

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RESISTÊNCIA DE JUNÇÕES ADESIVAS

Demetrio Jackson dos Santos

Henkel Technologies – Centro de Engenharia de Adesivos Loctite – Av. Prof. Vernon Kriebel, 91
06696-070 – Itapevi – SP – Brasil. demetrio.santos@br.henkel.com / santos.demetrio@yahoo.de

Gilmar Ferreira Batalha

Lab. de Engenharia de Fabricação – Dept. Eng. Mecatronica e de Sistemas Mecânicos –EPUSP -
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária – 05508.970 – São Paulo – SP – Brasil
gilmar.batalha@poli.usp.br / gfbatalh@usp.br

Resumo. *O estudo apresentado tem como objetivo analisar a variação da resistência de junções adesivas por sobreposição simples de chapas, unidas por adesivo acrílico estrutural. Os ensaios foram realizados com base em Planejamento Fatorial 2^k e análise complementar através da aplicação de Análise de Superfície de Resposta. Os fatores de influência estudados se referem às condições de superfície e cura, se diferenciando dos trabalhos tradicionais, os quais somente consideram condições geométricas. Somente uma condição geométrica foi analisada, visando esclarecer contradição apresentada em algumas publicações sobre a influência do comprimento de sobreposição das chapas na resistência das junções. Os estudos mostraram fortes influências de fatores como rugosidade superficial e temperatura de cura na resistência das junções, bem como comprovaram o comportamento das junções ao variar o comprimento de sobreposição das chapas.*

Palavras-chave: *Junções adesivas, Adesivo acrílico, Planejamento Fatorial 2^k .*

1. INTRODUÇÃO

Segundo Zoran⁽¹⁾ a aplicação de adesivos para união de materiais cresceu consideravelmente no decorrer nos últimos anos, sendo que tal crescimento se deve aos benefícios proporcionados pelos adesivos, quando comparados aos métodos tradicionais de união, como solda ou utilização de parafusos. Vários institutos de pesquisa na Europa, Estados Unidos, Japão e China se dedicam exclusivamente às pesquisas nas mais diversas áreas da adesão, analisando desde o comportamento mecânico dos adesivos até o comportamento da região de interface entre adesivo e substrato.

Na indústria, características como fácil aplicabilidade, distribuição uniforme de tensões, prolongada vida útil, maior absorção de impactos e vibrações, menores custos de produtos e processos, tornam a utilização de adesivos, soluções interessantes e competitivas.

De acordo com Carlac⁽²⁾ anualmente o mercado mundial de adesivos movimentava quantias superiores a 26 bilhões de euros, representadas em volume por mais de 12 milhões de toneladas de adesivos. A principal área de aplicação é a indústria de embalagens, com 42,5% do mercado mundial (em valores), seguida pelas indústrias de construção civil com 17,5% e de transporte com 10% do mercado. Juntos estes três segmentos da indústria representam mais de dois terços do faturamento global de adesivos.

Zoran⁽¹⁾ afirma que um dos principais fatores facilitadores na utilização de adesivos é a possibilidade de calcular previamente a resistência das junções adesivas. Porém, o elevado número de fatores de influência na resistência das junções inviabiliza o desenvolvimento de um modelo universal para determinar da resistência de junções adesivas.

Este trabalho analisa o comportamento da resistência de junções adesivas, considerando como variáveis as condições de superfície dos substratos e de cura do adesivo. Além de comprovar o comportamento da resistência das junções em função do aumento do comprimento de sobreposição das junções, ponto de conflito em algumas publicações.

2. OBJETIVOS

A realização deste estudo teve como objetivo as seguintes diretrizes:

- Verificar a viabilidade da utilização do Planejamento Fatorial 2^k para análise da variação da resistência de junções adesivas, considerando como fatores de influência as condições de superfície e cura do material.
- Determinar a significância de cada fator de influência e quantificar a variação da resistência das junções gerada pela variação destes fatores.
- Esclarecer contradição entre publicações sobre a influência do comprimento de sobreposição das chapas na resistência das junções.
- Gerar conhecimento aplicável de forma complementar aos modelos matemáticos existentes, os quais consideram somente a influência de fatores geométricos na resistência das junções adesivas.

3. MODELOS PREDITIVOS DA RESISTÊNCIA DE JUNÇÕES ADESIVAS

Diversos trabalhos já foram publicados sobre a influência de fatores geométricos das junções adesivas na resistência das mesmas. Entretanto, pouco se publicou sobre a influência das condições de superfície e de cura do adesivo, tratadas neste trabalho. O Modelo de Volkersen de 1938 apresentado por Tsai⁽³⁾, comprovou e quantificou a influência de fatores geométricos na resistência das junções adesivas. Segundo Zoran⁽¹⁾ o Modelo de Volkersen se afasta da realidade ao não considerar as condições de superfície dos substratos como rugosidade e tratamento superficial e ao negligenciar a alteração das propriedades mecânicas do polímero curado, influenciadas pela variação de condições de cura como temperatura e uso de ativadores.

Segundo Tsai⁽³⁾ o Modelo de Goland e Reissner complementou o trabalho pioneiro de Volkersen, ao considerar a deformação dos substratos, fator negligenciado por Volkersen. Mesmo modelos atuais, como o Modelo Aprimorado de Volkersen de 1997 desenvolvido por Tsai⁽³⁾, ou o Modelo Matemático para Cálculo de Junções Adesivas, desenvolvido por Zoran⁽¹⁾ em 2001 não consideraram as variáveis acima citadas. A escassez de dados, confirmada pela análise dos trabalhos publicados, justificou o estudo da influência de fatores de condições de superfície e de cura na resistência de junções adesivas e o desenvolvimento deste trabalho. Assim como a contradição entre algumas publicações sobre a influência do comprimento de sobreposição na resistência final, incentivou a realização de experimentos que demonstrem tal comportamento. Devido ao sucesso obtido por Zoran⁽¹⁾ com a utilização do Planejamento Fatorial 2^k no desenvolvimento de Modelo Matemático para Cálculo da Resistência de Junções Adesivas, por análise da influência de fatores geométricos, optou-se pela utilização do mesmo método para realização deste trabalho.

4. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Material Experimental: Adesivo e Chapas de Aço

Devido ao grande número de artigos já publicados sobre adesivo epóxi, optou-se por outro adesivo também muito utilizado na indústria, o adesivo acrílico. A experiência do autor em aplicação de adesivos, levou a utilização do adesivo acrílico Henkel LOCTITE 326, de cura rápida, alta resistência ao cisalhamento e ao impacto.

Foi utilizado aço SAE J403 1010 da Companhia Siderúrgica de Tubarão, com a seguinte composição química: 0,10% C, 0,021% Si, 0,471% Mn e 0,016% P.

A geometria da junta foi determinada de acordo com recomendação de Villenave⁽⁴⁾, a qual considerou a melhor condição para os experimentos, minimizando a interferência de fatores como “peeling” ou clivagem, gerados por possível sub-dimensionamento da espessura das chapas. O comprimento de sobreposição utilizado foi de 10mm nos ensaios para aplicação de Planejamento Fatorial 2^k, sendo este comprimento posteriormente variado para análise do comportamento da resistência em função da variação do mesmo.

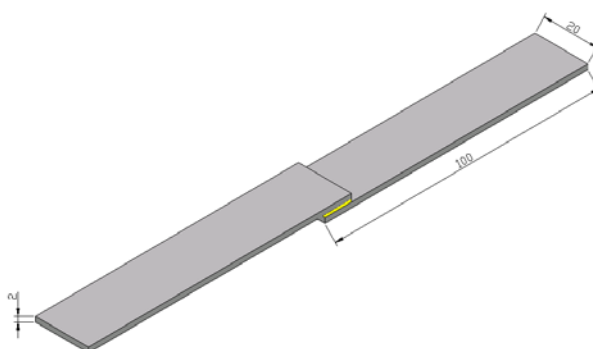


Figura 1. Configuração geométrica dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento

4.2. Tratamento Superficial Nanocerâmico: Condições de Superfície e Rugosidade

Há muito tempo a indústria, em particular a automotiva, vem utilizando tratamentos superficiais para aumentar a aderência de tintas em superfícies. Tal propriedade proporcionada por estes tratamentos motivou avaliar se o mesmo aumento seria proporcionado aos adesivos acrílicos, já que assim como as tintas, os adesivos tratam-se de polímeros.

Visando a inovação tecnologia e geração de conhecimento, optou-se pela realização de testes com uma nova tecnologia utilizada na indústria, a Nanocerâmica. De acordo com relatório da European Community⁽⁵⁾, esta tecnologia está em fase inicial de utilização e trata-se de uma forte tendência futura para o mercado mundial. A nanocerâmica consiste da deposição de Flúor e Zircônio, gerando uma nanocamada amorfa, a qual oferece o aumento da aderência. Esta nova tecnologia vem sendo utilizada em substituição aos tratamentos a base de fosfato tricatiônico e ferrítico. Foi utilizado a nanocerâmica da Henkel, produto denominado BONDERITE NT1.

Para análise da influência das variáveis na resistência das junções foram realizados ensaios de cisalhamento dos corpos de prova, utilizando máquina de ensaios mecânicos EMIC DL5000, com capacidade máxima de carga de 50kN. A velocidade de ensaio utilizada foi de 2mm/min, com 72 horas de cura do adesivo, de acordo com as especificações de Villenave⁽⁴⁾.

4.3. Condições de Cura: Temperatura e Uso do Ativador

Segundo Canevarolo⁽⁶⁾ a resistência mecânica de polímeros é diretamente proporcional ao tamanho das cadeias de polímeros (peso molecular): quanto maior o peso molecular, maior a resistência mecânica. Baseado em tais informações da literatura, optou-se por investigar a influência da temperatura de cura na formação das cadeias de polímeros e conseqüentemente na resistência mecânica dos adesivos. Foram utilizados dois níveis de temperatura de cura, 22°C e 60°C (durante 2h). A temperatura de 60°C foi obtida em estufa.

Brinson⁽⁷⁾ mostrou que a cura de adesivos acrílicos pode ser obtida de três formas diferentes; dependendo do tipo de adesivo. No caso de adesivo bi-componente, obtém-se a cura através da mistura dos dois componentes. Para adesivo mono-componente, como o LOCTITE 326, a cura é obtida por anaeróbia para superfícies ativas, ou pelo uso de ativador para superfícies inativas.

Alguns processos produtivos exigem o uso do ativador, mesmo em superfícies ativas, para que ocorra a aceleração do processo de cura. Desta forma resolve-se avaliar a influência de ativadores (aceleradores de cura) na resistência do adesivo, quando aplicado em aço. Utilizou-se o ativador LOCTITE 7649 “N”, especificado para aplicação conjunta com adesivo LOCTITE 326.

4.4. Desenvolvimento do Planejamento Fatorial

Na determinação dos fatores de influência, atentou-se para que não houvesse nenhum fator que proporcionasse falha adesiva das junções, como nível de oleosidade das superfícies. Sendo assim todos os fatores selecionados atuaram de forma que as falhas ocorridas foram coesivas, rompimento do filme de adesivo, assumindo desta forma que as condições de superfícies variaram entre níveis que proporcionaram apenas tal tipo de falha. Os seguintes fatores foram selecionados:

- (A) - Tratamento superficial;
- (B) - Temperatura de Cura;
- (C) - Rugosidade superficial;
- (D) - Uso de ativador;
- (E) - Comprimento de sobreposição das chapas.

O cuidado em não proporcionar falha adesiva dos substratos, permite que o modelo desenvolvido seja utilizado em complemento aos modelos “geométricos” aumentando sua área de abrangência, precisão e proximidade da realidade. Com o intuito de preservar tal possibilidade e não alterar as características dos métodos geométricos optou-se por analisar a influência do comprimento de sobreposição em experimento separado, o gerou dois métodos de testes e análises.

4.4.1 Primeiro Método

Este primeiro método levou em consideração quatro fatores de influência, analisando seus efeitos através de Planejamento Fatorial 2^k , após execução dos experimentos e aplicação do Planejamento Fatorial, foi averiguado o nível de significância dos fatores e realizada a Análise de Superfície de Resposta. Antes da realização definitiva dos experimentos, foram realizados experimentos preliminares visando identificar a influência dos fatores analisados individualmente, evitando a utilização de fatores que não tenham nenhuma significância. Caso algum fator tivesse demonstrado ser insignificante, este teria sido excluído e novos experimentos teriam sido realizados. Foram realizadas 10 réplicas para cada combinação de tratamento, totalizando somente nos testes definitivos 160 ensaios de cisalhamento.

4.4.2 Segundo Método

Com o intuito de esclarecer informações contraditórias encontradas em algumas publicações, foram realizados experimentos onde a única variável foi o comprimento de sobreposição das chapas, desta forma foi possível analisar o comportamento da resistência do adesivo em função da variação do comprimento de sobreposição. Foram realizadas 10 réplicas para cada comprimento de sobreposição, totalizando somente nos testes definitivos 70 ensaios de tração por cisalhamento.

Tabela 1. Combinações de Tratamento

Condição	Nanocerâmico (A)	Temperatura. (B)	Rugosidade. (C)	Atividade. (D)
1	-1	-1	-1	-1
A	+1	-1	-1	-1
B	-1	+1	-1	-1
C	-1	-1	+1	-1
D	-1	-1	-1	+1
AB	+1	+1	-1	-1
AC	+1	-1	+1	-1
AD	+1	-1	-1	+1
BC	-1	+1	+1	-1
BD	-1	+1	-1	+1
DC	-1	-1	+1	+1
ABC	+1	+1	+1	-1
BCD	-1	+1	+1	+1
ACD	+1	-1	+1	+1
ABD	+1	+1	-1	+1
ABCD	+1	+1	+1	+1

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Análise dos Resultados do Primeiro Método - Planejamento Fatorial 2^k

O Planejamento Fatorial 2^k mostrou que:

- A Figura 2 mostra que todos os fatores principais são significativos, com diferentes amplitudes de variação. A Figura 2 também mostra que somente duas interações são significativas, A*C e B*C.

- A análise da Figura 3 mostra diferentes variações na resistência da junção adesiva, causadas pela alteração dos fatores de influência. Sendo que a alteração de alguns fatores causou aumento da resistência, enquanto a variação de outros causou a redução da resistência.

- A Figura 2 e a Tabela 2 mostram que os dois fatores de maior influência na variação da resistência são: a temperatura de cura e o uso de ativador. Ambos os fatores estão relacionados com a cura do produto influenciando no peso molecular do adesivo e segundo Canevarolo⁽⁶⁾ nas propriedades mecânicas dos polímeros.

- O fator de maior influência foi o uso do ativador, gerador de uma considerável queda na resistência da junção.

- O segundo fator mais influente foi o aumento da temperatura de cura de 22°C para 60°C, resultando em grande aumento da resistência da junção.

- Superfícies jateadas, maior rugosidade, geraram leve aumento na resistência da junção adesiva. Segundo Villenave⁽⁴⁾ existe um limite na influência da rugosidade na resistência de junções adesivas, informação baseada no modelo mecânico de adesão.

- A aplicação de nanocerâmica gerou leve redução na resistência da junção. Possart⁽⁸⁾ apresentou uma teoria química de adesão, a qual propõe uma reação química entre o adesivo e a superfície. Desta forma a alteração da superfície por deposição de Flúor e Zircônio e consequentemente a alteração da reação química entre os materiais, pode ser a responsável pela redução. Outra possibilidade é a alteração das características mecânicas na superfície. Uma varredura com microscópio eletrônico poderia mostrar se houve alteração mecânica significativa, capaz de alterar as condições de rugosidade da superfície.

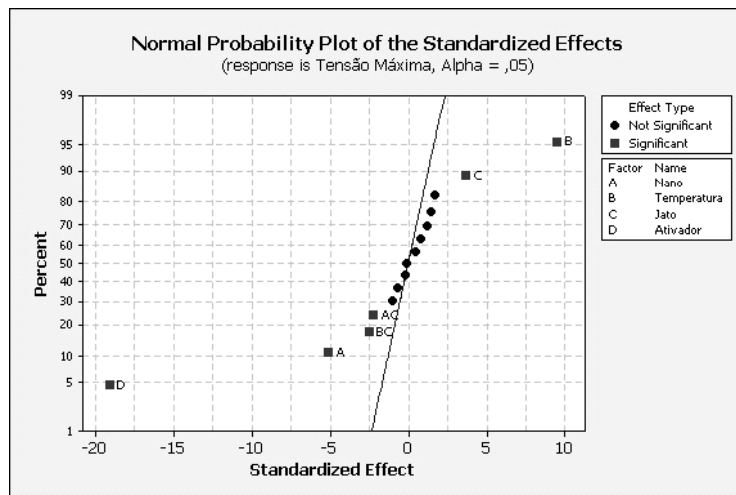


Figura 2. Análise de significância dos fatores principais e interações

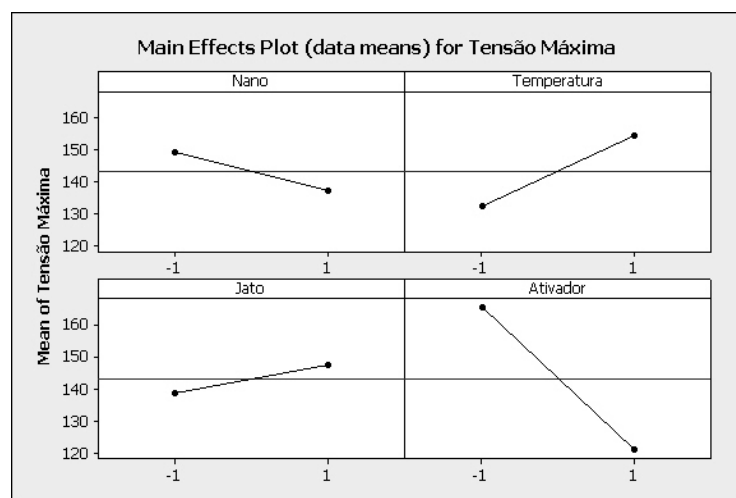


Figura 3. Variação da resistência dos fatores principais

Tabela 2. Resultados do Planejamento Fatorial 2^k

Fator	Efeito	Coefficiente.	Erro Padrão.	T	P
Constante	143,21		1,163	123,18	0,000
A	-11,83	-5,91	1,163	-5,09	0,000
B	22,15	11,07	1,163	9,52	0,000
C	8,63	4,31	1,163	3,71	0,000
D	-44,41	-22,21	1,163	-19,10	0,000
A*B	-0,48	-0,24	1,163	-0,21	0,837
A*C	-5,13	-2,57	1,163	-2,21	0,029
A*D.	1,78	0,89	1,163	0,77	0,445
B*C	-5,82	-2,91	1,163	-2,50	0,013
B*D	-1,54	-0,77	1,163	-0,66	0,509
C*D	3,98	1,99	1,163	1,71	0,089
A*B*C	3,38	1,69	1,163	1,45	0,148
A*B.*D	-2,34	-1,17	1,163	-1,01	0,315
A*C*D	2,79	1,40	1,163	1,20	0,232
B*C*D.	1,10	0,55	1,163	0,47	0,636
A*B*C*D	-0,15	-0,08	1,163	-0,07	0,947

A aplicação da Análise de Superfície de Resposta possibilitou ilustrar os efeitos das interações significativas (Figuras 4 e 5):

- A interação A*C é significativa e resulta em leve enfraquecimento da resistência.
- A interação B*C é significativa e resulta em leve enfraquecimento da resistência da junção.

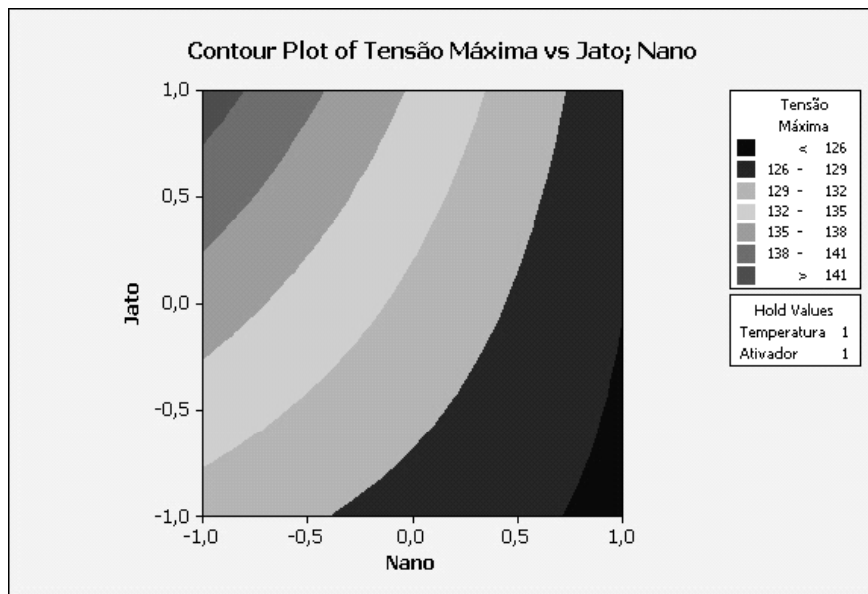


Figura 4. Análise de superfície de resposta da interação rugosidade x revestimento nanocerâmico.

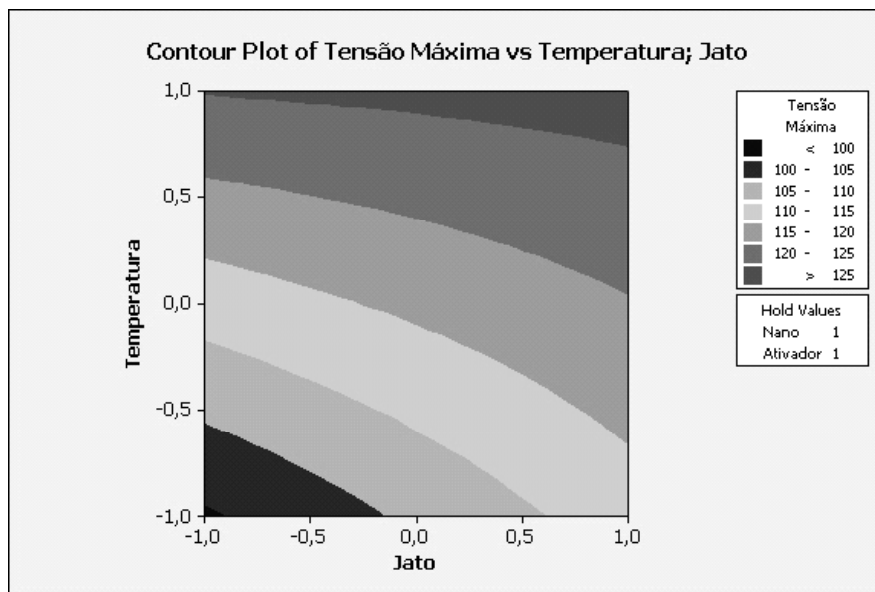


Figura 5. Análise de superfície de resposta da interação rugosidade x temperatura

5.2. Análise dos Resultados do Segundo Método – Comprimento de Sobreposição

Os ensaios de cisalhamento mostraram a seguinte variação da resistência em função da variação do comprimento de sobreposição. Sendo que a combinação de tratamento A(-1), B(-1), C(-1), D(-1) e E(10mm) foi considerada como padrão, os resultados restantes foram expressos em função da relação entre as tensões obtidas em condições com comprimentos variados / tensão máxima obtida na condição padrão.

Tabela 3. Relação de Comprimentos de Sobreposição.

Comprimento de Sobreposição	Relação (Comprimento / Largura)
10 mm	0,5
15 mm	0,75
20 mm	1
25 mm	1,25
30 mm	1,5
40 mm	2
50 mm	2,5

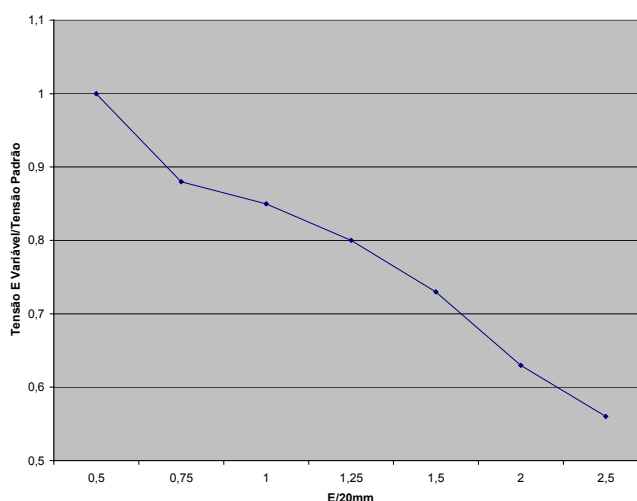


Figura 6. Influência do comprimento de sobreposição.

- O aumento do comprimento de sobreposição ocasiona forte redução da resistência da junção (tensão de cisalhamento).
- A partir do comprimento de sobreposição de 30 mm ou relação de 1,5. Nesta configuração de amostra inicia-se a deformação dos substratos metálicos, dando origem a esforços de clivagem.

6. CONCLUSÕES

A utilização de adesivos para união de substratos é um método com várias vantagens, porém com a desvantagem de ter um número relativamente alto de fatores que interferem na resistência da junção adesiva. Neste sentido as seguintes conclusões puderam ser estabelecidas:

- Os resultados aprovaram o uso do Planejamento Fatorial 2^k para desenvolver um modelo para cálculo da resistência de junções adesivas, considerando fatores de condição de superfície e cura.
- Modelos matemáticos considerando somente as condições geométricas não representam a realidade, devido à forte influência de fatores como condições de cura e de superfície. As informações sobre a influência de condições de cura e de superfície na resistência da junção podem ser utilizadas como modelo complementar aos métodos geométricos, tornando-os mais próximos da realidade. É evidente a influência do comprimento de sobreposição sobre a resistência da junção, causando redução da resistência da junção, em acordo com a literatura.
- A preparação dos substratos é de extrema importância para resistência da junção, testes iniciais mostraram grandes variações de tensão de cisalhamento devido falhas de limpeza e presença de rebarbas nos corpos de prova.
- Os estudos apresentaram resultados referentes à uma condição específica de aplicação de adesivos. Um modelo universal que represente todos os fatores possíveis, inclusive tipos de esforços e tipos de adesivos ainda não foi desenvolvido.

7. AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível devido à compreensão e cooperação de minha esposa e filhas. A cooperação e incentivo da divisão Henkel Technologies foi de extrema importância, disponibilizando materiais e laboratórios para a execução deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

1. ZORAN K.; KRALJ, D. S.; ZAGRED, D. N. S. & DORN, L. et al. Mathematical Model for Calculating the Strength of a Single Lap Adhesive Joint. **Schweissen und Schneiden**, Alemanha, v.2, p. 32–37, fev. 2001.
2. CARLAC, H D. & HEMERY Y. **Le Collage em France – um atout pour l’assemblage industriel**. Direction Générale de l’Industrie des Technologies de l’Informations et des Postes. França, Dezembro ,2002.
3. TSAI M. Y.; OPLINGER D.W. & MORTON, J. **Improved Theoretical Solutions for Adhesive Lap Joints**. Dept. of Engineering Science and Mechanics. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, EUA, 1997.
4. VILLENAVE, Jean-Jacques. **Assemblage Par Collage**. DUNOD, Paris, 2005. 319 p.
5. EUROPEAN COMMUNITY & STEINBEIS EUROPA ZENTRUM 6TH Framework Programme: Overview on Promising Nanomaterials for Industrial Applications. In: Nanomaterial Roadmap 2015. **Development of Advanced Technologies Roadmaps to Small and Medium sized Enterprises (NanoroadSME)**. Disponível em: <http://www.nanoroad.net/download/overview_nanomaterials.pdf>. Acesso em 23/02/2007.
6. CANEVAROLO JUNIOR, Sebastião. **Ciência de Polímeros**. Artliber, São Paulo, 2002.
7. BRINSON, Hal. F. **Engineered Materials Handbook – Adhesives and Sealants**. ASM International, USA 1990.
8. POSSART, Wulf. **Vorlesung “Klebstoffe & Klebtechnologie”**. Saarland Universitaet, Alemanha, 2006.

STATISTICAL ANALYSIS OF ADHESIVE JOINTS STRENGTH

Demetrio Jackson dos Santos

Henkel Technologies – Center for Adhesives Engineering - Av. Prof. Vernon Kriehle, 91 – 06696-070 - Itapevi - SP – Brazil. demetrio.santos@br.henkel.com / santos.demetrio@yahoo.de

Gilmar Ferreira Batalha

Lab. of Manufacturing Engineering – Dept. of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering - University of S. Paulo - Escola Politecnica - Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – Cidade Universitária. 05508.970 – São Paulo – SP – Brazil. - gilmar.batalha@poli.usp.br / gfbatalh@usp.br

Abstract. *The presented work has the purpose of making possible to calculate and to size the strength of single lap adhesive joints, bonded by structural acrylic adhesive. The tests had been carried through based on Factorial Design 2^k and complementary Response Surface Analysis. Surface and cure conditions had been taken in consideration, the studies usually published just take in considerations geometric variables. In this study only one geometric variable was considered, the overlap length, in order to clarify a contradiction found in different publications. The results show strong influences of variables like roughness and temperature cure on the adhesive joint strength and had proven the joint strength behavior by varying the overlap length.*

Keywords: *Adhesive Joints, Acrylic Adhesive, Factorial Design.*