

# COMPARAÇÃO ENTRE CHAPAS UNIDAS MECANICAMENTE POR *CLINCHING* E ADESIVAÇÃO POLIMÉRICA PARA USO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Luiza Bordin Carvalho <sup>1</sup>; Susana Marraccini Giampietri Lebrão <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professora do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo a comparação entre chapas de aço SAE 1020 galvanizadas unidas pelos processos mecânicos de clinching e adesivação polimérica, para uso na indústria automotiva. Para isso, foram realizados ensaios de tração, além de caracterização por macroscopia e microscopia eletrônica de varredura. O estudo se faz necessário visto que os mecanismos de união em questão diminuem o peso das juntas e vêm sendo cada vez mais utilizados na indústria. Observou-se baixa resistência à tração do clinching em relação ao adesivo, mas devido à menor área de união, sua tensão à tração é maior. Além disso, a união híbrida não resulta na soma das resistências de junções apenas por adesivo ou clinching.*

## Introdução

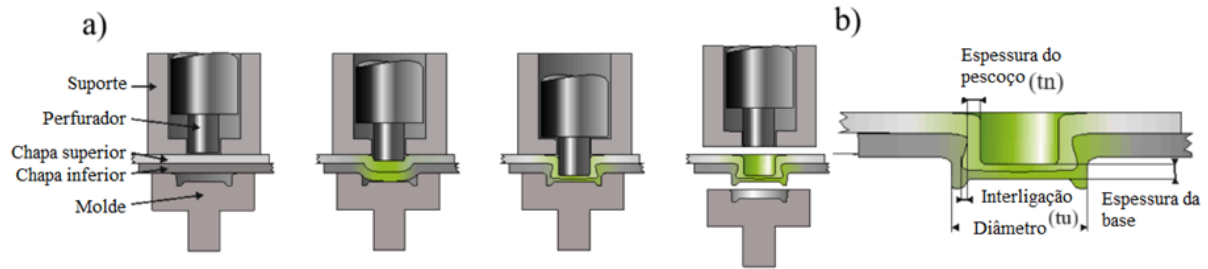
Junções mecânicas são uma tecnologia amplamente utilizada em construções dos mais diversos modelos, cuja função essencial é transferir cargas de um componente da junção para outro. Trazem a possibilidade de ligar diversos tipos de materiais em diferentes geometrias, sendo que combinações inteligentes contribuem para alívio de massa e maior segurança e sustentabilidade da estrutura, já que diminuem o consumo de energia e emissões de gases tóxicos. (Schramm et al, 2022)

O desenvolvimento socioeconômico traz a necessidade de novas tecnologias eficientes e sustentáveis. Na indústria automotiva, entram em vigor cada vez mais regulamentações ambientais e de segurança que exigem veículos mais leves e seguros. (Ciardiello, 2019) Uma das principais formas de a indústria adaptar-se a essas exigências é buscando opções de junções mecânicas mais leves e eficientes que as convencionais, como os adesivos e o *clinching*.

A união de chapas por conformação a frio, também conhecida como *clinching*, é o processo em que duas chapas sobrepostas são unidas por um perfurador e um molde. Essa conformação a frio gera um encaixe travado a partir da forma e do atrito entre as partes unidas. O processo de apenas um estágio é vantajoso pois diminui imprecisões observadas em junções que requerem um furo pré-existente para inserir os elementos de fixação (parafusos, rebites, etc.). (Schramm et al, 2022) Além disso, requer cerca de apenas 0,5 kW de energia por ponto, enquanto um único ponto de solda gasta cerca de 100 kW de energia, além da ausência do consumo de óleos e líquidos refrigerantes e emissão de gases tóxicos. (Sarmiento et al, 2021)

Alguns parâmetros importantes são a espessura da base, diâmetro, espessura do pescoço e espessura de interligação. Esta última é importante para determinar as propriedades da junta sob carga normal, enquanto a espessura do pescoço determina as propriedades sob tensão de cisalhamento. (Schramm et al, 2022) A Figura 1 ilustra o processo e parâmetros do *clinching*.

Figura 1 - Processo (a) e parâmetros (b) do *clinch*ing



Fonte: Schramm, 2022

O modo de falha da união por *clinch*ing depende principalmente da resistência do material da chapa, da espessura do pescoço e espessura de entrosamento. Os modos de fratura são: falha do pescoço, separação do botão ou falha híbrida. Um novo parâmetro em estudo, o fator de conformação  $c = t_n/t_u$ , ajuda a qualificar a qualidade da estrutura interna da união por *clinch*ing. Sendo  $t_n$  a espessura do pescoço e  $t_u$  a espessura de interligação, quando  $t_n$  decresce, o valor de  $c$  tende a zero. Isso implica que o pescoço se quebrou, ou seja, houve falha do pescoço; quando  $t_u$  decresce, o valor de  $c$  tende ao infinito, o que indica a ausência da interligação e, portanto, separação do botão. (Lei et al, 2019)

Os adesivos são materiais poliméricos capazes de juntar diferentes materiais que seriam difíceis ou impossíveis de juntar de outras maneiras. São mais leves e baratos que elementos de fixação convencionais, insensíveis a algumas condições corrosivas e possuem alta performance mecânica. Além disso, apresentam uma grande área de contato entre as partes unidas, o que melhora a distribuição de tensões e absorção de energia. (Ciardiello, 2019)

Parâmetros importantes são o comprimento da região sobreposta das chapas onde o adesivo está aplicado e a espessura do adesivo. Quanto maior a região sobreposta, maior será a resistência do adesivo a tensões normais e de cisalhamento. Quanto menor a espessura, maior será a resistência; a razão para este último é alvo de estudos, alguns dos quais concluem que quanto maior a espessura, maior o número de defeitos – espaços vazios e microfraturas – na camada do adesivo e mais rápida a deformação plástica desta mesma camada. (Koricho et al, 2016)

O adesivo pode romper-se das formas adesiva, coesiva e híbrida. A falha adesiva indica que houve falha na adesão entre o adesivo e o substrato. Já a falha coesiva ocorre quando o adesivo rompe em seu interior, ou seja, as forças de ligação entre o adesivo e o substrato foram maiores que a resistência interna do adesivo.

## Materiais e Métodos

Na produção dos corpos de prova, foram utilizadas chapas de aço baixo teor de carbono (SAE 1020) – com dimensões 25x100x0,8mm – recobertas de zinco pelo processo de imersão a quente, seguindo a norma NBR 7008 da ABNT. A Tabela 1 mostra a composição química nominal do aço utilizado.

Tabela 1 - Composição química do aço

Grau do aço	C máx. (%)	P máx. (%)	S máx. (%)
ZAR-230	0,20	0,04	0,04

Fonte: ABNT 2003

A fim de medir a espessura da camada de zinco nas chapas, foi realizado um ensaio em que foi medida a massa da chapa antes e depois da decapagem do zinco com solução à base de ácido clorídrico. Foi realizado, também, ensaio de medida de espessura pelo equipamento Mitutoyo.

Foram produzidas 10 configurações diferentes de corpos de prova, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2 - Configurações de corpos de prova

CP's retos	CP's dobrados em 90°
Adesivo	Adesivo
<i>Clinching</i>	<i>Clinching</i>
Adesivo+Câmara úmida	Adesivo+Câmara úmida
Adesivo+ <i>Clinching</i>	Adesivo+ <i>Clinching</i>
Adesivo+ <i>Clinching</i> +Câmara úmida	Adesivo+ <i>Clinching</i> +Câmara úmida

Os corpos de prova dobrados em 90° possuem a região da dobra com raio nominal de 2 mm. Para realização dos pontos de *clinching*, foi utilizada a máquina da fabricante mundial TOX Pressotechnik® com diâmetro de união 5,90 mm e profundidade da matriz 0,8 mm. Em parceria com a fabricante de adesivos estruturais SIKA®, foi disponibilizado o adesivo a base de resina epóxi SikaPower®-487, com tempo de cura de 20 minutos a uma temperatura de 170°C. Foram utilizados espaçadores de alumínio para garantir que a espessura e região de sobreposição dos adesivos fossem padronizadas no momento da confecção dos corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova estão indicadas nas Figuras 2 a 5.

Figura 2 - CP adesivado reto

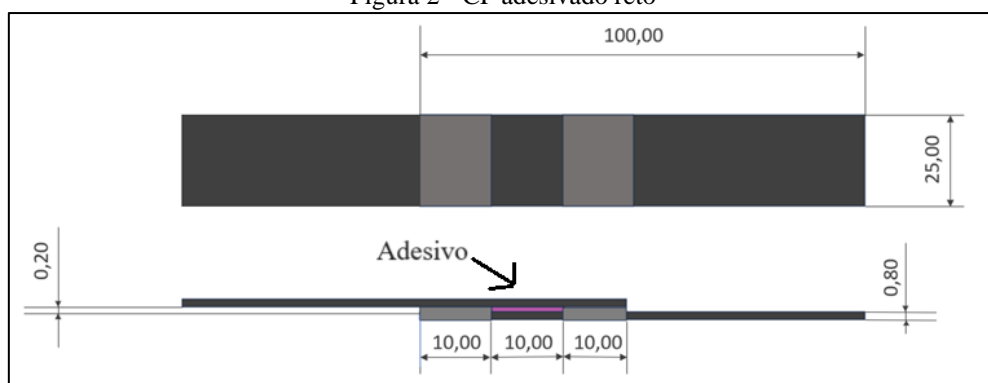


Figura 3 - CP adesivado dobrado em 90°

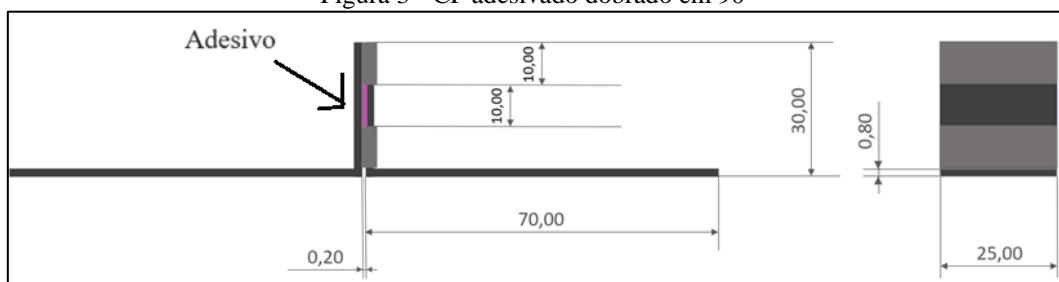


Figura 4 - CP com *clinch*ing reto

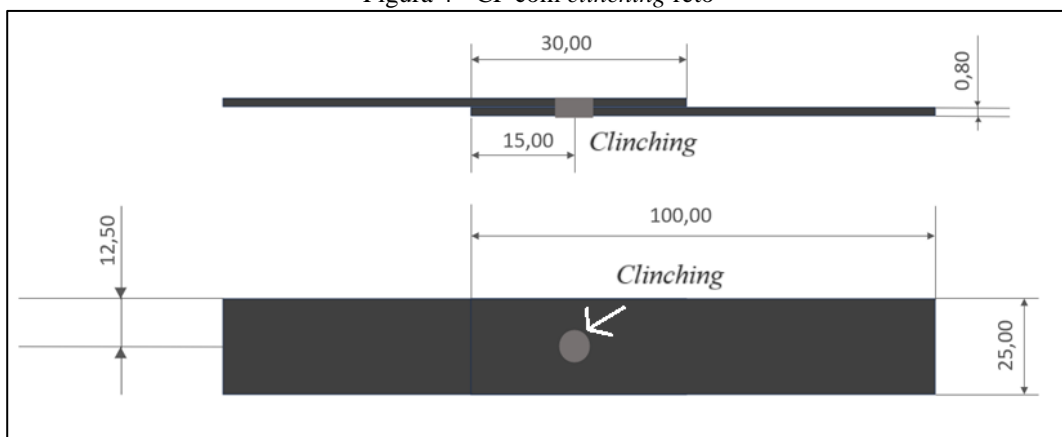
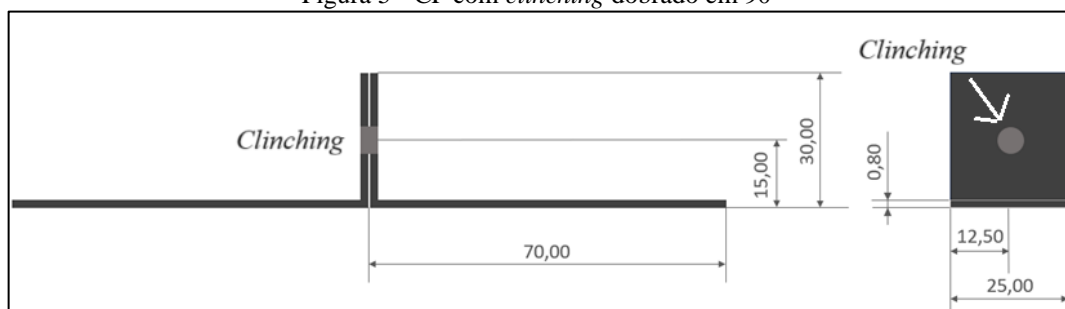


Figura 5 - CP com *clinch*ing dobrado em 90°



Nos corpos de prova com adesivo e *clinch*ing, este último foi realizado após a aplicação e cura do adesivo. O ensaio de câmara úmida durou 240 horas, em conformidade com a norma NBR 8095 da ABNT. Seu objetivo é avaliar a performance do adesivo em condições extremas de oxidação e alta umidade.

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de tração seguindo a norma ASTM E8 a fim de analisar as curvas de tensão por deformação de cada configuração, além de avaliar a relação entre as forças e tensões suportadas com as áreas de contato de cada método de junção. A Tabela 3 mostra as áreas consideradas no cálculo das tensões, para cada configuração de CP.

Tabela 3 - Áreas consideradas no cálculo das tensões

CP's retos e dobrados em 90°	
Configuração	Área (mm <sup>2</sup> )
Adesivo	250,00
<i>Clinching</i>	27,34
Adesivo+ <i>Clinching</i>	250,00

Foram também realizados ensaios de tração para posterior análise no software GOM Correlate. Para isso, CP's retos com adesivo, *clinch*ing e adesivo+*clinch*ing receberam uma pintura especial e foram submetidos a ensaios de tração, os quais foram gravados. Os arquivos de vídeo foram então inseridos no software, gerando uma malha de deformação dos CP's por meio da pintura realizada.

Foi utilizado o equipamento estéreo Leica S9i para observar a seção transversal dos corpos de prova na região das junções mecânicas e comparar os diferentes parâmetros do *clinch*ing quando este é aplicado em chapas com e sem adesivo. Além disso, foram capturadas fotografias macrográficas dos corpos de prova rompidos, que permitem avaliar os modos de falha do adesivo – coesiva, adesiva ou híbrida – e do *clinch*ing – falha do pescoço, separação do botão ou híbrida; além da deformação dos corpos de prova.

Por fim, a metalografia seguiu a norma ASTM E3-11 e teve como objetivo observar os modos de fratura dos CP's após os processos de adesivação e conformação a frio.

## Resultados e Discussão

Foram realizados ensaios para medir a espessura da camada de zinco nas chapas: o ensaio com equipamento Mitutoyo indicou uma média de 9,178 $\mu$ m de zinco e, no ensaio de camada de zinco, calculou-se uma média de 8,58 $\mu$ m, com um desvio padrão aceitável de 0,42 entre os dois ensaios. A Tabela 4 mostra os resultados dos ensaios de tração em CP's retos.

Tabela 4 - Ensaio de tração em CP's retos

	Limite de resistência à tração		Carga máxima		Alongamento	
	Média (MPa)	Desvio padrão	Média (kgf)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
<b>Clinching</b>	61,93	3,14	172,65	8,74	1,36	0,28
<b>Adesivo</b>	25,02	0,5	637,94	12,86	4,54	1,73
<b>Adesivo + clinching</b>	28,25	0,94	720,28	23,98	3,52	1,69

É possível observar que a resistência à tração do *clinching* é consideravelmente menor que do adesivo, porém, como sua área de junção é quase 10 vezes menor, a tensão à tração do *clinching* é maior que do adesivo. Além disso, na configuração híbrida, houve um aumento de 12,90% na carga máxima e limite de resistência à tração em relação ao CP unido por adesivo, mas não ocorreu a soma das resistências das uniões apenas por adesivo ou *clinching*. A Tabela 5 mostra os resultados dos ensaios de tração na mesma configuração, após o ensaio de câmara úmida.

Tabela 5 - Resultados após ensaio de câmara úmida

	Após câmara úmida					
	Limite de resistência à tração		Carga máxima		Alongamento	
	Média (MPa)	Desvio padrão	Média (kgf)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
<b>Clinching</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Adesivo</b>	25,25	0,79	643,59	20,10	2,70	1,07
<b>Adesivo+ clinching</b>	24,39	2,75	621,83	39,77	2,18	0,29

Observa-se que o ensaio de câmara úmida afetou pouco a performance do adesivo, visto que este é um material já utilizado na indústria automobilística, ou seja, deve ser capaz de suportar os efeitos do intemperismo. A Tabela 6 mostra os resultados dos ensaios de tração em CP's dobrados em 90°.

Tabela 6 - Ensaios de tração em CP's dobrados em 90°

	Limite de resistência à tração		Carga máxima		Alongamento	
	Média (MPa)	Desvio padrão	Média (kgf)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
<b>Clinching</b>	8,06	0,85	22,48	2,38	17,6	2,96
<b>Adesivo</b>	1,18	0,05	30,2	1,16	22,39	1,77
<b>Adesivo + clinching</b>	1,2	0,12	30,7	3,09	21,86	0,84

Observa-se, assim como nos corpos de prova retos, que a resistência à tração do *clinching* é consideravelmente menor que do adesivo, porém a tensão à tração é maior, devido à diferença de áreas de junção.

A configuração dos CP's retos permite avaliar o desempenho dos métodos de junção sob tensões normais, enquanto os CP's dobrados permitem avaliar este mesmo desempenho sob tensões de cisalhamento. Assim, pode-se confirmar que as duas junções possuem resistências à

tensão normal muito maiores que ao cisalhamento, comparando os resultados dos ensaios de tração nas configurações reta e dobrada. Nos CP's dobrados, o alongamento é maior pois há o desdobraimento das chapas antes da deformação da junção.

Além disso, nota-se que o *clinch* confere um aumento na resistência à tensão normal, mas não influencia a resistência à tensão de cisalhamento dos corpos de prova unidos por adesivo+*clinch*. O mesmo foi observado em uniões soldadas que receberam aplicação de adesivo, por Chang e Dong (1999). A Tabela 7 mostra os resultados dos ensaios de tração na mesma configuração, após o ensaio de câmara úmida.

Tabela 7 - Resultados após ensaio de câmara úmida

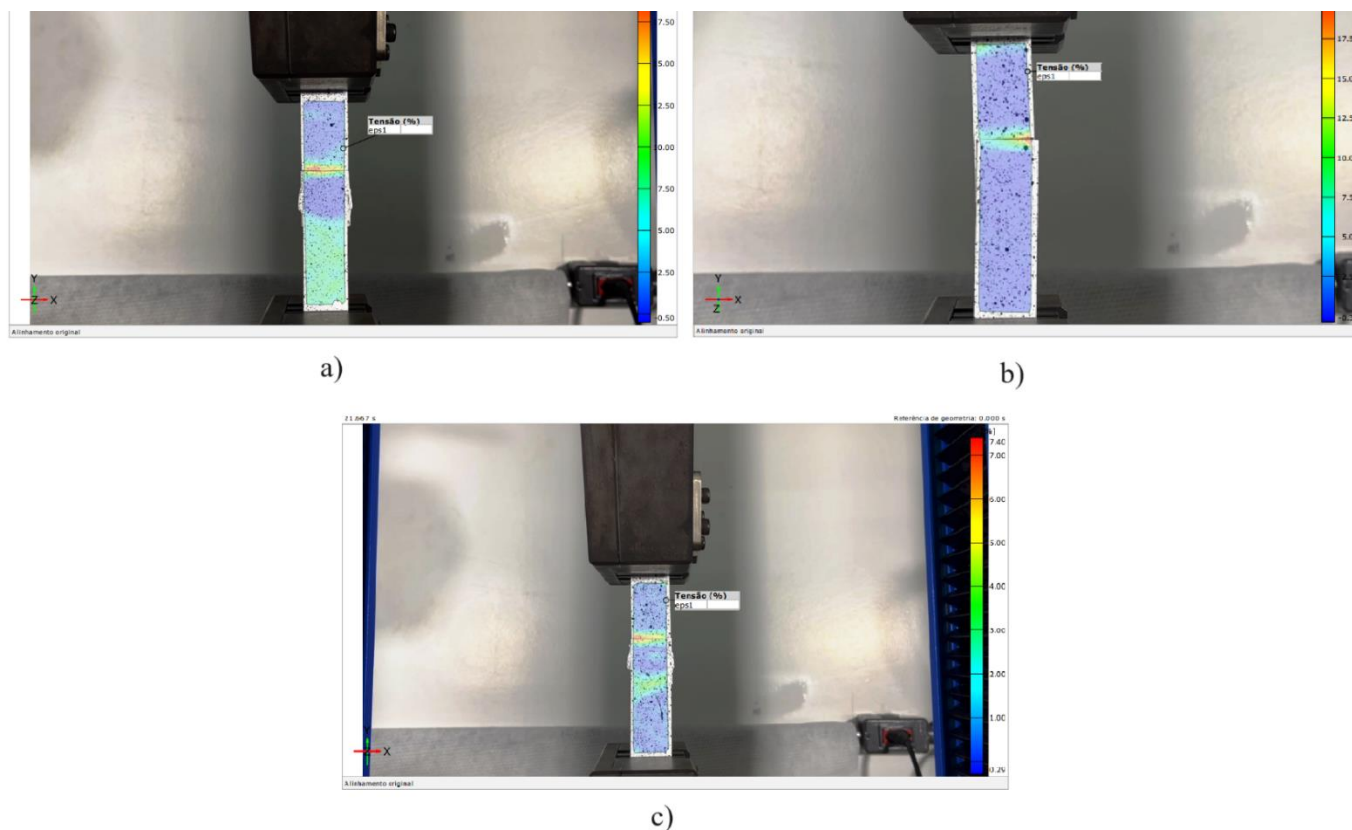
	Após câmara úmida					
	Limite de resistência à tração		Carga máxima		Alongamento	
	Média (MPa)	Desvio padrão	Média (kgf)	Desvio padrão	Média (%)	Desvio padrão
<b><i>Clinching</i></b>	-	-	-	-	-	-
<b>Adesivo</b>	1,00	0,11	25,53	2,93	25,47	2,27
<b>Adesivo+ <i>clinch</i></b>	0,87	0,13	22,08	3,38	23,27	2,72

Novamente, é possível observar que o ensaio de câmara úmida afeta pouco o desempenho do adesivo, tanto nos CP's com apenas com adesivo como para adesivo+*clinch*.

De todas as configurações de ensaios de tração, observou-se que a resistência do *clinch* é menor que do adesivo, enquanto sua tensão à tração é muito maior, devido às diferenças de áreas de junção anteriormente mencionadas. No entanto, na prática, não é possível aumentar a área do *clinch* para aumentar sua resistência, já que os pontos possuem diâmetro fixo e devem ter uma distância mínima entre si; enquanto isso, há a possibilidade de aplicar o adesivo em menores ou maiores áreas.

A Figura 6 mostra as malhas de tensão x deformação obtidas no software GOM Correlate, utilizando o recurso DIC (Digital Image Correlation).

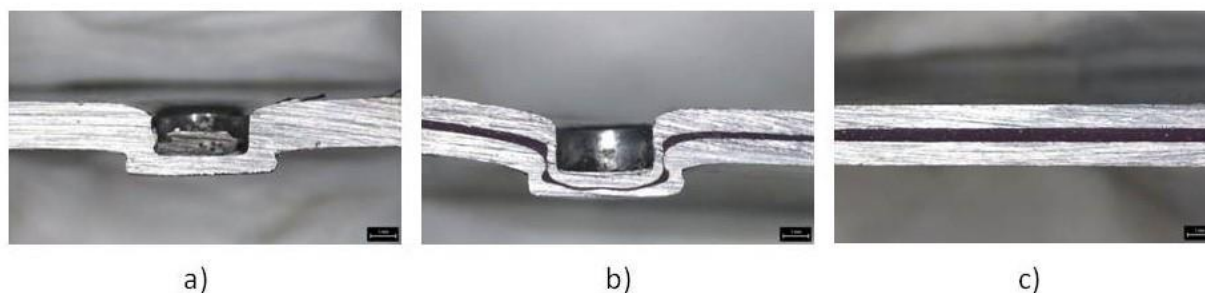
Figura 6 – Deformação (%) – CP adesivado (a); CP com clinching (b); CP com adesivo+*clinching* (c).



Imagens dos CP's com adesivo e união híbrida mostram que as tensões atuam principalmente em cima do adesivo. Tensões na chapa são explicadas pela ausência de calços nos ensaios de tração. Assim, as tensões de tração são aplicadas ligeiramente fora da linha neutra, de forma simétrica, o que causa momentos fletores nas chapas. Imagem do CP com *clinching* mostra que se as duas chapas não estiverem perfeitamente alinhadas, a junção sofre não apenas esforços de tração, como também de torção.

A Figura 7 mostra imagens da seção transversal dos corpos de prova na região das junções mecânicas, obtidas no equipamento estéreo Leica S9i com aumento de 10x.

Figura 7 - CP com *clinching* (a); CP com adesivo+*clinching* (b); CP adesivado (c).

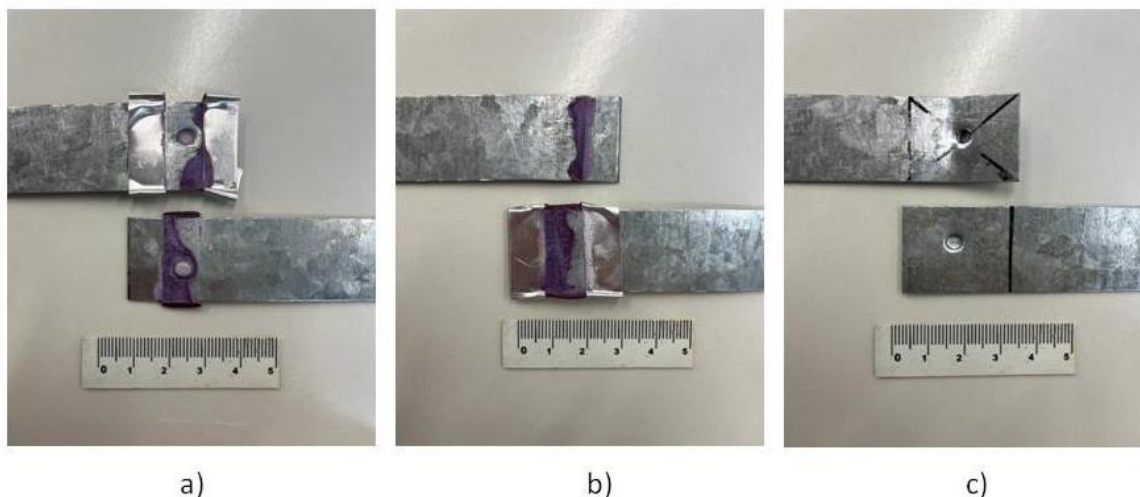


A partir das imagens, é possível observar que a aplicação do *clinching* por cima do adesivo impede que o primeiro atinja seus parâmetros ideais de espessura de pescoço e entrosamento. Além disso, observa-se que a utilização de espaçadores garantiu a uniformidade da espessura do adesivo ao longo da chapa.

A Figura 8 mostra macrografias dos corpos de prova após a ruptura nos ensaios de tração.



Figura 8 - CP com adesivo+clinchng (a); CP com adesivo (b); CP com *clinchng* (c).



Nos corpos de prova com adesivo, observa-se que ocorreu falha mista, ou seja, houve tanto falha adesiva como coesiva. Já o *clinchng* sofreu falha do botão, ou seja, não houve ruptura do pescoço durante a separação das chapas. Isso indica que a espessura do pescoço se sobressaiu sobre a espessura de entrosamento na junção.

A Figura 9 mostra um exemplo de corpo de prova dobrado em 90° rompido, confirmando o que foi afirmado anteriormente sobre o alongamento dos CP's dobrados ser maior que dos CP's retos, já que há o desdobramento da chapa antes do real alongamento da junção.

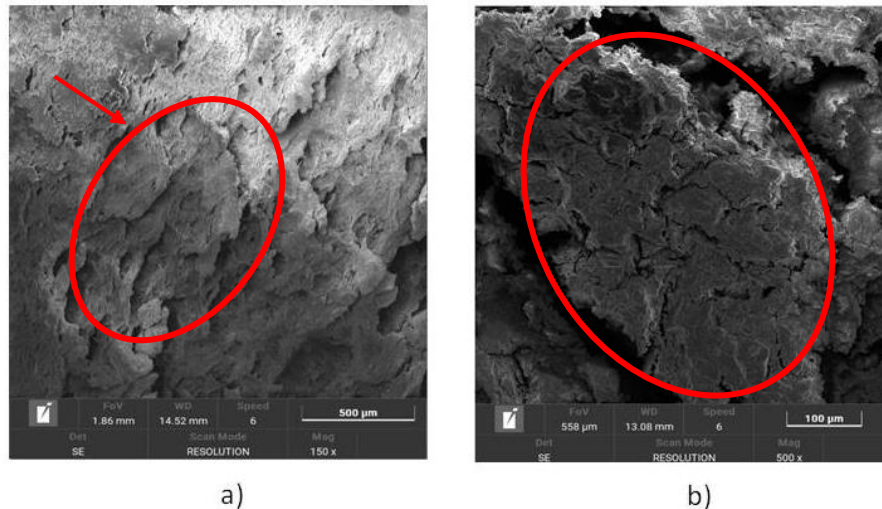
Figura 9 - Corpo de prova dobrado em 90°



A Figura 10 mostra imagens de corpos de prova com adesivo e adesivo+*clinchng* no microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 150x e 500x, respectivamente.

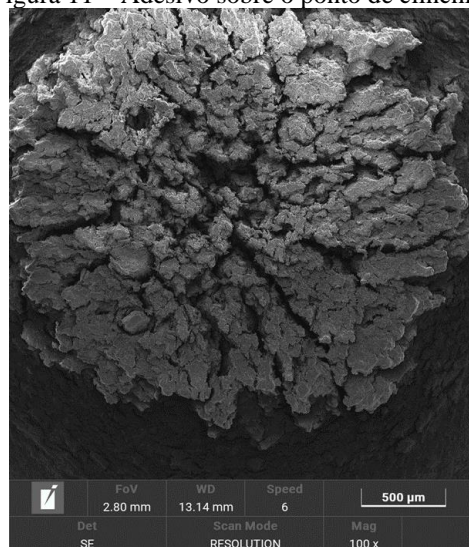


Figura 10 - CP com adesivo (a); CP com adesivo+*clinch*ing (b).



As imagens mostram um comportamento ligeiramente frágil do adesivo, indicado por fraturas planas e curtas. O corpo de prova com união híbrida apresenta uma fratura ainda mais plana, devido à pressão aplicada no adesivo durante o *clinch*ing. A falta de ductilidade do adesivo é um dos fatores que explicam sua alta resistência mecânica. Por fim, a Figura 11 mostra a imagem obtida com o microscópio eletrônico de varredura do adesivo na região do *clinch*ing, na configuração de união híbrida.

Figura 11 – Adesivo sobre o ponto de *clinch*ing



Observam-se microfissuras causadas pelo *clinch*ing sobre o adesivo, as quais podem explicar o comportamento frágil deste último. Além disso, as microfissuras diminuem o alongamento e resistência do adesivo.

## Conclusão

O adesivo apresenta melhor desempenho em aplicações onde há maior área de união, e a junção terá maior resistência mecânica que se fosse realizada com *clinch*ing. Porém, em aplicações onde seja necessária uma junção com boa resistência, mas haja pouco espaço disponível, o *clinch*ing se sairá melhor que o adesivo, já que suporta mais força para menores áreas de aplicação.

Dos ensaios de tração em corpos de prova com adesivo+*clinch*ing, conclui-se que a união híbrida não resulta na soma das resistências das uniões apenas por *clinch*ing ou adesivo,

assim como observado por Sarmiento et al (2021). Como observado por Chang e Dong (1999), a união híbrida não afeta a resistência à tensão de cisalhamento do adesivo.

Por fim, pôde-se confirmar que a exposição do adesivo à umidade não afeta suas propriedades, assim como enunciado por Ciardiello et al, 2019 e Saito et al, 2022.

### **Agradecimentos**

Ao IMT, a empresa Sika Brasil e a FAPESP (Processo Fapesp nº 2020/09163-3).

### **Referências**

- Chang, B., Dong, S. A study of the role of adhesives in weld-bonded joints. Flórida, Estados Unidos da América: *Welding Journal*, v. 78, 1999. p. 1-5.
- Ciardiello, R. Mechanical characterization and separation tests of a thermoplastic reinforced adhesive used for automotive applications. Turim, Itália: *Procedia Structural Integrity*, v. 24, 2019. p. 155 – 166.
- Ciardiello, R., Belingardi, G., Martorana, B., Brunella, V. Physical and mechanical properties of a reversible adhesive for automotive applications. Torino, Itália: *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 89, 2019. p. 117-128.
- Koricho, E. G., Verna, E., Belingardi, G., Martorana, B., Brunella, V. Parametric study of hot-melt adhesive under accelerated ageing for automotive applications. Itália: *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 68, 2016. p. 169-181.
- Lei, L., He, X., Yu, T., Xing, B. Failure modes of mechanical clinching in metal sheet materials. Kunming, China: *Thin-Walled Structures*, v. 144, 2019. p. 1-9.
- Sarmiento, A. A., Rinaldi, A. S., Bordinassi, E. C., Silva, J. C. L., Farkas, M. V. Estudo Da Resistência Mecânica Da União De Chapas Metálicas Por Conformação A Frio Com Aplicação De Adesivo Estrutural. In: 11º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 24 a 26 de maio de 2021, Curitiba, PR, Brasil. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2021.
- Schramm, B., Martin, S., Steinfelder, C., Bielak, C. R., Brosius, A., Meschut, G., Troster, T., Wallmersperger, T., Mergheim, J. A Review on the Modeling of the Clinching Process Chain - Part I: Design Phase. Alemanha: *Journal of Advanced Joining Processes*, v. 6, 2022. p. 100-133.
- Schramm, B., Harzheim, S., Weiß, D., Joy, T. D., Hofmann, M., Mergheim, J., Wallmersperger, T. (2022). A Review on the Modeling of the Clinching Process Chain - Part III: Operational Phase. Alemanha: *Journal of Advanced Joining Processes*, v. 6, 2022. p. 100-135.
- Saito, G. K., Thinem, L. W., Neto, P. M. P., Ferreira, A. C., Moraes, V. T., Lebrão, S. M. G., Souza, E. M. M., Lebrão, G. W. Avaliação da Tensão de Ruptura de Adesivo Híbrido Estrutural para Carroceria no Setor Automotivo. In: 75º Congresso Anual da ABM – Internacional, 7 a 9 de junho de 2022, São Paulo, SP, Brasil. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2022.