

CARACTERIZAÇÃO DE JUNTA SOLDADA POR SOLDA PONTO PARA USO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Vinícius Fernandes Ferreira ¹; Susana Marraccini Giampietri Lebrão ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização e comparação das características mecânicas da união de chapas de aço carbono, por solda resistência a ponto, com equipamentos de corrente contínua de média frequência e adaptativa, sendo que ambas foram submetidas aos mesmos ensaios (tração, caracterização metalográfica, câmara úmida e micro dureza). Tal processo merece um estudo, uma vez que dentro da indústria automobilista é cada vez mais comum a substituição das soldas por adesivos estruturais.*

Introdução:

As peças de chapa metálica costumam ser montadas por vários métodos de união. A tecnologia de soldagem por resistência elétrica (RSW) é um dos métodos de união mais importantes na indústria automotiva. (Noh, Koh, Chung, Song, & Lee, 2018)

O processo ocorre devido ao Efeito Joule (resultado da transformação de energia elétrica em energia térmica), que obedece a seguinte equação.

$$Q = I^2 * R * t$$

Q = Quantidade de calor gerado [J]

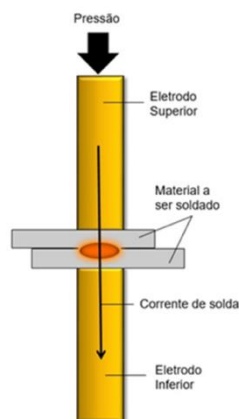
I = Corrente [A]

R = Resistência dos condutores [Ω]

t = Duração da corrente [s]

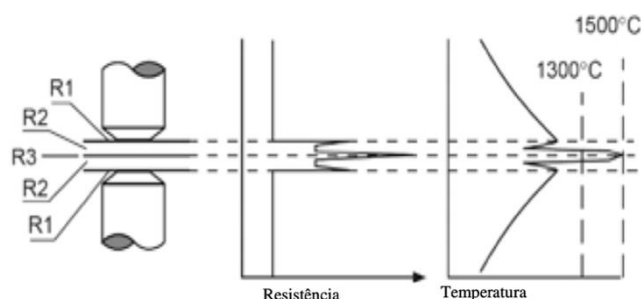
O princípio de solda ponto é a soldagem a partir de uma pressão exercida por 2 eletrodos não consumíveis, que transmitem uma alta corrente elétrica às chapas de metal a serem soldadas. Por conta da resistividade dos metais (propriedade do material que define o quanto o material impede a passagem de corrente elétrica), quando se passa uma alta corrente elétrica, o local chega em temperaturas elevadíssimas, chegando a fundir uma chapa na outra, como mostrado na figura 1.

Figura 1 - Esquema de funcionamento de uma solda ponto



Fonte: (Isotron, 2021)

Figura 2 - Esquema das resistências em uma solda ponto



Fonte: Ruuki Co. (2009)

Na figura 2 é possível observar as resistências envolvidas no processo de soldagem. De todas as resistências, a R3 é a mais importante, porque é nesse local que se formará o ponto e, conseqüentemente, a geração de calor para ocorrer a fusão localizada. As resistências R1 também tem forte influência, e ambas devem ter seus valores de resistividade elétrica o mais baixo possível. As resistências R2 não têm muita influência nos ciclos iniciais de soldagem e, sim, nos finais. (Brandi, 2004)

Depois de soldada, a área ao redor da junta é conhecida como zona termicamente afetada (ZTA). A ZTA é uma área ao redor da solda e nos aços é frequentemente o ponto de falha, tornando-se uma parte importante da solda por pontos. As características da ZTA podem ser significativamente diferentes dependendo do material e da liga soldada. (Summerville, Compston, & Doolan, 2019)

Parâmetros de regulagem são as condições que, com um determinado valor e uma combinação entre eles, é realizado um ponto de solda, efetivando a união de uma junta. Os valores certos desses parâmetros são os responsáveis por uma boa ou má qualidade da solda. Em soldagem a ponto por resistência existem três parâmetros principais, isto é, corrente de soldagem, força de eletrodo e tempo de soldagem os quais são aplicados em um ciclo de soldagem. (Santos, 2013)

Material e Métodos:

Os corpos de prova (CPs) a serem soldados são de aço de baixo teor de carbono (1008), revestido de zinco por eletrodeposição e seguem a norma NBR 7008 da ABNT, suas dimensões são 100mmX25mmX1mm. Na tabela 1 a seguir está a composição química do aço utilizado.

Tabela 1 - Requisitos da composição química do aço

Grau de Aço	C Máx. (%)	Mn Máx. (%)	P Máx. (%)	S Máx. (%)	Al Máx. (%)
ZEE grau 1	0,08	0,45	0,03	0,03	-

Fonte: (ABNT, 2003)

Conseqüentemente, as suas propriedades mecânicas, assim como a composição química, também seguem os requisitos da norma como mostra a tabela 2.

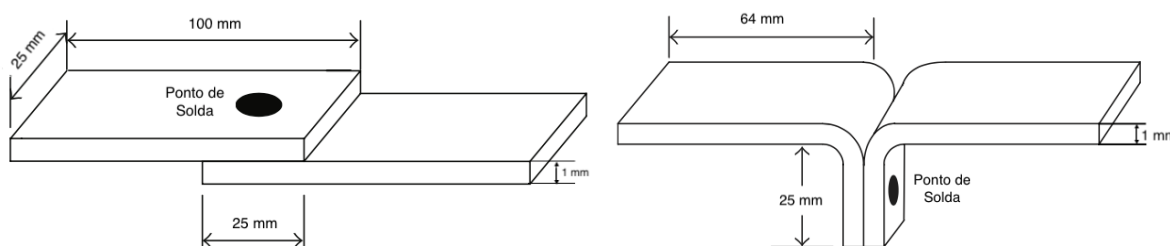
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço

Grau do Aço	Limite de escoamento [MPa]	Resistência à Tração [MPa]	Alongamento mínimo %
ZEE grau 1	140/260	380 máx.	31

Fonte: (ABNT, 2003)

Os corpos de prova foram soldados na empresa Düring do Brasil, sendo utilizada a máquina Telwin, modelo Inverspotter 14000/2 smart, que realizou tanto a solda média frequência como a solda Adaptativa. A figura 4 mostra a localização do ponto de solda nos CP's.

Figura 3 – Configuração dos CP's



Nos corpos de prova soldados com a solda Adaptativa, para cada corpo de prova foi utilizado um parâmetro diferente, determinado pela própria máquina, a partir de diversos critérios como, por exemplo; espessura do corpo de prova, área de contato, resistência do material. Na solda média frequência foram utilizados os seguintes parâmetros de soldagem, pré-determinados na própria máquina, conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados

a)

CP	Corrente [A]	Tempo [ms]	Força [daN]	Energia [J]
A1 P	9881	387	434	3596
A2 P	9865	397	434	3596
A3 P	9881	365	434	3596
A4 P	9865	385	434	3596
A5 P	9865	369	434	3596
A6 P	9865	353	434	3596
A1	9881	371	434	3596
A2	9881	436	434	3596
A3	9881	388	434	3596
A4	9865	372	434	3596
A5	9865	377	434	3596
A6	9865	426	434	3596
A7	9881	388	434	3596
A8	9881	373	434	3596
A9	9881	385	435	3596
A10	9865	398	434	3596
A11	9881	372	435	3596
A12	9865	402	435	3596

b)

CP	Corrente [A]	Tempo [ms]	Força [daN]
M P	9802	610	432
M	9802	610	432

c)

obs:	
M	Média frequência
M P	Média frequência Peel Test (CP dobrado)
A	Adaptativa
A P	Adaptativa Peel Test (CP dobrado)

a) Parâmetros para o processo adaptativo. b) Parâmetros para o processo de corrente contínua de média frequência. c) Legenda da nomenclatura utilizada dos CP's

Na tabela 4 estão discriminados os ensaios realizados em cada CP separadamente.

Tabela 4 - Ensaios realizados em cada CP

CP	Tração	Câmara Úmida	Metalografia	Ultrassom	Arrancamento	Dureza	CP	Tração	Câmara Úmida	Metalografia	Ultrassom	Arrancamento	Dureza
A1 P			X	X			M1 P					X	
A2 P					X		M2 P					X	
A3 P					X		M3 P					X	
A4 P					X		M4 P					X	
A5 P					X		M5 P					X	
A6 P					X		M6 P			X	X		
A1			X			X	M1		X	X	X		
A2	X	X					M2	X					
A3	X	X					M3			X			X
A4	X	X					M4	X					
A5	X	X					M5	X					
A6	X						M6	X					
A7	X						M7	X					
A8	X						M8	X	X				
A9	X						M9	X	X				
A10	X						M10	X	X				
A11	X	X					M11	X	X				
A12		X	X	X			M12	X	X				

O processo de Ultrassom foi realizado para a verificação do diâmetro do ponto de solda. O mesmo deve respeitar a norma AWS D8, que define que o diâmetro do ponto de solda deve seguir a seguinte equação.

$$D_n = 4 * \sqrt{e}$$

Sendo:

e = espessura da chapa.

O ensaio de câmara úmida durou 240 horas, a uma umidade relativa de 100% e em uma temperatura de 38°C, conforme a norma NBR 8095. Este ensaio teve como principal objetivo forçar o processo de oxidação dos CPs, para posteriormente ser realizado um ensaio de tração e observar os efeitos da oxidação, quando comparados com um CP sem nenhum tipo de oxidação.

O ensaio de tração visou observar a curva tensão x deformação e caracterizar as propriedades mecânicas da solda, seguindo a norma ASTM E8, por conta dos CPs terem um baixo teor de carbono, em que teoricamente é possível observar nitidamente a transição entre o regime elástico e plástico. Foram realizados diversos ensaios de tração com os mesmos em diferentes configurações:

- A 1ª configuração foram os CPs com o ponto de solda padrão, mas esses receberam uma pintura especial, para que fosse possível posteriormente utilizar um arquivo de vídeo no Software GOM Correlate. Dentro deste software a pintura é reconhecida e processada e conforme o ensaio de tração acontece, o software através da pintura realizada, consegue gerar uma malha de deformação no vídeo.
- A 2ª configuração foram os CPs que, anteriormente ao ensaio de tração, passaram pela câmara úmida.
- A 3ª configuração e última foram os CPs que, anteriormente ao processo de solda, foram dobrados 90 graus. Esse processo foi realizado justamente para observar o comportamento do ponto de solda no ensaio de tração. Por conta dos CPs estarem dobrados, vão existir componentes de forças que não existem no CP sem ser dobrado.

A metalografia seguiu a norma ASTM E3-11, e teve como principal objetivo observar a microestrutura dos CPs após passar pelo processo de soldagem. No processo de polimento utilizaram-se duas pastas de diamante, uma de 6µm e outra de 1 µm. Depois do polimento feito, as amostras foram submetidas a um ataque químico, a fim de tornar-se possível a visualização das microestruturas, sendo que o ataque realizado foi o Nital 3% (ácido nítrico diluído em álcool).

Com todo esse processo, foi possível observar a microestrutura dos CPs através da microscopia ótica. Também foi utilizado o equipamento estéreo (Lupa), para observar as amostras com um menor aumento e realizar medidas.

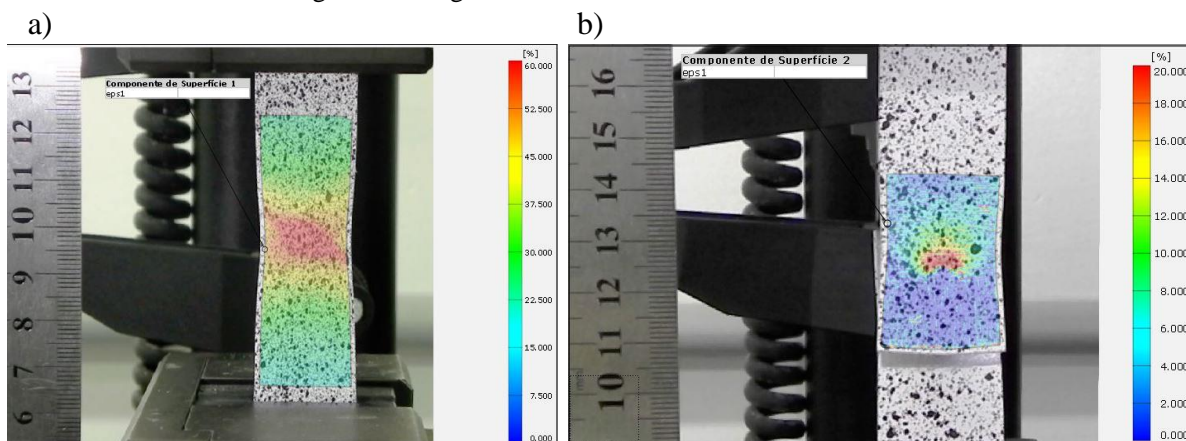
O ensaio de micro dureza, seguiu a norma ASTM E 384-110000, foi realizado no Centro Universitário Fundação Santo André, com o equipamento da QATM, modelo Qness 60 A+ EVO.

Resultados e Discussão:

Foi feito um ensaio de perda de massa, seguindo a norma NBR 7397, para avaliar a camada de zinco dos corpos de prova e foram obtidos 114 g/m^2 de zinco nos CPs. Também foi medida a espessura da camada de zinco ao longo dos CPs, que teve uma espessura média de $9,481 \mu\text{m}$.

Nas imagens a seguir estão as malhas de tensão x deformação obtidas no software GOM Correlate, utilizando o recurso DIC (Digital Image Correlation). Na figura 4 é possível observar dois CPs, um sem nenhum tipo de solda, isso foi feito para fins comparativos, e outro, soldado.

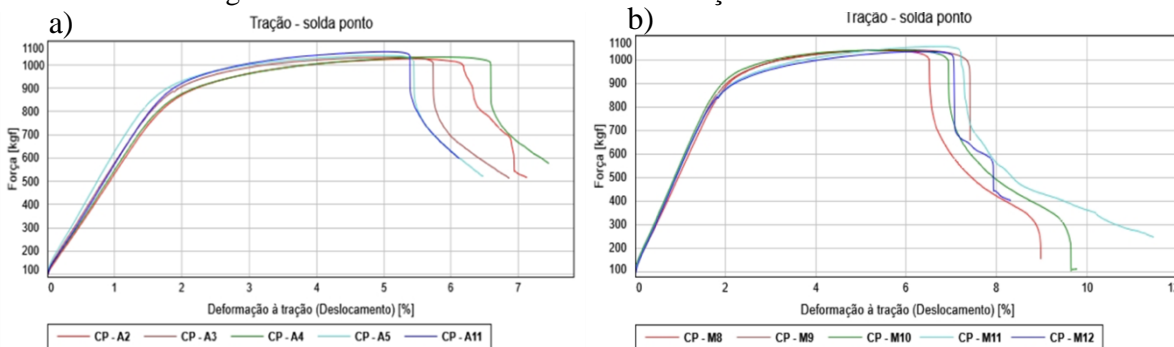
Figura 4 - Imagens obtidas no software GOM Correlate



a) CP sem nenhum tipo de solda, imagem obtida para fins comparativos. b) CP soldado, nota-se uma maior deformação em torno do ponto de solda.

Nas figuras 5, 6 e 7 e tabelas 5, 6 e 7 pode-se observar os gráficos obtidos nos ensaios de tração e os resultados.

Figura 5 - Gráficos obtidos no ensaio de tração CPs câmara úmida



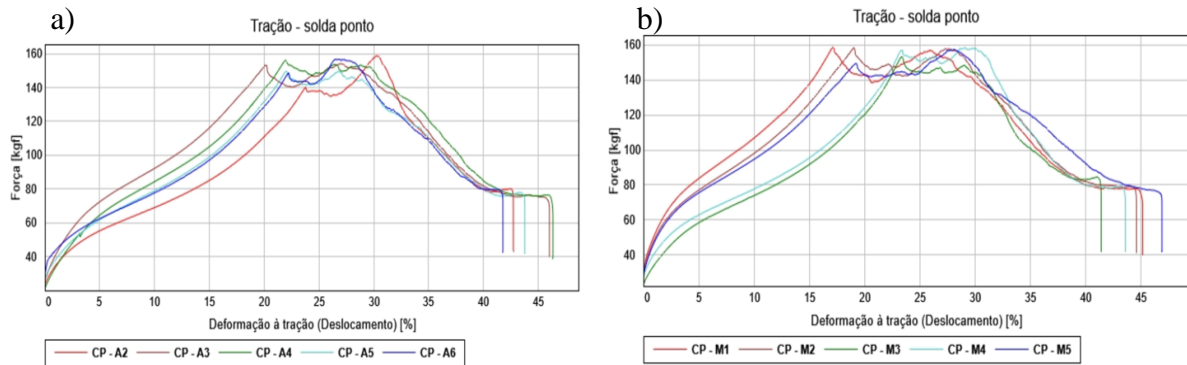
a) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda adaptativa. b) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda média frequência.

Tabela 5 – Resultados obtidos do ensaio de tração dos CPs de câmara úmida

CP's A	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]	CP's M	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]
Média	1038,796	6788,338	Média	1042,74	6333,48
Desvio Padrão	11,3355384	574,747744	Desvio Padrão	8,14996012	275,231783

É possível observar que os CPs que foram soldados pela solda de média frequência tiveram resultados mais lineares e uma resistência a tração média ligeiramente maior. Já aqueles soldados pela solda adaptativa tiveram em média um módulo de Young maior.

Figura 6 - Gráficos obtidos no ensaio de tração CPs dobrados 90°



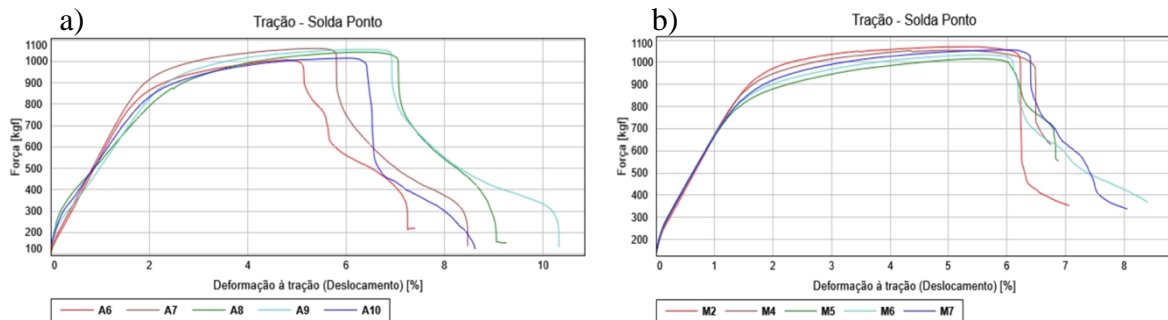
a) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda adaptativa. b) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda média frequência.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de tração dos CPs dobrados 90°

CP's A	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]	CP's M	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]
Média	155,112	150,916	Média	157,318	249,748
Desvio Padrão	3,45815269	31,1194518	Desvio Padrão	2,27827127	81,2502389

Neste ensaio os CPs que foram soldados por média frequência tiveram um melhor resultado tanto na resistência a tração quanto no módulo de Young.

Figura 7 - Gráficos obtidos no ensaio de tração CPs padrão



a) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda adaptativa. b) Gráfico do ensaio de tração dos CPs soldados por solda média frequência.

Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio de tração dos CPs normais

CP's A	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]	CP's M	Resistência a Tração [Kgf]	Módulo de Young [MPa]
Média	1036,788	8690,564	Média	1046,344	11343,454
Desvio Padrão	24,2993358	2839,40789	Desvio Padrão	21,0720711	1369,00076

Novamente neste ensaio os CPs soldados por média frequência obtiveram um módulo de Young e uma resistência a tração média maior do que os CPs soldados por solda adaptativa, que tiveram no módulo de Young um alto desvio padrão.

Essas diferenças entre as soldas média frequência e adaptativa são explicadas pelo fato de que as soldas de média frequência foram realizadas com os mesmos parâmetros, diferentemente da adaptativa, que cada CP teve um parâmetro diferente. Isso explica o porquê, em quase todos os ensaios, a solda por média frequência teve sempre os menores valores de desvio padrão. O parâmetro da solda média frequência que teve maior diferença em relação a solda adaptativa foi o tempo de solda [ms].

Na figura 8 é possível observar a microestrutura ferrítica do aço 1008. Na figura 9 é possível notar que houve um crescimento de grão, quando comparado com a figura 8. Na figura 10 é possível observar que já não existe um contorno de grão claro, as estruturas estão acirculares, notando-se uma estrutura de bruto de fusão. E na figura 11 nota-se como a microestrutura muda ao longo do comprimento, à medida que nos afastamos da região fundida até chegarmos no material base, onde as temperaturas não influenciam.

Figura 8 - Metal base 500x Nital

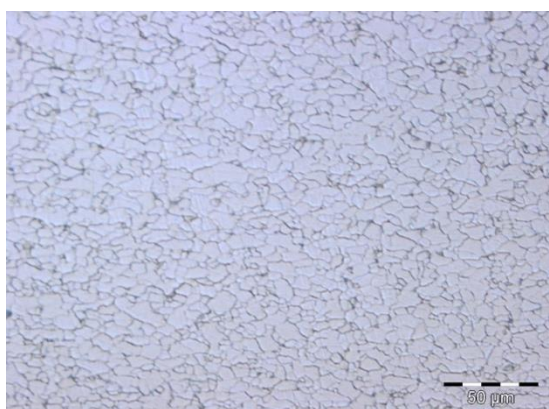


Figura 9 - Zona termicamente afetada 500x Nital

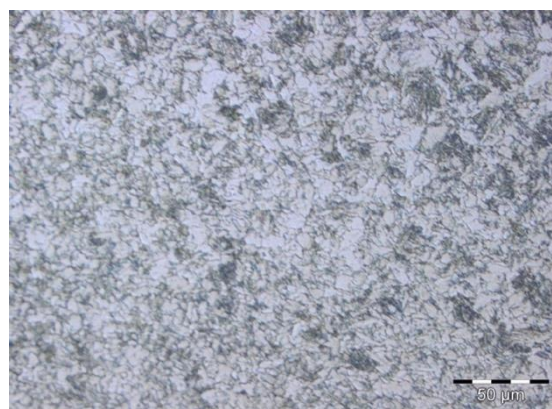


Figura 10 - Zona fundida (ponto de solda) 200x Nital



Figura 11 - Vista das 3 áreas 50x Nital

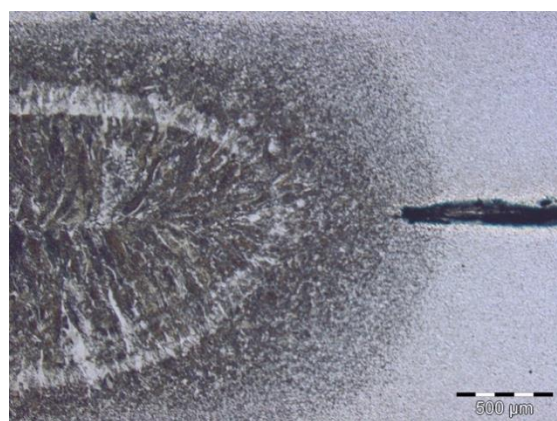
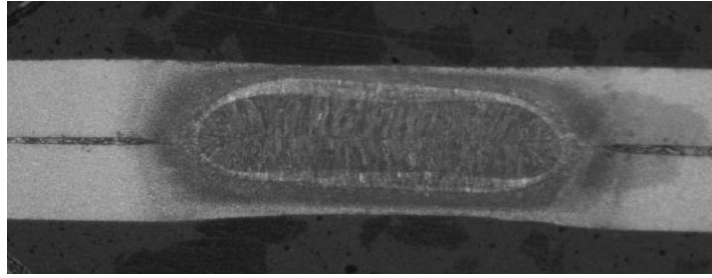


Figura 12 - Vista geral do ponto de solda 20x Nital



Na tabela 8, a seguir, estão as medidas determinadas pela norma AWS D8.1, obtidas pelo software ImageJ. Neste software é possível tirar medidas a partir de imagens, que foram obtidas pelo equipamento estéreo da Zeiss.

Tabela 8 - Medidas obtidas no software ImageJ

CP	Zona termicamente afetada [mm]	Zona Fundida [mm]	Largura da deformação[mm]	Profundidade da deformação [mm]	Espessura da chapa 1 [mm]	Espessura da chapa 2 [mm]	Altura do ponto de solda na chapa 1 [mm]	Altura do ponto de solda na chapa 2 [mm]
A1	7,361	5,951	7,383	0,18	1,216	1,224	0,856	0,658
A12	7,45	5,959	6,408	0,194	1,167	1,197	0,829	0,748
A1P	7,595	6,27	6,921	0,243	1,167	1,211	0,662	0,946
M1	7,617	5,725	7,092	0,23	1,167	1,211	0,608	0,833
M3	8,036	6,347	7,526	0,221	1,203	1,224	0,968	0,635
M6P	7,554	5,766	7,513	0,248	1,23	1,263	0,568	0,856

As figuras 13 e 14 mostram a posição aproximada da localização dos pontos de medida e os gráficos das micro durezas obtidas. Os pontos na cor vermelhas indicam onde foram realizadas medidas de microdureza, no total de 11 medidas, começando no metal base à esquerda e terminando no ponto de solda (de A até K).

Figura 13 – Localização das medidas de microdureza

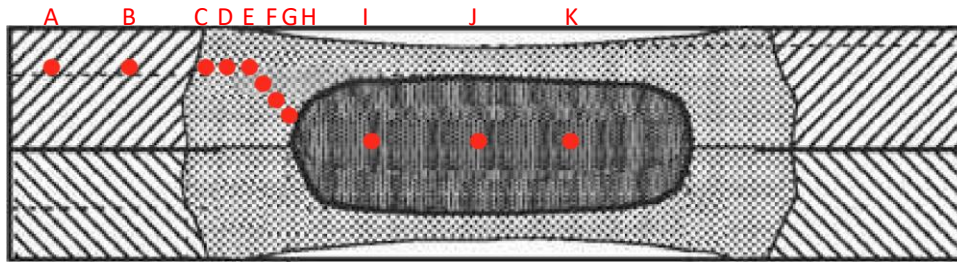
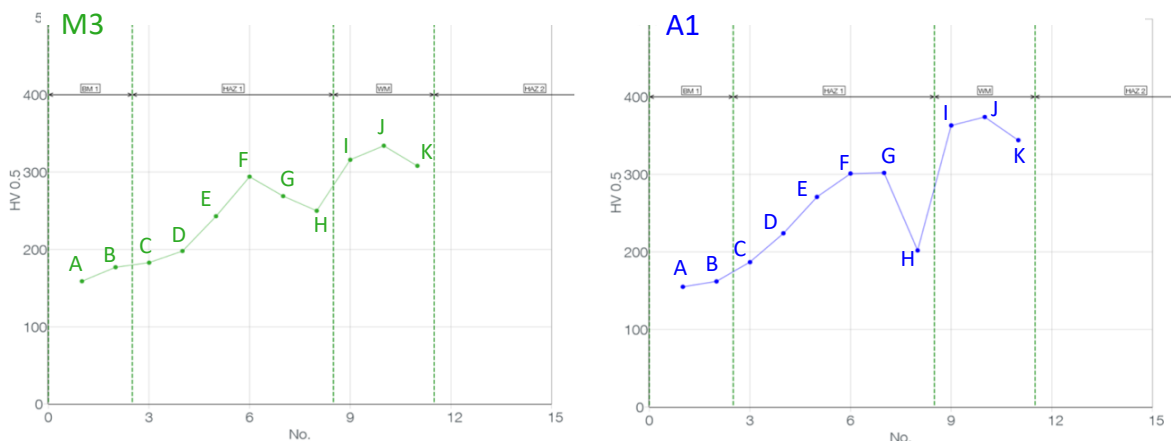
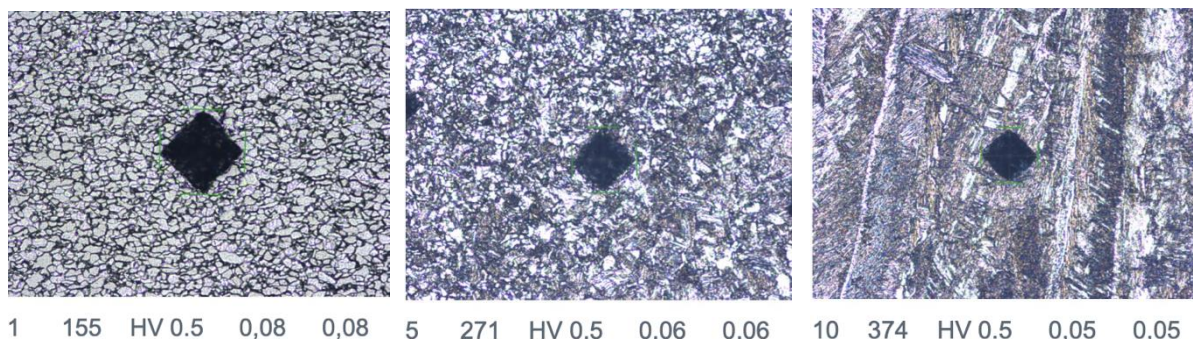


Figura 14 – Gráficos das microdurezas obtidas nos CPs M3 e A1



É possível observar que perto da área fundida houve uma queda de dureza, isto se explica pelo crescimento dos grãos provocado pelas temperaturas alcançadas nesta região. A maior dureza na zona fundida e maior redução de dureza observadas nas amostras soldadas com processo adaptativo podem ser atribuídas a maior energia térmica.

Figura 15 – Imagens obtidas durante o processo de microdureza



Na tabela 9 a seguir estão os resultados obtidos no ensaio de microdureza.

Tabela 9 - Durezas obtidas

M3		A1	
Local	Dureza [HV 0.5]	Local	Dureza [HV 0.5]
MB 1	159	MB 1	155
MB 2	177	MB 2	162
HAZ 1	183	HAZ 1	187
HAZ 2	198	HAZ 2	224
HAZ 3	243	HAZ 3	271
HAZ 4	294	HAZ 4	301
HAZ 5	269	HAZ 5	302
HAZ 6	250	HAZ 6	202
ZF 1	316	ZF 1	363
ZF 2	334	ZF 2	374
ZF 3	308	ZF 3	344

Nota-se que em ambos os CPs, o local “HAZ 6” teve uma queda de dureza, isso mostra que a região em torno do ponto de solda é um local muito prejudicado pelo efeito térmico.

Conclusão:

As deformações máximas ficam localizadas em torno do ponto de solda, mostrando que a zona termicamente afetada é uma região frágil, confirmando o que (Summerville, Compston, & Doolan, 2019) disse: “a área em torno do ponto de solda ‘zona termicamente afetada’ é uma região mais propícia a ocorrerem falhas”.

A diferença entre as soldas adaptativa e média frequência confirmam o que (Santos, 2013) disse: “Os valores certos desses parâmetros são os responsáveis por uma boa ou má qualidade da solda.”. Os parâmetros selecionados para a solda média frequência foram muito assertivos, por conta disso não houve grandes diferenças entre as soldas. Se os parâmetros da solda média frequência não fosse tão bem escolhidos, com certeza, a solda adaptativa teria um desempenho muito melhor. Então, por conta dos parâmetros utilizados na média frequência, as diferenças nos ensaios de tração, na metalografia e na microdureza, foram muito pequenas.

Referências:

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7008: Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro: Abnt Editora, 2003.
- Brandi, S. D. (2004). Soldagem por resistência. In: E. Wainer, S. D. Brandi, & F. D. Homen de Mello (Eds.), *Soldagem, processos e metalúrgia* (4a ed., p. 494). São Paulo, São Paulo, Brasil: Editora Edgard Blücher Ltda.
- Noh, W., Koh, Y., Chung, K., Song, J.-H., & Lee, M.-G. (2018). *Influence of dynamic loading on failure behavior of spot welded automotive steel sheets*. República da Coreia.
- Santos, W. A. (2013). *Estudo da influência dos parâmetros de regulação na soldagem por resistência na indústria automobilística*. São Caetano do Sul.
- Shafiq, A. S. (2017). *Modeling of spot weld with failure for crash simulations*. Gothenburg, Suíça.
- Summerville, C., Compston, P., & Doolan, M. (2019). *A comparison of resistance spot weld quality assessment techniques*. Acton, Austrália.
- Isotron. (2021). *Isotron*. Fonte: Isotron: <https://isotron.com.br/solda-por-resistencia/>

Agradecimentos:

À orientadora deste trabalho Professora Doutora Susana Marraccini Giampietri Lebrão.
Ao Professor Mestre José Agustín Castillo Lara.
Às instituições: Instituto Mauá de Tecnologia (IMT) e a Fundação Santo André (FSA).
Aos técnicos dessas instituições, sendo alguns deles: Pablo Aparecido Delfino Maravelli (técnico do laboratório de ensaios mecânicos do IMT), Ivone Rubio da Silva e Érica Fernanda da Silva Tirelli (técnicas da divisão de ensaios e análises do IMT), Daniela Santos (técnica do laboratório de materiais da FSA). E, em especial, à Margarete Cristina Moreira Serbino (técnica do laboratório de metalografia do IMT).
Às empresas que colaboram com essa pesquisa, sendo elas: General Motors (que forneceu os corpos de provas) e a Düring do Brasil (que forneceu o equipamento para realização das soldas).