

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**Pedro Henrique Almeida**

**Efeito do Tratamento Superficial em Ligações de Aço e  
Concreto com Adesivo Epóxi**

Belo Horizonte

2016

# **Efeito do Tratamento Superficial em Ligações de Aço e Concreto com Adesivo Epóxi**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr.

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

**Belo Horizonte**

**2016**

A447e

Almeida, Pedro Henrique.

Efeito do tratamento superficial em ligações de aço e concreto com adesivo epóxi [manuscrito] / Pedro Henrique Almeida. – 2016. xiii, 92 f., enc.: il.

Orientador: Carlos Alberto Cimini Jr.

Coorientador: Rodrigo Barreto Caldas.

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

Anexos: f. 87-92.

Bibliografia: f. 82-86.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Concreto - Estruturas - Teses. 3. Aço - Estruturas - Teses. 4. Superfícies - Preparação - Teses. 5. Adesivos - Teses. I. Cimini Júnior, Carlos Alberto. II. Caldas, Rodrigo Barreto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

## **Efeito do Tratamento Superficial em Ligações de Aço e Concreto com Adesivo Epóxi**

**Pedro Henrique Almeida**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão avaliadora:

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Cimini Jr.  
DEES-UFMG –(Orientador)

---

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas  
DEES-UFMG –(Coorientador)

---

Prof. Dr. Hermes Carvalho  
DEES-UFMG

---

Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro  
Departamento de Engenharia Mecânica-UFMG

Belo Horizonte, 02 de setembro de 2016

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, mas em especial:

Aos professores Carlos Alberto Cimini Jr. e Rodrigo Barreto Caldas, pela grandiosa orientação e pelo incentivo constante.

Aos professores, técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia de Estruturas pelos ensinamentos e pela dedicação.

À família, pelo amor e por estarem presentes em todos os grandes momentos de minha vida.

A Bruna por caminhar do meu lado em todos os momentos.

Aos amigos pelo apoio em todos os momentos difíceis desta caminhada.

Aos “amigos do mestrado”, em especial: Juliano, Edcarlos, Leandro, Danilo, Thiago, Raphael, Lucas e Guilherme.

# EPÍGRAFE

“Spes non Confundit (Rm, 5,5).”

## RESUMO

Este trabalho refere-se a um estudo realizado para avaliar o efeito do tratamento superficial em ligações de aço e concreto utilizando um adesivo estrutural epóxi, sob cisalhamento. Esse adesivo pode ser empregado em juntas de aço-epóxi-aço e concreto-epóxi-aço, sendo utilizado, em diversos tipos de indústrias, para substituir (ou auxiliar) alguns métodos convencionais de união (rebitagem, soldagem e/ou parafusagem) e para reforços em estruturas de concreto. Entretanto, o sucesso da adesão depende não apenas do preparo da superfície dos substratos (aderente), mas também do controle do processo de colagem (adesivo). Para determinar os efeitos da preparação da superfície, corpos de prova com juntas aço-epóxi-aço e concreto-epóxi-aço foram ensaiados com superfícies sem tratamento e com tratamento mínimo (limpeza e abrasão), representando as condições reais de realização do processo de colagem em ambiente não controlado. Os resultados foram apresentados comparativamente. Em seguida, um modelo analítico foi utilizado para avaliar as tensões desenvolvidas na camada adesiva. Além disso, a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para caracterizar o adesivo epóxi e sua interação com os substratos. Também, uma análise dinâmico mecânica (DMA) foi empregada para calcular a temperatura de transição vítrea do adesivo determinando assim sua estabilidade térmica. Concluiu-se, a partir dos resultados e análises dos ensaios, que o tratamento de superfície empregado é adequado para adesão de ambas as juntas.

*Palavras-chave: Adesivo Estrutural Epóxi. Estudo Experimental Mecânico. Tratamento de Superfície. Caracterização do Adesivo Epóxi. Reforço de Estruturas de Concreto. Reforço de Estruturas de Aço.*

## ABSTRACT

This work refers to a research study aimed at evaluating the effect of superficial treatment in steel-concrete connection using of structural epoxy adhesive under shear stresses. This adhesive may be employed in structural joints conformed as steel-epoxy-steel and concrete-epoxy-steel. In diverse industries it is a substitute, as well as, an auxiliary measure to some conventional methods for bonding structural elements, such as riveting, soldering and/or bolting. Epoxy structural adhesive may also be used in concrete structures. However, successful adhesion depends on the adequate preparation of substrates (also referred to as adherends), as it also depends on controlling the conditions for the curing process in the adhesive. In order to determine the impact of surface treatment, test bodies of joints in steel-epoxy-steel and concrete-epoxy-steel were assembled with surfaces whose preparation varied from no treatment at all, to minimal treatment (cleaning and abrasion). This was meant to somewhat represent real conditions for the gluing process in a non-controlled environment. Results are presented comparatively. Following up, an analytical model was used to evaluate the stresses in the adhesive layer. Furthermore, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) was leveraged to characterize the epoxy adhesive and its interaction with substrates. Also, a Dynamic Mechanical Analysis (DMA) was employed in order to calculate the vitreous temperature transition for the adhesive, therefore assessing its thermal stability. We conclude that several results and analyses point that superficial treatment is adequate to the adhesion structural function proposed.

*Key words: Epoxy Structural Adhesives. Mechanical Experimental Study. Surface treatment. Characterization of Epoxy Adhesive. Concrete Structure Reinforcement. Steel Structure Reinforcement.*



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Algumas juntas comuns em engenharia (ADAMS e WAKE, 1986).....	2
Figura 1-2. Juntas preparadas para suportar o mesmo carregamento: (a) junta colada (b) e (c) junta parafusada (d) junta pregada. (ADAMS e WAKE, 1986).....	3
Figura 1-3. Componente porta e seções transversais evidenciando a grafagem e o adesivo aplicado (HOEHNE, 2013).....	4
Figura 1-4. Estruturas “soldadas a frio” e tanque sendo assentado ao novo local (da SILVA, A., 2007).....	4
Figura 2-1. Demanda de adesivos em diferentes tipos de indústria (FERREIRA, 2010). ....	9
Figura 2-2. Nomenclatura segundo ASTM D907 (2012). Adaptado de (MENDES, 2005). ...	10
Figura 2-3. Conexão proposta utilizando adesivo. Adaptado de (VERMA, 2011).....	11
Figura 2-4. Vedação utilizando silicone (dos SANTOS, 2007). ....	12
Figura 2-5. Teoria da adsorção física em esquema (da SILVA et al., 2007). ....	14
Figura 2-6. Teoria da adsorção química em esquema (da SILVA et al., 2007). ....	15
Figura 2-7. Teoria da difusão para materiais poliméricos (da SILVA et al., 2007). ....	15
Figura 2-8. Teoria Eletrostática entre um polímero e um metal (da SILVA et al., 2007).....	16
Figura 2-9. Teoria da Adesão Mecânica (da SILVA <i>et al.</i> , 2007). ....	17
Figura 2-10. Uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida (KINLOCH, 1980). .....	18
Figura 2-12. Esquema dos modos de falha de um adesivo. (a) falha no adesivo. (b) falha coesiva no adesivo; (c) falha coesiva no substrato (EBNESAJJAD, 2008).....	19
Figura 2-13. Falha adesiva por contaminação (dos SANTOS, 2007). ....	20
Figura 2-14. Tipos de tensões em juntas adesivas. Adaptado de (3M, 2016). ....	21
Figura 2-15. Esforços de clivagem (dos SANTOS, 2007). ....	22
Figura 2-16. Esforços de peeling (dos SANTOS, 2007). ....	23
Figura 2-17. Ensaio de cisalhamento produzido por Villenave (VILLENAVE, 2002). ....	24
Figura 2-18. Cisalhamento diferencial (Tsai <i>et al.</i> , 1998).....	25
Figura 2-19. Parâmetros geométricos e de materiais de um ensaio double-lap (TSAI <i>et al.</i> , 1998).....	26
Figura 2-20. Classificação dos Polímeros quanto ao comportamento mecânico (CANEVAROLO, 2007).....	35

Figura 2-21. Estrutura molecular do DGBEA.....	36
Figura 2-22. Mecanismo de reação de cura (KARAYANNIDOU <i>et al.</i> , 2006). .....	37
Figura 2-23. Defeitos típicos em juntas coladas (da COSTA, 2011). .....	38
Figura 2-24. Diagrama dos blocos mostrando os principais componentes de um espectrômetro FTIR (SALA, 1996). .....	40
Figura 2-25. Representação esquemática da forma de medição realizada no DMA (WASILKOSKI, 2002).....	41
Figura 3-1. Esquema do projeto experimental e disposição de um corpo de prova no experimento. ....	42
Figura 3-2. Adesivo bicomponente Sikadur 30. ....	43
Figura 3-3. (a) Disposição de um corpo de prova (b) Grampo utilizado na montagem do corpo de prova. ....	44
Figura 3-8. Equipamento utilizado no ensaio de junta dupla. ....	46
Figura 3-9. Disposição de um dos corpos de prova no experimento.....	47
Figura 3-10. Moldes utilizados para concretagem. ....	48
Figura 3-11. (a) Disposição de um corpo de prova (b) Grampo utilizado na montagem do corpo de prova. ....	49
Figura 3-12. Molde utilizado para confecção dos corpos de prova do adesivo estrutural. ....	51
Figura 3-13. Processo de confecção dos corpos de prova para o DMA. ....	51
Figura 3-14. Retirada dos corpos de prova do molde.....	52
Figura 3-15. Equipamento de DMA. ....	53
Figura 4-1. Modos de falha: (a) Modelo A1 (b) Modelo A2 (c) Modelo A3.....	57
Figura 4-2. Gráfico Força por Deslocamento. ....	58
Figura 4-3. Modos de falha: (a) Modelo B1 (b) Modelo B3 (c) Modelo B5. ....	59
Figura 4-4. Ensaio do modelo D1, a seta amarela indica a presença de uma cantoneira de aço para concentrar a tensão na região de colagem. ....	60
Figura 4-5. Disposição dos corpos de prova (a) C1 e C2 e (b) D1 e D2. ....	62
Figura 4-6. Modos de falha: (a) Modelo C1 (b) Modelo C2. ....	64
Figura 4-7. (a) Falha mista: coesiva no concreto e por descolamento do concreto (b) Falha mista: coesiva no concreto e por descolamento da chapa de aço. ....	65
Figura 4-8. Falha na direção das placas adicionada (Modelo D1). ....	66
Figura 4-9. Modo de falha para o modelo D2 .....	67
Figura 4-10. Gráfico Força por Deslocamento das amostras .....	68
Figura 4-11. Gráfico Força por Deslocamento da “série” E. ....	69

Figura 4-12. Modos de falha dos CP's de (a) E1 até (f) E6. ....	72
Figura 4-13. Falha obtida por clivagem. ....	73
Figura 4-14. Tensão de Cisalhamento ao longo do comprimento de colagem para a junta aço/epóxi/aço. ....	74
Figura 4-15. Tensão de Cisalhamento ao longo do comprimento de colagem para a junta concreto/epóxi/aço. ....	74
Figura 4-16. Espectro FTIR do adesivo Sikadur 30. ....	76
Figura 4-17. Espectro FTIR do adesivo Sikadur 30 enfatizando de 1500 a 800 $\text{cm}^{-1}$ . ....	76
Figura 4-18. Curva de DMA para amostra 1. ....	78
Figura 4-19. Curva de DMA para amostra 2. ....	79
Figura 4-20. Curva de DMA para amostra 3. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Estimativa da demanda e do consumo per capita de adesivos em 2007. Adaptado de (LOHMAN, 2008) .....	8
Tabela 3-1. Propriedades características dos materiais utilizados (ABNT, 2008; Jabbar, 2015, Sika, 2010).....	43
Tabela 3-2. Propriedades do Concreto de acordo com o tempo de cura. ....	47
Tabela 4-1. Resultados obtidos com os ensaios. ....	55
Tabela 4-2. Resultados obtidos com os ensaios preliminares. ....	63
Tabela 4-3. Resultados obtidos com os ensaios finais.....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS

$W_{S/L}$  – trabalho de adesão entre a superfície sólida e o líquido (J);

$\gamma_{L/Ar}$  – tensão superficial do líquido (N/m);

$\theta$  – ângulo de contato (graus).

$2c$  – comprimento da sobreposição (m)

$\eta$  – espessura da camada adesiva (m)

$G_c$  – módulo de cisalhamento do adesivo (GPa)

$E_0$  – módulo de elasticidade do aderente externo (GPa)

$G_0$  – módulo de cisalhamento do aderente externo (GPa)

$t_0$  – espessura do aderente externo (m)

$E_i$  – módulo de elasticidade do aderente interno (GPa)

$G_i$  – módulo de cisalhamento do aderente interno (GPa)

$t_i$  – espessura do aderente interno (m)

$T_i$  – força por unidade de largura (N)

$T_0$  – força por unidade de largura (N)

$T$  – força por unidade de comprimento (N)

$\tau_c$  – tensão de cisalhamento do adesivo (N/m<sup>2</sup>)

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DMA – Análise Dinâmico Mecânico;

DT - Transdutor de deslocamento;

FEICA – Estudos da Associação de Adesivos Europeia;

FTIR – Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier;

LAEES – Laboratório de Análise Experimental de Estruturas;

Tg – Temperatura de Transição Vítrea;

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais;

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá.

# SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1 Considerações Iniciais .....	1
1.2 Objetivos.....	5
2 Revisão Bibliográfica.....	7
2.1 Resumo Histórico .....	7
2.2 Mercado.....	8
2.3 Definições.....	9
2.4 Funções dos Adesivos .....	10
2.4.1 Adesão .....	10
2.4.2 Fixação .....	11
2.4.3 Travamento.....	11
2.4.4 Vedação .....	12
2.5 Mecanismos de Adesão .....	12
2.5.1 Teoria da Adsorção.....	13
2.5.2 Teoria da Difusão .....	15
2.5.3 Teoria Eletrostática.....	16
2.5.4 Teoria Mecânica .....	16
2.6 Molhamento e Espalhamento .....	17
2.7 Junta Adesivada.....	19
2.7.1 Tipos de Falhas em Juntas Adesivadas .....	19
2.7.2 Tipos de Tensões em Juntas Adesivadas.....	21
2.7.2.1 Compressão .....	21
2.7.2.2 Tração.....	22
2.7.2.3 Clivagem .....	22
2.7.2.4 Descascamento (Peeling) .....	23
2.7.2.5 Cisalhamento.....	23
2.7.2.5.1 Distribuição de Tensões.....	24
2.7.2.5.2 Resistência a Ruptura.....	25
2.7.2.5.3 Modelo de Junta Dupla.....	26

2.8	Tratamento de Superfícies .....	30
2.8.1	Introdução .....	30
2.8.2	Tratamento de Superfície de Metais .....	31
2.8.2.1	Limpeza (Desengorduramento).....	32
2.8.2.2	Abrasão.....	33
2.8.2.3	Tratamento Químico .....	33
2.9	Adesivos Estruturais .....	33
2.9.1	Polímeros .....	34
2.9.2	Resina Epóxi.....	35
2.9.3	Espessura da camada adesivada .....	38
2.10	Técnicas de Caracterização .....	39
2.10.1	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	39
2.10.2	Análise Dinâmico Mecânico (DMA) .....	40
3	Materiais e Métodos .....	42
3.1	<i>Push Test</i> Aço-Epóxi-Aço .....	42
3.1.1	Materiais Utilizados.....	42
3.1.2	Dimensões dos Corpos de Prova .....	43
3.1.3	Preparação dos Corpos de Prova .....	44
3.1.3.1	Preparo dos Adesivos .....	44
3.1.3.2	Colagem .....	45
3.1.3.3	Tratamento Mínimo.....	45
3.1.4	Equipamento .....	45
3.2	<i>Push Test</i> Aço-Epóxi-Concreto .....	46
3.2.1	Materiais Utilizados.....	47
3.2.2	Dimensão dos Corpos de Prova.....	48
3.2.3	Preparação dos Corpos de Prova .....	48
3.2.3.1	Preparo dos adesivos .....	49
3.2.3.2	Colagem .....	49
3.2.3.3	Tratamento Mínimo.....	50
3.2.4	Equipamento.....	50
3.3	FTIR .....	50



3.4	DMA.....	50
4	Resultados e Análise .....	54
4.1	<i>Push Test</i> Aço-Epóxi.....	54
4.1.1	Experimento .....	54
4.2	<i>Push Test</i> Concreto-Epóxi-Aço.....	60
4.2.1	Experimento .....	60
4.3	Modelo Analítico.....	73
4.4	FTIR .....	75
4.5	DMA.....	77
5	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	80
5.1	Conclusões.....	80
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	81
	Referências Bibliográficas.....	82
	ANEXO A MANUAL TÉCNICO SIKADUR 30.....	87

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações Iniciais

O uso de adesivos para aplicações estruturais aumentou com a chegada dos adesivos sintéticos ao mercado. Este aumento se deve a uma evolução nos processos de ligação e nas tecnologias aplicadas. No caso da colagem de metais, passou-se a utilizá-los com ampla frequência no lugar de outros métodos convencionais como parafusagem, rebitagem, soldagem e ainda, no reforço de estruturas de concreto com chapas de aço. Algumas vantagens podem ser notadas para justificar o uso dos adesivos estruturais: a garantia de uma fixação contínua; possibilidade de obter uma estrutura mais uniforme quanto à distribuição de tensões e maior rigidez; menores temperaturas de processamento comparado à solda; obtenção de juntas com ligações mais simples, econômicas e resistentes; reduções em relação ao custo e ao peso; impermeabilização e isolamento; amortecimento de vibração; resistência à fadiga; melhora de projeto (questão estética: os adesivos, por exemplo, não modificam o contorno do material a ser unido) (ADAMS e WAKE, 1986; BERTHET *et al.*, 2011, EBNESAJJAD, 2008; PASTERNAK *et al.*, 2004; REIS, 2001).

Mesmo com as grandes vantagens descritas acima, os adesivos apresentam algumas desvantagens: baixa resistência em altas temperaturas; requer um tempo de endurecimento; as superfícies no qual serão coladas devem ser tratadas; as peças devem ser coladas antes do endurecimento da cola; a junta obtida é permanente. Além disso, fatores ambientais como umidade e temperatura podem prejudicar a durabilidade das uniões estabelecidas pelo adesivo (ADAMS e WAKE, 1986; dos SANTOS, 2007).

Uma das aplicações industriais mais empregadas são as juntas ou junções adesivas onde o objetivo principal é alcançar uma máxima resistência para uma dada área de colagem. Na prática, muitos tipos de juntas são usados destacando as ilustradas pela Figura 1-1. Pode-se

notar nesta figura que apesar dos substratos estarem submetidos a carregamentos de tração, a junção está sob carregamento de cisalhamento.

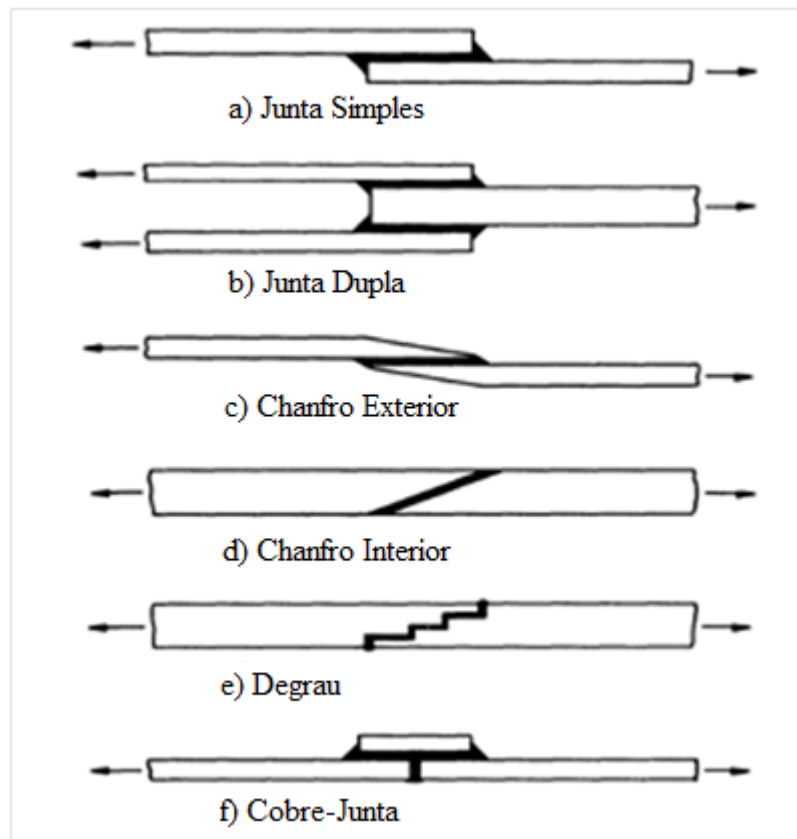


Figura 1-1. Algumas juntas comuns em engenharia (ADAMS e WAKE, 1986).

As juntas simples e dupla representadas pelas letras (a) e (b) da Figura 1-1, respectivamente, são as mais utilizadas pela indústria (NEMEŞ e LACHAUD, 2010). Adams e Wake (1986) fizeram um estudo sobre estas juntas e concluíram que apresentam ótima relação entre a facilidade para suportar cargas aplicadas e o seu custo. Além disso, são juntas de fácil execução, apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme e ainda uma transferência de carga mais leve em relação às outras juntas da Figura 1-1 representadas pelas letras de (c) até (f). A Figura 1-2 ilustra um dos primeiros experimentos destes pesquisadores: juntas duplas, mas com diferentes tipos de ligação submetidas ao mesmo carregamento. Observa-se nesta figura, que o comprimento da junta aumenta com os diferentes meios de ligação.

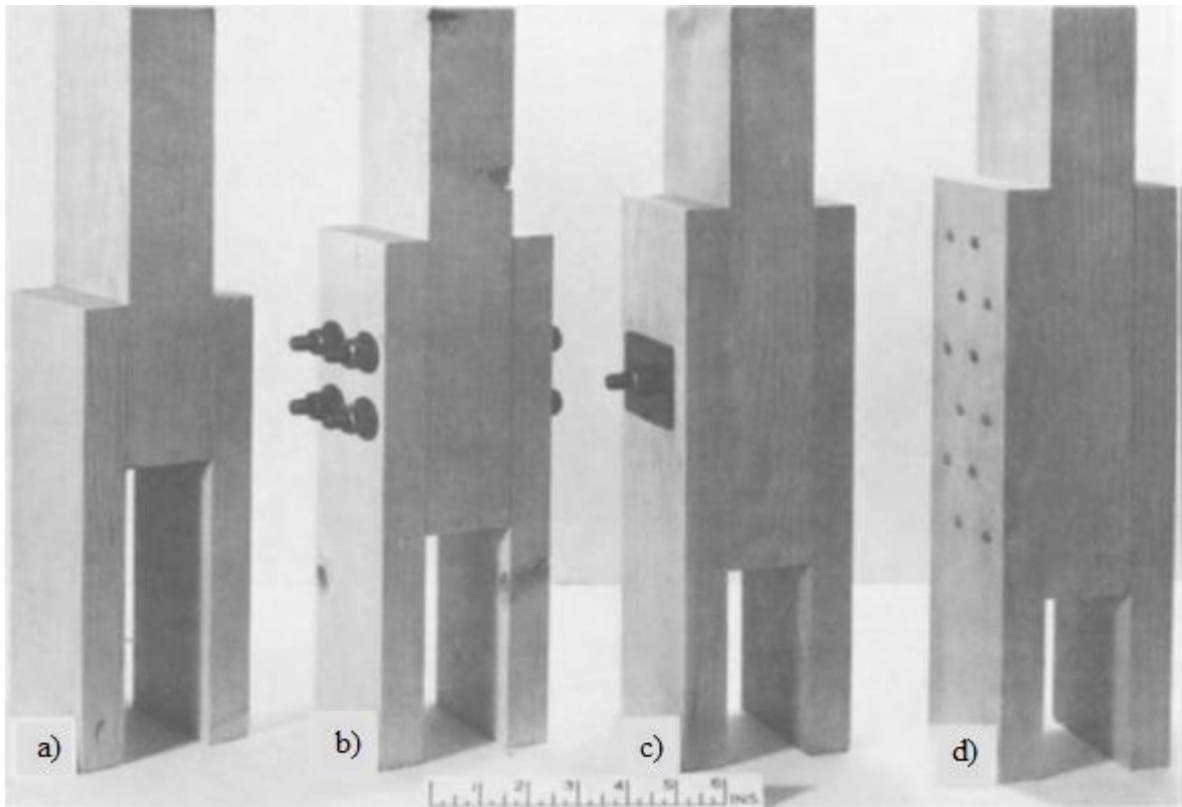


Figura 1-2. Juntas preparadas para suportar o mesmo carregamento: (a) junta colada (b) e (c) junta parafusada (d) junta pregada. (ADAMS e WAKE, 1986).

Atualmente, as indústrias aeronáutica, automobilística (Figura 1-3) e civil (Figura 1-4) empregam com segurança este tipo de ligação a fim de garantir um alto custo benefício e qualidade (EBNESAJJAD, 2008; NEMEŞ e LACHAUD, 2010; PASTERNAK *et al*, 2004).

Os adesivos mais utilizados são os do tipo epóxi devido a suas boas propriedades mecânicas e químicas (L'HERMITE, 1977). Destaca-se ainda o grande número de resinas e endurecedores encontrados no mercado. Cuidados, porém, devem ser tomados quanto à temperatura, umidade e superfície do substrato para que não haja perda de adesão entre adesivo e substrato.



Figura 1-3. Componente porta e seções transversais evidenciando a grafagem e o adesivo aplicado (HOEHNE, 2013).



Figura 1-4. Estruturas “soldadas a frio” e tanque sendo assentado ao novo local (da SILVA, A., 2007).

Os materiais escolhidos no presente trabalho como aderentes foram o aço e o concreto devido ao número expressivo de aplicações encontradas pelas juntas formadas por aço-epóxi-aço e concreto-epóxi-aço. A primeira junta é amplamente utilizada em painéis e no chassi pela indústria automobilística (HOEHNE, 2013; SANTOS, 2005). Outras aplicações são encontradas na indústria de construção civil, para substituir conectores convencionais (PASTERNAK *et al.*, 2004) e ainda turbinas eólicas estão sendo coladas ao invés de soldadas (VERMA, 2011). Já as aplicações relacionadas com a junta concreto-epóxi-aço estão concentradas na indústria de construção civil, especificamente, no reforço de estruturas de concreto (BARNES e MAYS, 2001; BERTHET *et al.*, 2011; KWON *et al.*, 2007). Isto porque estruturas de concreto já existente estão sujeitas a algumas alterações devido ao desgaste natural ou ainda por algumas patologias. Além disso, novos esforços podem ser solicitados à estrutura por aumentos de carga e/ou efeitos deletérios do tempo (fadiga/fluência). Mesmo com muitos estudos desta junta, algumas dúvidas ainda não foram solucionadas: o tipo de interação entre o aço e epóxi (VETTEGREN' *et al.*, 2014), e um tratamento de superfície mais simples e objetivo, capaz de manter a junta resistente (da SILVA, A., 2007; HOEHNE, 2013).

Como é crescente o uso deste tipo de adesivo, torna-se importante um estudo do comportamento mecânico sob cisalhamento de tal adesivo. Do ponto de vista prático é importante recorrer a ensaios laboratoriais e para testar e simular as diversas e melhores condições de trabalho possíveis.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de um adesivo, a base de epóxi para ligação de elementos estruturais de aço e concreto, sob cisalhamento, considerando o tratamento de superfície do aço e do concreto.

Dois ensaios mecânicos, de junta dupla, denominados *push tests*, com diferentes substratos foram realizados: um ensaio contendo juntas formadas por aço-epóxi-aço e outro contendo concreto-epóxi-aço. Um método de análise experimental foi desenvolvido considerando esses dois ensaios mecânicos, equipamento de ensaio disponível e alguns trabalhos encontrados na literatura (BERTHET *et al.*, 2011; da COSTA, 2011). Estes ensaios permitiram obter a resistência de uma junta adesivada e estudar diferentes tratamentos de superfícies para

determinar o mais eficiente. Com os resultados dos ensaios e com as propriedades dos materiais envolvidos, uma análise analítica foi empregada para avaliar as tensões desenvolvidas na camada adesiva. Os resultados obtidos foram relacionados com os experimentais para melhor compreensão do comportamento mecânico do adesivo.

Duas técnicas de caracterização também foram utilizadas: espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e a análise dinâmico mecânico (DMA). A primeira para identificar alguns grupos funcionais do adesivo responsáveis pela interação com os substratos e com a resistência ao cisalhamento do próprio adesivo. Já a DMA foi utilizada para estudar a estabilidade térmica do adesivo pela medida da temperatura de transição vítrea.

# 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Resumo Histórico

Adesivos, mais conhecidos por colas são, há bastante tempo, utilizados pelo homem para unir duas ou mais peças diferentes. Mesmo na época dos Egípcios já havia certo grau de tecnologia no processo de colagem. Adesivos a base de gelatina, albumina, resinas extraídas de árvores, entre outros, são exemplos de substâncias usadas para juntar peças naquela época (ESTEVES, 1990).

Vários exemplos de aplicações são encontrados na literatura: pigmentos eram colados com gesso para enfeitar os caixões egípcios; resinas de árvores eram empregadas como vedação em navios do mediterrâneo; colas uniam tábuas de madeiras em igrejas (TEIXEIRA, 2000). Além de ligantes, os adesivos também eram utilizados como agentes de vedação.

Houve uma estagnação em aplicações até o surgimento da borracha e dos adesivos sintéticos no início do século XX. Durante a primeira grande guerra, adesivos a base de caseína foram usados em aviões de guerra e estruturas de madeira em geral (L'HERMITE, 1977).

Com a chegada das resinas sintéticas, as propriedades de adesão e coesão foram melhoradas e mais projetos neste campo foram desenvolvidos. Além de maior reprodutibilidade, essas resinas conseguiram interagir com materiais diferentes. Porém, somente com a chegada das resinas a base de epóxi (1943), diferentes materiais foram ligados pelo mesmo adesivo (SKEIST e MIRON, 1981; TEIXEIRA, 2000).

Nos dias de hoje, são muitas as aplicações estabelecidas pelos novos adesivos e, algumas delas, serão mostradas no item 2.4.



## 2.2 Mercado

Estudos da Associação de Adesivos Europeia (FEICA) apontam que a indústria de adesivos e selantes exerce um papel significativo na indústria química. São mais de 1.500 fabricantes no mundo e mais de 250.000 diferentes adesivos e selantes (FEICA, 2005). Para se ter uma ideia, em 2000, as vendas alcançaram a marca de 30 bilhões de dólares (FURTADO, 2001).

É um mercado que consegue manter um crescimento mesmo com crises econômicas. Em 2003, apesar da recessão econômica, o mercado cresceu em relação a 2002 (FERREIRA, 2010).

Vários tipos de adesivos estão em constante crescimento devido a um aumento no preço da energia. Com isso há um incentivo a economia de combustíveis em muitos setores, incluindo o de transportes, para buscar estruturas mais leves. Destaca-se a família de resinas epóxi aplicadas na indústria eletrônica e na de estruturas.

Em 2007 foram consumidos 15 milhões de toneladas de adesivos distribuídos em todas as regiões do mundo conforme a Tabela 2-1 (LOHMAN, 2008). Já a Figura 2-1 ilustra a distribuição da demanda por adesivos. Nesta figura nota-se que a indústria de construção civil já ocupava o segundo lugar. Para suprir essa grande demanda por adesivos, vários fabricantes estão no mercado. Segundo a Revista Adhesive & Sealants Industry (MCPHERSON, 2014) a empresa Sika está entre os líderes mundiais do ramo.

Tabela 2-1. Estimativa da demanda e do consumo per capita de adesivos em 2007. Adaptado de (LOHMAN, 2008)

Região	Demanda (milhões de kg)	Consumo per capita (kg)
América do Norte	4409	13,0
América Latina	744	1,4
Europa Ocidental	3453	8,6
Europa Oriental	792	2,3
China	2394	1,8
Japão	859	6,7
Resto da Ásia	2049	0,8
Resto do Mundo	254	0,3

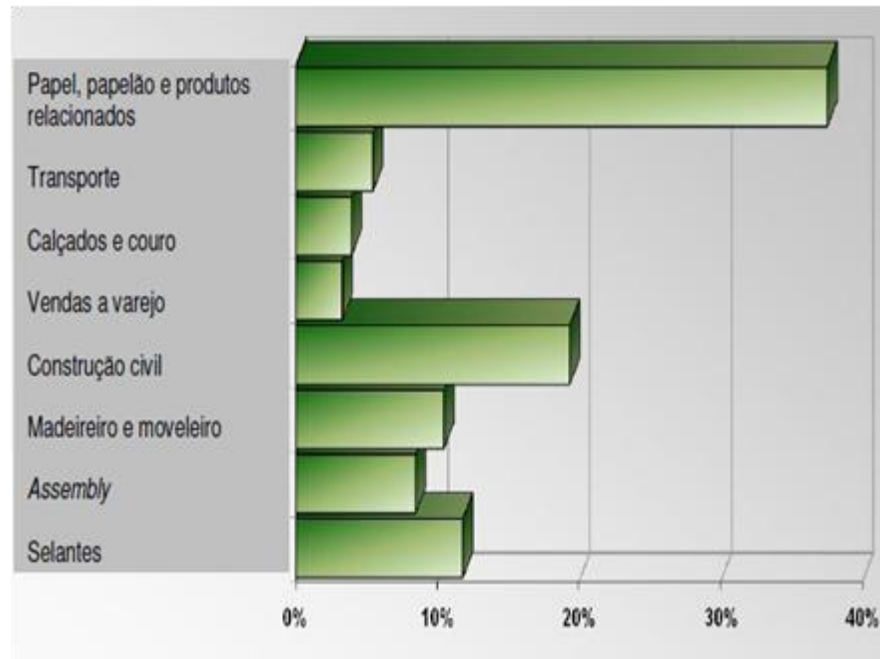


Figura 2-1. Demanda de adesivos em diferentes tipos de indústria (FERREIRA, 2010).

O Brasil domina o mercado de adesivos na América Latina tanto em faturamento (com exceção do México) quanto em modernização. Em 2002, por exemplo, o Brasil contabilizou 303 milhões de dólares, o que equivale a 62% do total da demanda na América Latina (Vieira, 2004). Em muitos casos, houve uma melhora em técnicas de aplicação aliado ao surgimento de novas resinas. Assim, alguns setores como o automobilístico e o eletrônico já estão no mesmo patamar de países pioneiros nesta tecnologia (FURTADO, 2001).

### 2.3 Definições

A norma ASTM D907 (2012) define os principais conceitos utilizados no estudo de adesivos. A Figura 2-2 ilustra alguns dos principais termos encontrados na norma que estarão presentes no trabalho:

**ADESIVO** ou **COLA**: substância que mantém elementos unidos pelo contato das superfícies;

**ADERENTE** ou **SUBSTRATO**: elemento unido pelo adesivo a outro elemento.

**JUNTA ADESIVADA** ou **JUNTA COLADA**: conjunto de aderentes unidos pelo adesivo;

**PRIMER**: cobertura aplicada ao substrato para melhorar a aderência do adesivo.

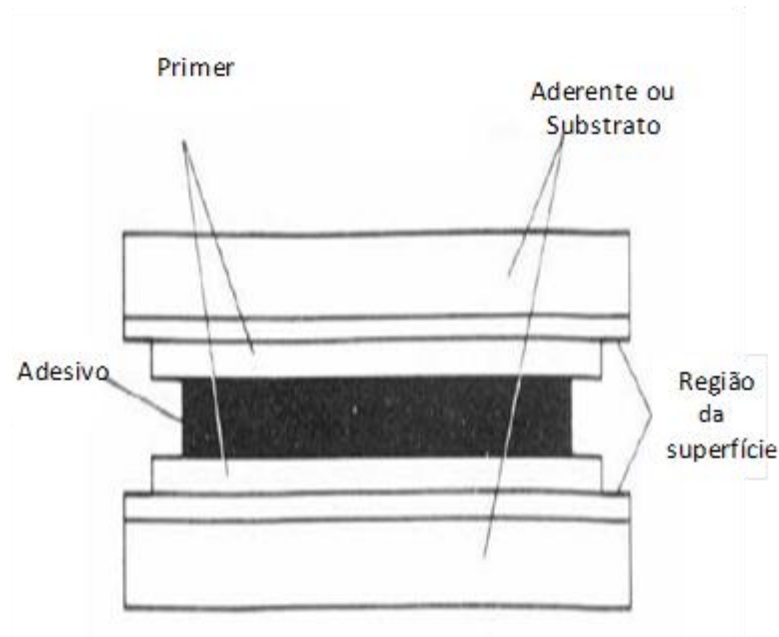


Figura 2-2. Nomenclatura segundo ASTM D907 (2012). Adaptado de (MENDES, 2005).

## 2.4 Funções dos Adesivos

Os adesivos podem ser aplicados em diversos fins, que variam de adesivos acrílicos para agulhas médicas até epóxis na carroceria de automóveis. Isso se deve ao grande número de adesivos presentes no mercado com diferentes composições químicas. De modo geral, são quatro os tipos de aplicações relacionados com a indústria: adesão, fixação, vedação e travamento (da SILVA *et al.*, 2007).

Nas aplicações a seguir, vale ressaltar, que o adesivo pode substituir ou complementar outros processos mais convencionais de adesão. Pois garante uma melhor distribuição de tensões e impede altas concentrações de tensões no material.

### 2.4.1 Adesão

Caracterizada pela junção de duas partes não cilíndricas (ou mais), a adesão é uma das aplicações mais utilizadas pela indústria. Deve-se notar que o tipo de adesivo a ser empregado depende de um conjunto de características do sistema envolvido (aderente/adesivo). Em alguns carros, por exemplo, a adesão entre vidros e carroceria é feita por adesivos a base de poliuretano. Já adesivos a base de epóxi são empregados para substituir ponto de solda na

fabricação de chassis (SANTOS, 2005). Outro exemplo se trata da adesão de placas de aço para torres de turbina de ventos como retrata a Figura 2-3.

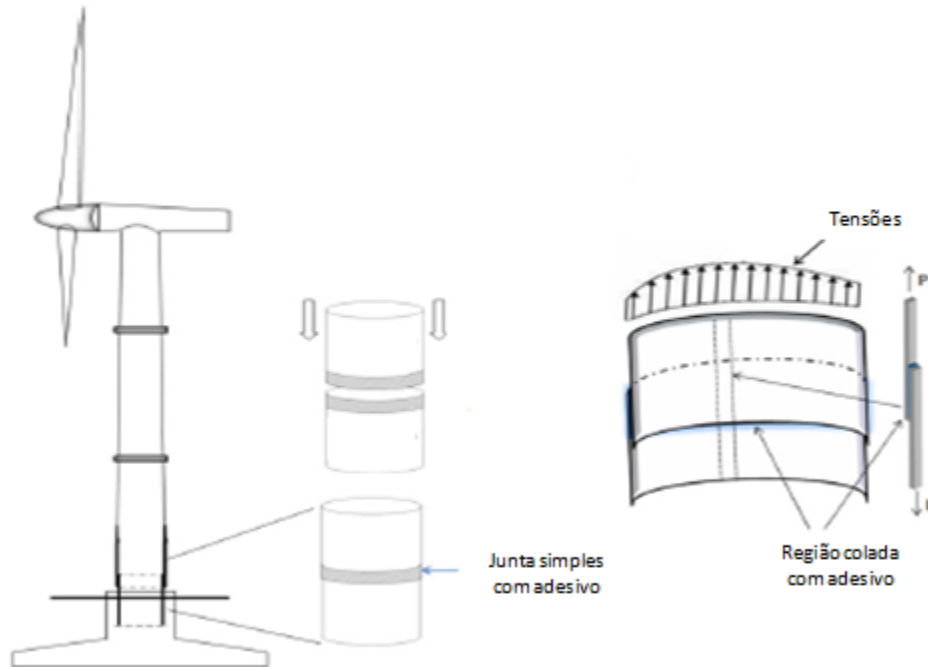


Figura 2-3. Conexão proposta utilizando adesivo. Adaptado de (VERMA, 2011).

### 2.4.2 Fixação

É a junção de elementos cilíndricos por adesivo. Dois exemplos clássicos deste tipo de aplicação são a união de engrenagem a eixo ou de rolamento em mancal. No primeiro caso, o adesivo impedirá o deslocamento e transmitirá o esforço para o eixo (dos SANTOS, 2007).

### 2.4.3 Travamento

É o processo que impede o movimento relativo entre os elementos envolvidos. Um dos sistemas mais utilizados de junção de partes é o conjunto porca/parafuso. Este sistema deve unir e manter as peças unidas por compressão, e ainda, permitir a desmontagem e manutenção das peças. Entretanto, fatores como corrosão, vibrações e relaxamento de tensão associado a ciclos de trabalho do parafuso podem levar a falha. O uso dos adesivos entre as superfícies com roscas impede a falha. Isto porque o adesivo penetra e preenche os espaços vazios entre as roscas. Assim, há um amortecimento das vibrações, aumento da área de contato e atrito entre os materiais. Além disso, uma proteção contra corrosão é garantida com a formação de uma película polimérica entre os elementos.

#### 2.4.4 Vedação

É uma aplicação que tem a função de impedir a passagem de fluidos entre as superfícies. Aqui os adesivos são usados entre as áreas de superfícies das peças. A diferença na geometria e na aplicação são os fatores que exigem diferentes tipos de adesivos.

O silicone é aplicado para vedação de flanges porque tem uma ótima capacidade de preenchimento e também alongamento. A Figura 2-4 ilustra o processo de vedação, a base de silicone, em um motor automotivo.



Figura 2-4. Vedação utilizando silicone (dos SANTOS, 2007).

### 2.5 Mecanismos de Adesão

Os mecanismos de adesão ainda não são totalmente entendidos e algumas teorias são encontradas na literatura. Frequentemente, as propostas de cada teoria oferecem suas hipóteses como uma explicação compreensiva de todo fenômeno de adesão. O que dificulta,

em algumas teorias, são os métodos empregados para medir a resistência de uma junta. Isso porque elas introduzem parâmetros geométricos de difícil medição (KINLOCH, 1980).

Ainda assim elas conseguem uma explicação de como o adesivo e o substrato estão unidos. Cada uma delas tem a sua contribuição para o mecanismo de forma geral e completa. Então, o mecanismo de adesão pode ser entendido como um conjunto de forças de natureza química, física e mecânica que atuam de forma independente e que se complementam. Elas são divididas em quatro teorias: adsorção, difusão, eletrostática e mecânica (KINLOCH, 1980; da SILVA *et al.*, 2007). Apesar dessa divisão, as teorias da adsorção e mecânica são as mais importantes para a adesão entre adesivos e aço/concreto devido aos conceitos utilizados por tais teorias (da SILVA *et al.*, 2007).

### **2.5.1 Teoria da Adsorção**

Pela teoria da adsorção, a adesão entre o substrato e o adesivo se deve as forças interatômicas (adsorção química) e intermoleculares (adsorção física). Ou seja, há um contato íntimo que se desenvolve entre os átomos dos materiais envolvidos.

A adsorção física está ilustrada na Figura 2-5 e é um mecanismo muito importante, pois ocorre na maioria das adesões entre materiais. Elas podem ser de dois tipos: Van der Waals e ligações de hidrogênio.

As forças de Van der Waals são ainda subdivididas em: interação dipolo-dipolo, interação dipolo-dipolo induzido e forças de dispersão. A primeira ocorre quando dois dipolos permanentes se aproximam e estabelecem uma força de atração mútua.

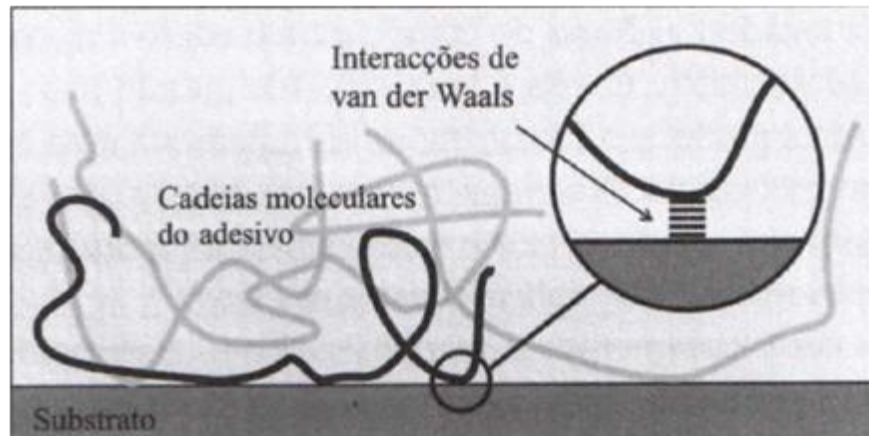


Figura 2-5. Teoria da adsorção física em esquema (da SILVA et al., 2007).

Já a interação dipolo-dipolo induzido ocorre quando um dipolo permanente provoca um deslocamento na nuvem eletrônica de uma molécula mais próxima, formando um dipolo induzido. As forças de dispersão ocorrem em moléculas apolares. Em um determinado instante, a nuvem eletrônica dessas moléculas sofre flutuações que induzem uma mudança na nuvem eletrônica de outra molécula.

As ligações de hidrogênio são atrações intermoleculares em que um átomo de hidrogênio permanece entre dois átomos menores e eletronegativos, com pares de elétrons isolados. Em outras palavras, uma das moléculas deve ser constituída de O-H, H-N ou H-F e a outra de O, N ou F. É uma interação mais forte do que as forças de Van der Waals.

A adsorção química, também conhecida por quimissorção, é uma ligação primária que envolve ligações covalentes, metálicas ou iônicas. É uma das formas que mais contribui para adesão. A Figura 2-6 ilustra este tipo de adesão. Os agentes de fixação ou primers citados no item 2.3, auxiliam a adesão por reação química (HOEHNE, 2013).



Figura 2-6. Teoria da adsorção química em esquema (da SILVA et al., 2007).

### 2.5.2 Teoria da Difusão

A teoria da difusão acontece se o sistema adesivo e aderente forem polímeros. Os polímeros devem ser solúveis, ou seja, o movimento da cadeia polimérica não deve ser dificultado pela sua estrutura cristalina. Ela deve ocorrer em polímeros acima de sua temperatura de transição vítrea. A Figura 2-7 ilustra a teoria: uma cadeia de polímeros se difunde em outra, pela interface.

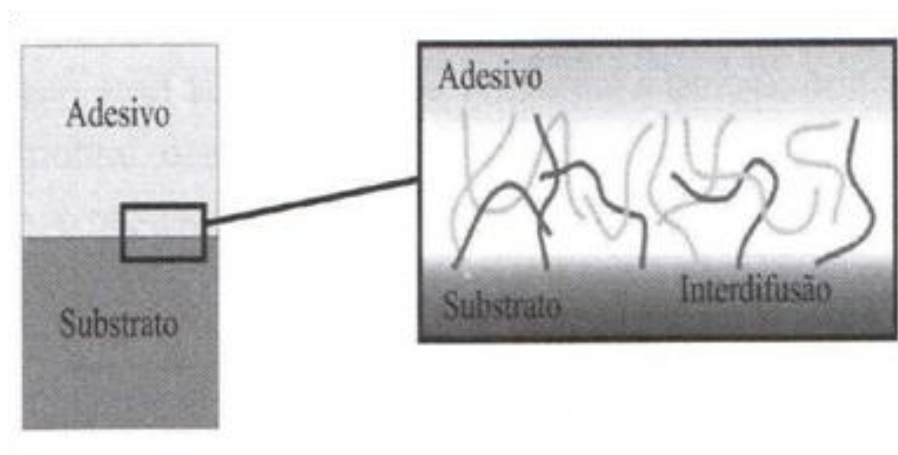


Figura 2-7. Teoria da difusão para materiais poliméricos (da SILVA et al., 2007).



### 2.5.3 Teoria Eletrostática

Nesta teoria a adesão acontece devido a efeitos eletrostáticos entre o adesivo e o aderente. É uma teoria experimental que credita a força de adesão a uma transferência de elétrons entre o adesivo e o substrato devido a diferenças nas bandas eletrônicas dessas estruturas (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Com isso, há a formação de um polo positivo e outro negativo, representado pelas superfícies dos materiais envolvidos como ilustra a Figura 2-8. Essas forças representam uma resistência a uma possível separação. Entretanto, são muito fracas quando comparadas as de adsorção e mecânica.

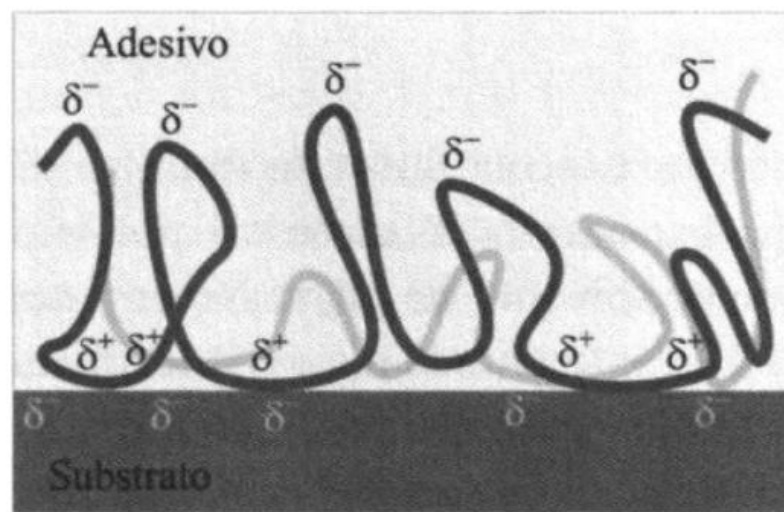


Figura 2-8. Teoria Eletrostática entre um polímero e um metal (da SILVA et al., 2007).

### 2.5.4 Teoria Mecânica

Segundo esta teoria, há um ancoramento mecânico entre as partes envolvidas, ou seja, o adesivo adere ao substrato como se travasse mecanicamente nos poros, fendas, aberturas e irregularidades do substrato como mostra a Figura 2-9.

Para que isto ocorra, o adesivo deve possuir propriedades reológicas capazes de penetrar nas irregularidades do substrato num período curto de tempo (molhamento e espalhamento são necessários). Outro fator encontra-se nas superfícies do substrato que devem conter microrrugosidades para melhorar o ancoramento mecânico garantindo assim, uma melhor resistência e durabilidade da junta (da SILVA *et al.*, 2007; KINLOCH, 1980).

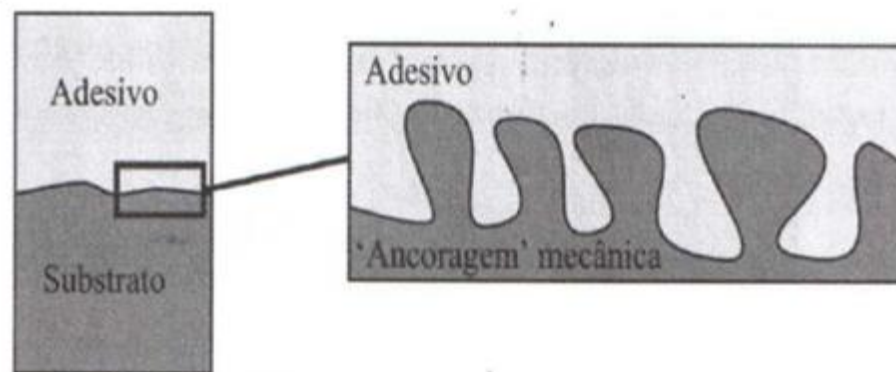


Figura 2-9. Teoria da Adesão Mecânica (da SILVA *et al.*, 2007).

## 2.6 Molhamento e Espalhamento

Quando uma gota de um líquido qualquer for colocada sobre uma superfície sólida e plana, ela poderá ou não se espalhar totalmente sobre esta superfície, ou, provavelmente, permanecerá como uma gota, com um ângulo de contato com a superfície sólida. A Figura 2-10 apresenta uma gota qualquer sobre uma superfície sólida qualquer (SHAW, 1975).

Young, através da Equação (2.1), conseguiu equacionar as forças superficiais representadas pelas tensões superficiais que atuam na direção das superfícies. (SHAW, 1975)

$$W_{S/L} = \gamma_{L/Ar}(1 + \cos \theta) \quad (2.1)$$

onde  $W_{S/L}$  é o trabalho de adesão, entre a superfície sólida e o líquido, que é igual ao trabalho necessário para separar uma unidade de área da interface líquido-sólido;  $\gamma_{L/Ar}$  é a tensão superficial do líquido; e  $\theta$  é o ângulo de contato.

Assim, um ângulo de contato nulo ocorre se as forças de atração entre líquido e sólido são iguais ou maiores do que as forças de atração entre líquido e líquido. No caso de adesivos e superfícies tratadas, esse ângulo nulo ocorrerá até o *pot life*. Por outro lado, um ângulo de contato finito se dá quando as forças de atração entre líquido e sólido são menores do que as forças de atração entre líquido e líquido (SHAW, 1975).

Vale ressaltar que sem um bom molhamento não há boa adsorção. Para que as interações de Van der Waals ou ligações químicas ocorram, é necessário um contato íntimo entre o líquido (adesivo) e o sólido (aderente).

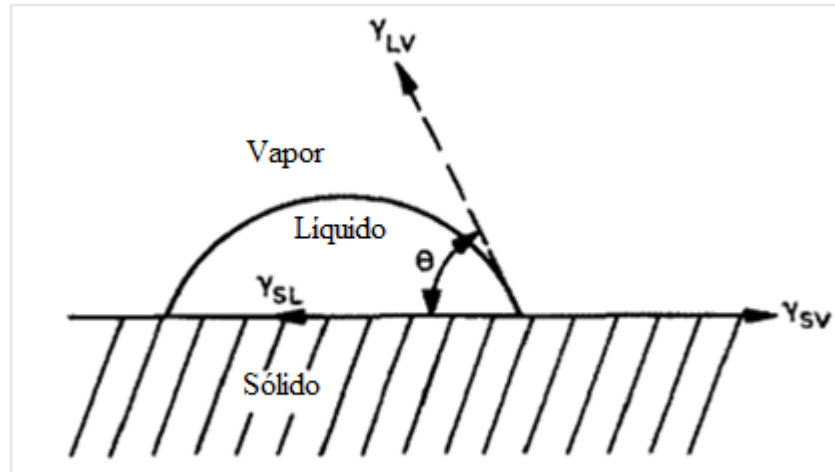


Figura 2-10. Uma gota de líquido em repouso sobre uma superfície sólida (KINLOCH, 1980).

A Figura 2-11 ilustra uma situação em que há um bom molhamento, representado pela letra (a) e outra de um molhamento pobre, representado pela letra (b). Neste caso, há a presença de ar preso que impossibilitam ligações e o ancoramento mecânico responsáveis pelo sucesso da adesão.

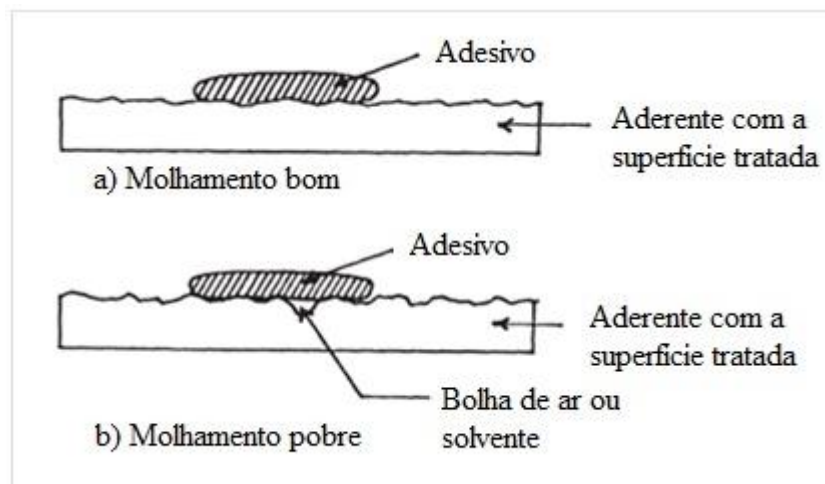


Figura 2-11. Exemplos de molhamentos (a) bom e (b) pobre de um adesivo sobre uma superfície sólida (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006).

## 2.7 Junta Adesivada

### 2.7.1 Tipos de Falhas em Juntas Adesivadas

Três tipos de falhas podem ser obtidos quando as juntas adesivas são submetidas a esforços mecânicos: adesiva, coesiva no adesivo e coesiva no aderente. A primeira está associada com a região da interface entre o adesivo e o substrato. Já a segunda e a terceira estão associadas às propriedades mecânicas dos adesivos e dos aderentes, respectivamente (EBNESAJJAD, 2008; MENDES, 2005). A Figura 2-12 ilustra uma hipotética junta adesivada e os possíveis tipos de falhas.

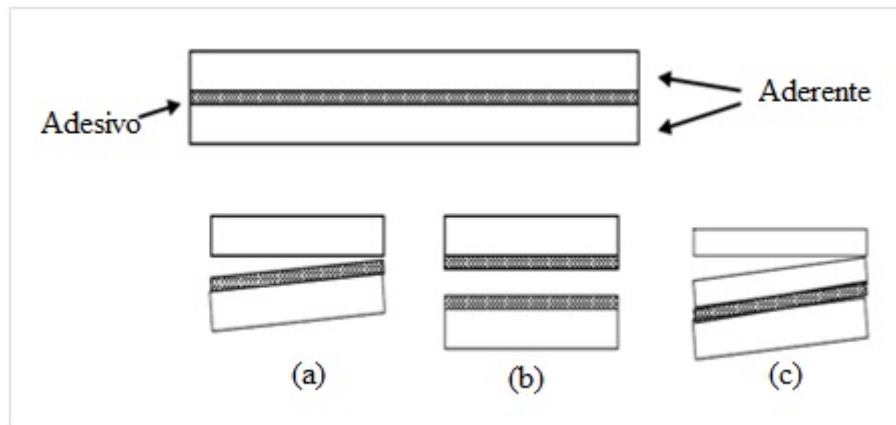


Figura 2-12. Esquema dos modos de falha de um adesivo. (a) falha no adesivo. (b) falha coesiva no adesivo; (c) falha coesiva no substrato (EBNESAJJAD, 2008).

A falha adesiva acontece na região de interface adesivo/aderente e tem como característica o destacamento do polímero de um dos dois substratos. Nota-se, depois da falha, que o filme adesivo permanece sobre um dos substratos. Há hipóteses para este tipo de falha: pouca pressão de colagem, possível contaminação dos substratos, e incompatibilidade entre o aderente/adesivo. No último caso, recomenda-se um tratamento superficial para aumento de resistência na junção. Um esquema exemplificando uma falha adesiva por contaminação é ilustrado pela Figura 2-13. A contaminação impede o contato entre o adesivo e o substrato.

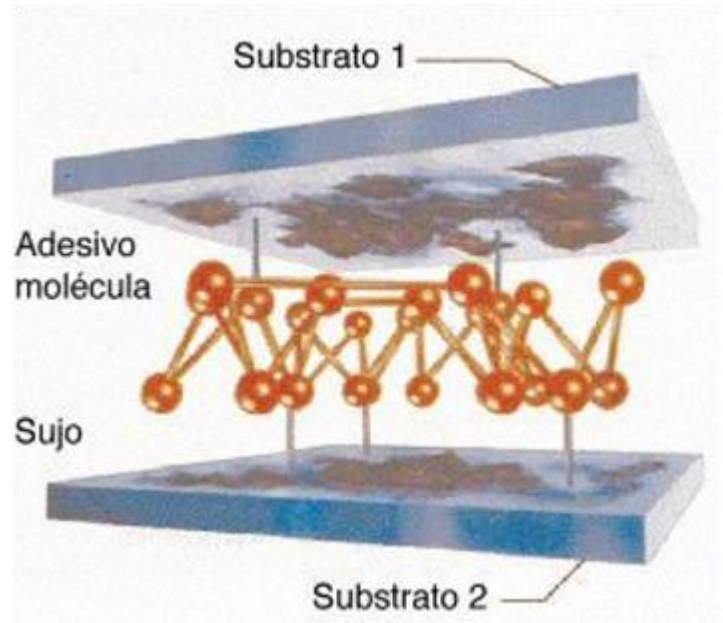


Figura 2-13. Falha adesiva por contaminação (dos SANTOS, 2007).

A falha coesiva no adesivo ocorre pela ruptura do adesivo graças a uma carga acima do limite mecânico do adesivo. Por isso, adesivos são encontrados em ambos os substratos neste tipo de falha. Quando ocorre uma falha prematura coesiva no adesivo deve-se ficar atento quanto ao tempo e temperatura usados para colar a junta.

A falha coesiva no aderente acontece quando o adesivo e a interface adesivo/substrato apresentam maiores resistências do que o aderente. Então, pode ocorrer uma quebra ou falha no aderente.

Alguns estudos revelam que graças a possíveis ligações e interações químicas entre o polímero e o metal, numa junta formada somente por metal e epóxi, a maior parte das falhas acontece no polímero, ou seja, é coesiva no adesivo. Portanto, para ocorrer falha adesiva é necessário haver um material diferente entre o adesivo e o aderente. Estudos revelam também que uma boa adesão não garante boa resistência coesiva visto que reações ocorridas na interface são diferentes das ocorridas no polímero (EBNESAJJAD, 2008).

## 2.7.2 Tipos de Tensões em Juntas Adesivadas

A Figura 2-14 abaixo ilustra os cinco tipos de tensões encontradas numa junta adesivada. Qualquer combinação entre elas também pode ser encontrada em muitas aplicações.

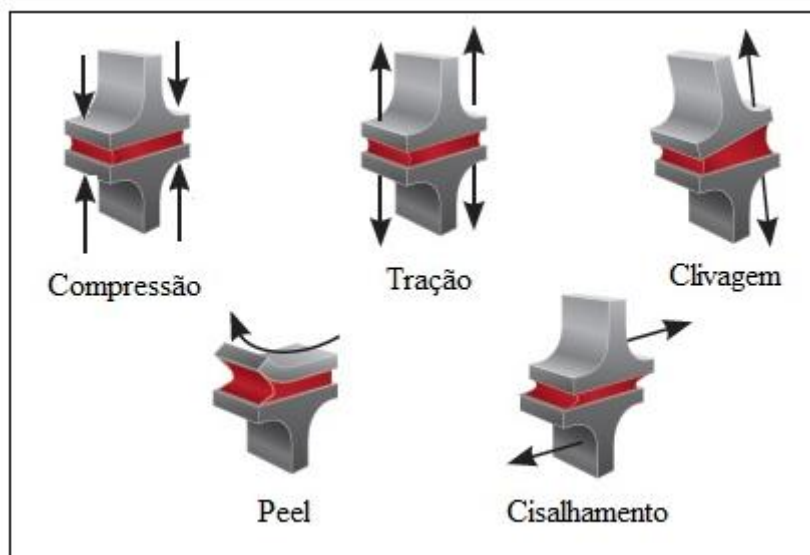


Figura 2-14. Tipos de tensões em juntas adesivas. Adaptado de (3M, 2016).

### 2.7.2.1 Compressão

Quando submetido à compressão pura, uma junta é menos provável de falhar do que se submetida a outro tipo de carregamento. Porém, tensão de compressão é limitada para aplicações em juntas devido à dificuldade em ser modeladas e/ou testadas. Isto porque são difíceis as condições reais de aplicação e uma análise de resultados com baixa amplitude de deformação e esmagamento do substrato. Os equipamentos de teste para estudos de compressão apresentam riscos de sobrecarga, mesmo instalados com os cuidados necessários (ADAMS e WAKE, 1986).

Mesmo assim, há aplicações de juntas sob esforços de compressão: colagem de vidros e tampas de motores, revestimentos de solos. Observa-se que são aplicações, na maioria das vezes, de vedação e de geometrias favoráveis resultando num substrato forçado contra o outro.

### 2.7.2.2 Tração

Neste tipo de esforço (como ocorre no cisalhamento), a tensão normal é distribuída uniformemente sobre a área da junta, entretanto não é possível prever a presença de outros tipos de tensões. Se a carga aplicada é deslocada em qualquer grau, a vantagem da tensão distribuída uniformemente é perdida e uma falha na junta torna-se provável. Os aderentes devem ser espessos neste tipo de junta para evitar a flexão sob o esforço aplicado. Tal situação também resultará em tensões não uniformes (ADAMS e WAKE, 1986; EBNESAJJAD, 2008). Clivagem e descascamento são outros tipos de tensões prováveis quando somente forças axiais não são empregadas completamente em uma junta colada. Como os adesivos geralmente têm resistências ruins à clivagem e ao descascamento, juntas projetadas sob tração precisam ter restrições físicas para garantir, unicamente, carregamento axial (EBNESAJJAD, 2008).

### 2.7.2.3 Clivagem

Ocorre quando forças na extremidade de uma junta colada (constituída por substratos rígidos) age para dividir os aderentes (ADAMS e WAKE, 1986; EBNESAJJAD, 2008). Pode ser considerado como a situação em que uma força de tração ou um momento é aplicado para separar os aderentes. A tensão não é distribuída uniformemente (como no caso da tração), mas é concentrada no lado em que a força é aplicada e teoricamente nula no outro lado. Uma ampla área é necessária para acomodar essa tensão, resultando em mais custos para junta. A Figura 2-15 ilustra três possibilidades de solicitação por clivagem. Modo I (abertura), Modo II (cisalhamento devido ao comprimento) e Modo III (cisalhamento devido à amplitude do esforço).

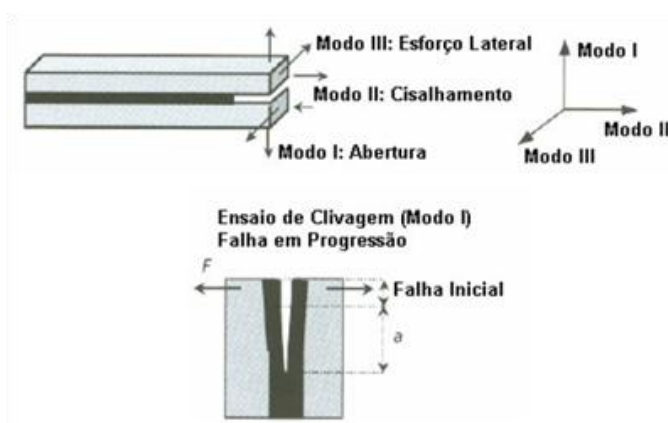


Figura 2-15. Esforços de clivagem (dos SANTOS, 2007).

#### 2.7.2.4 Descascamento (Peeling)

Pelo menos um dos aderentes precisa ser flexível neste tipo de esforço. Então, basta uma tensão considerável ser aplicada na linha da junta para falha ocorrer. Em outras palavras, o descascamento acontece na tentativa de separar dois substratos flexíveis ou um flexível ligado a um rígido como ilustrado na Figura 2-16. A separação ocorre devido à ação de um carregamento externo com velocidade constante, aplicada com ângulo  $\theta$  em relação ao plano da junção (dos SANTOS, 2007; EBNESAJJAD, 2008).



Figura 2-16. Esforços de peeling (dos SANTOS, 2007).

#### 2.7.2.5 Cisalhamento

A tensão aplicada neste tipo de esforço se distribui por toda área colada. Com isso, a área da junta passa a ser vantajosa proporcionando uma junta econômica. Sempre que possível, os esforços devem ser transmitidos através das juntas por cisalhamento porque é a mais resistente para evitar falhas (EBNESAJJAD, 2008).

A maioria das juntas coladas é projetada baseada em dados experimentais obtidos através de ensaios de cisalhamento. Com isso, é possível deslocar esses dados para as condições reais de aplicação (VERMA, 2011). Esses dados também permitem a determinação de parâmetros mecânicos além da criação e aperfeiçoamento de modelos matemáticos. Alguns deles são: força máxima  $F_{\max}$  e tensão média de ruptura  $\tau_{\text{avg}}$  (muito utilizado como a resultante da força aplicada sobre a área inicialmente aderida, força/unidade de área); Módulo de cisalhamento do adesivo  $G_c$  (representa o módulo elástico de cisalhamento para falhas coesivas); Energia de cisalhamento  $G_{\text{cis}}$  (representa a capacidade de dissipação de energia da junção).



### 2.7.2.5.1 Distribuição de Tensões

Os modelos matemáticos e os métodos de simulação presentes no mercado via método dos elementos finitos apontam para os seguintes resultados: maior concentração de tensão na extremidade da junta, se comparada à tensão média de ruptura (LUCIĆ *et al.*, 2006). Além disso, a distribuição de tensões depende do comprimento da sobreposição ( $l$ ) como ilustra a Figura 2-17.

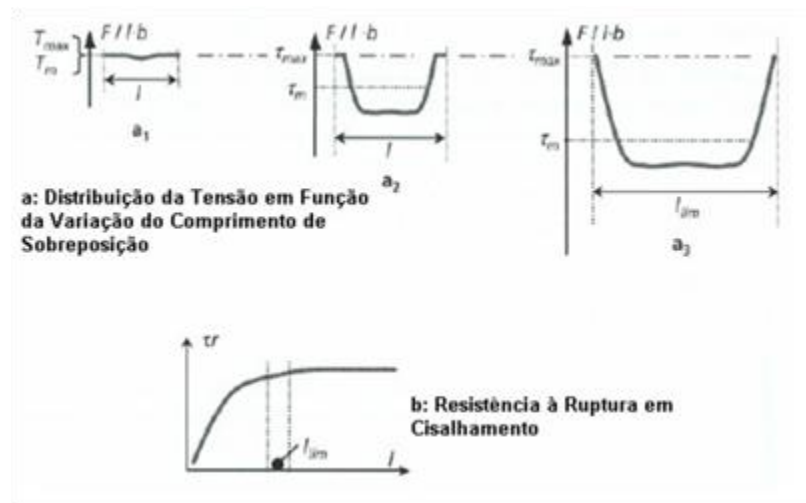


Figura 2-17. Ensaio de cisalhamento produzido por Villenave (VILLENAVE, 2002).

No caso  $a_1$ , para  $l$  pequeno, todo o comprimento de sobreposição está submetido a esforços máximos. Como  $l$  aumentou, no caso  $a_2$ , ocorreu uma redução da região sob esforço máximo. Com um comprimento limite  $l_{lim}$ , caso  $a_3$ , a região de onde as tensões máximas atuam é reduzida e a tensão média de ruptura é minimizada.

A forma da distribuição de tensão na Figura 2-17 é não linear e pode ser explicada pelo conceito de cisalhamento diferencial, ilustrado pela Figura 2-18. A redução da deformação dos aderentes ao longo do comprimento de colagem (de A até B) e a continuidade da interface adesivo/aderente causam uma distribuição de deformação cisalhante não uniforme na camada adesiva (Adams e Wake, 1986).

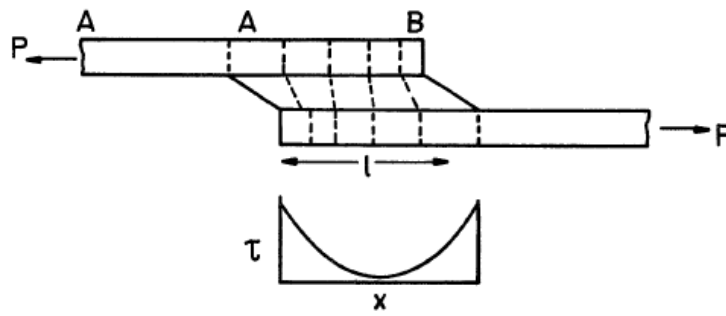


Figura 2-18. Cisalhamento diferencial (Tsai *et al.*, 1998)

Em outras palavras, as tensões são maiores nas extremidades do comprimento de colagem devido à máxima deformação dos aderentes em ambas as extremidades. No meio do comprimento, ambos aderentes tem a mesma deformação o que leva a baixa tensão.

Pode haver uma assimetria na distribuição de tensão devido a diferenças entre as dimensões e propriedades mecânicas dos substratos caso os mesmos sejam diferentes.

#### 2.7.2.5.2 Resistência a Ruptura

Em determinados experimentos, como o cisalhamento em juntas simples ou duplas, os corpos de prova fornecem um valor de tensão média de ruptura através da medição da força máxima  $F_{max}$ . Este parâmetro é aceito como característica do adesivo, pois representa o valor médio das solicitações mais duras e a distribuição de tensões. Observa-se que os limites impostos por  $\tau_{avg}$  (como propriedade da junta) também são garantidos pelos modelos analíticos. Inclusive o modelo proposto por Tsai *et al.* (1998) inclui uma relação entre tensão média de ruptura e a tensão máxima. Outro ponto interessante é o parâmetro resistência ao cisalhamento: apesar de aparelhos com alta tecnologia, o resultado de tensão média de ruptura, somente consegue atingir resultados significativos em condições no qual a espessura do adesivo não influencia no resultado. Portanto,  $\tau_{avg}$  continua sendo um dos fatores mais importantes para projetos de juntas adesivas.

### 2.7.2.5.3 Modelo de Junta Dupla

O objetivo de modelos matemáticos é relacionar o esforço de tração/compressão submetido aos aderentes com o esforço de cisalhamento submetido ao adesivo. Esta relação ocorre pelas características da junta (módulo de cisalhamento  $G$ ; espessura  $e$ ), dos adesivos (módulo de elasticidade  $E$ , espessura  $t$ ) e da montagem como todo (largura  $b$  e comprimento de sobreposição das chapas  $2c$ ).

Muitos modelos teóricos de juntas coladas foram desenvolvidos no século passado. Um modelo bastante utilizado pela literatura é o proposto por Tsai et al.(1998). Trata-se de um modelo que considera deformações e tensões de cisalhamento também nos aderentes. O modelo elementar de um ensaio double-lap é demonstrado pela Figura 2-19. Observa-se que o comprimento da sobreposição é  $2c$  e a espessura do adesivo é  $\eta$ . O módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento e a espessura dos substratos laterais são  $E_0$ ,  $G_0$  e  $t_0$ , respectivamente. Já  $E_i$ ,  $G_i$  e  $t_i$  são os valores correspondentes ao substrato central.  $T_i$  e  $T_o$  representam forças por unidade de largura e  $T$  é uma força aplicada por unidade de comprimento.

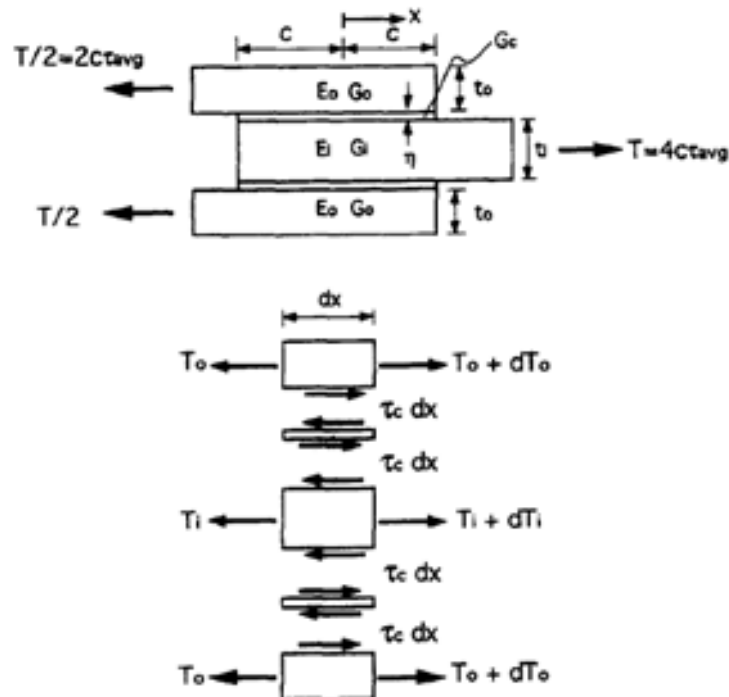


Figura 2-19. Parâmetros geométricos e de materiais de um ensaio double-lap (TSAI *et al.*, 1998).

As equações de equilíbrio de força na direção  $x$  para os aderentes são:

$$\frac{dT_o}{dx} + \tau_c = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{dT_i}{dx} - 2\tau_c = 0 \quad (2.3)$$

onde  $\tau_c$  é a tensão de cisalhamento do adesivo. As deformações de cisalhamento do aderente são incorporadas nesta análise. Uma distribuição linear de tensão cisalhante através da espessura do aderente é assumida. Considera-se, também, uma ligação perfeita entre o adesivo e o aderente. A tensão de cisalhamento do adesivo é definido pela Equação (2.4):

$$\tau_c = \frac{G_c}{\eta} (\mu_{ci} - \mu_{co}) \quad (2.4)$$

onde  $G_c$  é o módulo de cisalhamento transversal do adesivo, e  $(\mu_{c2} - \mu_{c1})/\eta$  é a deformação do adesivo.

A Equação (2.5) é obtida ao derivar a Equação (2.4) em função de  $x$ :

$$\frac{d\tau_c}{dx} = \frac{G_c}{\eta} \left( \frac{d\mu_{ci}}{dx} - \frac{d\mu_{co}}{dx} \right) \quad (2.5)$$

As Equações (2.6) e (2.7), abaixo, relativos à tensão em função da deformação dos aderentes, são aplicadas na Equação (2.4), resultando na Equação (2.8):

$$T_o = E_o t_o \left( \frac{d\mu_{co}}{dx} - \frac{t_o}{3G_o} \frac{d\tau_c}{dx} \right) \quad (2.6)$$

$$T_i = E_i t_i \left( \frac{d\mu_{ci}}{dx} + \frac{t_i}{6G_i} \frac{d\tau_c}{dx} \right) \quad (2.7)$$

Onde  $T_o$  e  $T_i$  são forças aplicadas por unidade de largura no adesivo superior e inferior, respectivamente.

$$\frac{d\tau_c}{dx} = \frac{G_c}{\eta} \left[ \frac{T_i}{E_i t_i} - \frac{T_o}{E_o t_o} - \left( \frac{t_i}{6G_i} - \frac{t_o}{3G_o} \right) \frac{d\tau_c}{dx} \right] \quad (2.8)$$

A Equação (2.9) é obtida derivando a Equação (2.8) em relação a  $x$  e aplicando as condições de equilíbrio dos aderentes, representados pelas equações (2.2) e (2.3).

$$\frac{d^2\tau_c}{dx^2} = \frac{G_c}{\eta} \left[ \frac{2\tau_c}{E_i t_i} + \frac{\tau_c}{E_o t_o} - \left( \frac{t_i}{6G_i} - \frac{t_o}{3G_o} \right) \frac{d^2\tau_c}{dx^2} \right] \quad (2.9)$$

A Equação (2.9) pode ser reescrita pela Equação (2.10):

$$\frac{d^2\tau_c}{dx^2} - \tau_c \beta^2 = 0 \quad (2.10)$$

onde:

$$\beta^2 = \frac{\frac{G_c}{\eta} \left( \frac{2}{E_i t_i} + \frac{1}{E_o t_o} \right)}{\left[ 1 + \frac{G_c}{\eta} \left( \frac{t_i}{6G_i} + \frac{t_o}{3G_o} \right) \right]} \quad (2.11)$$

O parâmetro  $\beta$  pode ser redefinido como:

$$\beta^2 = \alpha^2 \lambda^2 \quad (2.12)$$

onde o parâmetro  $\lambda$  (parâmetro de alongamento) e  $\alpha$  (parâmetro de cisalhamento) são:

$$\lambda^2 = \frac{G_c}{\eta} \left( \frac{2}{E_i t_i} + \frac{1}{E_o t_o} \right) \quad (2.13)$$

$$\alpha^2 = \left[ 1 + \frac{G_c}{\eta} \left( \frac{t_i}{6G_i} + \frac{t_o}{3G_o} \right) \right]^{-1} \quad (2.14)$$

A solução da Equação (2.10) é:

$$\tau_c = A \sinh(\beta x) + B \cosh(\beta x) \quad (2.15)$$

onde as constantes A e B são:

$$A = \frac{\beta c \tau_{avg}}{\cosh(\beta c)} \left[ \frac{1 - \frac{E_i t_i}{2E_o t_o}}{1 + \frac{E_i t_i}{2E_o t_o}} \right] \quad (2.16)$$

$$B = \frac{\beta c \tau_{avg}}{\sinh(\beta c)} \quad (2.17)$$

e  $\tau_{avg}$  pode ser representado pela Equação (2.18) quando T não for aplicado por unidade de largura:

$$\tau_{avg} = \frac{T}{2cb} \quad (2.18)$$

## 2.8 Tratamento de Superfícies

### 2.8.1 Introdução

Tratamento ou preparação de superfícies é definido como uma ou uma série de operações incluindo limpeza, remoção de partículas soltas e mudanças físicas ou químicas da superfície a qual um adesivo é aplicado para colagem (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Em colagem de substratos plásticos, o preparo da superfície tem como objetivo aumentar a polaridade da mesma, melhorando a molhabilidade do adesivo, e criando pontos de interação entre o adesivo e o substrato. Já algumas superfícies de metais são cobertas por camadas de óxidos, tornando-a altamente polar e apta para uma boa ligação adesiva. Preparação de superfície destina-se a aumentar a resistência à colagem na superfície do substrato e, principalmente, melhorar a durabilidade do adesivo, especialmente quando expostos a ambientes úmidos.

As principais razões para realizar um tratamento de superfície são (ADAMS e WAKE, 1986; EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006):

- Remover ou prevenir a formação de uma camada mais fraca na superfície do substrato;
- Maximizar o grau de interação molecular entre o adesivo ou primer e a superfície do substrato;
- Otimizar as forças de adesão que desenvolvem nas interfaces e portanto garantir uma junta resistente, inicialmente e durante a vida de serviço da cola;
- Para criar uma superfície microestrutural específica sobre o substrato.

Normalmente, estruturas e energia de superfície ótimas são alcançadas pelo tratamento químico de superfície (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Isso porque a composição química e a morfologia da superfície são alteradas de modo que a energia de superfície do substrato é maximizada para adesão. Tratamento químico também aumenta as chances de interações e ligações químicas. Um teste rápido para descobrir qual o tratamento químico adequado é colocar uma gota d'água sobre a superfície do substrato e notar se a gota espalha-

se. Em caso afirmativo, o ângulo de contato formado com a superfície é muito pequeno. Outros testes podem ser realizados utilizando fluidos especiais chamados de dyne (HOEHNE, 2013). Eles são líquidos utilizados para medir a tensão superficial da superfície de um substrato.

Métodos alternativos ao tratamento químico (com similares mudanças de superfície) incluem: tratamento por plasma, deposição química e anodização por ácido fosfórico (MENDES, 2005). Esses métodos agem em caminhos semelhantes ao tratamento químico com menos resíduos perigosos, porém com maior custo e menor reprodutibilidade. Abrasão mecânica é outro método de preparação de superfície. Este método é superior aos outros por sua simplicidade de processamento e menor geração de resíduos. Ele trabalha fornecendo uma superfície limpa e aumentando a área de contato entre o substrato e o adesivo. Um projeto irá determinar qual tratamento de superfície será necessário. Às vezes, dependendo da aplicação da junta ou do estado da superfície do substrato, não precisará ser empregado nenhum tratamento. Em outros casos um tratamento mais completo e complexo será necessário.

### **2.8.2 Tratamento de Superfície de Metais**

Preparar a superfície de um aderente metálico envolve alguns passos, todos os quais nem sempre são aplicados. É impossível obter uma ligação adesiva de qualidade sem limpeza e/ou abrasão da superfície metálica. Metais têm alta energia de superfície e absorve óleos e outras contaminações vindos da atmosfera. Assim, um tratamento mínimo, que garante uma boa adesão entre os elementos requer, pelo menos, limpeza e abrasão (ASTM D2651, 2008; EBNEAJJAD; EBNEAJJAD, 2006).

Em resumo, o objetivo de qualquer método de tratamento é aumentar a resistência e durabilidade de uma junta colada. Os requerimentos básicos são (KINLOCH, 1980):

- Escolha adequada do adesivo
- Bom projeto de junta
- Limpeza da superfície
- Molhabilidade nos aderentes



- Processo de colagem (solidificação e cura do adesivo)

Os três principais tratamentos serão descritos a seguir:

### **2.8.2.1 Limpeza (Desengorduramento)**

A remoção de todos os traços de contaminação causados por óleo e graxa da superfície do aderente é vital para formação de uma ligação adesiva forte. Para isso, diferentes métodos estão disponíveis e devem ser realizados ainda que a superfície aparente limpa (ADAMS e WAKE, 1986; ASTM D2651, 2008; EBNEAJJAD e EBNEAJJAD, 2006).

A parte a ser colada deve ser mergulhada em um solvente puro e não contaminado como tricloroetileno ou com vapores de percloroetileno. Como os vapores condensam sobre a parte, os contaminantes são dissolvidos e escorridos com o solvente condensado. Quando não há este tipo de vapor solvente, a superfície a ser colada pode ser enxugada com um pano embebido com tricloroetileno, seguido por uma evaporação completa da mesma. Estes solventes citados são tóxicos tanto na forma líquido quanto em vapor, e requerem um ambiente de trabalho ventilado.

Outra técnica consiste em esfregar a superfície do substrato em uma solução de detergente. Metais podem ser imersos ou pulverizados com um agente desengordurante alcalino, depois enxaguado com água limpa e quente, e secado completamente com ar quente ou pelo ambiente. Limpeza utilizando ultrassom também produz excelentes resultados para pequenas peças. Tricloroetileno, acetona e tetracloroetileno estão entre os bons solventes para limpeza com ultrassom. Um solvente muito bom é o 1,1,1-tricloroetano pela sua baixa toxicidade e inflamabilidade. Álcool, gasolina, ou tñers não são recomendados.

Para verificar a limpeza de uma superfície depois deste processo, água ou um líquido dyne são utilizados. Se a gota de água formar um filme na superfície, ela está limpa de contaminação, e se a gota conservar sua forma, a limpeza deve ser repetida (EBNEAJJAD e EBNEAJJAD, 2006; HOEHNE, 2013).

### **2.8.2.2 Abrasão**

Uma superfície rugosa por abrasão usualmente forma uma junta colada mais forte do que uma superfície polida, principalmente devido ao maior contato de área superficial entre a mesma e o adesivo. Uma superfície devidamente lixada não deve conter qualquer parte de área polida e suave. O tratamento por abrasão deve ser seguido de uma segunda limpeza para garantir a remoção de partículas soltas. Jateamento de areia remove depósitos na superfície como mancha, ferrugem ou carepa (ASTM D2651, 2008; EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Se esse equipamento não estiver disponível ou o metal for muito fino para resistir ao jateamento, escova de aço, lixa de esmeril ou lixa comum podem ser utilizados. Superfícies pintadas devem ser removidas para aumentar a resistência adesiva.

### **2.8.2.3 Tratamento Químico**

Limpeza, seguido de abrasão e novamente limpeza são tratamentos suficientes para muitas juntas. Mas para obter uma resistência máxima, reprodutibilidade, e resistência à deterioração, um ataque químico é necessário (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Atenção especial deve ser dada na preparação de soluções químicas para garantir a proporção correta dos componentes requeridos para formação de uma boa adesão. O tempo na aplicação é um fator crítico. Se a aplicação é muito curta, a superfície não será suficientemente atingida, enquanto aplicações longas formam uma camada de produtos químicos reativos que podem interferir na adesão (ASTM D2651, 2008).

Alguns tratamentos de superfície usam reagentes químicos que provocam sérios problemas a saúde. Por isso devem ser usadas com extremo cuidado. Solventes orgânicos precisam ser manuseados com jalecos, óculos de proteção e máscara.

## **2.9 Adesivos Estruturais**

Adesivo estrutural (ou cola estrutural) é um polímero utilizado para unir superfícies de dois materiais com objetivo de produzir uma junta resistente e forte. Esta noção de definição surgiu no momento em que realizavam colagens que precisavam assegurar a transmissão de esforços (na mesma grandeza de ligações convencionais como solda e rebite) de um elemento

para o outro. O adesivo deve ser capaz, nestas ligações, de suportar a transmissão de esforços de grandeza considerável.

Normalmente este tipo de adesivo é constituído por polímeros termofixos. Na indústria mecânica e de construção civil os adesivos a base de epóxi são os mais empregados, pois apresentam excelentes propriedades como: boa resistência mecânica; boas propriedades de resistência térmica; excelente dureza e resistência química; ótima adesão a metais e outros substratos; possibilidade de cura em várias temperaturas e tempos diferentes; ausência de água e outros produtos voláteis durante o processo de cura. Por isso é possível obter juntas adesivas com baixo nível de tensões residuais, boa coesão e integridade estrutural e excelente adesão a muitos tipos de substratos.

### **2.9.1 Polímeros**

Madeira, lã e algodão são alguns dos polímeros naturais usados há muito tempo. Estes polímeros são derivados de plantas e animais e também podem exercer papéis importantes no metabolismo de seres vivos como as proteínas e enzimas. Com o surgimento de microscópios e outras ferramentas, estruturas moleculares foram determinadas e vários polímeros sintéticos foram surgindo. Eles podem ser produzidos a custos menores e suas propriedades modificadas para que sejam melhores dos que os naturais (CALLISTER, 2008).

Polímero pode ser definido como uma macromolécula formada por várias unidades de repetição denominadas meros, unidos por ligação covalente. Os polímeros são sintetizados através de moléculas menores conhecidos por monômeros. Há uma grande variedade de materiais poliméricos quanto ao tipo e aplicações. Quanto ao comportamento mecânico, os polímeros são divididos em plásticos, elastômeros e fibras (CANEVAROLO, 2007).

Os plásticos são os de maior interesse pela indústria porque apresentam um número expressivo de materiais poliméricos diferentes e são sólidos em temperatura ambiente. Além disso, possuem certa rigidez estrutural sob carregamento sendo usados para várias aplicações. Eles ainda podem ser subdivididos em:

Termoplásticos: quando há um aumento de temperatura e pressão são amolecidos e podem fluir. Depois de retirada as solicitações de temperatura e pressão se solidificam adquirindo a forma do molde. Se aplicadas outras condições de temperatura e pressão o processo se

reinicia. São polímeros recicláveis e solúveis. Alguns exemplos são o polietileno e o polipropileno (CALLISTER, 2008; CANEVAROLO, 2007).

Termorrígidos (ou termofixos): são caracterizados por suas moléculas estarem em rede ou em retículo. Quando sujeitos a um aumento da temperatura e de pressão, também amolecem e fluem, adquirindo a forma do molde. Porém, reagem quimicamente, formando ligações cruzadas entre cadeias e se solidificam. Assim, novos aumentos de temperatura e pressão perdem a influência, resultando-os em materiais insolúveis, infusíveis e não recicláveis (CALLISTER, 2008; CANEVAROLO, 2007).

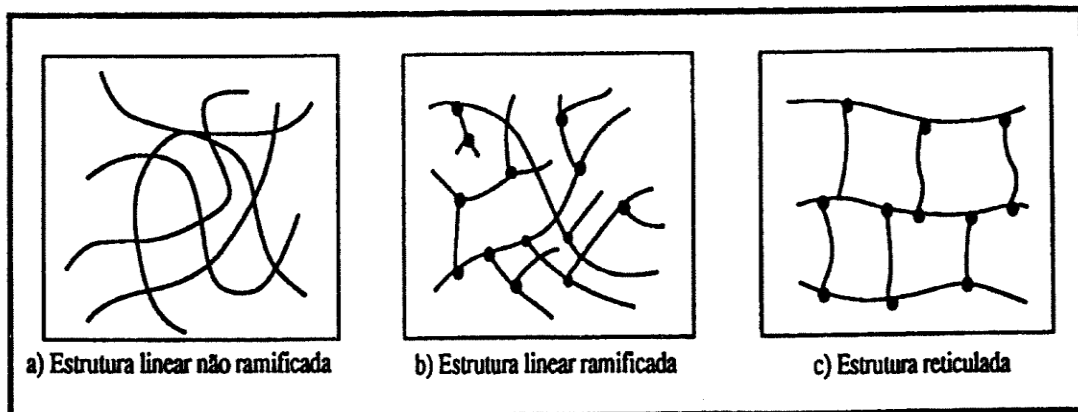


Figura 2-20. Classificação dos Polímeros quanto ao comportamento mecânico (CANEVAROLO, 2007).

### 2.9.2 Resina Epóxi

São termorrígidos de alto desempenho empregados como matéria prima em vários setores industriais. As maiores aplicações são matriz para compósitos estruturais, laminados elétricos e, principalmente, adesivos. As resinas epóxi mais aplicadas tem como componentes o diglicil éter do bisfenol A (DGEBA), ilustrado na Figura 2-21.

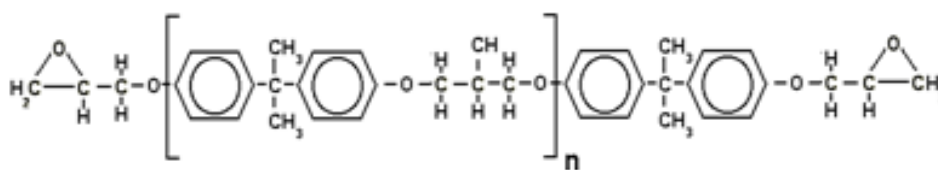


Figura 2-21. Estrutura molecular do DGBEA.

Nesta figura observa-se que as unidades de repetição (n) podem variar e influenciar nas propriedades da resina. Por este motivo, os adesivos a base de epóxi são disponibilizados em várias formulações e para junção de vários aderentes.

Estes adesivos são amplamente utilizados como adesivos estruturais. Eles se apresentam ao mercado com duas possibilidades, mono e bi componente. Os sistemas mono componente precisam de aquecimento para o processo de cura (HOEHNE, 2013). Já os bi componentes, como o empregado neste trabalho, não precisam de muita energia térmica para o processo. Além disso, estes adesivos apresentam ótima resistência ao cisalhamento apesar de apresentarem baixa resistência ao arrancamento ou a clivagem.

Uma grande quantidade de agentes de cura pode ser utilizada no processamento de resinas epóxi. O tipo de agente de cura irá determinar o tipo de reação de cura e afetar as propriedades do material curado.

Um esquema simples, para ilustrar duas das principais reações químicas da síntese de ligações cruzadas (processo de cura) está representado pela Figura 2-22. Neste esquema, o endurecedor (a base de uma amina primária) reage com o grupo epóxi (presente na molécula de DGBA da resina). Isso resulta em uma molécula de amina secundária que reage novamente com o grupo epóxi (de outra molécula de DGBA). Como resultado uma amina terciária e o começo da formação de um rede ou retículo.

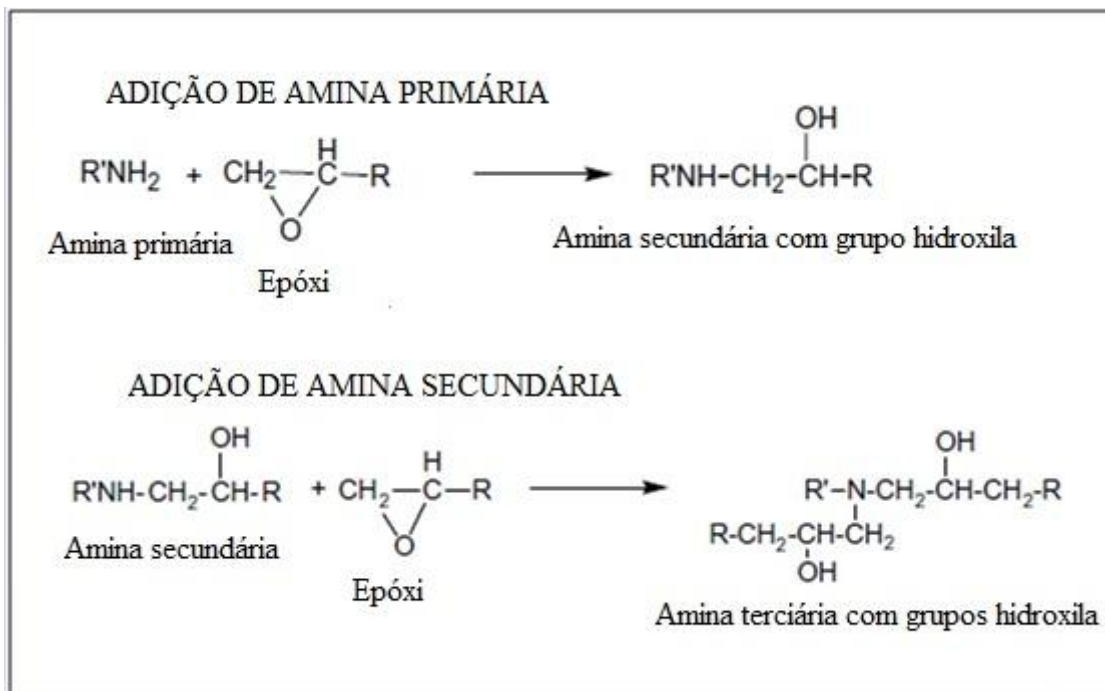


Figura 2-22. Mecanismo de reação de cura (KARAYANNIDOU *et al.*, 2006).

É importante saber que o grau de cura e de reticulação são parâmetros que não podem ser medidos diretamente. Por esse motivo, de algum jeito, o parâmetro a ser medido deve ser relacionado com o grau de cura e com densidade de reticulação. Excelente aproximação é relacionar as características do material ao grau de cura pela medida da extensão da reação. Um método bastante usado para determinação da extensão do grau de cura de um polímero termorrígido é pela temperatura de transição vítrea (Tg). Esta temperatura revela uma mudança de comportamento em polímeros: de um comportamento rígido para um caracterizado como amolecido. Em uma definição mais técnica a temperatura de transição vítrea pode ser compreendida como sendo a temperatura na qual se têm o início de movimentos moleculares coordenados e a longas distâncias de segmentos contendo em torno de 50 átomos. Tal transição envolve energias térmicas comparáveis às energias necessárias para rompimento de ligações intermoleculares fracas em polímeros (NETO e PARDINI, 2006). Em temperaturas acima da transição vítrea, cadeias apresentam mobilidade e liberdade suficientes para grandes deslocamentos. No caso de termorrígidos, como não apresentam fusão, eles degradam em elevadas temperaturas de forma irreversível. Por este motivo, a Tg é controlada pelo grau de reticulação do polímero.

### 2.9.3 Espessura da camada adesivada

Os aspectos mais importantes relacionadas à espessura do adesivo são a dimensão e uniformidade. Usualmente, a camada adesiva deve ser a mais fina possível (da SILVA *et al.*, 2007). Em termos práticos, no caso do adesivo utilizado neste trabalho, uma espessura entre 1 mm e 2 mm. Isso porque a resistência deste adesivo não varia consideravelmente neste intervalo. Uma boa recomendação é um tamanho de espessura em que as interações entre adesivo e substratos sejam suficientes, ou seja, não haja descolamento. Em espessuras maiores, há um grande risco do aparecimento de defeitos: concentrações de vazios, trincas, poros e regiões não curadas (Figura 2-23). Outro problema é a dificuldade em se manter as cargas axiais com uma linha adesiva muito espessa (EBNESAJJAD, 2008). O método utilizado para manter a espessura constante e na medida “certa” foi o uso de uma espátula serrilhada (altura dos dentes da espátula é igual a altura que se deseja obter da camada de adesivo) e a aplicação de pressão durante a cura.

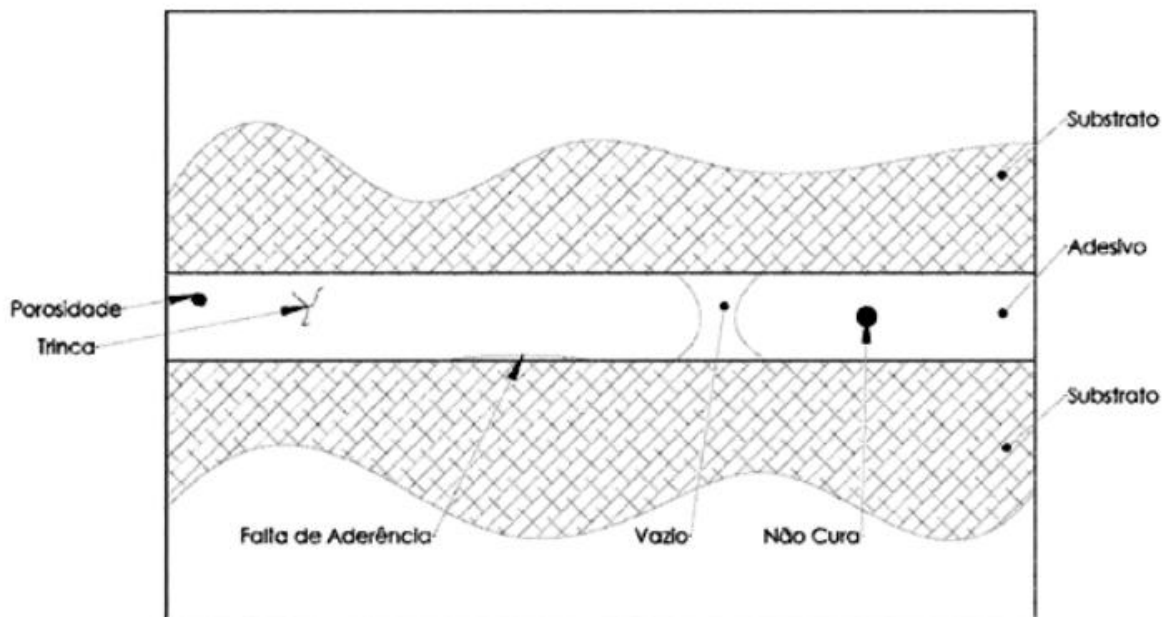


Figura 2-23. Defeitos típicos em juntas coladas (da COSTA, 2011).

## 2.10 Técnicas de Caracterização

### 2.10.1 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia de infravermelho é um tipo de espectroscopia de absorção que usa a região do infravermelho do espectro eletromagnético ( $100$  a  $10000\text{ cm}^{-1}$ ). O fenômeno de absorção e liberação de energia através da emissão é característico para cada material, por isso um estudo detalhado pode classificar ou pelo menos aproximar sua composição e ajudar no entendimento da estrutura de um material. Um modo de vibração é ativo no infravermelho quando provoca uma variação no momento de dipolo permanente do meio, fazendo com que este oscile com uma frequência na faixa do infravermelho. Ao se incidir uma radiação com essa mesma frequência no meio, ela será absorvida.

A base de qualquer espectrômetro FTIR é o interferômetro de Michelson (Figura 2-24). Nesse sistema, a radiação de uma fonte monocromática hipotética é dividida em dois feixes, cada um correspondendo idealmente a 50% do original, no "beamsplitter" (divisor de feixe). Um dos feixes (A) segue em direção ao espelho de posição fixa no qual reflete de volta para o "beamsplitter", onde parte deste feixe reflete de volta para a fonte e parte vai para o detector. O outro feixe (B) parte do "beamsplitter" em direção ao espelho móvel. Se os feixes A e B percorrerem a mesma distância há uma interferência construtiva e os dois feixes estão em fase. Assim a energia que chega ao detector será máxima. Por outro lado, se o caminho dos feixes forem diferentes haverá uma interferência destrutiva, os feixes estarão fora de fase e a energia que chegará ao detector será mínima (LAGE, 2004). Com isso, à medida que o espelho móvel percorre determinada distância, um interferograma, como o mostrado na Figura 2-24, é formado.

A técnica se baseia na absorção da radiação infravermelha. Uma variação no momento de dipolo permanente do meio devido a um modo de vibração provoca a absorção da radiação infravermelha incidente, que tenha a mesma frequência deste (SALA, 1996).



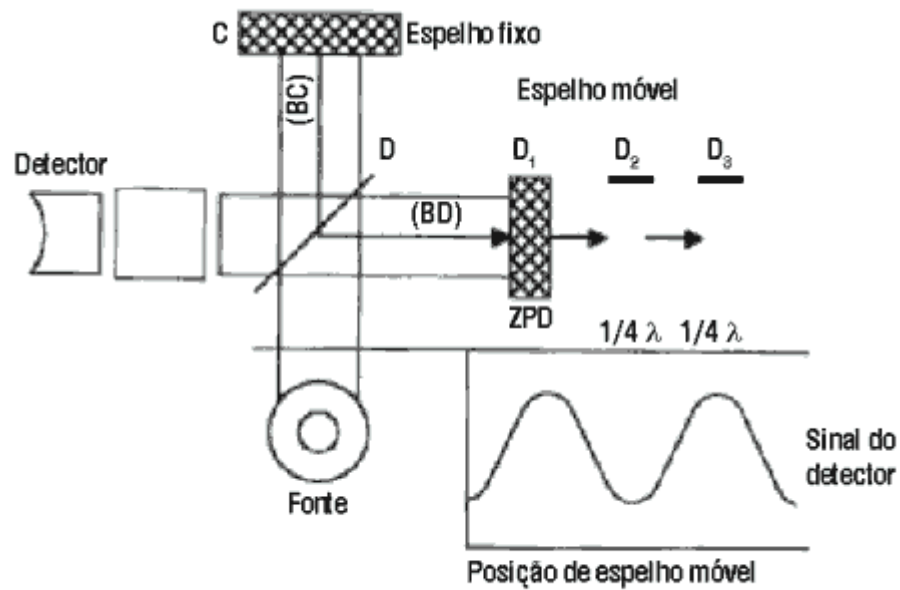


Figura 2-24. Diagrama dos blocos mostrando os principais componentes de um espectrômetro FTIR (SALA, 1996).

### 2.10.2 Análise Dinâmico Mecânico (DMA)

Conhecida também por análise termo-dinâmico-mecânica, a DMA (do inglês Dynamic Mechanical Analysis) é uma análise térmica que permite relacionar propriedades macroscópicas (propriedades mecânicas) com características microscópicas. Estas características podem ser entendidas como relaxações moleculares em associação com mudanças de conformação e/ou deformações introduzidas através dos rearranjos moleculares (CANEVAROLO, 2004).

O ensaio de DMA consiste, de maneira geral, na aplicação de uma tensão ou deformação mecânica oscilatória, senoidal e de baixa amplitude, a um material sólido ou viscoso. Com isso, mede-se a deformação sofrida pelo material ou a tensão resultante, sob variação de frequência ou temperatura (DAWKINS, 1986). Assim, calcula-se a tendência ao escoamento (viscosidade) pela diferença de fase e, a rigidez (módulo de elasticidade), pela recuperação do material. A viscosidade pode ser entendida como a capacidade de perder energia na forma de calor (amortecimento), enquanto a elasticidade como a capacidade de recuperação da deformação de uma curva tensão-deformação na região linear inicial (MENARD, 2008). A Figura 2-25 é uma ilustração esquemática da forma de medição realizada no DMA pela medida da deformação de um material.

Na análise por DMA, um módulo chamado de elasticidade complexa ( $E^*$ ) é constituído por um módulo de armazenamento ou real ( $E'$ ), e um módulo de perda ou imaginário ( $E''$ ), obtidos pelo cálculo da resposta do material à onda senoidal. A presença de diferentes módulos permite uma melhor caracterização da amostra ao avaliar a capacidade do material de armazenar energia mecânica ( $E'$ ) e, em perder energia em forma de calor ( $E''$ ) quando solicitado mecanicamente, sendo a razão entre estas grandezas ( $\tan \delta$ ) denominado de fator de perda (MARTINS, 2015; MENARD, 2008).

Num ensaio envolvendo polímeros, em geral, com o aumento da temperatura,  $E'$  decresce e  $E''$  cresce. Além disso, o pico máximo de  $E''$  (em relação a temperatura) indica a dissipação de energia o que revela a ocorrência de transições associadas ao processo de relaxação de algumas estruturas poliméricas. No DMA existem 4 transições que podem ser analisadas: transição vítrea (calculada neste trabalho) e as transições  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  que estão relacionadas com relaxação submolecular das cadeias e são mais evidentes em resfriamento dos polímeros (CHENG, 2002; MARTINS, 2015).

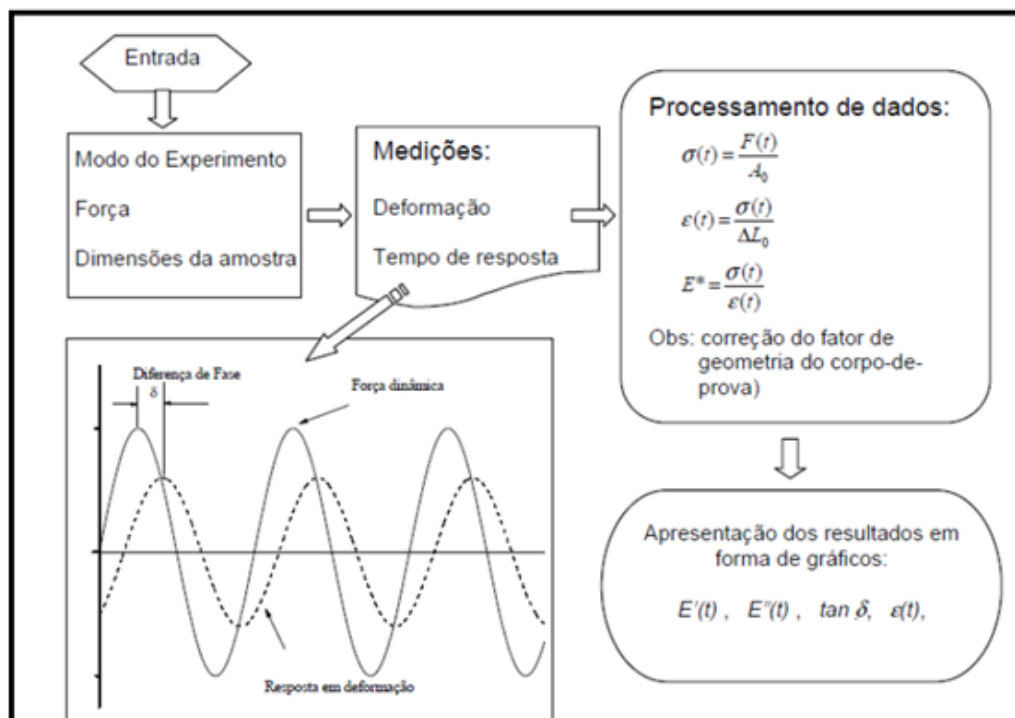


Figura 2-25. Representação esquemática da forma de medição realizada no DMA (WASILKOSKI, 2002).

O DMA tem sido bastante empregado para a determinação da temperatura de transição vítrea visto que apresenta maior sensibilidade às técnicas convencionais de análise térmica além de resultados mais precisos (WASILKOSKI, 2002).

# 3

## MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 *Push Test* Aço-Epóxi-Aço

Este ensaio consistiu na aplicação de uma carga centrada na chapa central (a espessura das chapas foi escolhida com o objetivo de evitar a flexão das mesmas), que tende a provocar um deslizamento relativo da mesma em relação às chapas laterais, com o objetivo de obter o comportamento (resistência e rigidez) do adesivo ao cisalhamento.

A Figura 3-1 esboça a disposição dos corpos de prova no experimento:

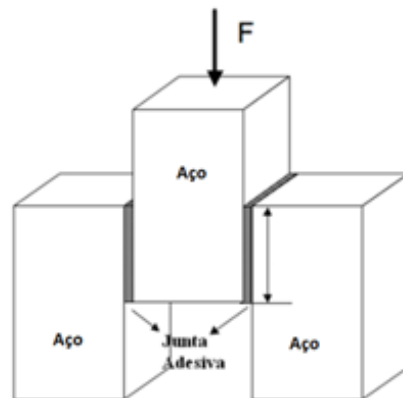


Figura 3-1. Esquema do projeto experimental e disposição de um corpo de prova no experimento.

#### 3.1.1 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados foram o aço ASTM A36, um adesivo comercial bi-componente (Sikadur 30) a base de epóxi e um concreto auto adensável. Este adesivo possui um componente branco e um preto (Figura 3-2) e, na mistura de ambos, cinza claro. Na Tabela 3-1 estão apresentadas as propriedades dos materiais utilizados.

Tabela 3-1. Propriedades características dos materiais utilizados (ABNT, 2008; Jabbar, 2015, Sika, 2010).

Materiais	Aço ASTM A36	Adesivo
Densidade ( $\text{Kg/m}^3$ )	7850	1650
Módulo de elasticidade transversal (MPa)	77000	5000
Módulo de Elasticidade (MPa)	200000	9600
Coefficiente de dilatação térmica ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$1,2 \times 10^{-5}$	$2,5 \times 10^{-5}$
Resistência ao escoamento (MPa)	250	-
Resistência ao cisalhamento (MPa)	150	18



Figura 3-2. Adesivo bicomponente Sikadur 30.

### 3.1.2 Dimensões dos Corpos de Prova

Foram confeccionadas 8 chapas laterais e 4 chapas centrais. Como o aço não atingiu o regime plástico, não houve a necessidade de confeccionar mais chapas. Então elas foram reaproveitadas para os ensaios seguintes.

As chapas laterais possuíam dimensões de 12,5 mm de espessura, 50 mm de comprimento e 70 mm de altura; a chapa central possuía dimensão de 50 mm de espessura, 50 mm de comprimento e 70 mm de altura. A área colada foi de 50 cm<sup>2</sup> por experimento e a espessura da camada adesiva foi, na média, de 1 mm.

### 3.1.3 Preparação dos Corpos de Prova

Cada corpo de prova foi constituído por 3 chapas de aço, duas laterais coladas a uma central de acordo com a Figura 3-3. Foram montados 12 corpos de provas com o adesivo Sikadur 30.



(a)



(b)

Figura 3-3. (a) Disposição de um corpo de prova (b) Grampo utilizado na montagem do corpo de prova.

#### 3.1.3.1 Preparo dos Adesivos

O componente A foi misturado ao componente B na proporção 3:1 em peso conforme recomendação do fabricante (medido em uma balança analítica) em um recipiente adequado. Para misturar os componentes, uma espátula de madeira serviu de misturador de baixa

rotação, até que o material se apresentou com consistência e cor homogêneos (5 minutos). A cura desta resina começou logo após a mistura e terminou 7 dias depois.

### 3.1.3.2 Colagem

O adesivo foi aplicado (Figura 3-4) nas quatro áreas de colagem (de forma a molhar as superfícies) com auxílio de uma espátula serrilhada, que também foi utilizada para controle da espessura. Em seguida, um grampo (Figura 3-3(b)) foi empregado para manter uma pressão constante sobre o corpo de prova, de forma a pressionar a camada de cola a fim de garantir que na zona de sobreposição o adesivo não apresentasse zonas de descontinuidade e a espessura fosse a desejada. As duplas coladas foram esfregadas entre si para evitar a presença de bolhas de ar.

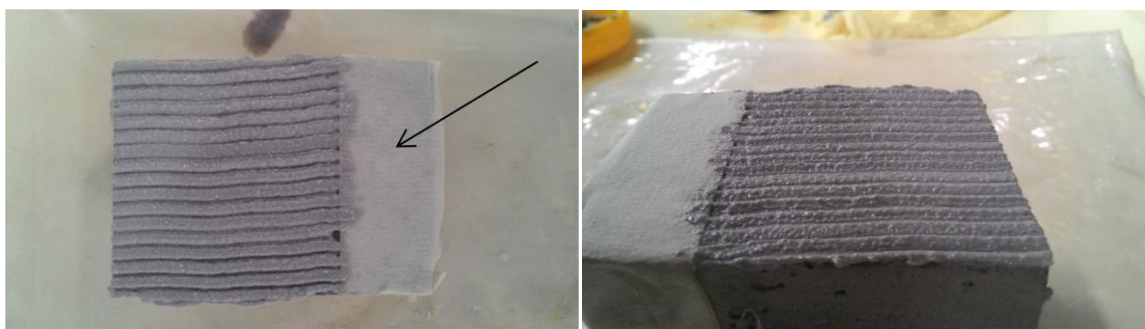


Figura 3-4. Passagem do adesivo em uma das superfícies pela espátula serrilhada. A seta indica a presença de uma fita adesiva utilizada para limitar a área colada.

### 3.1.3.3 Tratamento Mínimo

O tratamento mínimo empregado foi de limpeza-abrasão-limpeza. Para limpeza, uma escova foi esfregada na superfície a ser colada. Depois, uma lixa (da marca 3M, grão 50) foi empregada para eliminar qualquer tipo de oxidação na superfície e um esmeril foi utilizado a fim de deixar a superfície rugosa. Por fim, um compressor de ar foi empregado para remover qualquer tipo de poeira ou resíduo.

### 3.1.4 Equipamento

A estrutura de reação foi composta por um pórtico metálico e pela laje de reação do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES), do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG. Para a execução do ensaio de compressão foi utilizado um atuador

hidráulico MTS, que dispõe de uma célula de carga para a medição da intensidade das forças. A Figura 3-5 mostra o pórtico utilizado e, ao centro, o atuador.



Figura 3-5. Equipamento utilizado no ensaio de junta dupla.

### **3.2 *Push Test* Aço-Epóxi-Concreto**

Este ensaio também consistiu na aplicação de uma carga centrada no bloco de concreto, que tende a provocar um deslizamento da mesma sobre as chapas laterais, com o objetivo de avaliar o adesivo quanto a aplicação de reforço em estruturas de concreto com chapas coladas.

A Figura 3-6 esboça a disposição dos corpos de prova no experimento:



Figura 3-6. Disposição de um dos corpos de prova no experimento.

### 3.2.1 Materiais Utilizados

Os mesmos materiais descritos no item 3.1.1 foram utilizados com o acréscimo do concreto. A concretagem, que faz parte do trabalho de doutorado da professora Jacqueline Maria Flor, foi realizada no LAEES (Figura 3-7) e a caracterização do concreto no laboratório da Universidade Fundação Mineira de Fundação e Cultura (FUMEC).

Tabela 3-2. Propriedades do Concreto de acordo com o tempo de cura.

Materiais	Concreto (28 dias)	Concreto (56 dias)
Densidade ( $\text{Kg/m}^3$ )	2400	2400
Módulo de elasticidade transversal (MPa)	14700	15540
Módulo de Elasticidade (MPa)	35000	37000
Resistência à ruptura (MPa)	39,90	43,00
Resistência ao cisalhamento (MPa)	3,99	4,30





Figura 3-7. Moldes utilizados para concretagem.

### 3.2.2 Dimensão dos Corpos de Prova

Foram confeccionadas 16 chapas laterais (4 chapas foram aproveitados nos ensaios preliminares) de aço e 10 blocos de concreto. As chapas de aço (laterais) possuem dimensões de 12,5 mm de espessura, 100 mm de comprimento e 150 mm de altura; o cubo central de concreto possui dimensão de 150 mm de lado. A área colada e a espessura da camada adesiva foi de 210 cm<sup>2</sup> e 2 mm, respectivamente.

### 3.2.3 Preparação dos Corpos de Prova

Um corpo de prova foi constituído por 2 chapas de aço e um bloco de concreto, sendo as primeiras coladas ao cubo central. Foram montados 10 corpos de provas com o adesivo Sikadur 30.



(a)



(b)

Figura 3-8. (a) Disposição de um corpo de prova (b) Grampo utilizado na montagem do corpo de prova.

### 3.2.3.1 Preparo dos adesivos

O mesmo preparo utilizado no item 3.1.3.1.

### 3.2.3.2 Colagem

O mesmo procedimento empregado no item 3.1.3.2.

### 3.2.3.3 Tratamento Mínimo

O tratamento empregado na superfície do aço foi o mesmo do item 3.1.3.3.

No concreto somente a lixa foi empregada com o intuito de retirar a camada mais frágil presente na superfície. Depois, esta superfície foi limpa (retirada de poeira) com o compressor de ar.

### 3.2.4 Equipamento

O mesmo utilizado no item 3.1.4.

## 3.3 FTIR

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada para a identificação dos grupos químicos presentes no adesivo estrutural. As amostras do adesivo foram retiradas no mesmo dia da confecção dos corpos de prova de aço-epóxi-concreto. Então foi misturada ao brometo de potássio (KBr) e somente assim analisada no equipamento Termo Nicolet Nexus 470 FT-IR da *Thermo Electron Corporation* no Laboratório de Materiais Poliméricos da Engenharia de Materiais e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Os resultados são apresentados sob a forma de espectro de absorbância e a leitura do adesivo estrutural bicomponente foi realizada de 4000 a 500  $\text{cm}^{-1}$ .

## 3.4 DMA

Três corpos de prova do adesivo Sikadur 30 foram produzidos para análises de DMA. Eles foram moldados utilizando a norma ASTM D7028 (2008) com o intuito de determinar a temperatura de transição vítrea do adesivo. A Figura 3-9 ilustra o molde utilizado para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de DMA.



Figura 3-9. Molde utilizado para confecção dos corpos de prova do adesivo estrutural.

Depois de colocar um plástico fino sobre o molde, as cavidades do mesmo foram preenchidas pelo adesivo (preparado como no item “3.1.3.1 Preparo dos adesivos”). Por fim, o molde foi fechado e uma pressão utilizando um grampo foi estabelecida para garantir que o adesivo penetrasse nas cavidades do molde (Figura 3-10).



Figura 3-10. Processo de confecção dos corpos de prova para o DMA.

As amostras foram deixadas em cura ambiente (aproximadamente 30 °C). Passados então sete dias (conforme indicação do fabricante), até desmoldagem dos corpos de prova (Figura 3-11).

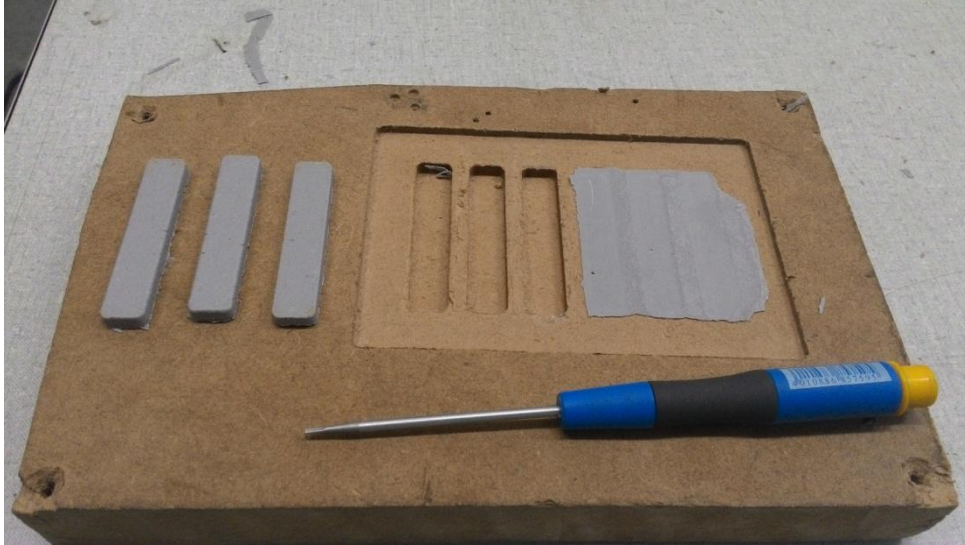


Figura 3-11. Retirada dos corpos de prova do molde.

Três amostras com dimensões de  $54,40 \times 11,15 \times 4,10$  mm foram obtidas e ensaiadas no dispositivo flexão de três pontos (foram engastados em todos os pontos), em análise oscilatória com 1 Hz de frequência e 0,05% de amplitude de deformação. As amostras foram aquecidas à 5 °C/min da temperatura de 30 °C até 96 °C. As análises foram realizadas no equipamento de DMA da marca EXSTAR, modelo SII 6000 (Figura 3-12) na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).



Figura 3-12. Equipamento de DMA.

# 4

## RESULTADOS E ANÁLISE

### 4.1 *Push Test* Aço-Epóxi

#### 4.1.1 Experimento

Este ensaio consistiu na aplicação de um carregamento na placa central utilizando-se o equipamento descrito no item 3.1.4 (Figura 3-1) com o objetivo de obter o comportamento do adesivo, principalmente com o intuito de se chegar na resistência ao cisalhamento do adesivo, localizado entre a placa central e as placas laterais. Com o corpo de prova devidamente ajustado e centralizado em relação ao atuador hidráulico e com os cabos devidamente ligados ao sistema de aquisição de dados, iniciou-se um carregamento sobre o corpo de prova, até a total separação de uma das placas laterais da placa central. A falha em cada corpo de prova ocorreu por três motivos distintos: rompimento da camada adesiva, destacamento da camada de óxido da superfície metálica e descolamento da camada de adesivo em relação à superfície metálica. Além da medida da carga, a deformação da camada adesiva foi estimada pela medida do deslocamento entre o atuador e a base de apoio do corpo de prova com o uso de dois transdutores de deslocamentos (DT's) ilustrados na Figura 3-5. A base de apoio foi constituída pela sobreposição de seis placas de aço: uma placa mais espessa (base para o corpo de prova) e cinco placas quadrangulares. A primeira foi apoiada sobre a segunda por uma camada de neoprene.

A carga foi aplicada em incrementos, de acordo com uma taxa de carregamento ou deslocamento imposta. O software utilizado para controlar o ensaio permitia programar a aplicação do carregamento. Assim, programou-se um algoritmo com duas fases distintas. Na primeira fase do ensaio, após a aplicação de uma pré-carga de 20 kN, foram executados 3 ciclos de carga e descarga (0,02 Hz de frequência) com controle de força, numa faixa entre 15 a 20 kN. Na segunda fase, aplicou-se um carregamento, com controle de deslocamentos de 0,01 mm/s, até a falha do corpo de prova. A aquisição de dados ocorreu em uma taxa de 2 Hz.

O ensaio foi dividido em duas séries. A primeira foi denominada “série A”, na qual os corpos de prova (A1 a A6) passaram pelo tratamento descrito no item 3.1.3.3. Já a segunda foi denominada “série B”, na qual os corpos de prova ou não passaram por nenhum tratamento (B1 e B2), ou ficaram com a superfície polida com o uso da lixa (B3 e B4), ou ainda passaram pelo tratamento mínimo, porém houve contaminação na colagem das placas por um produto de limpeza doméstico (B5 e B6). A série B foi proposta para reforçar a necessidade do tratamento de superfície adotado e representado pela série A. Os valores de tensão de cisalhamento máxima de ruptura para cada ensaio assim como o tipo de falha estão apresentados na Tabela 4-1. Essa tensão foi calculada pela razão entre a força de cisalhamento máxima e área de colagem.

Tabela 4-1. Resultados obtidos com os ensaios.

Modelo	Tensão de cisalhamento Máxima (MPa)	Tipo de Falha	Modelo	Tensão de cisalhamento Máxima (MPa)	Tipo de Falha
A1	28,52	Coesiva no adesivo	B1	7,64	Descolamento da camada de óxido
A2	22,14	Coesiva no adesivo	B2	13,30	Mista (Descolamento da camada de óxido e coesiva no adesivo)
A3	23,60	Coesiva no adesivo	B3	5,04	Adesiva
A4	21,00	Coesiva no adesivo	B4	6,78	Adesiva
A5	26,52	Coesiva no adesivo	B5	7,38	Adesiva
A6	19,70	Coesiva no adesivo	B6	9,50	Adesiva
Média	23,58	-	-	-	-
Coefficiente de Correlação	0,14				
Fabricante	18,00	-	-	-	-



Os resultados obtidos da série A foram satisfatórios. Em todos os modelos, os valores da tensão de cisalhamento máxima de ruptura superaram o valor fornecido pelo fabricante (Tabela 3-1). O valor encontrado pelo fabricante é por meio de um ensaio de tração numa junta simples. Esse ensaio é regulamentado pela norma DIN 53283, que assim como a ASTM D1002 apresentam algumas falhas: percebe-se na geometria do corpo de prova que existe um desalinhamento das forças de tração, mesmo quando são colocados “batentes para regular” a espessura nos locais de sobreposição; as juntas simples são realizadas com substratos considerados finos; é possível verificar que antes da ruptura do adesivo existe uma deformação significativa do substrato levando a problemas de não linearidade geométrica e material. Por esses motivos que a média da tensão de cisalhamento máxima de ruptura obtida nos resultados (o resultado é expresso pela tensão média de cisalhamento a que o adesivo é submetido quando ocorre a ruptura (Equação (2.18))) dificilmente tem alguma relevância prática, porque não permite determinar nenhuma propriedade intrínseca do adesivo ou da própria junta. Ainda assim esse ensaio pode ser utilizado como método comparativo para o estudo de adesivos (ASTM D1002, 2010; ASTM D4986, 2016; da SILVA *et al.*, 2007).

Observou-se, nestes modelos, que o modo de falha foi coesiva no adesivo (Figura 4-1), ou seja, a adesão foi realizada com sucesso. O tipo de fratura em polímeros termorrígidos é frágil visto que ligações covalentes do reticulado são quebradas durante a fratura. Isto pôde ser confirmado pelo gráfico de força por deslizamento relativo ilustrado na Figura 4-2. Neste gráfico também foi possível notar que o deslocamento da camada adesiva foi entre 0,3 e 0,4 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-1. Modos de falha: (a) Modelo A1 (b) Modelo A2 (c) Modelo A3.

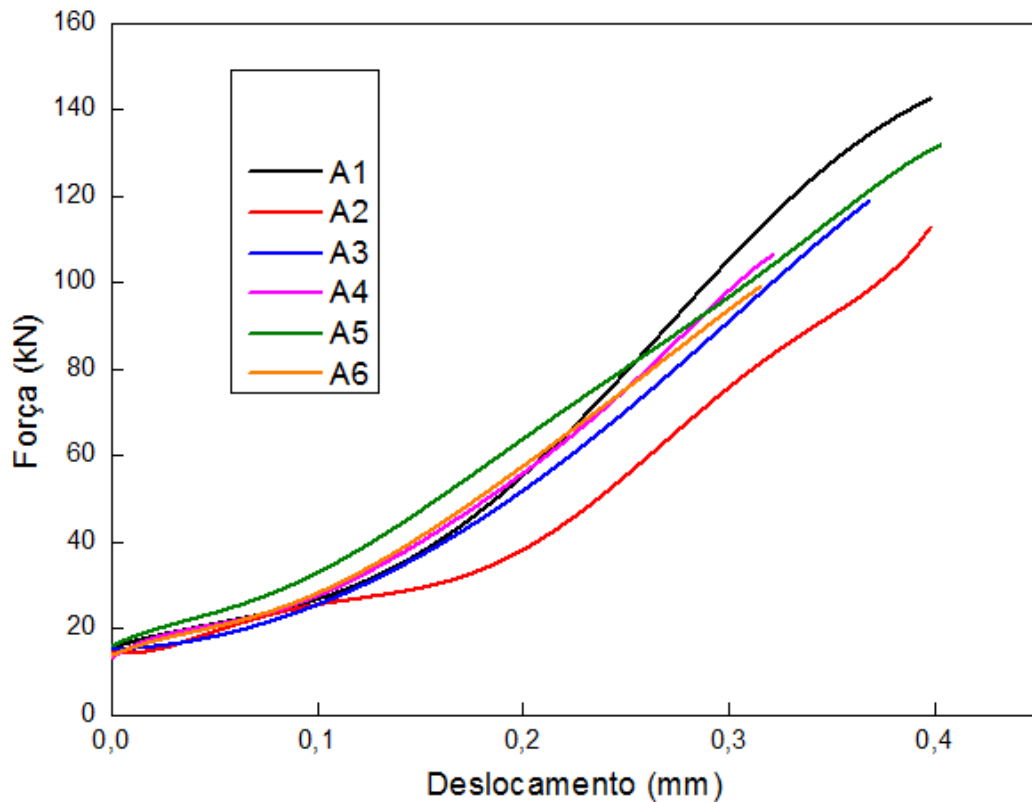
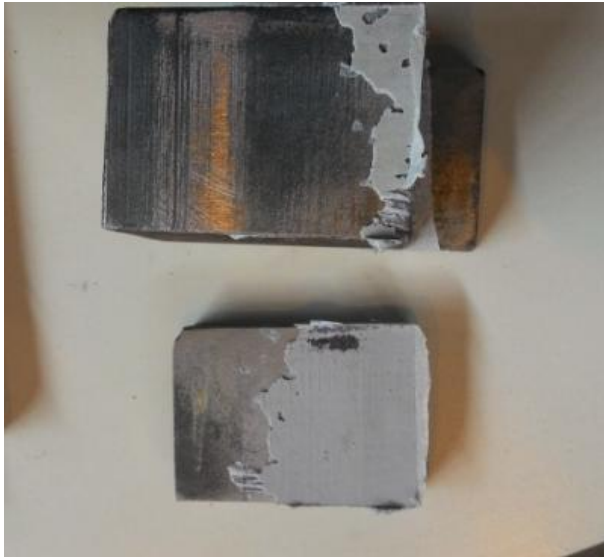


Figura 4-2. Gráfico Força por Deslocamento.

Os resultados obtidos com os corpos de prova da série B confirmaram que é necessário um tratamento adequado na superfície do metal. Os modelos B1 e B2 foram colados sem qualquer tratamento (nem a camada de óxido formada foi retirada da superfície do aço). Assim, a falha ocorreu na camada de óxido presente na superfície (Figura 4-3(a)). O modelo B2 chegou a alcançar 13,30 MPa porque houve uma parcela de falha coesiva no adesivo. Já os resultados dos modelos B2 e B3 foram os menores porque a superfície desses substratos foram polidas. Assim, a ancoragem mecânica e a quantidade de interações entre o adesivo e o substrato não foram suficientes. Com isso a falha ocorrida foi adesiva como ilustrado na Figura 4-3(b). O mesmo tipo de falha (Figura 4-3(c)) ocorreu nos modelos B5 e B6 porque foi adicionado um contaminante (produto de limpeza) nas superfícies preparadas para colagem. Este produto impediu interações entre o adesivo e o substrato.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-3. Modos de falha: (a) Modelo B1 (b) Modelo B3 (c) Modelo B5.

## 4.2 *Push Test* Concreto-Epóxi-Aço

### 4.2.1 Experimento

O ensaio desta junta também consistiu na aplicação de um carregamento na placa central (bloco de concreto) utilizando-se o mesmo equipamento do experimento anterior, mas desta vez, no cubo central de concreto (Figura 3-6). Os ajustes, as aquisições de dados e o controle de carga deste experimento foram os mesmos do experimento descrito no item 4.1.1. Para este tipo de junta, houve a inserção de duas cantoneiras de aço, entre a chapa de concreto e o atuador, com o objetivo de concentrar as tensões próximas da junta (Figura 4-4).



Figura 4-4. Ensaio do modelo D1, a seta amarela indica a presença de uma cantoneira de aço para concentrar a tensão na região de colagem.

Para este tipo de junta, a falha ocorreu no concreto, ou seja, coesiva no substrato. Além da medida da carga de ruptura no concreto, a rigidez da junta foi estimada pela medida do deslocamento entre o atuador e a base de apoio do corpo de prova com o uso de dois transdutores de deslocamentos (DT's).

Antes da realização do ensaio do corpo de prova propriamente dito, um ensaio preliminar foi executado para testar a colagem e a espessura da camada adesiva: foram testados dois corpos de prova por ensaio até a definição da configuração e do tamanho da camada adesiva ideal. Dois ensaios foram realizados visto que o tipo de falha ocorrida nos corpos de prova do primeiro ensaio não foi o esperado. Estes ensaios foram realizados depois de 28 dias da cura do concreto.

Os ensaios foram realizados em dois dias, sempre oito dias após a colagem. No primeiro dia dois corpos de prova (C1 e C2) que passaram pelo tratamento descrito no item 3.2.3.3 foram ensaiados. A espessura de colagem adotada foi de 1 mm e a área colada de 200 cm<sup>2</sup> como ilustrado na Figura 4-5(a). No segundo dia mais 2 corpos de prova (D1 e D2) foram ensaiados. Ambos também passaram por tal tratamento. Quanto à colagem, não houve dificuldade, porém no corpo de prova D1 houve uma pequena excentricidade em uma das placas quando o grampo foi utilizado para fixação sob pressão entre os componentes. A espessura de colagem adotada, neste caso, foi de 2 mm e a área colada de 210 cm<sup>2</sup>, como ilustrado na Figura 4-5(b).



(a)



(b)

Figura 4-5. Disposição dos corpos de prova (a) C1 e C2 e (b) D1 e D2.

Os valores de tensão de cisalhamento máxima na camada adesiva assim como o tipo de falha para cada modelo estão apresentados na Tabela 4-2. Todos os valores encontrados para tensão de cisalhamento foram coerentes com os ensaios de caracterização do concreto apresentados na Tabela 3-2. O valor médio de 3,93 MPa equivale a 10% do valor da tensão de ruptura obtida pelo ensaio de caracterização.

Tabela 4-2. Resultados obtidos com os ensaios preliminares.

Modelo	Tensão de cisalhamento (MPa)	Espessura da camada adesiva (mm)	Área colada (cm <sup>2</sup> )	Tipo de falha
C1	4,02	1	200	Mista: adesiva e coesiva no concreto
C2	4,55	1	200	Mista: adesiva e coesiva no concreto
D1	3,35	2	210	Coesiva no concreto
D2	3,82	2	210	Coesiva no concreto

Apesar do valor da tensão de cisalhamento dos modelos C, a ruptura ocorrida foi mista (Figura 4-6). A falha não ocorreu somente no concreto, pois houve uma parcela de descolamento do adesivo em relação ao aço ou em relação ao concreto como indicam as setas na Figura 4-7(a) e do adesivo colado na superfície do concreto como apresentado na Figura 4-7(b). Estes resultados indicam que não houve penetração e interação suficientes entre o adesivo e os substratos, principalmente entre o adesivo e o concreto, provavelmente devido a espessura adotada de 1 mm.





(a)



(b)

Figura 4-6. Modos de falha: (a) Modelo C1 (b) Modelo C2.



(a)



(b)

Figura 4-7. (a) Falha mista: coesiva no concreto e por descolamento do concreto (b) Falha mista: coesiva no concreto e por descolamento da chapa de aço.

No modelo C2 também observou-se uma trinca em todo o concreto (Figura 4-7(b)). A falha no modelo C2, assim como no modelo C1, ocorreu no concreto e por descolamento. Entretanto, o adesivo também se descolou do aço como mostrado na Figura 4-7(b).

Depois deste ensaio concluiu-se que seria necessário um aumento da camada adesiva para que o tipo de falha somente fosse no concreto. A configuração dos corpos de prova também foi modificada (Figura 4-5(b)) para que o comprimento da placa de aço fosse igual ao lado do

concreto. Assim, passou-se a ter uma espessura da camada adesiva de 2 mm, comprimento de colagem de 15 cm e área colada de 210 cm<sup>2</sup>.

Assim, com a nova configuração, no modelo D1 ocorreu uma falha no concreto, na direção das placas inseridas para concentrar a tensão na ligação entre o aço e o concreto. Este tipo de falha aconteceu provavelmente devido à excentricidade do corpo de prova: as duas placas laterais não ficaram totalmente paralelas entre si. Como houve um aumento da camada adesiva, a interação entre o adesivo e os substratos foi melhorada. Assim, a acomodação deste corpo de prova foi acompanhada de uma tensão maior do que os outros CP's e a falha se desenvolveu numa região diferente dos modelos anteriores. A Figura 4-8 ilustra o ensaio assim como a falha do modelo D1.



Figura 4-8. Falha na direção das placas adicionada (Modelo D1).

No modelo D2 a falha também ocorreu no concreto (Figura 4-9), porém na região perto da junta. Este resultado apresentou o tipo de falha esperada para os ensaios desenvolvidos. Neste

modelo, não houve excentricidade das placas, o que proporcionou a diferença nos resultados em relação ao modelo D1.

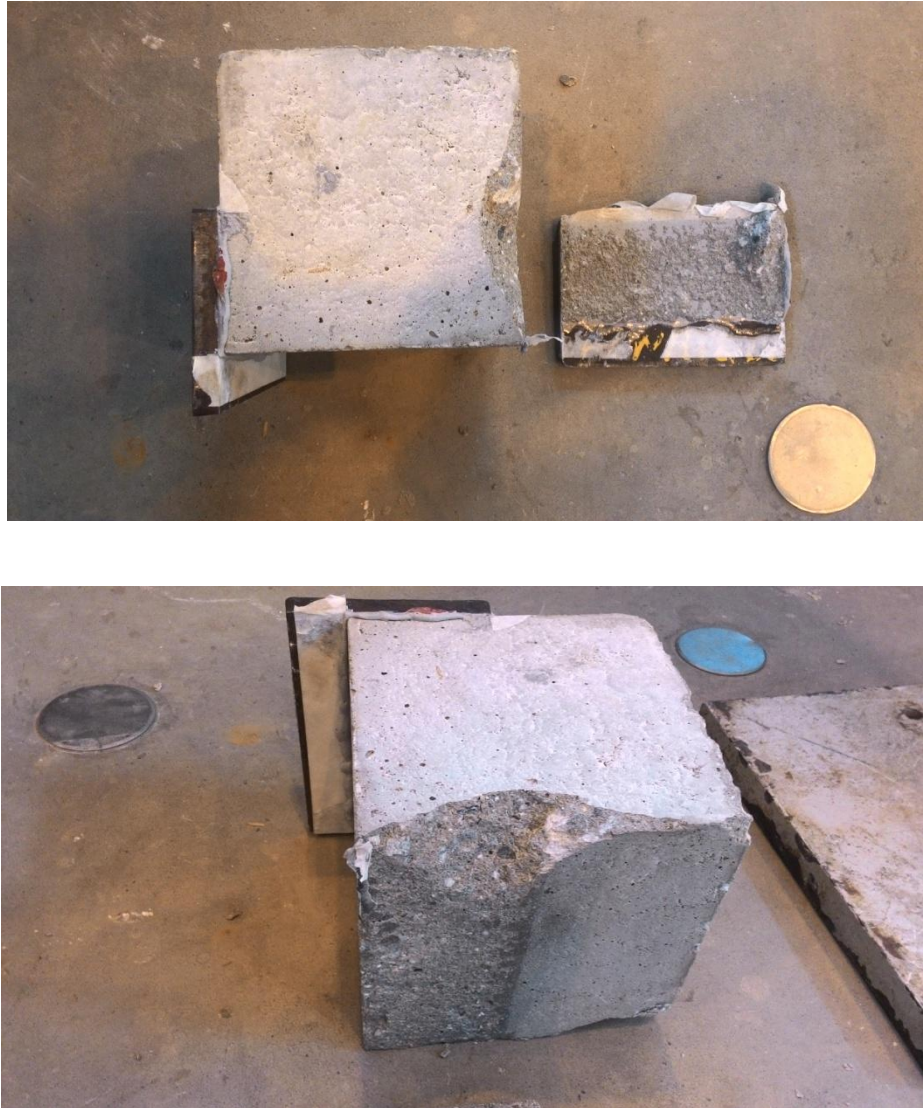


Figura 4-9. Modo de falha para o modelo D2

A Figura 4-10 contém o gráfico força por deslocamento de todas as amostras. Nota-se que os corpos de prova de mesma área colada apresentaram rigidez semelhante. E os de maior rigidez possuem maior carga de ruptura e menor deslocamento. Nota-se também que, entre 0 e 0,2 mm, o corpo de prova D1 precisou de uma carga superior (em relação aos demais corpos de prova) para se acomodar devido a imperfeições.

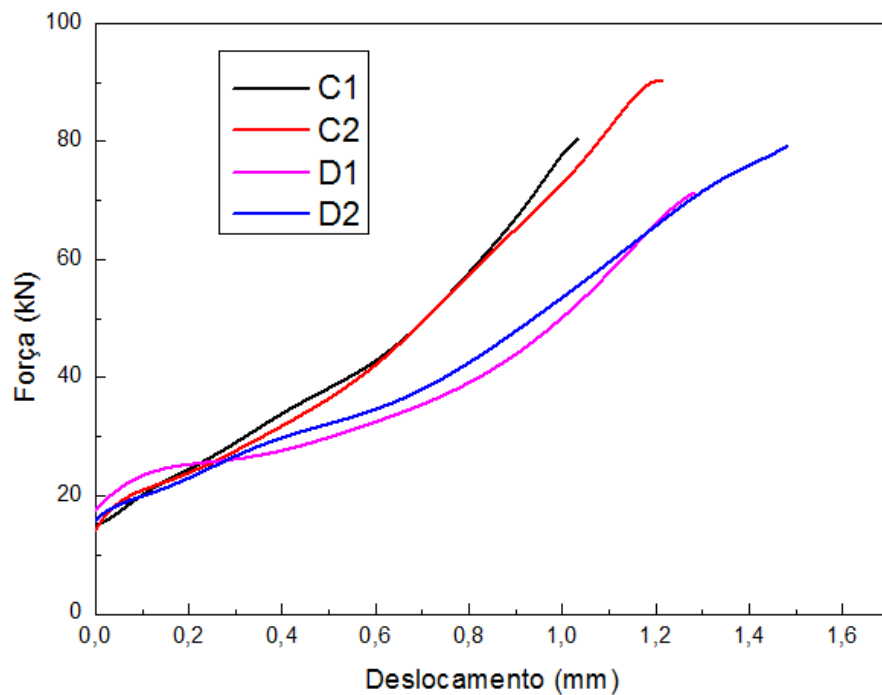


Figura 4-10. Gráfico Força por Deslocamento das amostras

Devido ao sucesso do modelo D2 optamos em reproduzir mais modelos com estas características. Um cuidado maior foi dado em relação ao posicionamento das placas para que não houvesse excentricidade entre as mesmas. Assim o modelo adotado é o descrito no item 3.2.3. Este ensaio foi realizado depois de 56 dias de cura do concreto.

O ensaio do modelo propriamente dito foi denominado de “série E” e os valores de tensão de cisalhamento máxima na camada adesiva para cada modelo assim como o tipo de falha estão apresentados na Tabela 4-3.

A Figura 4-11 apresenta um gráfico de força por deslocamento, também das amostras da “série E”.

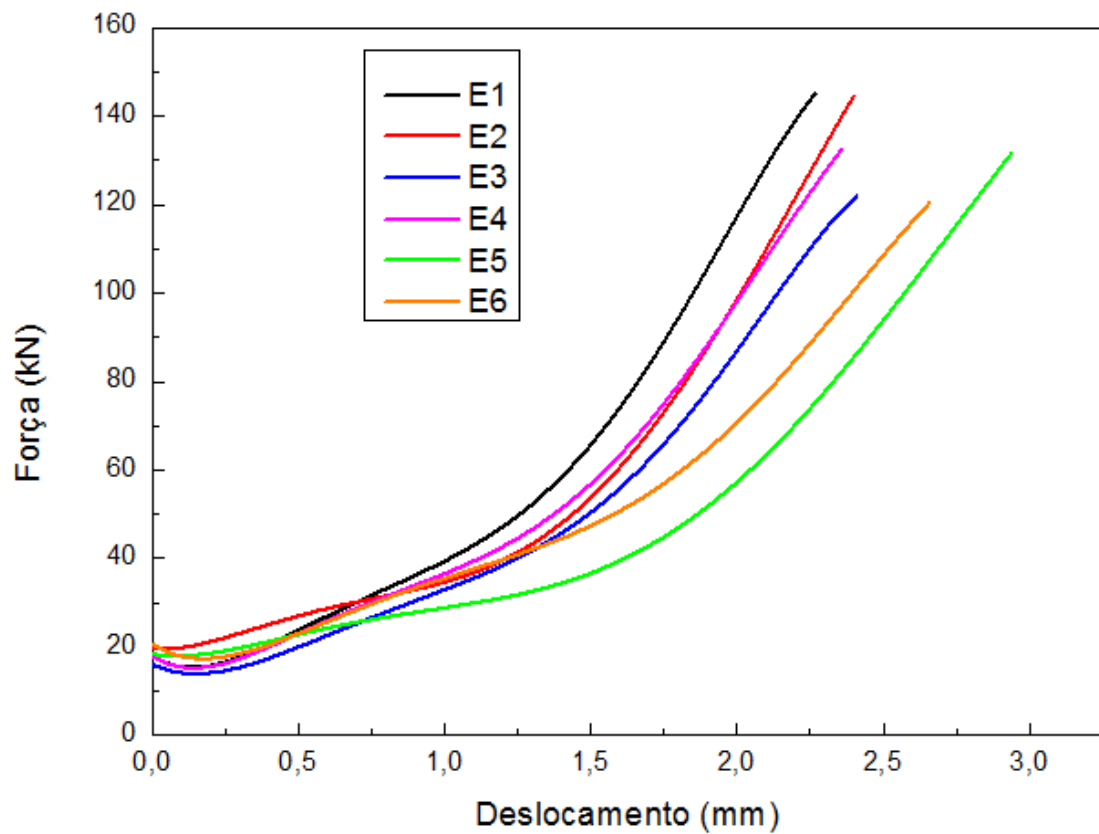


Figura 4-11. Gráfico Força por Deslocamento da “série” E.

Tabela 4-3. Resultados obtidos com os ensaios finais.

Modelo	Tensão máxima de ruptura (MPa)	Espessura da camada adesiva (mm)	Tipo de falha
E1	6,81	2	Coesiva no concreto
E2	6,76	2	Coesiva no concreto
E3	5,81	2	Coesiva no concreto

E4	6,38	2	Coesiva no concreto
E5	6,19	2	Coesiva no concreto
E6	5,71	2	Coesiva no concreto
Média	6,28	-	-
Coefficiente de Correlação	0,07		

Os resultados obtidos com este ensaio confirmaram que a disposição e o tamanho da camada adesiva escolhidos foram satisfatórios. Todos os corpos de provas apresentaram uma tensão de cisalhamento maior do que o valor da resistência ao cisalhamento do concreto (a razão entre a média pela resistência ao cisalhamento do concreto de 1,46 maior). Além disso, todos os tipos de falhas foram coesiva no substrato. Isso porque a interação entre o adesivo e os substratos são mais intensas do que as interações do próprio concreto. A Figura 4-12 ilustra o tipo de falha encontrada em cada corpo de prova.



(a)



(b)



(c)



(d)





(e)



(f)

Figura 4-12. Modos de falha dos CP's de (a) E1 até (f) E6.

Depois dos ensaios as chapas laterais resultantes das juntas foram removidas utilizando-se uma marreta (Figura 4-13). Como dito anteriormente, este tipo de adesivo é resistente ao cisalhamento e não a clivagem. Observou-se que o tipo de falha foi o mesmo encontrado na falha por cisalhamento, ou seja, coesiva no concreto, para todos os corpos de prova de E1 a E6.



Figura 4-13. Falha obtida por clivagem.

### 4.3 Modelo Analítico

Um algoritmo foi escrito no programa Matlab versão 2013 para simular as tensões na camada adesiva, segundo o modelo de Tsai *et al.* (1998), das duas juntas estudadas em cada modelo. A forma da distribuição de tensão nas Figuras 4-14 e 4-15 (obtida pela Equação (2.15) e utilizando-se propriedades da Tabela 3-1 e a tensões médias obtidas nas Tabelas 4-1 e 4-3) foi explicada pelo conceito de cisalhamento diferencial no item 2.7.2.5.1. A assimetria do nível de tensão em relação ao comprimento de colagem apresentada nas Figuras 4-14 e 4-15 foram atribuídas às diferenças entre as dimensões e as propriedades mecânicas dos substratos. Conforme pode ser observado pela influência dos parâmetros na Equação (2.11).

A Figura 4-14, por exemplo, ilustra uma assimetria nas tensões de cisalhamento nas duas extremidades da junta. A tensão na extremidade positiva do comprimento de colagem foi menor devido à maior rigidez do aderente central e, conseqüentemente, à menor deformação apresentada. Para que houvesse simetria, a chapa central de aço deveria ser da mesma espessura das chapas laterais.

Já a Figura 4-15 a assimetria foi atenuada pela menor rigidez do concreto, porém maior espessura em relação ao aço.

Verifica-se que, em ambas as juntas, os maiores níveis de tensão ficaram localizados nas extremidades da sobreposição (comprimento de colagem), por outro lado o centro da sobreposição contribuiu pouco para a resistência da junta.

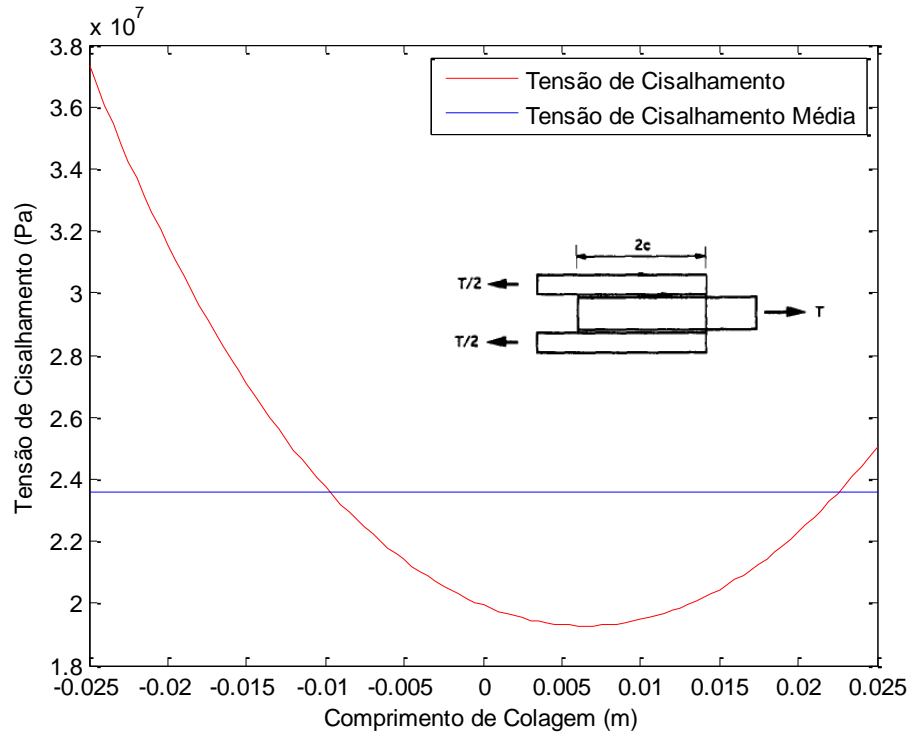


Figura 4-14. Tensão de Cisalhamento ao longo do comprimento de colagem para a junta aço/epóxi/aço.

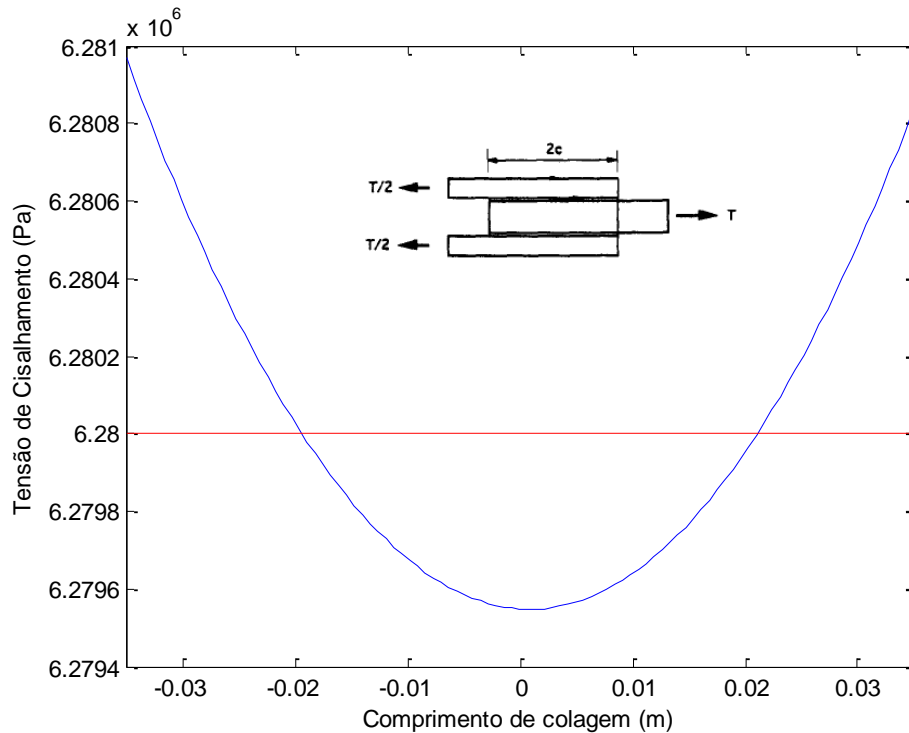


Figura 4-15. Tensão de Cisalhamento ao longo do comprimento de colagem para a junta concreto/epóxi/aço.

#### 4.4 FTIR

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier possibilitou a identificação dos principais grupos funcionais presentes no adesivo.

As Figuras 4-16 e 4-17 mostram o espectro de FTIR do adesivo Sikadur 30. Os picos ou bandas foram identificados de acordo com as referências sobre FTIR de adesivos a base de epóxi encontrados na literatura (KARAYANNIDOU *et al.*, 2006; NIKOLIC *et al.*, 2010; ROMÃO *et al.*, 2004; VETTEGREN' *et al.*, 2014; YOON *et al.*, 2008). Um dos picos mais importante é o referente ao grupo epóxi em  $915\text{ cm}^{-1}$  porque confirma que este adesivo pertence à família dos adesivos epóxi. É importante salientar que é através deste grupo que as ligações cruzadas são formadas (KARAYANNIDOU *et al.*, 2006; NIKOLIC *et al.*, 2010). A absorção em  $1608\text{ cm}^{-1}$  é devido à vibração da amina primária ( $-\text{NH}_2$ ) presente no endurecedor. Esta amina também estaria presente em  $3369$ ,  $3298$  e  $3174\text{ cm}^{-1}$  caso o FTIR fosse realizado antes da reação de cura. Como o adesivo já estava curado, estes três picos resultaram num pico forte característico do grupo hidroxila (OH) em  $3362\text{ cm}^{-1}$ . Este pico juntamente com o pico em  $1109\text{ cm}^{-1}$  característico do grupo (CN) confirmam a quebra do anel epóxi e, conseqüentemente, a formação das ligações cruzadas (KARAYANNIDOU *et al.*, 2006; NIKOLIC *et al.*, 2010). O forte pico em  $2920\text{ cm}^{-1}$  é devido à vibração por estiramento dos grupos ( $-\text{CH}_2$ ). Os grupos éteres presentes na molécula de DGEBA são caracterizados por duas bandas de absorção em  $1250$  e  $1034\text{ cm}^{-1}$ .

A forte banda em  $1250\text{ cm}^{-1}$  refere-se ao estiramento de um anel aromático/carbono/oxigênio, enquanto a banda em  $1034\text{ cm}^{-1}$  resulta da vibração por estiramento de um carbono alifático/oxigênio ( $-\text{O}-\text{CH}_2-$ ). Finalmente, as bandas em  $1510$  e  $833\text{ cm}^{-1}$  são característicos de grupos contendo anéis aromáticos.

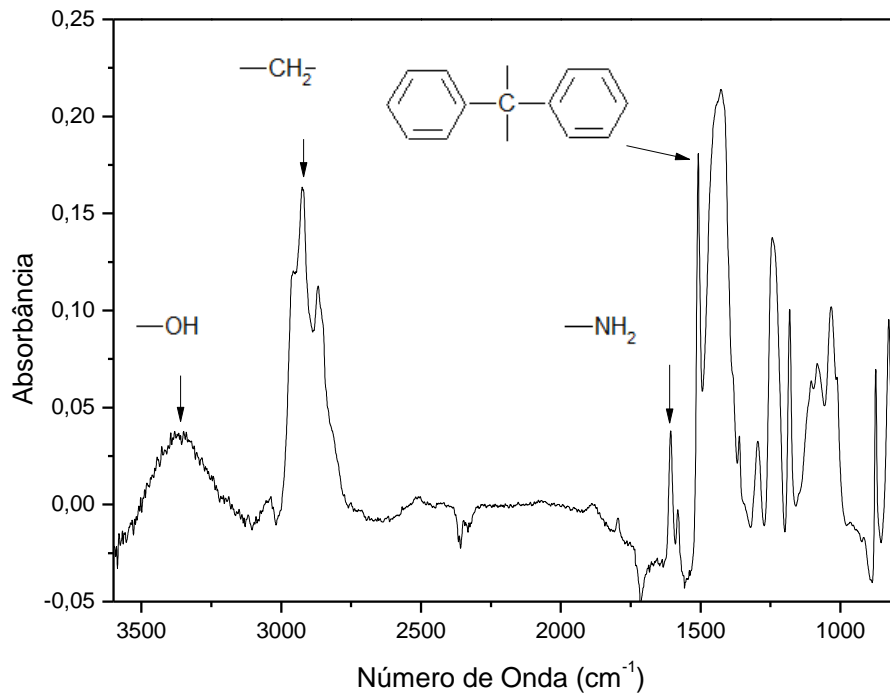


Figura 4-16. Espectro FTIR do adesivo Sikadur 30.

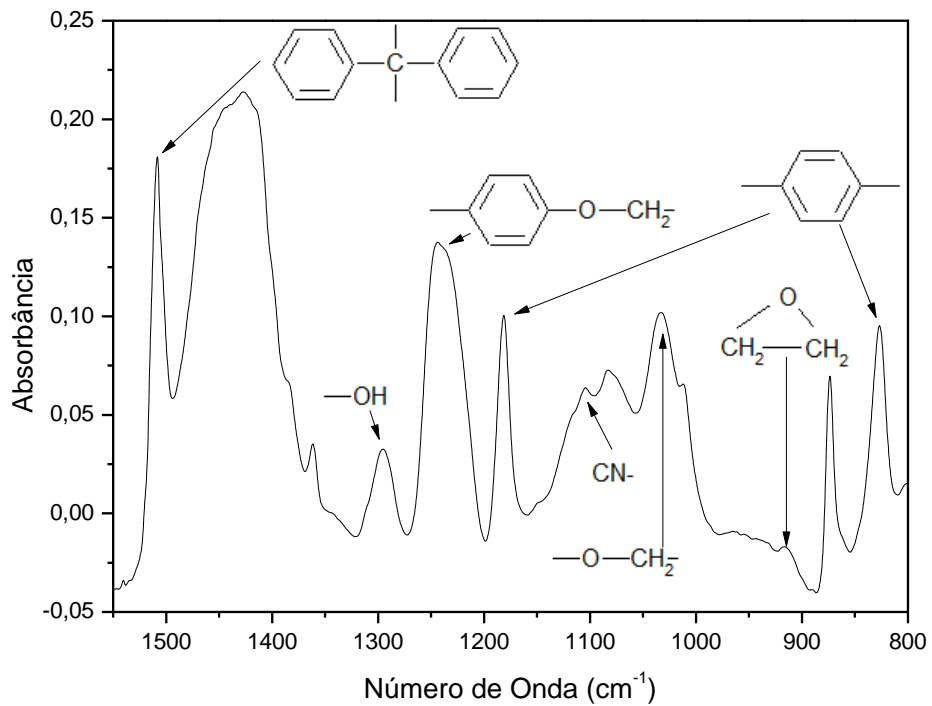


Figura 4-17. Espectro FTIR do adesivo Sikadur 30 enfatizando de 1500 a 800  $\text{cm}^{-1}$ .

Com o adesivo caracterizado pode-se relacionar os grupos funcionais encontrados com a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e com a interação do adesivo com o aço e com o concreto.

No caso da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) há alguns fatores que determinam o seu valor e que foram identificados pelo infravermelho, como: as ligações cruzadas, os anéis aromáticos e a presença de grupos polares. Todos estes fatores limitam a flexibilidade das cadeias e, conseqüentemente, do retículo com o aumento da temperatura e até mesmo com aplicação de tensões sobre o mesmo.

A interação entre o adesivo e os substratos por adsorção também pode ser relacionada à presença dos grupos funcionais, principalmente os polares. Tais grupos são os responsáveis pelas interações de van der Waals ou interações de hidrogênio em ambos os substratos (aço e concreto). No caso da interação entre o adesivo e o aço ainda há ligações químicas envolvendo grupos CN e o Fe (VETTEGREN' *et al.*, 2014). Observando os resultados dos ensaios realizados neste trabalho, e sendo este tipo de ligação mais forte do que as interações intermoleculares, e juntamente com o intertravamento mecânico podem explicar a falha coesiva no adesivo nos ensaios mecânicos.

#### 4.5 DMA

Os resultados obtidos através do DMA (análise dinâmico mecânica) estão representados em forma de gráfico pelas Figuras 4-18, 4-19 e 4-20. Nestas figuras foram apresentadas as curvas de módulo de armazenamento ( $E'$ ), módulo de perda ( $E''$ ) e o  $\tan\delta$  (ou  $\tan\Delta$ ). Segundo a norma ASTM D7028 (ASTM D7028, 2008) a temperatura de transição vítrea pode ser obtida pela temperatura de *onset* na curva de  $E'$  (temperatura na qual ocorre cruzamento do prolongamento da linha base com o prolongamento do ramo do pico), como ilustrado nas Figuras 4-18, 4-19 e 4-20. Há outras maneiras de realizar o cálculo da temperatura de transição vítrea, utilizando o módulo de perda ou ainda pela  $\tan\Delta$ , porém optou-se pela *onset* da curva  $E'$  por ser a mais conservadora.

Os ensaios foram realizados em três amostras confeccionadas como descrito na seção 3.4. A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) encontrada foi de  $49,50 \pm 1,25$  °C.

Esse resultado indica que, para temperaturas abaixo de 49,5 °C o adesivo não possui energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia (principalmente as cadeias que

não estão conectadas por ligação cruzada) em relação ao retículo por mudanças conformacionais. O polímero está no estado vítreo que é apresentado como duro, rígido e quebradiço. Já para temperaturas acima de 49,5 °C, as cadeias apresentam mobilidade elevada que favorecem deslocamentos quando da ação de carregamento mecânico, tornando o material com características mais viscosas, típicas de materiais fluidos, e menos elásticas, típicas de materiais sólidos. A degradação das propriedades mecânicas para níveis elevados de temperatura é função também da estrutura do polímero.

Essa temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) obtida revela que o adesivo possui certa limitação térmica, ou seja, suas propriedades mecânicas são estáveis até atingir a temperatura de 49,5 C. O que impossibilita a utilização deste adesivo em temperaturas extremas como em situações de incêndio, sem a falha do material por variação da temperatura.

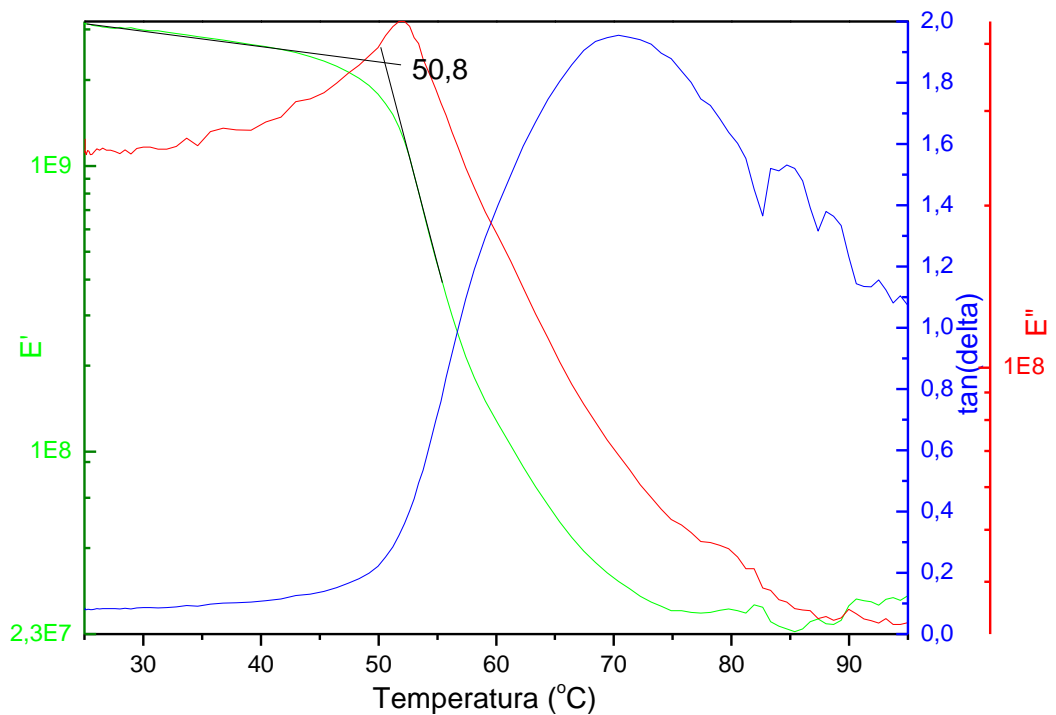


Figura 4-18. Curva de DMA para amostra 1.

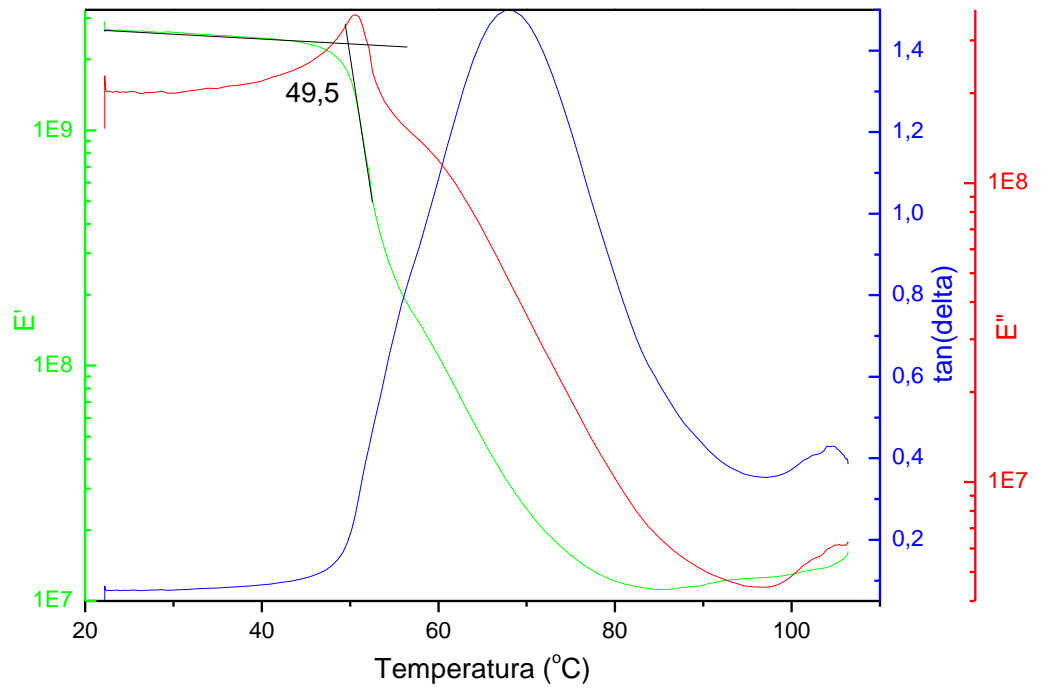


Figura 4-19. Curva de DMA para amostra 2.

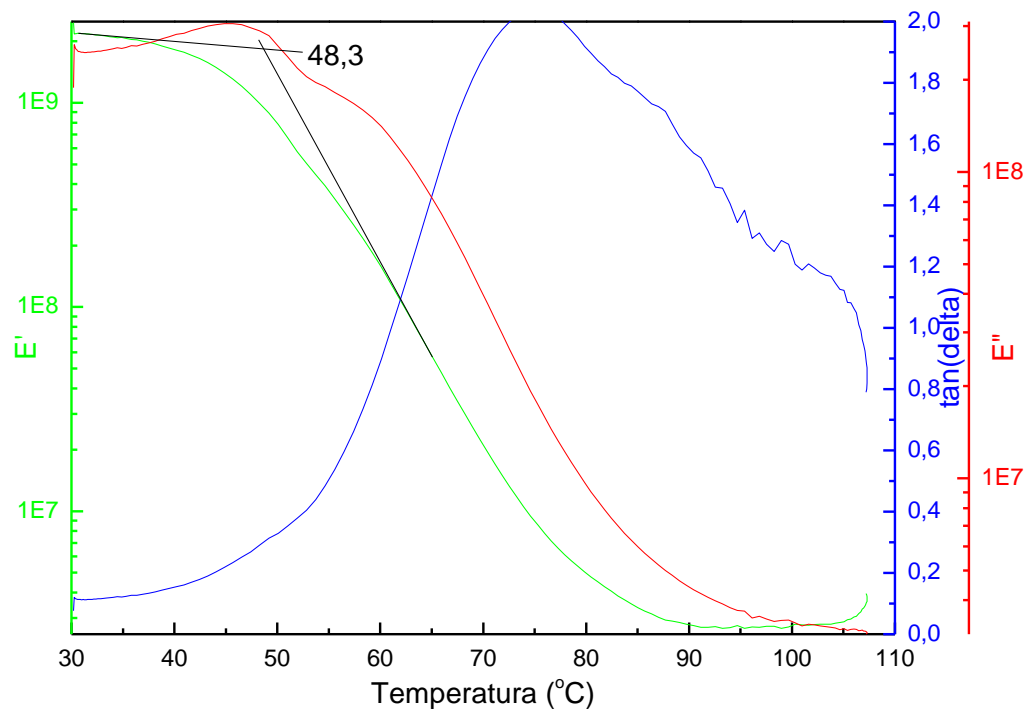


Figura 4-20. Curva de DMA para amostra 3.



# 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Este estudo foi produzido para analisar o comportamento mecânico de um adesivo estrutural em juntas de aço e concreto. Os resultados experimentais apresentaram informações qualitativas e quantitativas. Foi possível observar que as amostras apresentaram diferentes tipos de falhas. Para determinar a importância dos adesivos em uma junta adesivada foi necessário conhecer as propriedades mecânicas e químicas do adesivo utilizado.

É importante notar que o tratamento superficial tem influência significativa no comportamento das juntas coladas. Os corpos de prova que utilizaram o tratamento mínimo (limpeza-abrasão-limpeza) para a junta de aço/epóxi/aço atenderam as expectativas: a falha obtida foi coesiva no adesivo e os valores da tensão de cisalhamento máxima foram maiores que o valor de 18 MPa fornecido pelo fabricante. O sucesso deste tratamento se deve a eliminação da camada de óxido e a rugosidade introduzida pelo esmeril na superfície colada.

Com isso, o tratamento foi utilizado também nas juntas de concreto-epóxi-aço e provou também ser eficiente: a tensão de cisalhamento máxima foi maior do que a resistência ao cisalhamento do concreto, e a falha ocorrida nos corpos de prova foi coesiva no concreto.

O adesivo deve ser empregado sob cisalhamento, já que para outros tipos de solicitações de esforços, principalmente sob clivagem, a junta adesivada não suporta uma quantidade significativa de carga.

O modelo analítico foi empregado para avaliar a tensão na camada adesiva. Verificou-se que, em ambas as juntas, os maiores níveis de tensão foram localizados nas extremidades da

sobreposição (comprimento de colagem), por outro lado o centro da sobreposição contribuiu pouco para a resistência da junta.

A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier identificou os principais grupos funcionais presentes no adesivo. Tais grupos são responsáveis pela adsorção e resistência ao cisalhamento do adesivo.

A análise mecânica dinâmica determinou a temperatura de trabalho do adesivo (49,5 °C) quando processado (curado) a 30 °C.

## **5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros**

Seguem algumas sugestões:

Avaliação da resistência ao cisalhamento em temperaturas maiores do que a temperatura de transição vítrea do adesivo;

Utilizar correlação de imagem digital para o estudo da deformação de um adesivo estrutural;

Comportamento a fadiga de juntas coladas com adesivos estruturais;

Avaliação da resistência mecânica, após névoa salina, para simular situações adversas;

Simulação numérica de juntas duplas adesivadas assim como o impacto de cargas dinâmicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3M. *3M Industrial Adhesives and Tapes: Design & Production Guide*. St. Paul: 3M, January, 2016, 97 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 8800. Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

ADAMS, R. D.; WAKE, W. C. *Adhesive Joints in Engineering*. 1<sup>st</sup> ed. England: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. 309 p.

ANDRADE, H. P. C.; DINIZ, M. F.; AZEVEDO, M. F. P.; CASSU, F. N.; LOURENÇO, V. L.; DUTRA, R. C. L. Comportamento de cura de adesivo epoxídico contendo grupo mercaptana avaliado por espectroscopia no infravermelho (MIR/NIR) e calorimetria exploratória diferencial (DSC). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, p. 359–365, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D907. *Standard Terminology of Adhesives*. West Conshohocken, Pensilvânia, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D1002. *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. West Conshohocken, Pensilvânia, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D2651. *Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding*. West Conshohocken, Pensilvânia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D4896. *Standard Guide for Use of Adhesive-Bonded Single Lap-Joint Specimen Test*. West Conshohocken, Pensilvânia, 2016. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM D7028. *Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature By Dynamic Mechanical Analysis*. West Conshohocken, Pensilvânia, 2007.

BARNES, R. A., Mays, G. C. The transfer of stress through a steel to concrete adhesive bond. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 21, pp. 492–502, 2001.

BARTON, J. M. The application of differential scanning calorimetry (DSC) to the study of epoxy resin curing reactions. *Advances in Polymer Science*, v. 72, pp. 111–154, 2005.

BERTHET, J. F., YURTDAS, I., DELMAS, Y., LI, A. Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, v. 31, pp. 75–83, 2011.

CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 724 p.

CANEVAROLO, S. V. *Ciência dos polímeros*. 2ª Ed. São Paulo: ArtLiber, 2007. 280 p.

CANEVAROLO, S. V. *Técnicas de Caracterização de Polímeros*. 1ª Ed. São Paulo: ArtLiber, 2004. 448 p.

CHENG, S. Z. D. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Applications to Polymers and Plastics*. Elsevier Science, 2002. 858 p.

da COSTA, B. S. L. *Comportamento Mecânico de Juntas Coladas em Concreto Polimérico*. 2011. 112 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

da SILVA, A. H. M. da F. T. *Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas*. 2007. 85 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

da SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. *Juntas adesivas estruturais*. 1ª ed. Porto: Publindústria, 2007. 358 p.

DAWKINS, J. *Developments in Polymer Characterization*. Springer Science & Business Media, 1986. 343 p.

dos SANTOS, J. D. *Estudo experimental da resistência mecânica de junções adesivas*. 2007. 142 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

EBNESAJJAD, S. *Adhesives Technology Handbook*. 2ª ed. New York: William Andrew Inc, 2008. 363p.

EBNESAJJAD, S.; EBNESAJJAD, C. F. *Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding*. 1ª ed. New York: William Andrew Publishing, 2006. 260p.

ESTEVEZ, J. L. *Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais*. 1990. 112 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto.

FEICA. The European Adhesive & Sealant Industry – A Global Perspective. *IDS-Packaging*, Düsseldorf, 11 de janeiro de 2005. Disponível em: <[http://www.idspackaging.com/common/paper/Paper\\_164/Europ Adh Seal Ind - Global Persp - Jan 2005.pdf](http://www.idspackaging.com/common/paper/Paper_164/Europ Adh Seal Ind - Global Persp - Jan 2005.pdf)>. Acessado em 10 de janeiro de 2015.

FERREIRA, A. M. V. *O Emprego do Método Technology Roadmapping em Adesivos e Selantes Aplicados à Construção Civil*. Tese de Doutorado. 2010. 331 p. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FURTADO, M. Adesivos: Mercado em potencial mantém ritmo de investimentos apesar da redução dos lucros. *QUÍMICA E DERIVADOS*, 4 de maio de 2001. Disponível em: <<http://www.quimica.com.br/pquimica/24000/adesivos-mercado-em-potencial-mantem-ritmo-de-investimentos-apesar-da-reducao-dos-lucros/2/>>. Acessado em 11 de janeiro de 2015.

HOEHNE, J. L. *Estudo da utilização de adesivo estrutural para redução de pontos de solda nas partes móveis de veículos e correlação da estrutura do compósito metal/recobrimento/adesivo formado com seu desempenho mecânico*. Dissertação de Mestrado. 2013. 153 p. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

JABBAR, A. S. A., ALAM, M. A. and MUSTAPHA, K. N. An Experimental Study on Debonding of Steel Plates Bonded to Concrete in the Presence of Embedded Shear Connectors. *The 3rd National Graduate Conference (NatGrad2015)*, pp. 214–220, 2015.

KARAYANNIDOU, E. G., ACHILIAS, D. S., SIDERIDOU, I. D. Cure kinetics of epoxy-amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic. *European Polymer Journal*, v. 42, p. 3311–3323, 2006.

KINLOCH, A. J. The science of adhesion - Part 1 Surface and interfacial aspects. *Journal of Materials Science*, v. 15, p. 2141–2166, 1980.

KWON, G; HUNGERFORD, B.; KAYIR, H.; SCHAAP, B.; JU, Y. K.; KLINGNER, R.; ENGELHARDT, M. *Strengthening Existing Non-Composite Steel Bridge Girders Using Post-Installed Shear Connectors*. Technical Report. 2007. 126 p. University of Texas, Texas.

L'HERMITE, R. Use of bonding techniques for reinforcing concrete and masonry structures. *Materiaux et Construction*, v. 10, p. 85–89, 1977.

LAGE, M. M. *Estudos de Monocristais de Trifluoretos de Ítrio e de Lantanídeos e Tetrafluoretos de Sódio e Lantanídeos por Espectroscopias Raman e Infravermelho*. Tese de Doutorado. 2004. 92 p. Instituto de Ciências Exatas – Departamento de Física, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LOHMAN, R. J. Global Adhesive Growth. *The ChemQuest Group*, Abril de 2008. Disponível em <[http://www.chemquest.com/PDF-files/Global\\_Adhesive\\_Growth.pdf](http://www.chemquest.com/PDF-files/Global_Adhesive_Growth.pdf)>. Acessado em 11 de janeiro de 2015.

LUCIĆ, M.; STOIĆ, A.; KOPAČ, J. Investigation of aluminum single lap adhesively bonded joints. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, v. 15, p. 79–87, 2006.

MARTINS, A. T. D. *Projeto e fabricação de tubos compósitos em fibras de carbono/epóxi para próteses transtibiais por moldagem com bladder*. Dissertação de Mestrado. 2015. 131 p. Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

MCPHERSON, T. 2014 ASI Top 25: Leading Worldwide Adhesives and Sealants Manufacturers. *Adhesives & Sealants Industry Magazine*, Agosto de 2014. Disponível em: <<http://www.adhesivesmag.com/articles/93123-asi-top>>. Acessado em 11 de janeiro de 2015.

MENARD, K. P. *Dynamic Mechanical Analysis: A Practical Introduction*. 2ª ed. CRC Press, 2008. 240 p.

MENDES, C. N. R. P. *Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas*. Dissertação de Mestrado. 2005. 156 p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MOTHÉ, C. G.; AZEVEDO, A. D. *Análise Térmica de Materiais*. 1ª ed. São Paulo: Artliber, 2009, 324 p.

NEMEŞ, O.; LACHAUD, F. Double-lap adhesive bonded-joints assemblies modeling. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 30, p. 288–297, 2010.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. *Compósitos Estruturais*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2006, 336 p.

NIKOLIC, G.; ZLATKOVIC, S.; CAKIC, M.; CAKIC, S., LACNJEVAC, C.; RAJIC, Z. Fast Fourier Transform IR Characterization of Epoxy GY Systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH Polyamine Adducts. *Sensors*, v. 10, p. 684–696, 2010.

PASTERNAK, H. Ã.; SCHWARZLOS, A.; SCHIMMACK, N. The application of adhesives to connect steel members. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 60, p. 649–658, 2004.

REIS, L. S. N. *Sobre a Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado*. Dissertação de Mestrado. 2001. 111 p. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ROMÃO, B. M. V.; DINIZ, M. F.; PARDINI, L. C.; DUTRA, R. C. L. Aplicação de FT-MIR e FT-NIR ao Estudo de Reação de Cura de Sistemas Epoxídicos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 14, n. 3, p. 142-149, 2004.

SALA, O. *Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho*. 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996, 276 p.

SANTOS, A. F. *Avaliação do Comportamento Mecânico de um Adesivo Estrutural Epóxi Utilizado na Indústria Automobilística*. Dissertação de Mestrado. 2005. 146 p. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SHAW, D. J. *Introdução a Química dos Colóides e de Superfícies*. 1ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 185 p.

Sika. *Ficha de Produto Sikadur 30, Adesivo para colagem estrutural*. Osasco: Sika, Setembro, 2010, 5 p.

SKEIST, I.; MIRON, J. History of Adhesives. *Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry*, v. 15, n. October 2014, p. 1151–1163, 1981.

TEIXEIRA, L. M. B. S. *Caracterização do Comportamento Mecânico de Juntas de Sobreposição Simples Coladas com Adesivos Estruturais*. Dissertação de Mestrado. 2000. 182 p. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto.

TSAI, M. Y.; OPLINGER, D. W.; MORTON, J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. *International Journal of Solids and Structures*, v. 35, n. 12, p. 1163–1185, 1998.

VERMA, A. *Adhesive Bonded Towers for Wind Turbines: Design, Optimization and Cost analysis*. Master's thesis. 2011. 83 p. Wind Energy Research Group, Delft University of Technology, Netherlands.

VETTEGREN', V. I.; MAMALIMOVA, R. I.; SAVITSKIYA, A. V.; SHCHERBAKOVA, I. P.; SYTOVB, V. V.; SYTOVB, V. A. Nature of the adhesion bond between epoxy adhesive and steel. *Technical Physics*, v. 59, n. 3, p. 441–444, 2014.

VIEIRA, C. Um mercado em constante evolução. *Agência de Notícias e Editora Comunicativa Ltda, Campinas, 2004*. Disponível em: <<http://www.clicknoticia.com.br/clipp.asp?clip=790>>. Acessado em 06 de setembro de 2016.

VILLENAVE, J. J. *Assemblage par Collage*. 1<sup>st</sup> ed. Bordeaux: Dunod, 2002. 319 p.

YOON, S. G.; KIM, E. S.; KANG, N. K.; LEE, W. S.; KIM, Y.H. Synthesis and characterization of high temperature stable epoxy adhesive. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 16, n. 4, p. 550–554, 2008.

WASILKOSKI, C. M. *Caracterização do polietileno de baixa densidade através da técnica de análise dinâmico-mecânica e comparação com a análise por impedância elétrica*. Dissertação de Mestrado. 2002. 92 p. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Paraná.

**ANEXO A**  
**MANUAL TÉCNICO SIKADUR 30**



**Ficha de Produto**  
Edição 02/09/2010  
Identificação n.º  
02 04 01 04 001 0 000001  
Sikadur®<sup>30</sup>

## Sikadur® 30

Adesivo para colagem estrutural.

<b>Descrição do produto</b>	Sikadur® 30 é um adesivo estrutural à base de resina epóxi e agregados especiais, tixotrópico, bicomponente e de pega normal, formulado para uso em temperaturas normais entre +8°C e +35°C.
<b>Campos de aplicação</b>	Adesivo para colagem estrutural, particularmente reforço estrutural incluindo: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Colagem de lâminas Sika® Carbodur® em concreto, alvenaria e madeira (para detalhes consulte a ficha do produto Sika® Carbodur®).</li> <li>■ Colagem de chapas de aço em concreto (para detalhes consulte o Departamento Técnico da Sika®).</li> </ul>
<b>Características / Vantagens</b>	Sikadur® 30 possui as seguintes vantagens: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fácil de misturar e aplicar.</li> <li>■ Não requer imprimação.</li> <li>■ Alta resistência à deformação sob cargas permanentes.</li> <li>■ Excelente aderência a diversos substratos: concreto, madeira, alvenaria, pedra, aço, ferro fundido, alumínio e lâminas Sika® Carbodur®.</li> <li>■ O endurecimento não é afetado pela alta umidade relativa.</li> <li>■ Alta resistência de aderência.</li> <li>■ Tixotrópico, o que permite a aplicação em superfícies horizontais e verticais e sobre cabeça (não escorre).</li> <li>■ Endurece sem retrair.</li> <li>■ Componentes A e B com cores diferentes para facilitar a mistura.</li> <li>■ Elevadas resistências mecânicas iniciais e finais.</li> <li>■ Alta resistência à abrasão e ao impacto.</li> <li>■ Impermeável a líquidos e ao vapor d'água.</li> </ul>
<b>Testes</b>	
<b>Aprovações / Normas</b>	Deutsches Institut für Bautechnik Z-36.12-29, 2006: General construction authorisation for Sika® Carbodur®. IBMB, TU Braunschweig: Certificado n.º 1871/0054, 1994: Aprovação do adesivo epóxi Sikadur® 30. IBMB, TU Braunschweig: Certificado n.º 1734/6434, 1995: Aprovação para uso combinado do adesivo epóxi Sikadur® 30 e da argamassa epóxi Sikadur® 41 para colagem de chapas de aço.
<b>Dados do Produto</b>	
<b>Forma</b>	
<b>Aspecto/ Cor</b>	Parte A: Branco Parte B: Preto Cor da mistura: Cinza claro
<b>Embalagem</b>	Conjunto com 6 kg (A+B)
<b>Armazenamento</b>	




<b>Condições de armazenamento/ Validade</b>	24 meses, a partir da data de produção se estocados apropriadamente, nas embalagens originais e intactas, em temperaturas entre +5°C e +30°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.	
<b>Dados Técnicos</b>		
<b>Composição básica</b>	Resina epóxi.	
<b>Densidade</b>	1,65 kg/l ± 0,1 (mistura A+B) (a +23°C)	
<b>Consistência</b>	conforme FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) Sobre superfícies verticais, não escorre com espessura de 3 a 5 mm, a +35°C.	
<b>Extrusão</b>	conforme FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) 4.000 mm <sup>2</sup> a 15°C a 15 kg.	
<b>Espessura por Camada</b>	Máximo 30 mm. No caso de múltiplas camadas de lâminas, uma após a outra. Não mistura um novo conjunto até que o anterior tenha sido completamente utilizado evitando-se assim a diminuição do tempo de manipulação (pot life).	
<b>Alterações de Volume</b>	conforme FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) Retração: 0,04%.	
<b>Coeficiente de Expansão Térmica</b>	Coeficiente W: 2,5 x 10 <sup>-5</sup> x °C <sup>-1</sup> (faixa de temperatura de -20°C a +40°C)	
<b>Estabilidade Térmica</b>	Temperatura de transição vítrea: (conforme FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte))	
	Tempo de Cura	Temperatura
	7 dias	+45°C
		TG
		+62°C
	Temperatura de desvio do calor: (segundo ASTM-D 648)	
	Tempo de Cura	Temperatura
	3 horas	+80°C
	6 horas	+60°C
	7 dias	+35°C
	7 dias	+10°C
		TDC
		+53°C
		+53°C
		+53°C
		+36°C
<b>Temperatura de Serviço</b>	-40°C a +45°C (se curado a > +23°C)	
<b>Propriedades Físicas / Mecânicas</b>		
<b>Resistência à Compressão</b>	(conforme EN 196)	
	Tempo de Cura	Cura a +10°C
	12 horas	--
	1 dia	50 – 60 MPa
	3 dias	65 – 75 MPa
	7 dias	70 – 80 MPa
		Cura a +35°C
		80 – 90 MPa
		85 – 95 MPa
		85 – 95 MPa
		85 – 95 MPa



<b>Resistência ao Cisalhamento</b>	Falha no concreto (~ 15 MPa)		(conforme FIP 5.15)
	Tempo de Cura	Cura a +15°C	Cura a +35°C
	1 dia	3 – 5 MPa	15 – 18 MPa
	3 dias	13 – 16 MPa	16 – 19 MPa
	7 dias	14 – 17 MPa	16 – 19 MPa
	18 MPa (7 dias a +23°C)		(conforme DIN 53283)
<b>Resistência à Tração</b>			(conforme DIN 53455)
	Tempo de Cura	Cura a +15°C	Cura a +35°C
	1 dia	18 – 21 MPa	23 – 28 MPa
	3 dias	21 – 24 MPa	25 – 30 MPa
	7 dias	24 – 27 MPa	26 – 31 MPa
<b>Resistência de Aderência</b>	No aço: > 21 MPa (valores intermediários > 30 MPa) em substrato jateado até condição padrão Sa. 2,5		(DIN EN 24624)
	No concreto: > 4 MPa (FIP(Fédération Internationale de la Précontrainte)) (falha no concreto)		
<b>Módulo de Elasticidade</b>	Na compressão : 9.600 MPa (a +23°C)		(conforme ASTM D695)
	Na tração: 11.200 MPa (a +23°C)		(inicial, conforme ISO 527)
<b>Informações do sistema</b>			
<b>Estrutura do Sistema</b>	Sistema Sika® Carbodur®: Para maiores detalhes sobre a aplicação do Sikadur® 30 com lâminas Sika® Carbodur® consulte a ficha técnica do respectivo produto.		
<b>Detalhes de aplicação</b>			
<b>Preparo do Substrato</b>	Ver ficha técnica do produto Sika® Carbodur®		
<b>Qualidade do Substrato</b>	Ver ficha técnica do produto Sika® Carbodur®		
<b>Condições de Aplicação / Limitações</b>			
<b>Temperatura do Substrato</b>	mín. +8°C / máx. +35°C		
<b>Temperatura Ambiente</b>	mín. +8°C / máx. +35°C		
<b>Temperatura do Material</b>	Sikadur® 30 deve ser aplicado a temperaturas entre +8°C e +35°C		
<b>Umidade do Substrato</b>	Máximo 4%. Se aplicado sobre concreto úmido, espalhe bem o adesivo sobre a superfície.		
<b>Ponto de Orvalho</b>	Cuidado com a Condensação. A temperatura ambiente durante a aplicação deve estar no mínimo 3°C acima do ponto de condensação (orvalho).		
<b>Instruções de Aplicação</b>			
<b>Mistura</b>	Parte A : Parte B = 3 : 1 em peso ou volume. No caso de fracionamento do material deve-se garantir o peso e dosagem exata de cada componente.		



<b>Tempo de Mistura</b>		Misture os componentes A e B por pelo menos 3 minutos utilizando-se hélice de mistura apropriada acoplada a uma furadeira elétrica de baixa rotação (máx. 600 rpm) até que o material se apresente com consistência e cor homogêneos. Então, transfira o material para um recipiente limpo e misture por mais 1 minuto em baixa velocidade para evitar ao máximo a incorporação de ar. O uso de ferramentas não apropriadas, exceder o tempo de mistura e alta rotação podem incorporar ar ao produto bem como diminuir o tempo de manuseio (pot life). Prepare apenas a quantidade necessária para uso dentro do tempo de manuseio (pot life).		
<b>Método de Aplicação / Ferramentas</b>	Ver ficha técnica do produto Sika® Carבודur®			
<b>Limpeza das ferramentas</b>	As ferramentas e materiais utilizados devem ser limpos com Sika® Colma Cleaner imediatamente após o uso. Após o endurecimento, o produto só poderá ser removido mecanicamente.			
<b>Tempo de Manuseio (Pot Life)</b>	conforme FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte)			
	Temperatura	+8°C	+20°C	+35°C
	Pot Life	~ 120 min	~ 90 min	~ 20 min
	Tempo em Aberto	~ 150 min	~ 110 min	~ 50 min
	O tempo de manuseio (pot life) é contado a partir do início da mistura entre a resina e o endurecedor. É mais curto a altas temperaturas e mais estendido sob baixas temperaturas. Quanto maior a quantidade misturada, mais curto o tempo de manuseio (pot life). Para se obter um tempo de manuseio mais estendido a altas temperaturas, o adesivo deve ser dividido em pequenas porções. Outra opção é a de se resfriar os componentes A e B antes da mistura a temperaturas nunca inferiores a +5°C.			
<b>Notas da Aplicação / Limitações</b>	Os adesivos Sikadur® são formulados para atingir baixos valores de deformação lenta sob efeito de cargas permanentes. Entretanto, devido ao comportamento de deformação lenta de todos os materiais poliméricos sob carregamento, o dimensionamento estrutural para longo prazo deve levar a deformação lenta em consideração. Em geral, a carga de dimensionamento estrutural para longo prazo deve ser 20-25% inferior que a carga de falha. Consulte sempre um especialista em cálculo estrutural para sua aplicação específica.			
<b>Consumo</b>	Ver ficha técnica do produto Sika® Carבודur®			

# Construção

<b>Base dos Valores</b>	Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.
<b>Informações de Segurança e Ecologia</b>	Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxicidade, e outros dados de segurança pertinentes.
<b>Nota Legal</b>	As informações e em particular as recomendações relacionadas com a aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado do material, das superfícies, e das condições de aplicação no campo, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um determinado fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de quaisquer recomendações por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas de produto dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que solicitadas.



**GBC BRASIL**



Sika Brasil  
 Av Dr Alberto Jackson Byington, 1525  
 Vila Menck – Osasco – SP  
 CEP: 06276-000  
 Brasil

Tel. + 55 11 3687 4600  
 Fax : +55 11 3601 0288  
 e-mail : consumidor.atendimento@br.sika.com  
 www.sika.com.br