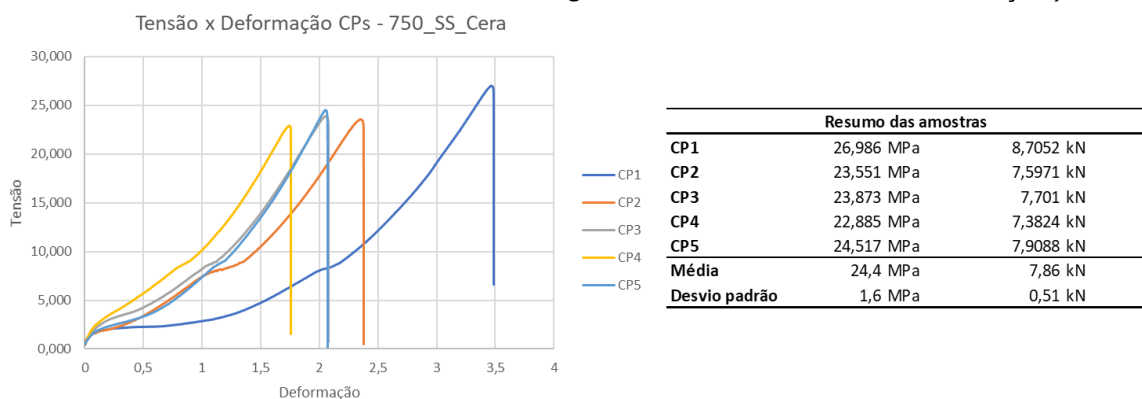


Fonte: O Autor.

Os corpos de prova que não foram submetidos à pintura apresentaram uma resistência média de 24,4 MPa, sendo que o corpo de prova 1 obteve resistência superior aos demais, alcançando 26,98 MPa. A dispersão dos resultados foi de 1,6 MPa. A figura 55 apresenta mais informações sobre o ensaio de tração dos corpos de prova. O deslocamento e deformação específica do corpo de prova 1 não pode ser considerado, uma vez que houve indício de escorregamento durante o teste de tração.

Figura 55 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina.

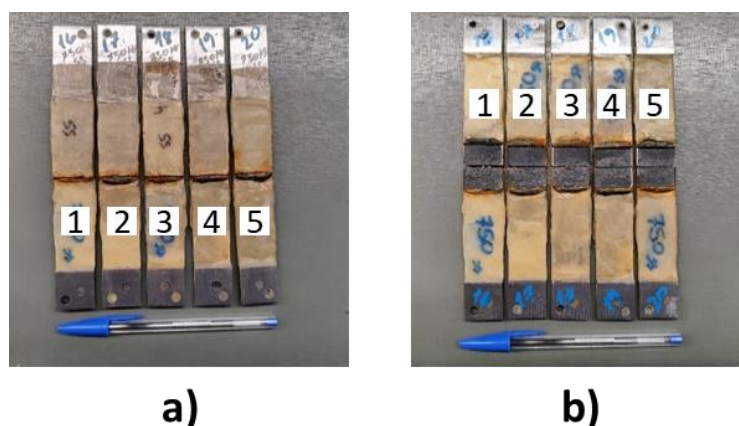
(Dados de deslocamento e deformação específica do CP5 devem ser desconsiderados devido ao escorregamento durante o teste de tração).



Fonte: O Autor.

Observou-se modo de falha misto, envolvendo falhas coesivas e coesivas de camada fina. No entanto, todos os corpos de prova apresentaram pequenas áreas de falha adesiva nas extremidades, o que pode representar início de degradação da interface entre substrato e adesivo. A Figura 56 mostra imagens dos corpos de prova.

Figura 56 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

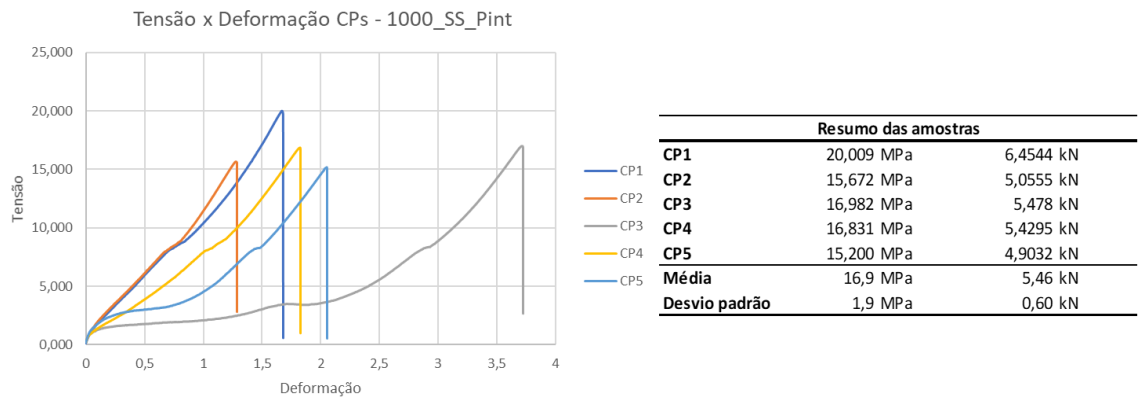
4.4.1.4 Ensaio de névoa salina com exposição de 1000h

Os corpos de prova pintados e com maior tempo de exposição apresentaram uma resistência média inferior em comparação às outras amostras. Os resultados são apresentados na Figura 57. Foi obtido um valor médio de 16,9 MPa, com uma dispersão de 1,9 MPa. O corpo de prova 1 obteve a maior resistência, alcançando 20 MPa, um valor significativamente superior aos dos outros corpos de prova. Os dados de deformação do CP3 não devem ser considerados, uma vez que foi evidenciado escorregamento do corpo de prova durante o ensaio de tração.

A Figura 58 mostra os corpos de prova da amostra. Constatou-se predominância da falha foi coesiva de camada fina, sem maiores discrepâncias entre as amostras.

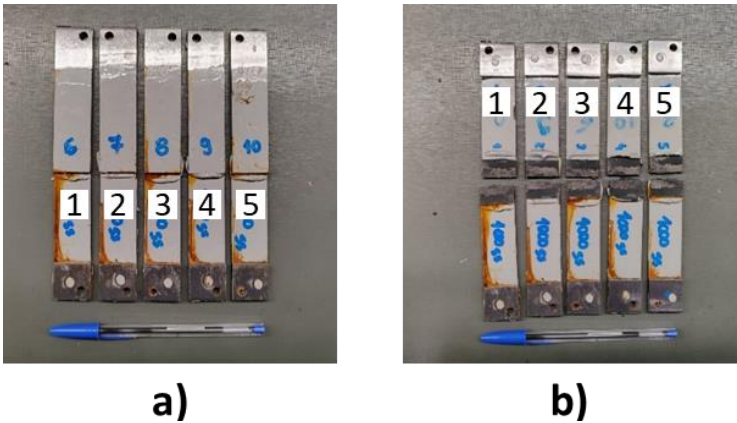
Por fim, os corpos de prova não pintados apresentaram uma resistência média de 22,1 MPa, com desvio padrão de 2,6 MPa. Como mostrado na Figura 59, o corpo de prova 4 se destacou por apresentar uma resistência superior em relação aos demais, alcançando cerca de 26,3 MPa. Este mesmo corpo de prova sofreu escorregamento durante o início do ensaio de tração cisalhante.

Figura 57 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina (Deve-se desconsiderar o resultado de deformação do CP3).



Fonte: O Autor.

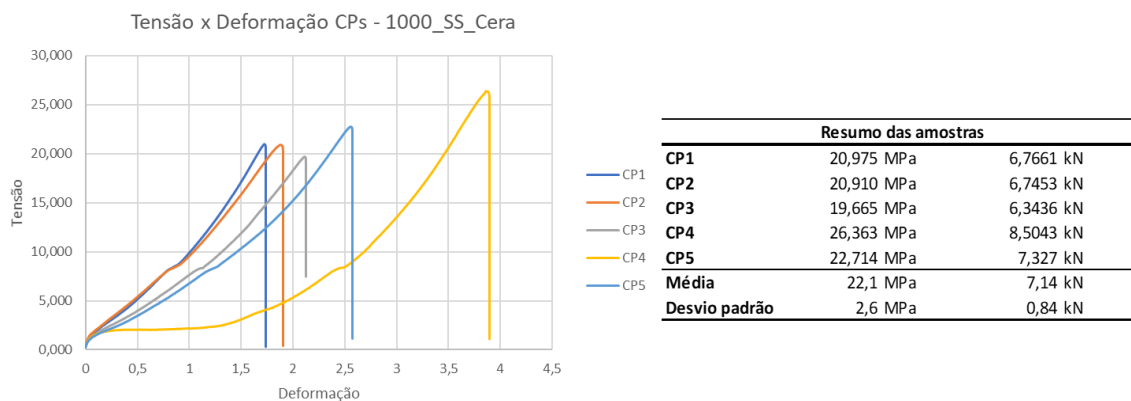
Figura 58 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

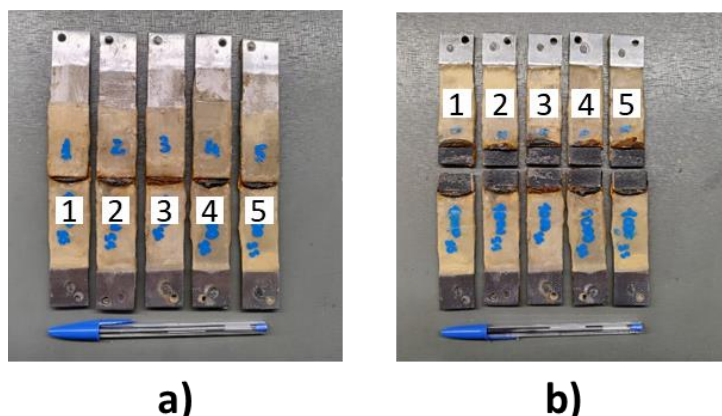
A Figura 60 mostra os corpos de prova deste grupo. Ao examinar os corpos de prova em macrografias, observou-se predominância da falha coesiva ou coesiva de camada fina. No entanto, nos corpos de prova 1, 4 e 5, a falha foi mista, com pequenas áreas nas extremidades onde ocorreu falha adesiva.

Figura 59 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina (Necessário desconsiderar valores de deformação do CP4).



Fonte: O Autor.

Figura 60 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de névoa salina: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

4.4.2 Resistência mecânica após ensaio de câmara de umidade saturada

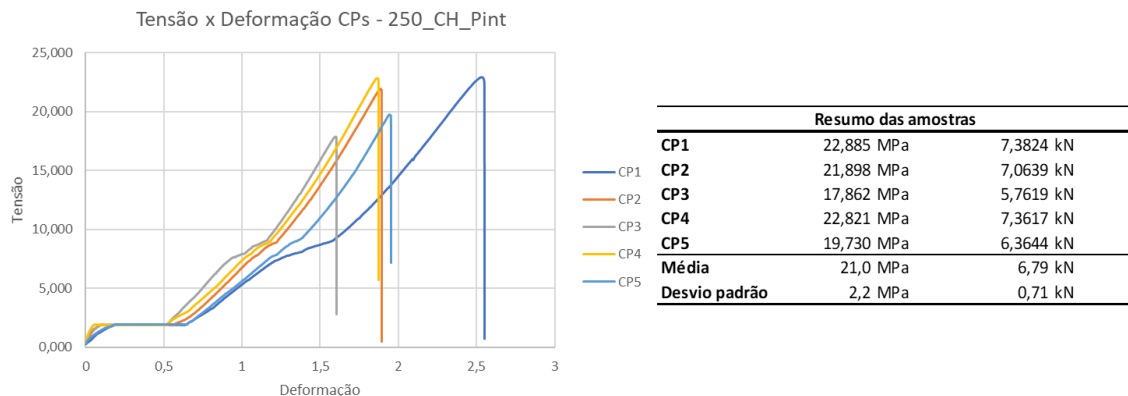
Os testes de câmara de umidade saturada foram realizados dentro do laboratório de tratamento de superfícies da empresa, conforme os parâmetros presentes nas normas e descritos em seções anteriores. Assim como nos testes de *salt spray*, foram empregados 40 corpos de prova, divididos entre os tempos de exposição de 250h, 500h, 750h e 100h, para cada uma das condições de cura.

4.4.2.1 Ensaio de câmara de umidade saturada com exposição de 250h

No caso dos corpos de prova pintados, a resistência média obtida foi de 6,79 kN (21 MPa), com um desvio padrão de 0,71 kN (2,2 MPa). O corpo de prova 3 foi o que apresentou menor resistência em relação aos demais, aproximadamente 5,76kN (17,86MPa). A Figura 61 detalha os resultados obtidos.

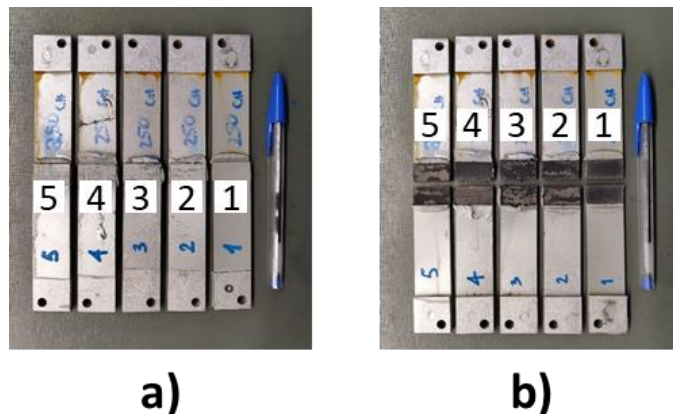
A análise de macrografia dos modos de falha revelou que apenas o corpo de prova 1 apresentou um modo de falha puramente coesivo. Os corpos de prova 2, 4 e 5 apresentaram modo de falha coesivo de camada fina, e o corpo de prova 3 apresentou algumas bolhas de ar na superfície de ruptura, o que pode justificar sua resistência menor em relação aos demais. A Figura 62 mostra os corpos de prova.

Figura 61 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

Figura 62 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 250h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.

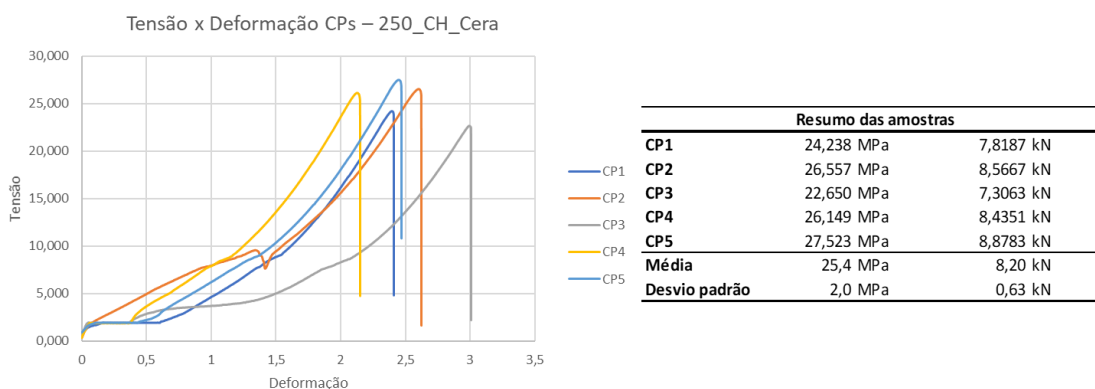


Fonte: O Autor.

No caso dos corpos de prova sem pintura, foi obtida uma resistência média de 25,4 MPa, com uma dispersão de 2MPa. A Figura 63 mostra os resultados. Nota-se que o corpo de prova 3 apresentou resistência inferior aos demais.

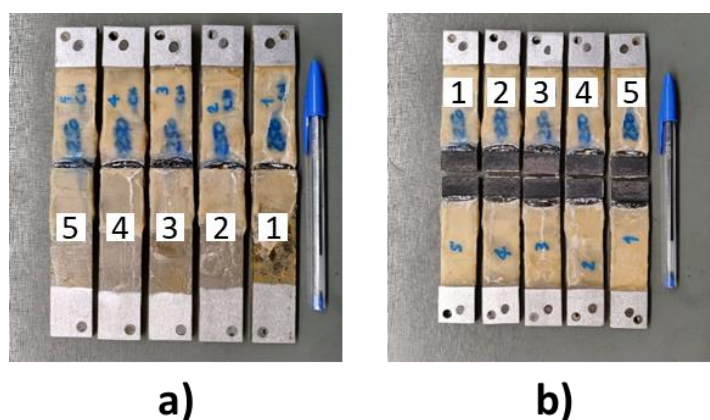
As macrografias realizadas mostraram que as falhas dos corpos de prova 4 e 5 foram predominantemente coesivas e os corpos de prova 1,2 e 3 apresentaram modo de falha coesivo de camada fina. O CP3 apresentou o maior percentual de falha coesiva de camada fina, o que pode estar relacionado com a sua resistência inferior. A figura 64 representa os corpos de prova.

Figura 63 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

Figura 64 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 250h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

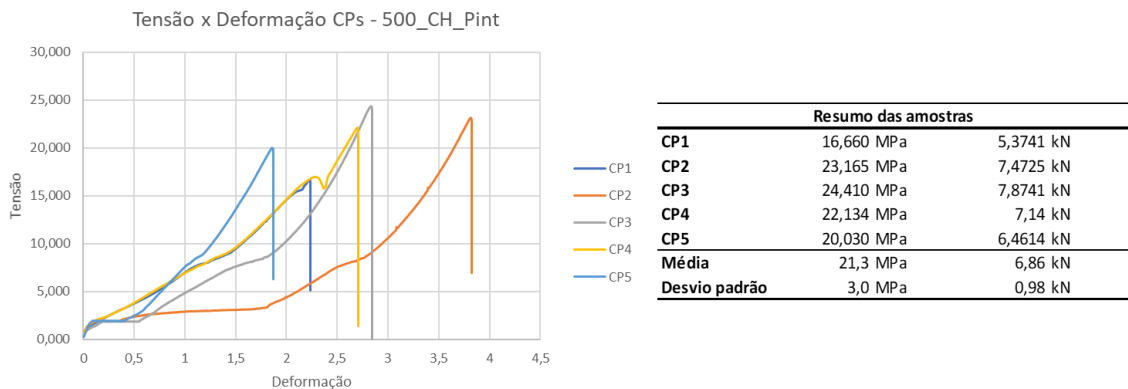
4.4.2.2 Ensaio de câmara de umidade saturada com exposição de 500h

Os corpos de prova pintados e submetidos a 500h de exposição apresentaram

uma resistência média de 21,3 MPa, com uma dispersão de 3MPa. Os resultados são apresentados na Figura 65. O CP1 foi o que apresentou menor resistência, cerca de 4,7 MPa abaixo da média dos demais corpos de prova. Os valores de tensão para o CP2 podem ser considerados, porém não sua deformação, uma vez que pode ter ocorrido escorregamento deste CP no teste de tração.

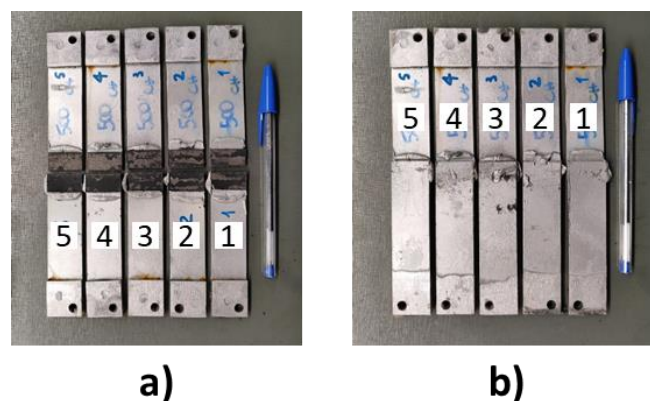
A análise das macrografias revelou que o modo de falha principal dos corpos de prova foi coesivo de camada fina. O corpo de prova 1, que apresentou a menor resistência, não apresenta peculiaridades em seu modo de falha, sendo coesivo de camada fina. Os corpos de prova 4 e 5 apresentaram a maior quantidade de camada fina, com maior quantidade de adesivo presente em apenas um dos lados do substrato. A Figura 66 mostra o conjunto de corpos de prova.

Figura 65 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada (Desconsiderar dados de deformação do CP2).



Fonte: O Autor.

Figura 66 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 500h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.

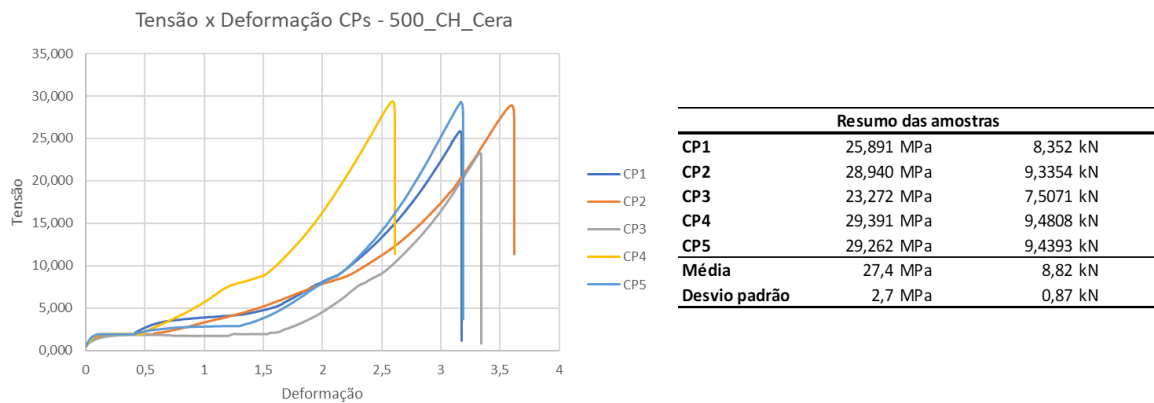


Fonte: O Autor.

Os corpos de prova sem pintura geraram uma média de resistência de 27 MPa, com um desvio padrão de 2,7 MPa. O corpo de prova 3 se destacou negativamente, apresentando 23,27 MPa de resistência. A Figura 67 apresenta os dados detalhados.

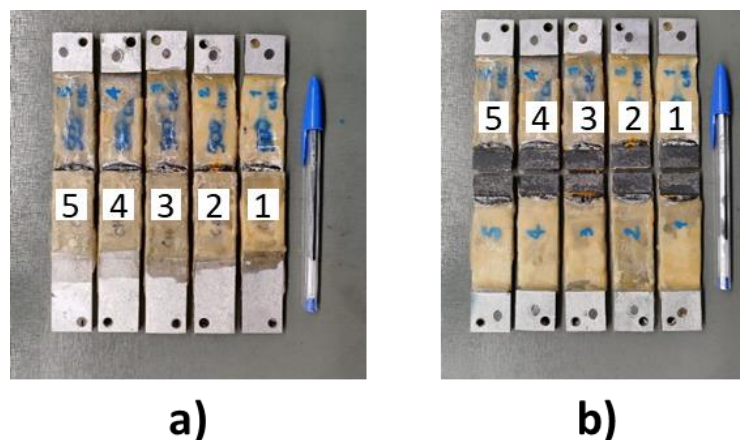
A Figura 68 mostra o conjunto de corpos de prova. A análise das macrografias revelou a predominância do modo de falha coesivo de camada fina. No CP3, que apresentou o menor valor de resistência, não foi observada diferença significativa em relação aos demais corpos de prova.

Figura 67 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

Figura 68 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 500h de exposição ao ensaio de câmara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



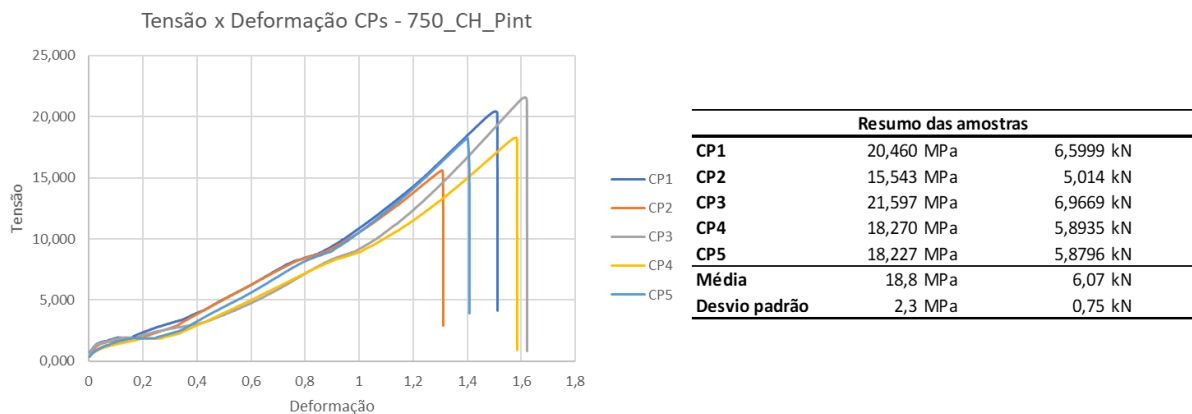
Fonte: O Autor.

4.4.2.3 Ensaio de Câmara de Umidade Saturada Com Exposição de 750h

Os corpos de prova expostos a 750 horas em câmara de umidade saturada apresentaram uma resistência média de 18,8 MPa, com uma dispersão de 2,3 MPa. Como mostrado na Figura 69, a diferença entre os corpos de prova de maior e de menor resistência mecânica foi de aproximadamente 6 MPa.

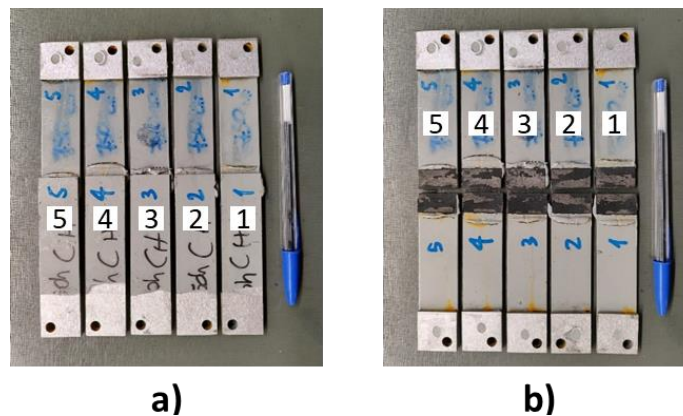
A análise de macrografia dos corpos de prova ensaiados, os quais são mostrados na Figura 70, revelou a falha coesiva de camada fina em toda a amostra.

Figura 69 - Ensaio de tração cisalhante (*lap-shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

Figura 70 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 750h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



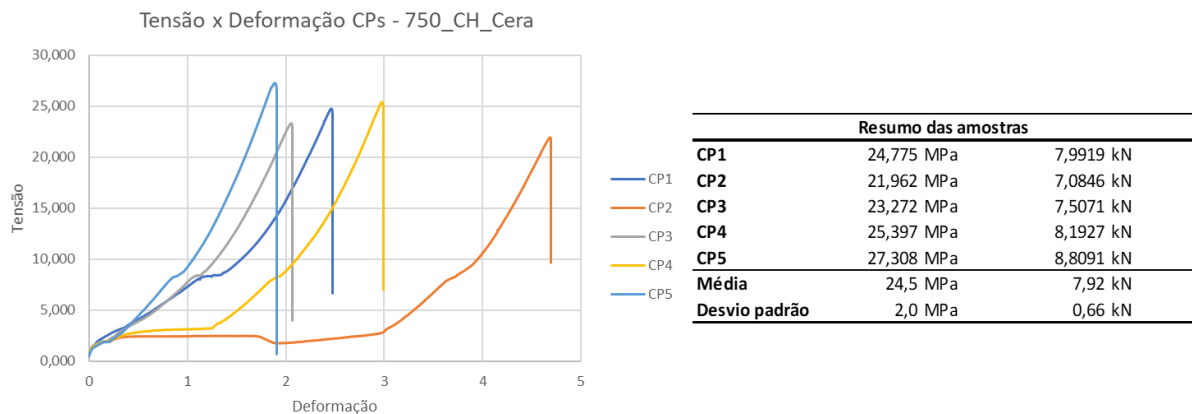
Fonte: O Autor.

Os corpos de prova sem pintura, cujos resultados são mostrados na Figura 71, apresentaram uma resistência média de 24,5 MPa, com um desvio padrão de 2 MPa.

O corpo de prova 2 registrou a menor resistência entre os avaliados, com um valor de 21,9 MPa. Este espécimen sofreu escorregamento durante o ensaio e, portanto, a informação de deformação deve ser desconsiderada no diagrama.

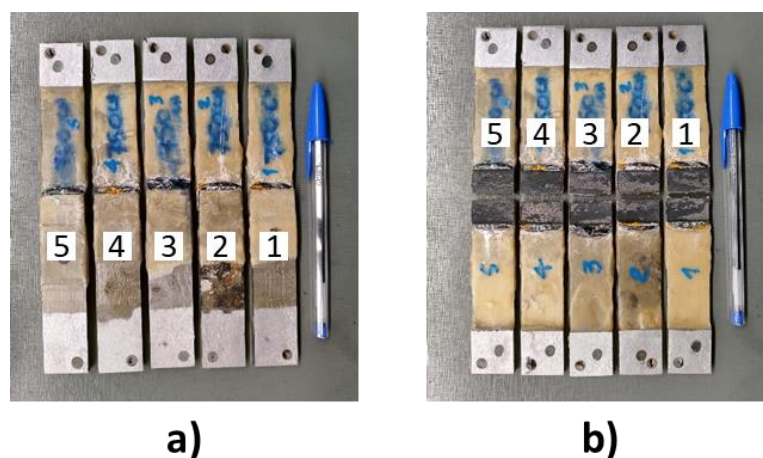
A análise macrográfica dos corpos de prova mostrou que os 5 corpos de prova apresentaram falha coesiva de camada fina, incluindo o corpo de prova 2 que apresentou a menor resistência. A Figura 72 apresenta os corpos de prova antes e depois do ensaio.

Figura 71 - Ensaio de tração cisalhante (*lap shear*) dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada (Desconsidera valores de deformação do CP2).



Fonte: O Autor.

Figura 72 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 750h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



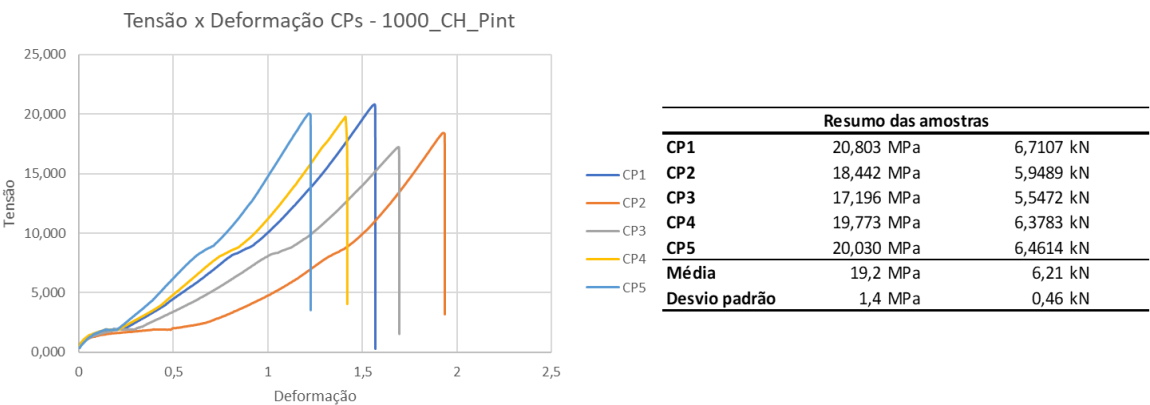
Fonte: O Autor.

4.4.2.4 Ensaio de Câmara de Umidade Saturada Com Exposição de 1000h

O último ciclo testado foi com 1000h de exposição em câmara de umidade saturada. A resistência média encontrada nos corpos de prova, foi de 19,2 MPa, com um desvio padrão de 1,4 MPa. Os dados são mostrados na Figura 73.

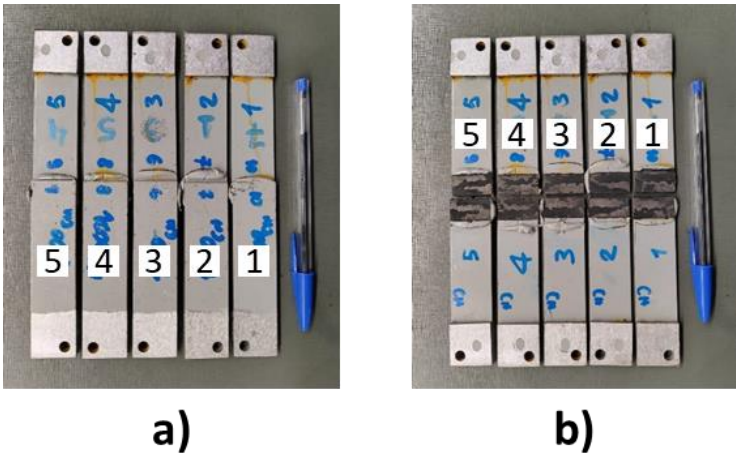
Toda a amostra apresentou falha coesiva de camada fina. A Figura 74 mostra os corpos de prova deste subgrupo.

Figura 73 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A com pintura após 1000h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

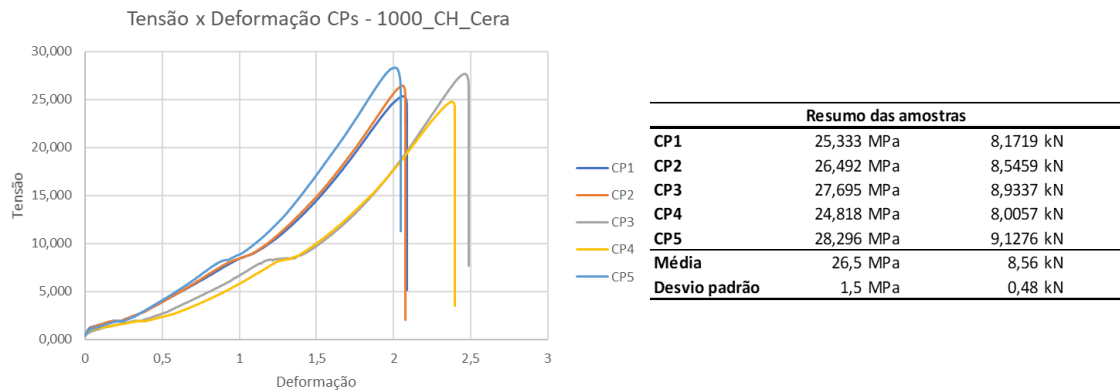
Figura 74 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



Fonte: O Autor.

Por fim, no caso dos corpos de prova sem pintura, foi obtida uma resistência média de 26,5 MPa, com uma dispersão de 1,5MPa. A Figura 75 mostra os dados.

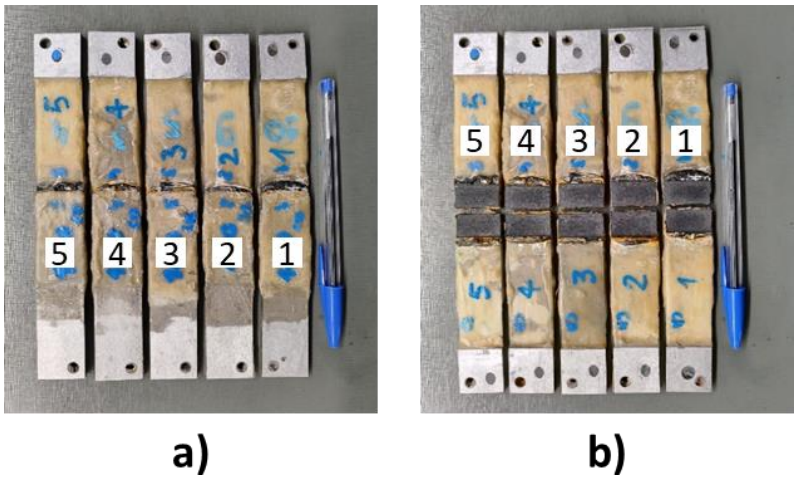
Figura 75 - Ensaio de tração cisalhante dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada.



Fonte: O Autor.

A avaliação dos modos de falha apresentou um modo de falha principalmente coesivo. A Figura 76 mostra os corpos de prova deste caso.

Figura 76 - Imagem dos corpos de prova do adesivo monocomponente A sem pintura após 1000h de exposição ao ensaio de camara de umidade saturada: a) Antes do ensaio de tração cisalhante, b) Após o ensaio de tração cisalhante.



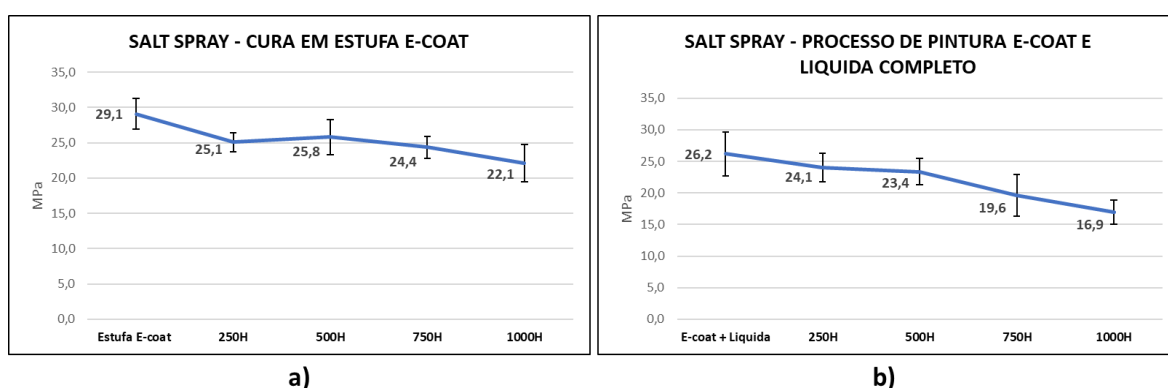
Fonte: O Autor.

4.4.3 Comparação de resultados obtidos nos testes de envelhecimento

A Figura 77 mostra diagramas que representam os resultados de resistência média e dispersão, em relação ao tempo de exposição, para o teste de *salt spray*. O decaimento de propriedades é evidente.

Comparando estes resultados com aqueles propiciados pelo grupo de controle, os corpos de prova apenas curados em estufa *e-coat* apresentaram uma redução de resistência de aproximadamente 24%, o que também foi acompanhado por aumento no desvio padrão. Já nos corpos de prova que passaram pelos processos completos de pintura, a redução de resistência foi ainda mais significativa, de aproximadamente 35%. Estes resultados contrariaram a expectativa inicial, segundo a qual a camada de tinta protegeria o adesivo contra o ambiente agressivo. Possivelmente a exposição aos solventes presentes nos processos de *e-coat* e pintura líquida, bem como a um novo ciclo de temperatura, tenham ocasionado a redução de resistência observada.

Figura 77 – Resultado de resistência e dispersão encontrados nos testes de tração cisalhante conforme o tempo de envelhecimento aplicado em ensaio de névoa salina.



Fonte: O Autor.

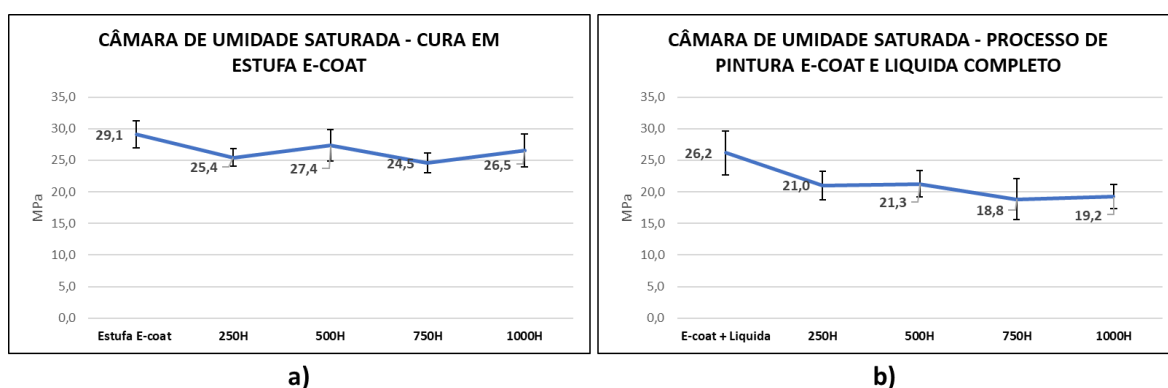
Uma análise de variância (ANOVA), com nível de confiança de 95%, evidenciou que o processo de envelhecimento foi significativo para a resistência dos espécimens.

No caso dos testes em câmara de umidade satura também foi evidenciada queda de resistência, porém num nível menor em relação aos experimentos em névoa salina, em ambos os tipos de corpos de prova. A Figura 78 mostra os diagramas que correspondem a este teste específico de envelhecimento acelerado.

É relevante observar que o menor valor médio de resistência foi obtido no caso de 750 horas de exposição, para ambas as condições de corpos de prova. Para este tempo de exposição a resistência encontrada foi de 24,5 MPa para os corpos de prova

curados em estufa e-coat, valor aproximadamente 15% inferior ao grupo não foi envelhecido. Nos corpos de prova pintados, a resistência caiu de 26,2 MPa, do grupo não envelhecido, para 18,8 MPa, no caso de 750 h de exposição, o que representa uma redução de aproximadamente 28% na resistência mecânica.

Figura 78 - Resultado de resistência e dispersão encontrados nos testes de tração cisalhante conforme o tempo de envelhecimento aplicado em ensaio de câmara úmida.

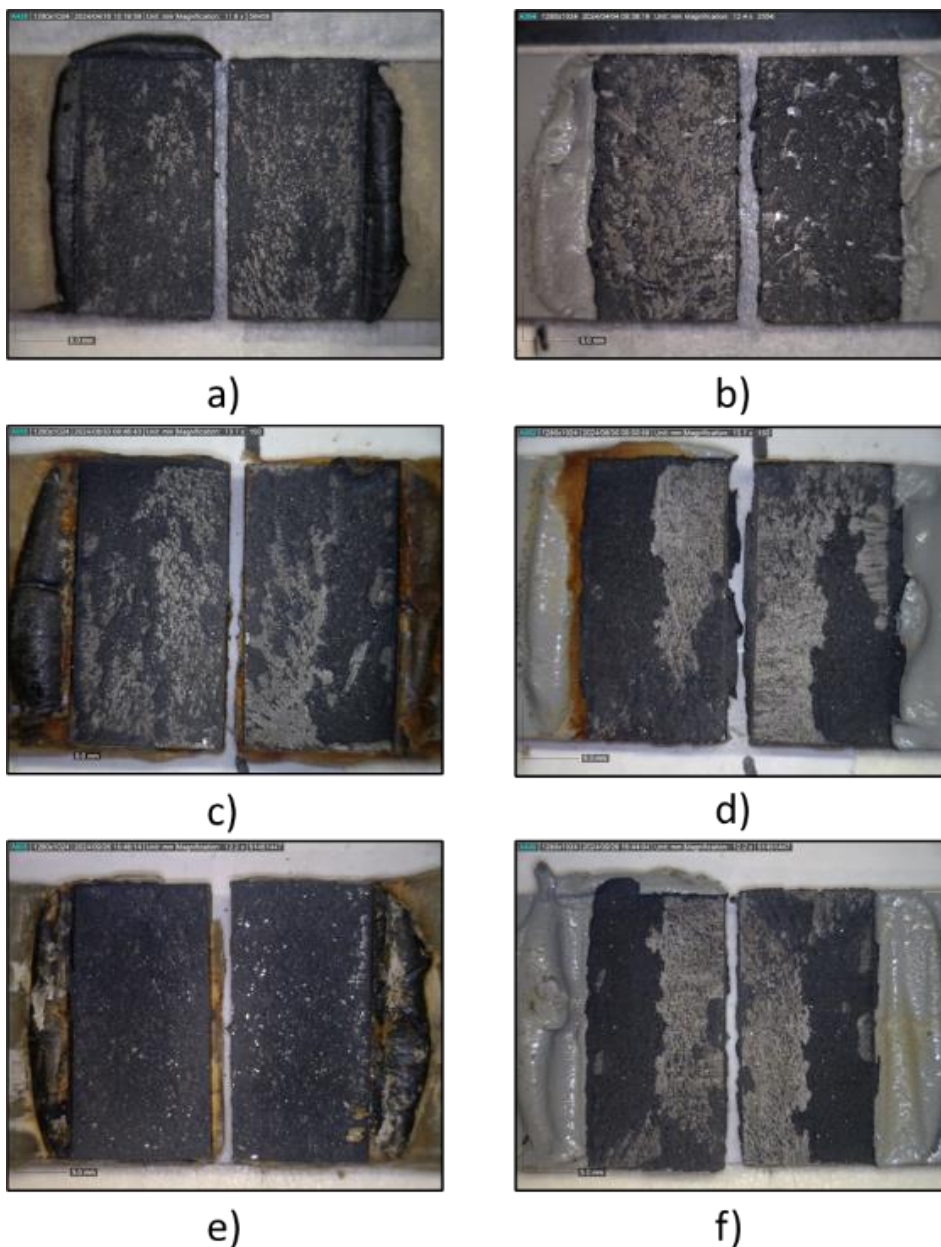


Fonte: O Autor.

Retornando à questão do efeito específico de cada um dos ensaios de envelhecimento aplicados, é interessante observar que, mesmo que os testes de umidade saturada tenham sido realizados em temperaturas mais elevadas (40°C) em relação à névoa salina (35°C), neste último caso a presença de cloreto de sódio teria tornado o ambiente mais agressivo, facilitando a corrosão do substrato.

Por fim, a figura 79 ilustra, de modo condensado, os modos de falha evidenciados nos corpos de prova de maior tempo de exposição, tanto nos grupos de controle como naqueles expostos a tempo elevado de envelhecimento. Como já reportado, em sua maioria as fraturas consistiram em falhas coesivas e falhas coesivas de camada fina. Em alguns corpos de prova raros, citados no texto e exemplificados no corpo de prova (b) da figura, algumas pequenas bolhas foram encontradas. Estas podem ser resultado da exposição ao processo de pintura, contração do adesivo ou em sua própria fabricação, fatores que precisam ser aprofundados em novos estudos.

Figura 79 – Espécimens com a menor resistência nos grupos de controle e após 1000h de envelhecimento. a) estufa e-coat (sem envelhecimento), b) pintura e-coat + líquida (sem envelhecimento), c) estufa e-coat submetido a 1000h de névoa salina, d) pintura e-coat + líquida submetido a 1000h de névoa salina, e) estufa e-coat submetido a 1000h de umidade saturada, f) Pintura e-coat + líquida submetido a 1000h de umidade saturada.



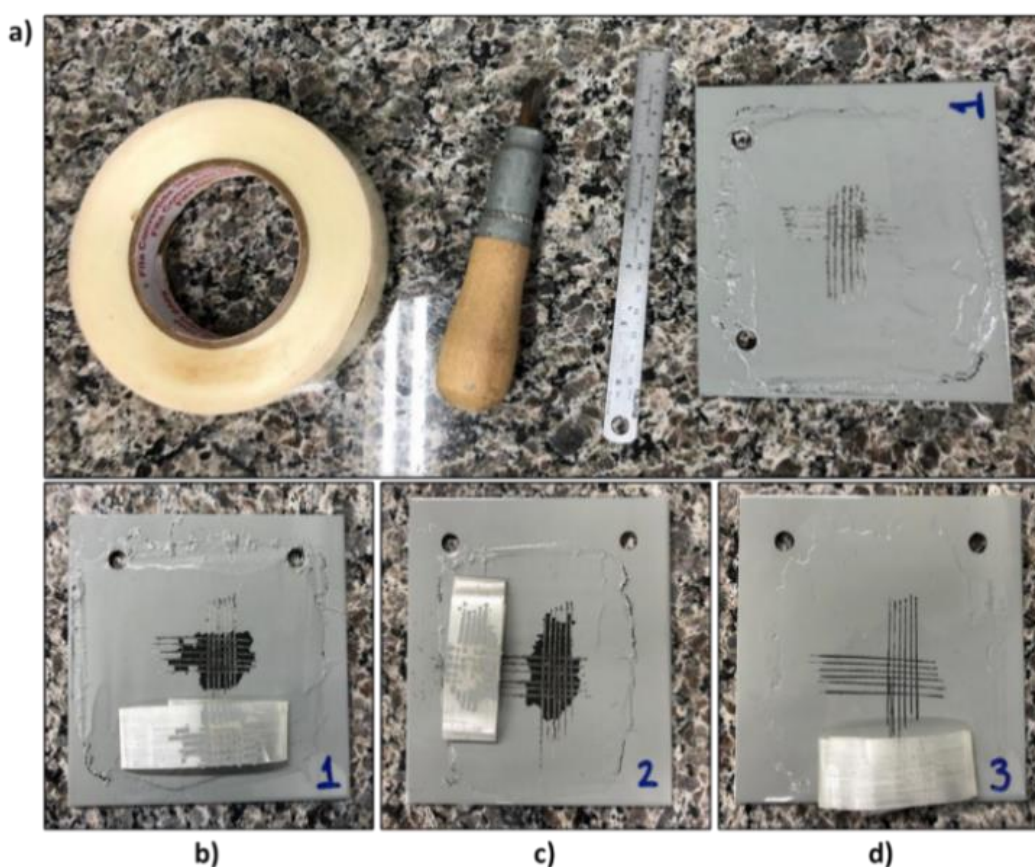
Fonte: O Autor.

4.5 Teste padrão para avaliação de aderência por fita

O teste de aderência da tinta foi realizado em três corpos de prova, seguindo a norma para substratos metálicos. As superfícies foram preparadas conforme os

requisitos do ensaio. Após o arrancamento da fita, observou-se que os corpos de prova que não foram lixados entre o processo de pintura *e-coat* e pintura líquida (imagens b e c da Figura 80) apresentaram baixa aderência da tinta líquida à superfície. Esses corpos de prova foram classificados como 0B no método de teste B (*cross-cut*) da norma ASTM (2023), devido à remoção de mais de 65% da tinta na região testada.

Figura 80 – Corpos de prova após realização do teste de aderência por fita. A) Ferramentas utilizadas, b) e c) corpos de prova não preparados, d) corpo de prova preparado por lixamento.



Fonte: O Autor.

Para o corpo de prova que foi lixado entre os processos de pintura *e-coat* e líquida, conforme a sequência de lixamento presente no tópico 3.8 deste trabalho, foi encontrada uma boa aderência da tinta ao adesivo depositado sobre a chapa metálica. Este resultado indica que a preparação da superfície foi muito relevante na adesão entre tinta e adesivo. O corpo de prova da Figura 80 (d) foi classificado 4B segundo a norma utilizada, uma vez que menos de 5% da tinta foi arrancada durante o teste realizado.

Estes resultados levantam uma preocupação quanto à efetividade da proteção

propiciada por uma cobertura orgânica em juntas adesivas. Cabe por fim salientar que o lixamento das juntas adesivas não é viável na maior parte das peças do setor da mobilidade.

4.6 Fabricação de um protótipo

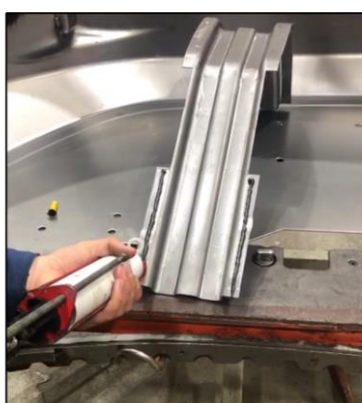
Como fase final da análise e com o objetivo de validar o trabalho realizado, um par de para-lamas agrícola foi fabricado utilizando juntas híbridas. Neste sistema o adesivo estrutural foi utilizado para realizar a união dos componentes, empregando-se também alguns pontos de solda, estrategicamente posicionados para conferir rigidez à peça durante sua movimentação no processo de pintura, onde ocorreria a cura. O adesivo utilizado foi o monocomponente A. As principais etapas de união do protótipo são apresentadas na figura 81.

Após a união de todos os componentes, os para-lamas foram pendurados no sistema de pintura, como mostrado na Figura 82, e passaram pelo processo completo de pintura por eletrodeposição em condição normal de operação. Nenhum incidente foi constatado ao longo do processo produtivo.

Figura 81 – Fabricação do para-lamas substituindo solda ponto e MAG por adesivo estrutural. a) Aplicação do adesivo no suporte da sinaleira, b) aplicação do adesivo no reforço do para-lama e c) solda ponto por projeção para manter estrutura do para-lama durante a pintura.



a)



b)



c)

Fonte: O Autor.

Figura 82 – Para-lamas após fabricação com adesivo estrutural carregados no sistema de pintura. A) Par de para-lamas carregados nos carros do sistema de pintura e-coat por eletrodeposição e b) Para-lama após o processo de pintura por eletrodeposição.



a)



b)

Fonte: O Autor.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal investigar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de adesivos estruturais como método de união em substituição às técnicas convencionais amplamente utilizadas em processos produtivos, como a solda por arco elétrico e por resistência. Inicialmente, foram avaliados dois tipos de adesivos estruturais, com enfoque no impacto do processo de pintura sobre a resistência mecânica das juntas adesivas formadas. Posteriormente, o comportamento das juntas foi analisado em condições de exposição a ambientes úmidos e corrosivos, por meio da aplicação de testes acelerados de degradação, a fim de determinar sua durabilidade e confiabilidade em cenários adversos. Adicionalmente, foi desenvolvido um protótipo de juntas híbridas, fabricado utilizando os mesmos meios de produção aplicados às peças convencionais. Esse protótipo permitiu não apenas a avaliação prática da viabilidade técnica do uso de adesivos estruturais em processos industriais, mas também a análise de sua viabilidade econômica. Os resultados obtidos forneceram subsídios relevantes para a tomada de decisão do setor de pesquisa, desenvolvimento e inovação da empresa, apontando para o potencial de adesivos estruturais como alternativa competitiva e sustentável às técnicas tradicionais de união.

O estudo do impacto do processo de pintura sobre os adesivos estruturais epóxi mostrou que a cura destes adesivos em ambiente industrial, considerado admissível pelo fabricante, pode afetar a resistência média e a dispersão de resultados das juntas. Portanto a avaliação destes impactos precisa ser aprofundada, antes da substituição direta da solda por adesivos. Nos testes realizados, o adesivo monocomponente A apresentou resultados superiores em relação ao adesivo bicomponente B, tanto no que concerne à conservação da resistência após exposição a processo de pintura, como ao custo de aquisição. O uso de uma matriz decisória foi fundamental para estabelecer as características almejadas num adesivo estrutural, propiciando também uma visualização organizada do conjunto de resultados obtidos até então.

Cabe aqui salientar que os processos de pintura, nos quais os adesivos foram testados, não podem sofrer alteração, pois estão otimizados segundo as metas almejadas na pintura em si. Portanto outras formulações de adesivos devem ser testadas, para que sejam obtidas juntas que suportem os regimes de temperatura evidenciados.

Os testes acelerados em laboratório com exposição a umidade e temperatura indicaram que ambas as condições utilizadas de envelhecimento (névoa salina e câmara de umidade saturada) propiciaram decaimento na resistência dos corpos de

prova. A queda de resistência foi mais acentuada nos testes de névoa salina, nos quais a redução de resistência, em relação aos corpos de prova não envelhecidos, foi de 24% nas amostras curadas em estufa do processo *e-coat*, e 35% nos corpos de prova pintados em processo *e-coat* com posterior pintura líquida. Já para os corpos de prova expostos a ensaio de névoa salina foi evidenciada uma redução de aproximadamente 15% sob os espécimes não envelhecidos, para as amostras curadas em estufa *e-coat* e 28% para os corpos de prova expostos ao processo de pintura completo.

Contrário ao que se esperava, os corpos de prova revestidos por uma camada de pintura líquida se revelaram mais suscetíveis à degradação do que os corpos de prova que não foram protegidos. Este fator pode estar associado à baixa adesão da tinta sobre o adesivo não preparado, o que foi evidenciado nos testes de arrancamento realizados. Possivelmente a exposição dos corpos de prova aos banhos compreendidos nos processos de pintura, bem como a aplicação de dois regimes de temperatura, respectivamente nas estufas *e-coat* e de pintura líquida, tenham sido responsáveis por tal decaimento de propriedades. Estes resultados indicam a necessidade de compreensão do efeito dos produtos químicos presentes na pintura, efeitos esses que se sobrepõem à temperatura e ao processo de envelhecimento. Foram conduzidas análises iniciais para avaliar a degradação térmica de amostras compostas exclusivamente pelo adesivo, porém os resultados obtidos não foram conclusivos.

Como fechamento do estudo, o êxito na fabricação de um protótipo de juntas híbridas, sem a alteração dos processos produtivos, mostra que existe viabilidade do uso de adesivos estruturais dentro da indústria metalmecânica, embora seja essencial um aprofundamento do estudo dos efeitos dos processos produtivos sobre as juntas. Tais estudos também devem ter por foco a elaboração de modelos que permitam estimar, de forma robusta e eficaz, o comportamento mecânico de protótipos a partir de testes de laboratório relativamente simples, sobre corpos de prova de geometria padrão.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Aprofundar o entendimento dos efeitos dos banhos de pré-tratamento da pintura *e-coat* sobre o adesivo estrutural.
2. Avaliar a causa dos vazios observados na camada adesiva de alguns corpos de prova. Tal análise teria por meta identificar em que etapa de fabricação esses vazios são gerados, e como poderiam ser evitados ou mitigados.
3. Testar a resistência a carregamentos dinâmicos, ou seja, efetuar testes de fadiga.
4. Realizar testes de laboratório e em campo sobre peças-protótipo, fabricadas com juntas adesivas e híbridas, buscando comparar seus resultados com as estimativas obtidas a partir de modelos baseados em testes simples, sobre corpos de prova padrão.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 1654 – 08**: Standard Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments. West Conshohocken: Astm International, 2008. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3359 - 23**: Standard Test Methods for Rating Adhesion by Tape Test. West Conshohocken: Astm International, 2023. 9 p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **D1002 - 10 (REAPPROVED 2019)**: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specime. West Conshohocken: Astm International, 2019. 6 p.

ASHCROFT, Ian A.; COMYN, John; MUBASHAR, Aamir. Effect of Water and Mechanical Stress on Durability. In: SILVA, Lucas F. M. da; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D. (ed.). **Handbook of Adhesion Technology**. 2. ed. Cham: Springer, 2018. Cap. 31. p. 880-914

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8092**: Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à atmosfera úmida saturada - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015. 3 p.

BANEA, M D; SILVA, L F M da. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications**. [S. L.], p. 1-18. 2009.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. São Paulo: Amgh, 2011. 1088 p.

COSTA, M. *et al.* Environmental effect on the fatigue degradation of adhesive joints: a review. **The Journal Of Adhesion**. [S. L.], p. 127-143. abr. 2016.

DAVIS, R. E.; FAY, P. A.. The durability of bonded coated steel joints. **International Journal Of Adhesion And Adhesives**. [S. L.], p. 97-104. abr. 1993.

DILGER, Klaus. Automobiles. In: ADAMS, Robert D. (ed.). **Adhesive Bonding**: science, technology, and applications second. 2. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2021. Cap. 19. p. 605-633.

FAY, P. A.; MADDISON, A.. Durability of adhesively bonded steel under salt spray and hydrothermal stress conditions. **International Journal Of Adhesion And**

Adhesives. [S. L.], p. 179-186. jul. 1990.

HALLIDAY, S. T.; BANKS, W M; A PETHRICK, R. Dielectric studies of ageing in aluminium epoxy adhesively bonded structures: design implications. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.** [S. L.], p. 103-119. abr. 1999.

HER, Shih-Chuan. Stress analysis of adhesively-bonded lap joints. **Composite Structures.** [S. L.], p. 673-678. 1999.

HILDEBRAND, Martin; ADAMS, Robert D.. Vibration damping. In: ADAMS, Robert D. (ed.). **Adhesive Bonding: science, technology, and applications.** 2. ed. [S. L.]: Woodhead Publishing, 2021. Cap. 12. p. 367-384.

HOUJOU, K. *et al.* Effect of test temperature on the shear and fatigue strengths of epoxy adhesive joints. **The Journal Of Adhesion.** [S. L.], p. 2599-2617. set. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6270 - 2:** Paints and varnishes — Determination of resistance to humidity - Part 2: Procedure for exposing test specimens in condensation-water atmospheres. Geneva: [S.N.], 2005. 6 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9227:** Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests. 4 ed. Geneva: [S.N.], 2017. 18 p.

LI, W. D. *et al.* Strength Prediction of Adhesively Bonded Single Lap Joints Under Salt Spray Environment Using a Cohesive Zone Model. **The Journal Of Adhesion.** [S. L.], p. 916-937. maio 2016.

MARQUES, E. A. S. *et al.* Adhesive Joints for Low- and High- Temperature Use: an overview. **The Journal Of Adhesion.** S.L., p. 556-585. 2014.

MARQUES, Eduardo A. S.; CARBAS, Ricardo J. C.; TENREIRO, A. Francisco G.; SILVA, Lucas F. M. da. **INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS.** Porto: Quântica Editora, 2021. 133 p.

MECHUT, G.; HAHN, O.; TEUTENBERG, D.. Influence of the curing process on joint strength of a toughened heat-curing adhesive. **Welding In The World.** [S. L.], p. 209-216. out. 2014.

PACKHAM, David E.. Theories of Fundamental Adhesion. In: SILVA, Lucas F. M. da; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D. (ed.). **Handbook of Adhesion Technology.** 2. ed. Cham: Springer, 2018. Cap. 2. p. 11-41.

PETHRICK, Richard A .. Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding: a review. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials: Design and Applications**. [S. L.], p. 349-379. 2015.

PETRIE, Edward M.. **Handbook of Adhesives and Sealants**. New York: McGraw-Hill, 2000. 867 p.

QIAN, Z.; AKISANYA, A. R.. AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FAILURE INITIATION IN BONDED JOINTS. **Acta Materialia**. [S. L.], p. 4895-4904. maio 1998.

SILVA, Lucas F.M. da *et al.* Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength. **The Journal Of Adhesion**. [S. L.], p. 1091-1115. jul. 2006.

SILVA, Lucas F. M. da; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D.. Introduction to Adhesive Bonding Technology. In: SILVA, Lucas F. M. da; ÖCHSNER, Andreas; ADAMS, Robert D. (ed.). **Handbook of Adhesion Technology**. 2. ed. Cham: Springer, 2018. Cap. 1.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS INTERNATIONAL. **SAE J403**: Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. Warrendale: [S.N.], 2001. 9 p.

VAN STRAALLEN, Ij.J. *et al.* Structural adhesive bonded joints in engineering: drafting design rules. **International Journal Of Adhesion & Adhesives**. [S. L.], p. 41-49. 1998.

VIANA, G. *et al.* Behaviour of environmentally degraded epoxy adhesives as a function of temperature. **The Journal Of Adhesion**. [S. L.], p. 95-112. ago. 2016.

WEI, Yang *et al.* Adhesively bonded joints: a review on design, manufacturing, experiments, modeling and challenges. **Composites Part B: Engineering**. [S. L.], p. 1-51. maio 2024.