

ESTUDO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DA UNIÃO DE CHAPAS METÁLICAS POR CONFORMAÇÃO A FRIO COM APLICAÇÃO DE ADESIVO ESTRUTURAL

Alisson Alves Sarmiento

André Succissi Rinaldi

Ed Claudio Bordinassi

Julio Cesar Lopes da Silva

Mateus Vale Farkas

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 1 – Mauá, São Caetano do Sul – SP – CEP: 09580-900

alisson.sarmiento@maua.br, andresuccissi@hotmail.com, ecb@maua.br, jclopes787@gmail.com,

mateusfarkas@gmail.com

Resumo. Este trabalho teve o objetivo de entender a influência do adesivo estrutural na União de Chapas por Conformação à Frio (UCCF), também conhecido como Clinching, no quesito de aumento da resistência mecânica estática da união. Além disso, o presente trabalho também realiza um comparativo entre os resultados obtidos por teste de tração real e o ensaio realizado por meio de simulação computacional, buscando a convergência destes resultados. Para isso, foi utilizado o aço de baixo carbono e alta ductilidade (AISI 1012), material bastante utilizado na indústria metalmeccânica. A união em questão foi submetida à testes e ensaios de tração com diferentes configurações de corpo de prova, como: união feita apenas por adesivo estrutural, apenas por UCCF e união híbrida (UCCF + adesivo estrutural), levadas ao seu limite, até o rompimento da união. Os corpos de prova feitos apenas com adesivo estrutural chegaram a suportar cargas de até 12 kN, enquanto aqueles apenas com UCCF suportaram aproximadamente 3,6 kN. Na união híbrida UCCF + Adesivo observou-se um aumento de 55% na resistência para o corpo de prova de menor resistência apenas com adesivo, além do aumento muito significativo do deslocamento da junta. Por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), o ensaio feito por simulação computacional apenas para a UCCF resultou em uma diferença de 20,73 % na resistência mecânica, comparando com a média dos resultados obtidos experimentalmente, e 9,19 % comparando com a maior resistência mecânica obtida nos ensaios de tração, sendo estas diferenças associadas a simplificações realizadas na simulação e variações no processo de UCCF.

Palavras chave: Clinching. Conformação de chapas metálicas. Método dos Elementos Finitos (MEF). Adesivo estrutural. Simulação computacional.

1. INTRODUÇÃO

A união de chapas metálicas é bastante utilizada na indústria e pode ser feita por diversas formas, podendo ser uma união permanente, feita por solda, rebite, ou união desmontável, como parafusos e porcas, dentre outros. Tal processo é muito abrangente, e pode ser aplicado desde a indústria de eletrodomésticos até a produção de aeronaves, que exige grande resistência estrutural à esforços externos. O estudo de técnicas para união de chapas metálicas levou a um processo conhecido por União de Chapas por Conformação a Frio (UCCF), também chamado pelo termo em inglês *Clinching*.

Comparado a outros métodos de união de chapas metálicas, a UCCF se sobressai em alguns aspectos gerais como: baixo custo, em que a fabricante TOX® realizou um comparativo de custos por união, na qual é perceptível uma redução de cerca de 40% em relação à soma dos custos de investimento, operação e ferramenta quando comparado à solda ponto; é livre de emissões, visto que a tecnologia de UCCF não emite vapores ou gases tóxicos, que permite ao operador melhores condições de trabalho e reduz a insalubridade; não há descarte de produtos químicos, nem consumo de líquidos refrigerantes, óleos ou gases (TOX® PRESSOTECHNIK, 2020); em estudo realizado por (SARMENTO e PEREIRA, 2012) destaca que para realização de apenas um ponto feito por solda ponto, gasta-se cerca de 100 kW de energia. Enquanto, para a realização de apenas um ponto feito por UCCF, gasta-se cerca de 0,5 kW de energia, ou seja, tem-se um consumo de energia 200x menor, quando comparado a solda ponto, o que torna a UCCF ainda mais atraente por ter uma ótima eficiência energética.

A fim de buscar melhorias para diminuir o fator negativo da UCCF, que é a baixa resistência estática da união, este trabalho tem como objetivo analisar qual o efeito da introdução de adesivo estrutural na UCCF por meio do ensaio de tração de corpos de prova. Além disso, realizar um comparativo entre o ensaio mecânico real com o ensaio por simulação computacional, realizado por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de verificar a convergência dos dois resultados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A ideia central da UCCF é unir chapas metálicas através de deformações plásticas, que utilizam a deformação local (união de pequenas áreas), sem o uso de aquecimento da região de união, como acontece com as soldas. Basicamente, este processo utiliza dois elementos de conformação, a matriz e o punção. O punção é responsável por realizar a conformação, seguindo, consequentemente, o molde da matriz, gerando o intertravamento (*interlock*) das placas (BABALO, FAZLI e SOLTANPOUR, 2018). A UCCF é um processo de fabricação mecânica, dentre os diversos processos presentes atualmente.

2.1. Parâmetros importantes de uma UCCF

Para estudo da UCCF, de início, é necessário conhecer quais são os fatores importantes que afetam diretamente a qualidade e a resistência da união. De acordo com o estudo de LEI e TONGXIN (2019) mostrado na [Figura 1](#), têm-se dois parâmetros que devem ser analisados nesse processo. São eles: Espessura do pescoço (t_N) e o rebaixo produzido (t_U). Segundo os autores mencionados, esses são os fatores centrais que interferem na resistência da UCCF.

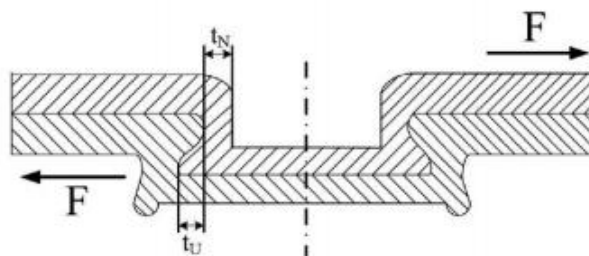


Figura 1 - Parâmetros da UCCF em vista de corte, (LEI e TONGXIN, 2019)

Como descrito por (LEI et al., 2019), o processo de falha para UCCF depende da diferença da resistência estrutural entre o pescoço formado (σ_N) e o rebaixo (σ_U) produzido, que é determinado pela resistência do material da chapa, a espessura do pescoço (t_N) e a espessura do rebaixo (t_U) formado.

Tomando como base os estudos de (MUCHA, 2011), outro fator importante, que define a qualidade de uma união feita por uma matriz, é a medição da espessura X, demonstrada na [Figura 2](#):

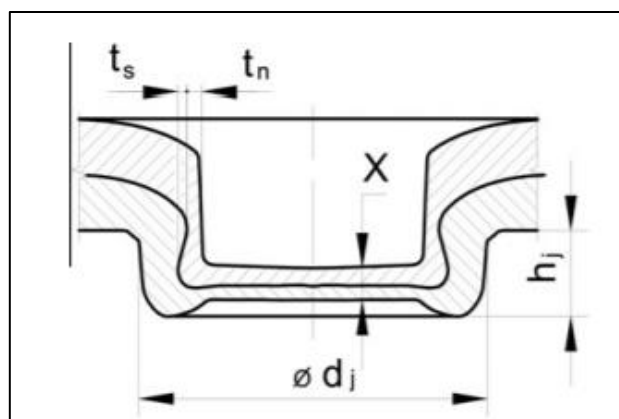


Figura 2 - Corte na seção transversal da união e identificação das variáveis, (MUCHA, 2011)

Em seus resultados apresentados no artigo referenciado, (MUCHA, 2011) conclui que a geometria da ferramenta (que define os parâmetros da [Figura 2](#)) é o fator central que determina a geometria final da união e, consequentemente, sua resistência mecânica.

2.2. Efeitos microestruturais causados pela UCCF

Na UCCF, por ocorrer deformação plástica para criação do intertravamento entre as chapas, ocorre o fenômeno conhecido por encruamento. O fenômeno consiste no aumento da resistência mecânica do material da chapa nas regiões que efetivamente sofreram deformação plástica. Com base na bibliografia de (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2018), este processo de endurecimento se dá pelo fato de que, durante a deformação plástica, o número de discordâncias aumenta drasticamente. A discordância é uma irregularidade no arranjo dos átomos (rede cristalina), em que essa não conformidade dificulta o movimento ordenado dos átomos do material. A dificuldade em se movimentar os átomos se traduz como a elevação da força. Essa modificação das orientações da rede cristalina dos átomos é definida, na engenharia mecânica, como encruamento.

Na [Figura 3](#), é possível observar as etapas de deformação das chapas durante o processo de união:

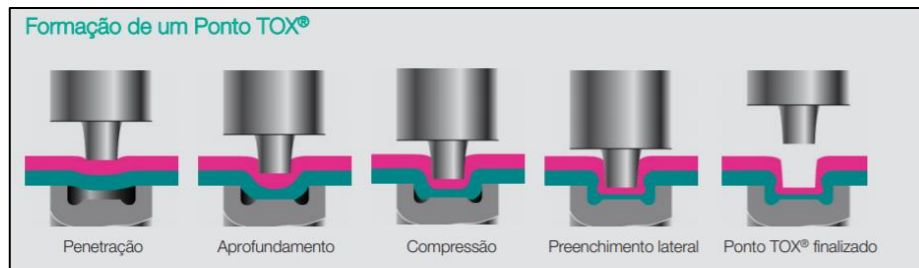


Figura 3 - Seção transversal da união durante o processo de UCCF, (TOX® PRESSOTECHNIK, 2020)

Com base nas descrições da bibliografia mencionadas anteriormente, é possível realizar novamente um comparativo com o artigo de (MUCHA, 2011), em que ele correlaciona a dureza do material e o campo de tensões, no qual os maiores valores são observados na parede formada (região que sofre maior deformação durante o processo) após a conformação, identificada pela cor vermelha na legenda do nível de tensão da [Figura 4](#).

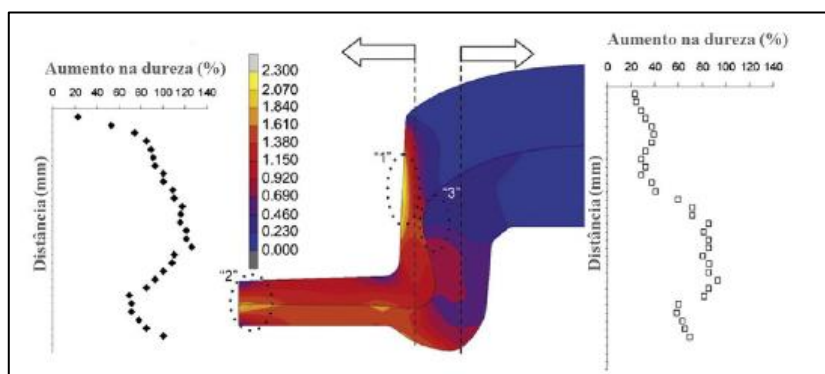


Figura 4 - Características do campo de tensões e a dureza nas regiões do botão, (MUCHA, 2011)

2.3. Adesivo estrutural

Conforme os gráficos da [Figura 5](#) e [Figura 6](#), nota-se que os adesivos estruturais conferem um aumento na resistência à tensão normal (força de destacamento), porém não influenciam diretamente na resistência a tensão de cisalhamento em uma união soldada. A resistência adicionada a junta se dá diretamente através da espessura do cordão de adesivo aplicado, que é diretamente proporcional a esta adição de resistência (CHANG, SHI e DONG, 1999).

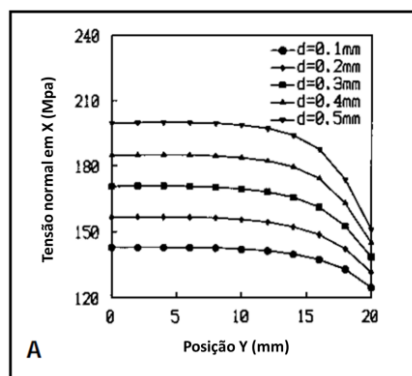


Figura 5 - Curva de Tensão normal na direção de X em função da posição em Y (adaptado de Chang, Shi & Dong, 1999)

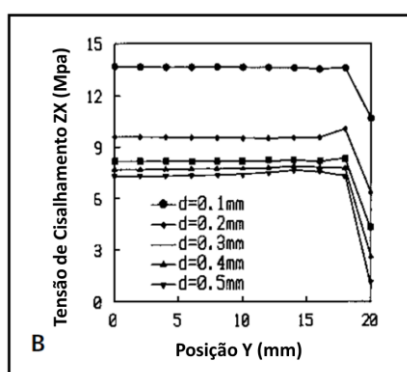


Figura 6 - Curva de Tensão de Cisalhamento ZX em função da posição em Y (adaptado de Chang, Shi & Dong, 1999)

Pensando no mercado automotivo, existem tipos de adesivos estruturais, em que sua utilização depende da região de aplicação no automóvel. Esses adesivos costumam ser aplicados em uma das duas fases: *body shop* (em português, montagem da carroceria), na adesivagem de partes estruturais da carroceria, ou *trim shop* (montagem dos acabamentos), na colagem de subcomponentes, como portas, capô, para-choque, dentre outros componentes.

Para a linha automotiva, os tipos de adesivo mais utilizados são a base de: Epóxi, acrilato-epóxi e poliuretanos. Todos estes, por serem utilizados na linha automotiva, possuem requerimentos que devem ser obedecidos pelo fabricante, como por exemplo: ter alta resistência a chamas, boa compatibilidade química, alta resistência mecânica e rigidez, resistência à corrosão e à humidade, tempo de cura otimizado, dentre outros requerimentos

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa mostrar como a adição de adesivo estrutural na UCCF interfere na resistência mecânica da união, que será quantificada por meio de ensaios de tração dos corpos de prova.

Para a definição do material, optou-se por um aço AISI 1012, de 2,0 mm de espessura, que possui baixo teor de carbono e alta ductilidade. Este material foi escolhido por ser comumente utilizado na indústria metalmeccânica.

Para realização dos ensaios de tração, as dimensões dos corpos de prova seguirão os padrões adotados pelo fabricante dos equipamentos de UCCF, a fim de utilizar as mesmas dimensões dos corpos de prova que são testados por eles. Na [Figura 7](#), é possível verificar as dimensões:

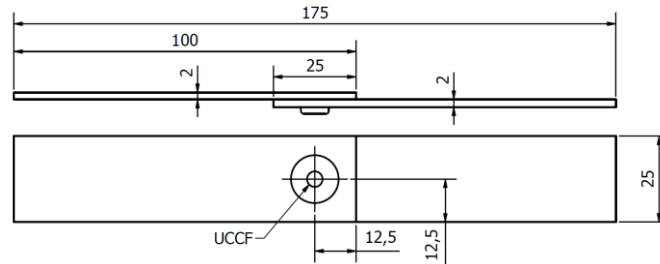


Figura 7 - Dimensões do corpo de prova (detalhamento fornecido pela TOX)

Em parceria com a empresa TOX Pressotechnik®, foi disponibilizado a utilização dos laboratórios da unidade de Joinville/SC para confecção dos corpos de prova.

Em uma parceria com a fabricante de adesivos estruturais SIKA®, o adesivo escolhido para realizar o teste é um adesivo a base de resina epóxi, conhecido comercialmente por SikaPower®-487. A escolha de utilizar este adesivo na análise experimental, se deve ao fato deste ser um dos mais utilizados na união de chapas metálicas no processo de montagem das carrocerias na indústria automobilística.

Foram feitos três tipos de corpos de provas, sendo: um somente com a UCCF, outro somente material adesivo e, por fim, a união híbrida, em que os resultados podem ser verificados no tópico a seguir, na [Figura 8](#), [Figura 9](#) e [Figura 10](#).

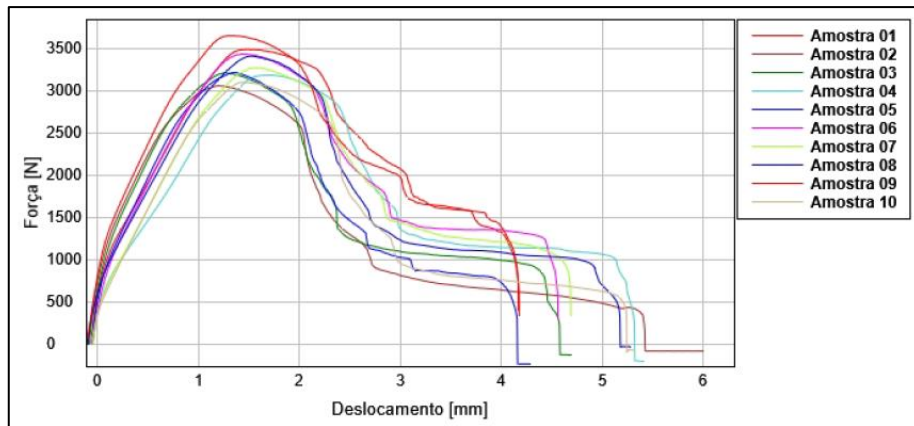


Figura 8 - Gráfico de força por deslocamento apenas para UCCF (Os autores, 2020)

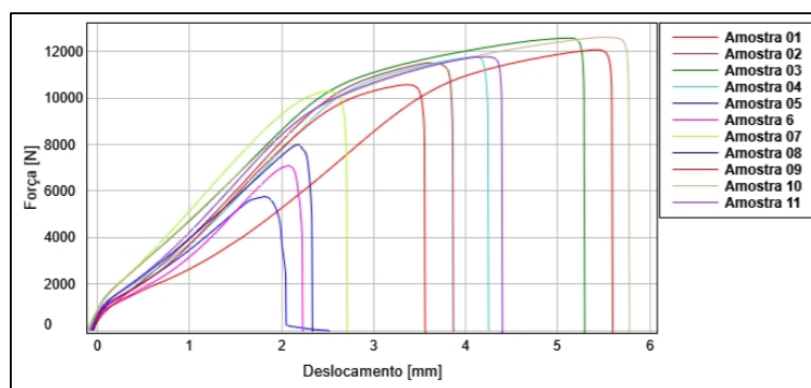


Figura 9 - Gráfico de força por deslocamento para união apenas com adesivo estrutural (Os autores, 2020)

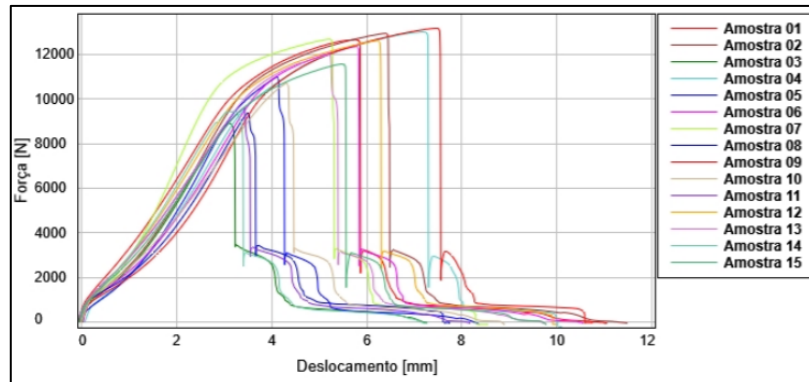


Figura 10 - Gráfico de força por deslocamento para união híbrida (Os autores, 2020)

As regiões destacadas na [Figura 11](#), mostram diferentes formatos de grão, o que evidencia a região de encruamento e, consequentemente, a existência de diferentes resistências na união.

Conhecer essas regiões permite ajustar a simulação computacional de maneira que o resultado seja mais próximo ao obtido em ensaios reais.

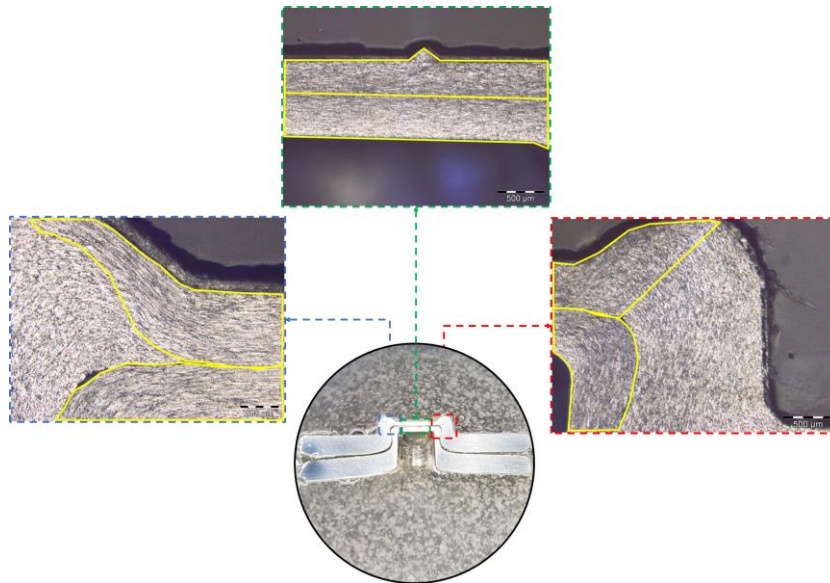


Figura 11 - Regiões de encruamento geradas pela UCCF (Os autores, 2020)

Tendo como base os resultados obtidos de forma experimental descritos anteriormente, foi realizado o teste de tração por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de fazer um comparativo e verificar uma possível convergência entre os resultados do ensaio físico com o resultado do ensaio experimental. Esta simulação trata-se do tracionamento do corpo de provas, sendo analisada a resistência a tração da UCCF.

Para realização da simulação, foi utilizado o software *Simufact Forming* e dois módulos de análise do ANSYS, sendo eles: *Explicit Dynamics* e *Static Structural*. Entretanto, após análises, verificou-se que o módulo *Static Structural* seria o mais aplicável para este estudo, devido características de parâmetros e argumentos inseridos para configuração da simulação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados do ensaio de tração

Como pode ser visto na [Figura 13](#), que compara os resultados obtidos nos ensaios de tração, existem duas fases de comportamento (destacadas em azul e verde) que, fazendo um comparativo com os gráficos dos corpos de prova apenas com adesivo estrutural e apenas com UCCF, são muito semelhantes a eles.

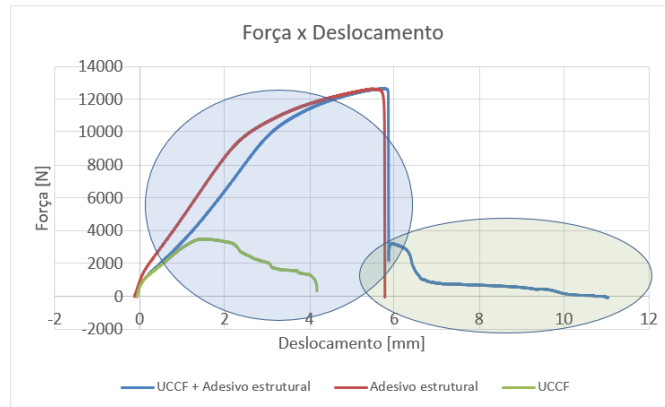


Figura 12 - Comportamento gráfico de cada tipo de corpo de prova (Os autores, 2020)

Ao verificar o gráfico da [Figura 12](#), é possível inferir que a junção dos dois métodos de união não interfere, de fato, na resistência mecânica como era esperado. Elas trabalham de forma individualizada, em que, na primeira fase (destacada pelo círculo maior em azul), é possível observar a resistência obtida em função do adesivo estrutural e, na segunda fase (destacada pela elipse em verde), é possível observar a resistência obtida em função da UCCF.

Mas, observando os dados um pouco mais a fundo, percebe-se uma melhoria de, aproximadamente, 55 % no valor da menor resistência mecânica obtida nos corpos de prova com união híbrida, comparado aos corpos de prova apenas com adesivo estrutural, como pode ser visto na [Figura 13](#).

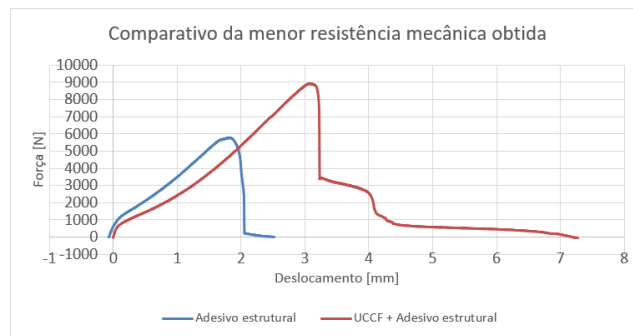


Figura 13 - Comparativo da menor resistência mecânica obtida (Os autores, 2020)

4.2. Simulação x ensaio real

A partir da simulação realizada e utilizando os parâmetros de construção, operação e geometrias, notou-se que a UCCF apresenta uma resistência à tração melhor do que a esperada, se comparada ao valor obtido através do ensaio de tração real ([Figura 14](#)).

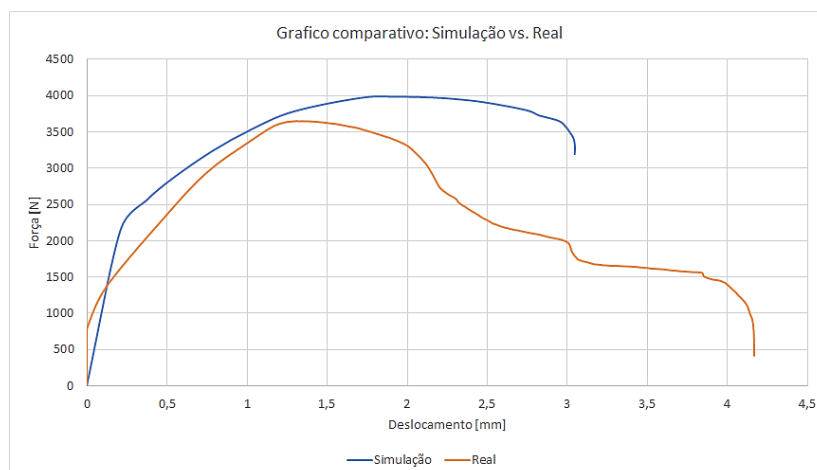


Figura 14 - Gráfico comparativo entre simulação e real (Os autores, 2020)

5. CONCLUSÕES

1. Realizar a UCCF + aplicação de adesivo estrutural não trouxe um aumento na resistência à tração da união como esperado (soma das resistências). Percebeu-se que existem dois comportamentos separados, onde primeiro ocorre o rompimento do adesivo e, em seguida, o rompimento do botão de forma individual.
2. A vantagem de realizar a união híbrida está no fato de que ela permite que o adesivo desenvolva a melhor performance de suas propriedades mecânicas, devido à UCCF remover os espaços entre as chapas. Dessa forma, evitando lacunas no contato que fariam com que a resistência mecânica final do adesivo fosse prejudicada.
3. Conforme mostrado na [Figura 13](#), realizar a união híbrida, permitiu um aumento de 3162,6 N na resistência à tração da união, que representa um acréscimo de 54,9 %.
4. A resistência à tração obtida da UCCF através da simulação computacional é superior em, aproximadamente, 9,19 %, se comparada a resistência máxima obtida nos ensaios mecânicos. Este resultado pode ser melhorado se for considerado o encruamento do material, gerado pelo processo de UCCF. Entretanto, ainda é um bom resultado para as condições configuradas no software.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da empresa TOX® e SIKA® pela disponibilização das informações e suporte técnico, e à todos os autores citados nas referências bibliográficas.

7. REFERÊNCIAS

- BABALO, V.; FAZLI, A.; SOLTANPOUR, M. **Electro-Hydraulic Clinching**: A novel high speed joining process. Qazvin: Elsevier: Journal of Manufacturing Processes, p. 1-11, 2018. 1-11 p. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612518305486>>. Acesso em: 16 Setembro 2019.
- CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Material Science and Engineering - An introduction**. 10^a. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 2018.
- CHANG, B. H.; SHI, Y. W.; DONG, S. J. **A Study on the Role of Adhesives in weld-bonded joints**. Flórida: Welding Journal, v. 78, 1999. 1-5 p. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/A-study-of-the-role-of-adhesives-in-weld-bonded-Chang-Dong/e80b8cdeceda40f2affd07b7b3c512212d20472e>>. Acesso em: 04 Abril 2020.
- LEI LEI, X. H.; TONGXIN YU, B. X. **Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials**. Kunming: Elsevier: Thin-Walled Structures, 2019. 1-9 p. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823119304690>>. Acesso em: 11 Setembro 2019.
- MUCHA, J. **The analysis of lock forming mechanism in the clinching joint**. Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics. Rzeszów, p. 12. 2011.
- SARMENTO, A. A.; PEREIRA, A. L. **Body in White Sheet Metal Joining**: Comparison between Weld Spot and Clinching in an Environment Perspective. São Caetano do Sul: SAE International, 2012. 1-5 p. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2012-36-0433/>>. Acesso em: 2 Abril 2020.
- TOX® PRESSOTECHNIK. Tecnologia de Clinching TOX®. **TOX® PRESSOTECHNIK**, 2020. Disponível em: <https://br.tox-pressotechnik.com/assets/countries/BR-PT/pdf/TOX_Clinching-Technology_80_br.pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STUDY OF THE MECHANICAL STRENGTH OF CLINCHING PROCESS WITH STRUCTURAL ADHESIVE APPLICATION

Alisson Alves Sarmiento

André Succissi Rinaldi

Ed Claudio Bordinassi

Julio Cesar Lopes da Silva

Mateus Vale Farkas

Instituto Mauá de Tecnologia – Praça Mauá, 1 – Mauá, São Caetano do Sul – SP – CEP: 09580-900

alisson.sarmiento@maua.br, andresuccissi@hotmail.com, ecb@maua.br, jclopes787@gmail.com,

mateusfarkas@gmail.com

Abstract. This work aims to verify how the application of structural adhesive could influence the clinching, in terms of increasing the static mechanical resistance of the union. This present work also performed a comparison between the results obtained by real tensile test and the test performed using computational simulation, seeking the convergence of these results. For this, the Steel AISI 1012 was used, which is a low carbon steel and high ductility, a material widely used in the metal industry. The join in question was submitted to tensile tests with different test body configurations, such as: join made only by structural adhesive, only by clinching and hybrid union (clinching + structural adhesive), carried to its limit, until the union rupture. The specimens made only with structural adhesive came to withstand loads of up to 12 kN, while those with clinching only supported approximately 3.6 kN. The hybrid joint (Clinching + adhesive) withstand 55% more load compared with lower load resistance for adhesive application only. It was possible to notice a significant deformation increase for hybrid version as well. Using the Finite Element Method (FEM), the analysis performed by computational simulation only for clinching resulted in a difference of 20.73% in mechanical resistance, comparing with the average of the results obtained experimentally, and 9.19% comparing with the higher mechanical resistance obtained in the tensile tests. These differences were associated with simplifications performed in the simulation and variations in the clinching process.

Keywords: Clinching, Forming sheet metal, Finite Element Method (FEM), Structural adhesive, Computer simulation

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.