

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

EDUARDO PEGORINI

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR
RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DAS JUNTAS EM ESTRUTURAS
AUTOMOTIVAS**

CAXIAS DO SUL

2021

EDUARDO PEGORINI

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR
RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DAS JUNTAS EM ESTRUTURAS
AUTOMOTIVAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Área de concentração: Processos de
Fabricação.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez
Acosta.

**CAXIAS DO SUL
2021**

EDUARDO PEGORINI

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR
RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DAS JUNTAS EM ESTRUTURAS
AUTOMOTIVAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade de Caxias do Sul como requisito
parcial à obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Área de concentração: Processos de
Fabricação.

Aprovado em: 29/11/2021

Banca Examinadora

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Adelair Lino Colombo

Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli

Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida repleta de saúde, e por estar ao meu lado em todos os momentos difíceis que já superei.

Aos meus pais, Iglênio e Marinês, por tudo.

À minha irmã, Flávia, pelo carinho e motivação.

À minha parceira de todas as horas, Fernanda, que me incentivou a concluir este curso, em razão do conhecimento adquirido e como um grande objetivo a ser alcançado, trazendo maior liberdade e autonomia para as escolhas futuras.

A todos os meus familiares, amigos e colegas, que me presentearam com sua companhia e ajuda durante a realização da graduação.

Aos meus professores, em especial ao professor Victor Hugo Velazquez Acosta, pela ajuda, compreensão e profissionalismo durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores Adelair Lino Colombo e Alexandre Vieceli, que dedicaram um pouco de seu precioso tempo para avaliar este trabalho.

Um agradecimento especial ao professor Alexandre Vieceli, pelo entusiasmo e motivação transmitidos para que este curso fosse concluído.

RESUMO

As carrocerias dos automóveis são em sua maioria, constituídas de um conjunto de chapas de aço conformadas, que são posteriormente unidas a partir do processo de soldagem a ponto por resistência. O presente trabalho teve como objetivo analisar a influência dos parâmetros de soldagem aplicados, na resistência mecânica e nas propriedades físicas e metalúrgicas de juntas utilizadas em estruturas automotivas. Dois conjuntos de chapas foram testados, e representam de modo genérico a longarina dianteira e a lateral inferior de um veículo, respectivamente. Na composição das juntas, estão presentes aços ao carbono, e aços de alta resistência mecânica, escolhidos de acordo com a região da carroceria em que são empregados. Para legitimar este estudo, foram soldados corpos de prova padronizados, sob diferentes combinações de parâmetros da soldagem a ponto. Em seguida, as amostras foram submetidas à avaliações da presença de defeitos superficiais, e de tamanho da solda, além de ensaios de resistência ao cisalhamento, metalográfico e de microdureza. Os resultados obtidos indicaram que a intensidade das principais variáveis deste processo, altera o nível de calor gerado na junta soldada, afetando o tamanho do ponto e influenciando em sua resistência ao cisalhamento. A combinação de parâmetros que promoveu melhores resultados na soldagem da junta com duas chapas de aço SAE 1010, teve corrente aplicada de 9,0 kA, força de soldagem de 2,7 kN e tempo de liberação de corrente de 490 ms. No experimento com aços SAE 1006 e USI – LN 700, destaca-se a combinação executada com corrente em 8,0 kA, força de 2,4 kN e tempo de 420 ms.

Palavras-chave: Carrocerias automotivas. Soldagem por pontos. Aços de alta resistência.

ABSTRACT

Most of the car bodies are made up of a set of shaped steel sheets, which are later joined through the process of spot welding by resistance. This study aimed to analyze the influence of applied welding parameters, mechanical strength and physical and metallurgical properties of joints used in automotive structures. Two sets of plates were tested, and they generically represent the front spar and the underside of a vehicle, respectively. In the composition of the joints, carbon steels and High-Strength Low-Alloy steels, chosen according to the region of the bodywork in which they are used. To legitimize this study, standardized specimens were welded under different combinations of spot welding parameters. Afterwards, the samples were submitted to evaluations for the presence of surface defects, and for the size of the weld, in addition to shear strength, metallographic and microhardness tests. The results obtained indicated that the intensity of the main variables of this process alters the level of heat generated in the welded joint, affecting the size of the spot and influencing its shear strength. The combination of parameters that promoted the best results in welding the joint with two SAE 1010 steel sheets had an applied current of 9.0 kA, a welding force of 2.7 kN and a current release time of 490 ms. In the experiment with SAE 1006 and USI – LN 700 steels, the combination performed with current at 8.0 kA, force of 2.4 kN and time of 420 ms stands out.

Keywords: Automotive bodies. Spot welding. High strength steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Equipamentos de soldagem a ponto automatizados	15
Figura 2 – Principais processos de soldagem por resistência.....	19
Figura 3 - Processo de soldagem por pontos (<i>Spot Welding</i>).....	20
Figura 4 - Ciclo de soldagem por pontos.....	21
Figura 5 – Pinças de solda suspensas	23
Figura 6 - Efeito da corrente de soldagem na resistência ao cisalhamento	24
Figura 7 - Expulsão de metal fundido na soldagem por pontos	25
Figura 8 - Resistência ao cisalhamento vs. diâmetro do ponto	29
Figura 9 - Forma das capas de eletrodo	31
Figura 10 - Capas de eletrodo.....	31
Figura 11 - Sistema de refrigeração dos eletrodos e distribuição de temperatura.....	32
Figura 12 - Distribuição dos aços automotivos em uma carroceria	35
Figura 13 - Seção transversal de uma soldagem de topo por pontos.....	37
Figura 14 – Gráfico de influência da resistência mecânica na soldabilidade.....	39
Figura 15 – Gráfico de influência da espessura do revestimento na soldabilidade.....	42
Figura 16 – Microestrutura do aço GA780DP após soldagem.....	43
Figura 17 - Fluxograma de Atividades	45
Figura 18 – Longarina dianteira de veículo.....	46
Figura 19 – Lateral externa inferior e reforços da carroceria	47
Figura 20 – Representação do corpo de prova	49
Figura 21 - Amostras antes da soldagem.....	52
Figura 22 – Máquina de solda a ponto multifuncional.....	53
Figura 23 - Embutimentos com amostras	55
Figura 24 - Microdurômetro Shimadzu	56
Figura 25 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material SAE 1010.....	58
Figura 26 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material USI – LN 700.....	60
Figura 27 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material SAE 1006.....	60
Figura 28 - Corpos de prova após ensaio de cisalhamento.....	62
Figura 29 - Resistência ao cisalhamento vs. corrente em SAE 1010	64
Figura 30 - Resistência ao cisalhamento vs. impulso em SAE 1010	65
Figura 31 - Gráfico de resistência ao cisalhamento vs. corrente para diferentes impulsos.....	65
Figura 32 - Resistência ao cisalhamento vs. corrente em SAE 1006/LN 700.....	67

Figura 33 - Gráfico de resistência ao cisalhamento vs. impulso em 7,0 kA e 9,0 kA.....	68
Figura 34 - Micrografias no metal de base do aço SAE 1010.....	69
Figura 35 - Micrografias na zona de transição e ZTA do aço SAE 1010.....	70
Figura 36 - Micrografias na zona fundida do aço SAE 1010	70
Figura 37 - Micrografias no metal de base em SAE 1006 e USI - LN 700.....	71
Figura 38 - Micrografias da ZTA nos aços SAE 1006 e USI - LN 700	71
Figura 39 - Micrografia da zona fundida no aço USI - LN 700	72
Figura 40 - Microdureza na junta com material SAE 1010.....	73
Figura 41 - Microdureza na junta com materiais SAE 1006 e USI - LN 700	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetro dos pontos de solda para categorias A, B e C	29
Tabela 2 – Classificação dos Aços de Alta Resistência	34
Tabela 3 – Parâmetros de Soldagem para Aços	38
Tabela 4 – Composição química dos materiais	48
Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais	48
Tabela 6 - Parâmetros de soldagem e seus níveis.....	50
Tabela 7 - Parâmetros de soldagem selecionados	51
Tabela 8 - Propriedades físicas e resistência elétrica dos materiais	57
Tabela 9 - Calor gerado na soldagem	58
Tabela 10 - Diâmetros dos pontos e relação sinal-ruído em SAE 1010.....	59
Tabela 11 - Diâmetros dos pontos e relação sinal-ruído em SAE 1006.....	61
Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento e relação sinal-ruído em SAE 1010.....	63
Tabela 13 - Cargas de cisalhamento e relação sinal-ruído em SAE 1006/LN 700	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) – Lei de Joule	21
Equação (2) – Resistência Elétrica do Material.....	28
Equação (3) - Diâmetro mínimo dos pontos de solda	28
Equação (4) - Cálculo de carbono equivalente.....	38
Equação (5) - Relação sinal-ruído "maior é melhor"	52

LISTA DE SIGLAS

AF	Ferrita Acicular
AHSS	<i>Advanced High Strength Steels</i>
ANOVA	Análise de Variância
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DP	<i>Dual Phase</i>
FS(A)	Ferrita com Segunda Fase Alinhada
FS(NA)	Ferrita de Widmanstätten
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
HSS	<i>High Strength Steels</i>
IIW	<i>International Institute for Welding</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MB	Metal de Base
MFDC	Multifásico de Corrente Contínua
PF(I)	Ferrita Intragranular Poligonal
RWMA	<i>Resistance Welder Manufacturers Association</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
UHSS	<i>Ultra High Strength Steels</i>
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	16
1.2	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	SOLDAGEM.....	18
2.1.1	Soldagem por Resistência Elétrica	18
2.1.2	Soldagem por Resistência Elétrica por Pontos	19
2.1.3	Princípios de Funcionamento da Soldagem por Pontos.....	20
2.1.4	Máquinas de Solda a Ponto	22
2.1.5	Parâmetros da Soldagem por Pontos.....	23
2.1.5.1	Corrente de Soldagem	23
2.1.5.2	Tempo de Soldagem	25
2.1.5.3	Força de Soldagem	26
2.1.5.4	Resistências de Contato e Resistência Elétrica dos Materiais	27
2.1.5.5	Diâmetro do Ponto de Solda.....	28
2.1.5.6	Eletrodos e Capas de Eletrodo.....	30
2.1.5.7	Projetos das juntas soldadas por pontos	32
2.2	AÇOS	33
2.2.1	Aços Empregados em Carrocerias Automotivas	33
2.2.2	Metalurgia de Soldagem	36
2.2.3	Soldabilidade.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	MATERIAIS	45
3.2	METODOLOGIA.....	48
3.2.1	Confecção e Preparação dos Corpos de Prova	49
3.2.2	Parâmetros de Soldagem.....	50
3.2.3	Procedimento e Equipamento de Soldagem.....	52

3.2.4	Inspeção e Medição do Tamanho da Solda	53
3.2.5	Ensaio de Cisalhamento	54
3.2.6	Ensaio Metalográfico.....	54
3.2.7	Ensaio de Microdureza	55
4	RESULTADOS	57
4.1	TAMANHO DA SOLDA.....	57
4.1.1	Calor Gerado no Procedimento de Soldagem.....	57
4.1.2	Diâmetro dos Pontos no Material SAE 1010.....	58
4.1.3	Diâmetro dos Pontos nos Materiais SAE 1006 e USI - LN 700	59
4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO	62
4.2.1	Resistência ao Cisalhamento no Material SAE 1010.....	63
4.2.2	Resistência ao Cisalhamento na Junta de SAE 1006 e USI – LN 700.....	66
4.3	MICROESTRUTURA	69
4.3.1	Microestrutura na Junta com Aço SAE 1010	69
4.3.2	Microestrutura na Junta Composta por Aços SAE 1006 e USI – LN 700	70
4.4	MICRODUREZA.....	72
4.4.1	Microdureza na Junta da Longarina: Material SAE 1010.....	73
4.4.2	Microdureza na Junta da Lateral Inferior: SAE 1006 e USI – LN 700	73
5	CONCLUSÃO.....	75
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DO PAINEL LATERAL..	83
	APÊNDICE B – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DO REFORÇO	84
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DA LONGARINA.....	85
	APÊNDICE D – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DO AÇO SAE 1006.....	86
	APÊNDICE E – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DO AÇO SAE 1010.....	87
	APÊNDICE F – PROPRIEDADES E NOTA FISCAL DO AÇO USI – LN 700	88
	APÊNDICE G – ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM SAE 1010	89
	APÊNDICE H – ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM SAE 1006/USI – LN 700	90

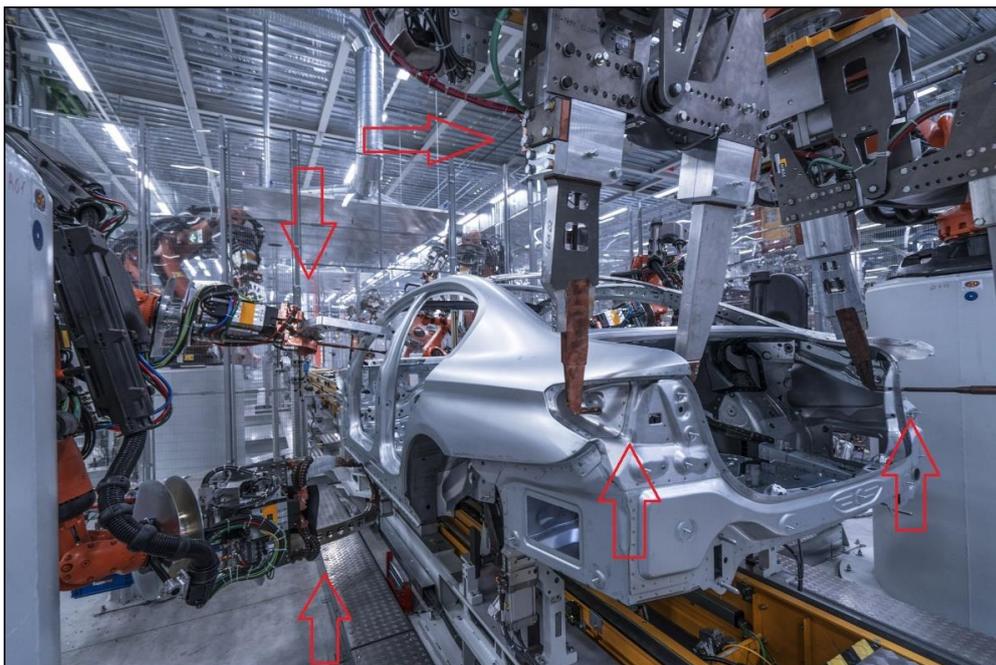
APÊNDICE I – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE MICRODUREZA	91
APÊNDICE J – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	92

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem por resistência elétrica é utilizado na fabricação de diversos produtos, apresenta bons níveis de produtividade e acabamento, além de versátil, entrega um resultado confiável. A união metálica ocorre através da fusão provocada pelo calor, gerado a partir da resistência do material à passagem de corrente elétrica. Esta operação é empregada na indústria automotiva, em especial o subprocesso de solda a ponto, pois permite unir um conjunto de chapas com facilidade, precisão e baixo custo. Em utilização há muito tempo, pode ser visualizada em vídeos de fabricação de automóveis da década de 1930 (JAMISON, 1936; BRANCO, 2019).

Para atender à legislação e às demandas dos consumidores, cada vez mais exigentes, os veículos modernos tem carroceria constituída de diferentes aços, que a indústria desenvolveu para atender às necessidades de redução de peso e elevada segurança, como por exemplo, aços de alta resistência e baixa liga (*High Strength Low Alloy, HSLA*) e aços avançados de alta resistência mecânica (*Advanced High Strength Steels, AHSS*). As fábricas de automóveis possuem uma quantidade considerável de equipamentos de soldagem a ponto por resistência, montados em sistemas automatizados para soldar os diversos tipos de aço que constituem as carrocerias, conforme pode ser observado na Figura 1 (GÁLAN *et al.*, 2012; IMGUR, 2016).

Figura 1 - Equipamentos de soldagem a ponto automatizados



Fonte: IMGUR (2016)

As vantagens encontradas na fabricação se repetem em processos de reparos realizados com soldagem por resistência, quando executados adequadamente. Em relação ao processo GMAW (*Gas Metal Ar Welding*), a solda a ponto é mais eficiente na união de chapas automotivas, pois permite que a operação seja realizada com um número menor de etapas, sem a necessidade de procedimentos de acabamento. Além disso, é o processo de soldagem recomendado pelos fabricantes na substituição de peças. Esses fatores contribuem para que cada vez mais empresas reparadoras de automóveis, adquiram novos equipamentos de soldagem por resistência (BRASIL MECÂNICO, 2017).

Em virtude das diferentes propriedades e espessuras dos aços que são soldados em consertos de veículos, faz-se necessário ajustar continuamente os parâmetros de soldagem para que a união metálica realmente aconteça, e não apresente problemas. Buscando assegurar a integridade das juntas, é importante comprovar a eficácia dos procedimentos aplicados em reparos com solda a ponto, em ensaios que avaliem as propriedades mecânicas e metalúrgicas, determinando a influência dos parâmetros envolvidos no processo. Um ensaio de resistência do ponto ao cisalhamento, por exemplo, pode fornecer resultados que alertem para um baixo desempenho da junta em uma colisão reincidente.

1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A Pegorini Chapeação e Pintura de Veículos LTDA é uma empresa fundada em 1989, na cidade de Caxias do Sul. Atua na recuperação de veículos leves que tiveram colisões, atualmente tem capacidade para atender até 140 carros por mês, contando com 22 colaboradores. Os serviços prestados iniciam no recebimento e avaliação do veículo acidentado, e se estendem até a entrega deste reparado ao cliente. A empresa foca na qualidade dos trabalhos, e recebeu diversos prêmios de entidades do ramo nos últimos anos.

O desenvolvimento do estudo aconteceu no setor de funilaria, na área de soldagem, com o propósito de avaliar cientificamente a importância da aplicação dos parâmetros adequados nos procedimentos de soldagem por pontos, a fim de preservar os aspectos estruturais de cada veículo.

1.2 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Através do emprego de uma maior quantidade de aços de alta resistência, na construção de carrocerias automotivas, o processo de soldagem a ponto têm passado por uma

modernização, que o manteve como o tipo líder de soldagem na indústria automobilística. Embora já estejam consolidados na fabricação, no mercado de reparação os novos equipamentos estão presentes em um número limitado de empresas, e frequentemente surgem dúvidas quanto a sua utilização e confiabilidade. A soldagem por pontos é o processo indicado para a união de peças substituídas em veículos acidentados, pois se utilizado corretamente, colabora para que os aspectos genuínos sejam devolvidos ao automóvel, através da resistência e do acabamento da junta.

Variáveis como material da peça e do eletrodo, e os parâmetros selecionados no equipamento, definem as características e a qualidade da solda. Este estudo é relevante, pois a partir dos testes e análises que foram executados, permitiu avaliar a influência das variáveis do processo em juntas automotivas. As avaliações do tamanho da solda e da resistência ao cisalhamento dos pontos, demonstraram as modificações que o nível de calor gerado na junta provocou nos resultados. Análises metalográficas e de microdureza forneceram outros dados que apontaram o comportamento dos materiais, de acordo com a intensidade dos parâmetros aplicados, alertando quanto à possíveis problemas como por exemplo, falta de fusão.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a influência dos parâmetros de soldagem por resistência elétrica, sobre as propriedades mecânicas das juntas, em aços ao carbono e aços de alta resistência mecânica empregados em carrocerias automotivas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) estudar o processo de soldagem por resistência elétrica, em especial o subprocesso de solda ponto na indústria automobilística;
- b) pesquisar sobre o surgimento e desenvolvimento dos aços de alta resistência mecânica e sua inclusão na produção de automóveis;
- c) desenvolver metodologia de ensaios que represente diferentes elementos da carroceria de um automóvel atual;
- d) analisar os resultados através de ensaios mecânicos e metalográficos, propondo ajustes nos parâmetros de soldagem para melhorar a fixação e minimizar defeitos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM

Os processos de soldagem estão presentes na fabricação de uma grande variedade de produtos, e são considerados os procedimentos de união mais importantes da indústria metalúrgica. A soldagem é classicamente definida como um processo de união de materiais, sendo utilizada principalmente em metais, e acontece através de fusão, pressão, ou ambos. Nas juntas executadas por soldagem, os materiais estão unidos por ligações químicas, e portanto, a união está sob ação de forças microscópicas (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

Atualmente existem cerca de cem processos diferentes de soldagem, sendo que alguns são empregados no corte de chapas e também na reparação de peças que apresentam desgaste, com a criação de revestimentos com propriedades específicas. Cada processo ou subprocesso, tem suas particularidades e em razão disso são utilizados equipamentos, consumíveis e técnicas diferentes em cada situação. Entretanto, uma fonte de energia que permita a transformação de energia elétrica em calor, é sempre necessária, em exceção nos processos de soldagem que ocorrem apenas por pressão (GEARY, 2014; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

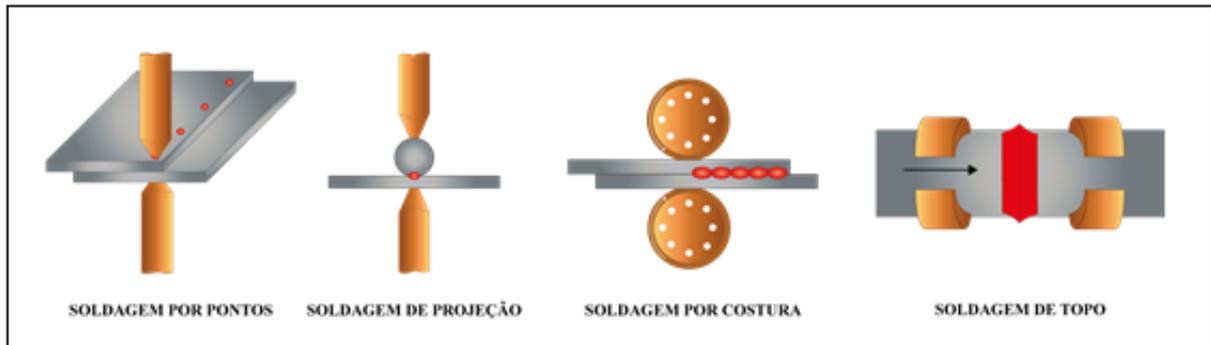
2.1.1 Soldagem por Resistência Elétrica

A soldagem por resistência elétrica (*Resistance Welding*) foi descoberta por volta de 1890 pelo engenheiro e inventor inglês, Elihu Thomson (1853-1937), que registrou patentes dos principais subprocessos de soldagem por resistência utilizados atualmente. O princípio de funcionamento desse processo é baseado na aplicação do efeito Joule, fenômeno físico que consiste na conversão de energia elétrica em calor (CARY, 1998; HELERBROCK, 2021a).

A união acontece induzindo-se a passagem de corrente elétrica por um tempo determinado, através das peças previamente pressionadas, o metal resiste à corrente e aquece até ocorrer a fusão na interface, formando assim a junta soldada. O grande diferencial deste processo de soldagem é que nenhum material é adicionado à junta, simplificando a metalografia da solda em relação aos processos que utilizam materiais de adição. A Figura 2 ilustra de forma simplificada os quatro subprocessos mais utilizados da soldagem por resistência: soldagem por

pontos, de projeção, por costura e de topo (RWMA, 2003; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016; BRANCO, 2019).

Figura 2 – Principais processos de soldagem por resistência



Fonte: Adaptado de BRANCO (2019)

Outra diferença em relação aos processos de soldagem por arco elétrico, é a utilização de força mecânica para pressionar as peças na região que a união ocorrerá. A aplicação de pressão no momento do aquecimento promove o refino da estrutura do grão, proporcionando uma união com propriedades físicas iguais ou superiores às do material original. A matriz de impurezas característica do ferro, principal componente do aço, é responsável por boa parte da resistência elétrica das peças metálicas, tendo grande importância na soldagem por resistência (RWMA, 2003).

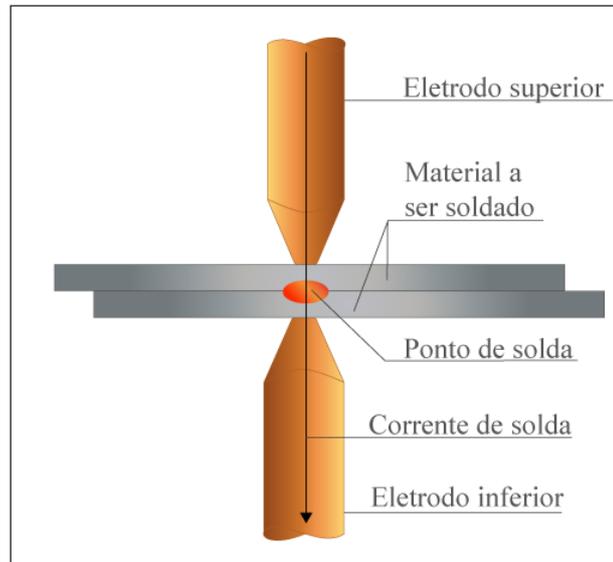
2.1.2 Soldagem por Resistência Elétrica por Pontos

Popularmente conhecida como solda a ponto (*Spot Welding*), trata-se de um subprocesso da soldagem por resistência elétrica, e é o processo de união por resistência mais utilizado na indústria. Empregada na fabricação de diversos produtos, como eletrodomésticos, aeronaves e equipamentos da indústria alimentícia, predomina também na montagem de carrocerias automotivas, com uma média de 4500 pontos de solda por veículo (BRANCO, 2019; CAMILLO, 2021).

A soldagem por esse processo é realizada em juntas sobrepostas ou de topo, comumente encontradas nas estruturas veiculares. O ponto de solda é formado pela fusão e solidificação do material, na região em que o calor foi produzido pela passagem da corrente elétrica em um tempo específico. Uma característica que difere a solda a ponto de alguns subprocessos de soldagem por resistência, e dos demais processos de soldagem, é o fato de os eletrodos se

manterem estacionários enquanto a união metálica ocorre. Uma representação do processo é demonstrada na Figura 3 (RWMA, 2003; BRANCO, 2019; ISOTRON, 2021).

Figura 3 - Processo de soldagem por pontos (*Spot Welding*)



Fonte: Adaptado de ISOTRON (2021)

Para executar o procedimento de soldagem, é preciso que um dos eletrodos faça contato com a superfície de uma das chapas, enquanto o outro eletrodo se aproxima da superfície da peça que será unida à primeira, e ambos devem permanecer alinhados durante a operação. Essa condição exige espaço para o posicionamento do equipamento, e pode impedir a execução do processo em alguns locais, sendo esta uma de suas limitações. Normalmente a soldagem por pontos é aplicada em chapas de 0,5 mm (milímetros) até 3,2 mm de espessura, (RWMA, 2003).

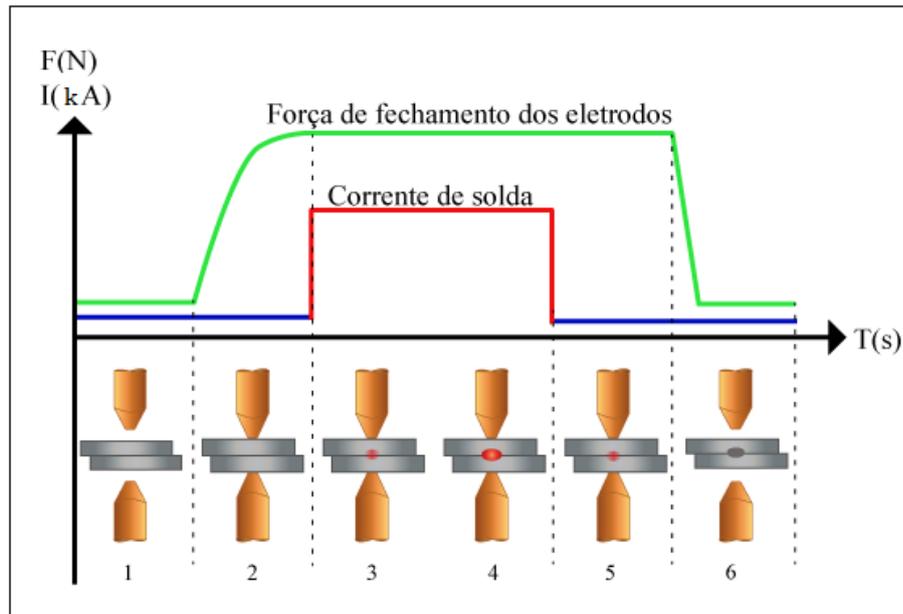
2.1.3 Princípios de Funcionamento da Soldagem por Pontos

O funcionamento da soldagem por pontos é simples, as chapas são pressionadas pela pinça enquanto ocorre a passagem de um elevado nível de corrente, através dos eletrodos e consequentemente dos materiais, gerando calor suficiente para formar o ponto de solda. O calor é gerado a partir da resistência, que os materiais apresentam em relação à passagem de corrente elétrica. A força realizada pelos eletrodos para pressionar as peças está presente antes, durante e após a aplicação da corrente, para garantir a formação adequada do ponto de solda (RWMA, 2003).

A Figura 4 demonstra os acontecimentos que ocorrem em um ciclo de soldagem por pontos, considerando F a força de soldagem, I a corrente, e T o tempo de soldagem. Na primeira

etapa, os eletrodos se aproximam das peças para pressioná-las, e as mantém dessa forma para garantir a proximidade necessária, na etapa 2. Na etapa 3, a corrente é liberada e a formação do ponto de solda é iniciada, para que na etapa seguinte, sem corrente passando pelos eletrodos, o ponto de solda se solidifique. Na etapa 5, a força de soldagem é anulada para que os eletrodos retornem até a posição inicial, que acontece na etapa 6 (BRANCO, 2019).

Figura 4 - Ciclo de soldagem por pontos



Fonte: Adaptado de BRANCO (2019)

A geração de calor é uma função que depende da densidade de corrente elétrica, da resistência do material ao fluxo de corrente, e do tempo de aplicação da energia que causará o aquecimento. A resistência do material deve ser alta em relação a dos eletrodos, para permitir o aquecimento das peças na interface de solda, retardando o superaquecimento dos eletrodos. A resistência que existe na interface de solda não depende apenas da resistividade do material, mas também das condições da superfície, das características dos eletrodos, e da pressão que está sendo exercida na junta. Uma forma de estimar o calor gerado no processo é através da lei de Joule, representada pela equação (1) (AWS, 2007; KARANDE, INANDAR, 2017).

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

Em que:

Q é o calor gerado, em joules [J];

I é a intensidade da corrente elétrica, em Ampères [A];

R é a resistência dos metais e das interfaces de contato, em Ohms [Ω];

t é o tempo de aplicação da corrente, em segundos [s].

Uma vez formado o ponto de solda, este deve apresentar um diâmetro mínimo previsto em norma, assim como um nível esperado de penetração. Visualmente, o ponto deve ter aspecto circular com uma leve indentação que não exija procedimentos de acabamento, exceto pintura (RWMA, 2003; BRANCO, 2019).

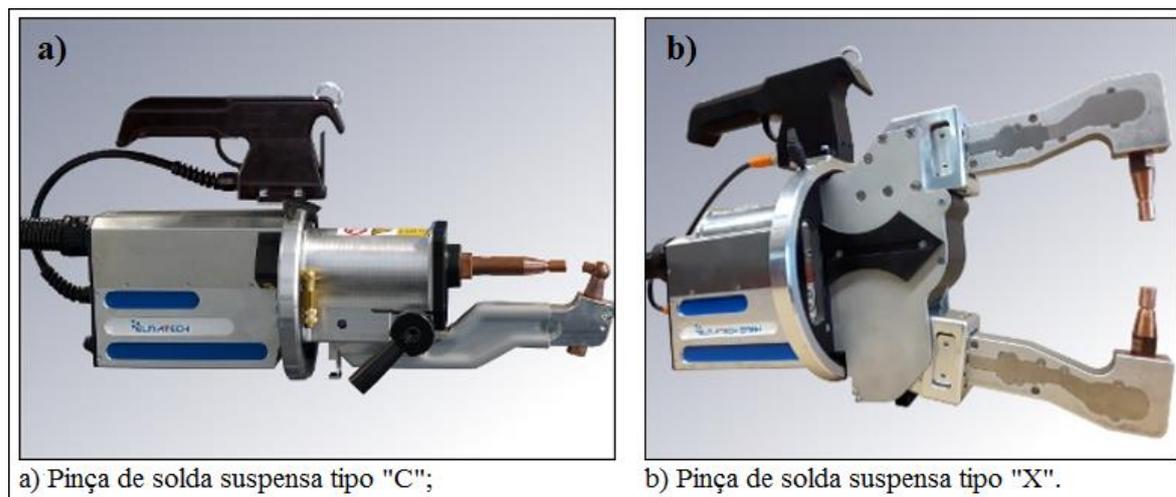
2.1.4 Máquinas de Solda a Ponto

Desde que foi inventado, no final do século XIX, o processo de soldagem por resistência cresceu gradativamente até o fim do século XX, ficando um pouco ofuscado por novas tecnologias que surgiram na soldagem a arco, laser e fricção. Com a introdução de materiais de maior resistência mecânica na indústria automotiva, para atender a requisitos de segurança, a soldagem por pontos está passando por uma reinvenção, impulsionada por equipamentos avançados e potentes, que a posicionam novamente como um tipo líder de soldagem (CAMILLO, 2021).

O aparato utilizado para executar os pontos de solda é chamado de máquina de solda a ponto. O equipamento é composto pelo circuito de controle, circuito elétrico e um sistema mecânico. A pinça de solda faz parte do sistema mecânico, mas está conectada aos circuitos eletrônicos, é na pinça que estão acomodados os eletrodos que efetuarão a soldagem. De acordo com a necessidade, a pinça pode ser estacionária ou suspensa, sendo facilmente acoplada em robôs para uso em operações automatizadas. Para facilitar o acesso aos diferentes pontos das carrocerias automotivas, os fabricantes desenvolveram mais de um tipo de pinça, e eletrodos com geometria específica para determinadas aplicações (BRANCO, 2019).

O circuito de controle atua na programação dos movimentos dos porta-eletrodos, para aplicação da força de soldagem, bem como da energização do transformador e aplicação dessa energia em um tempo programado. O sistema mecânico é composto de dispositivos hidráulicos e pneumáticos que realizam a movimentação dos eletrodos e aplicam a pressão nas chapas. O circuito elétrico, por sua vez, é constituído de transformador e de um circuito secundário, composto pelos eletrodos e pelo próprio material das peças que serão soldadas. A Figura 5 demonstra dois tipos de pinças de solda suspensas, do tipo “C” e tipo “X” (RWMA, 2003; BRANCO, 2019; ELMATECH GMBH, 2021).

Figura 5 – Pinças de solda suspensas



Fonte: Elmatech GmbH (2021)

Para a geração de energia que formará os pontos de solda, pode ser utilizada corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). O tipo de corrente depende do transformador que a máquina possui, CA ou MFDC (multifásico de corrente contínua), em ambos os casos, o transformador atua para converter a energia de alta tensão da rede, em energia de baixa tensão com elevada corrente. Transformadores CA são utilizados em máquinas compactas e que fornecem menores níveis de corrente, enquanto os transformadores CC podem retirar energia de uma rede trifásica, e fornecer níveis de corrente mais elevados, sendo ainda, mais eficientes e menos suscetíveis à flutuações intrínsecas da rede CA (AWS, 2007; ASARI, 2018).

2.1.5 Parâmetros da Soldagem por Pontos

A qualidade de um ponto de solda é determinada principalmente por três parâmetros presentes no processo: corrente, tempo e força. Por outro lado, outros fatores também influenciam na soldagem, como a espessura das chapas, resistência elétrica dos materiais, resistências de contato, presença de revestimentos anticorrosivos, geometria e material dos eletrodos, e a eficiência do equipamento. A seguir são apresentados os parâmetros da soldagem por pontos e outros aspectos que afetam o processo (AWS, 2007; ASARI, 2018).

2.1.5.1 Corrente de Soldagem

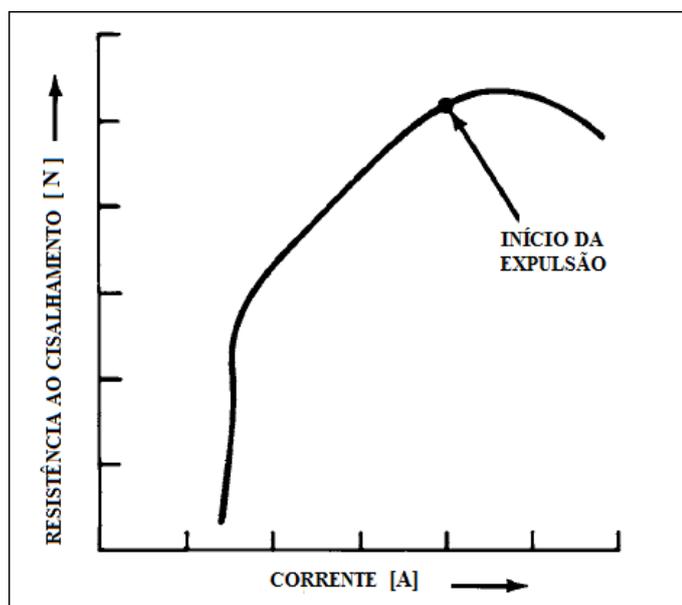
A corrente de soldagem nada mais é do que a corrente elétrica liberada no circuito do equipamento durante a formação do ponto, sendo expressa em Ampères [A]. A corrente é o

parâmetro que mais influencia na geração de calor da interface na junta, tanto a penetração quanto o diâmetro da solda aumentam com o acréscimo de corrente, contribuindo para maior resistência mecânica do ponto. No entanto, se a corrente exceder a ideal para a junta, ocorre um superaquecimento do metal de base, que causa problemas como indentação excessiva e fissuras, bem como desgaste prematuro dos eletrodos (KARANDE, INANDAR, 2017; ASARI, 2018).

Através da lei de Joule, entende-se que a corrente de soldagem é inversamente proporcional à raiz quadrada do tempo, ou seja, para gerar um ponto de solda com tempo muito curto, é preciso de alta densidade de corrente. O ajuste da corrente de soldagem normalmente é realizado com aumentos graduais da mesma, até que aconteçam alguns respingos entre as chapas metálicas no momento da formação do ponto de solda. É desejável que a corrente seja suficiente para garantir a resistência esperada na união, mas fique ajustada o mais baixa possível a partir desse nível, pois assim são evitados defeitos e reduzidos os custos com energia e substituição dos eletrodos (AWS, 2007; ASARI, 2018).

Ao estimar a quantidade de calor requerida, é preciso considerar que ocorrem perdas para o metal de base e para os eletrodos, além disso, podem ocorrer desvios de corrente devido a soldas próximas realizadas anteriormente. A magnitude da corrente influencia nas propriedades mecânicas da junta, como na resistência do ponto ao cisalhamento, cuja unidade de medida no sistema internacional é Newton [N]. A Figura 6 ilustra uma curva característica de resistência ao cisalhamento em função da corrente, em aço ao carbono, indicando ainda um ponto propício para início de expulsão (AWS, 2007).

Figura 6 - Efeito da corrente de soldagem na resistência ao cisalhamento



Fonte: AWS (2007)

A expulsão de metal fundido é um fenômeno que ocorre durante a concepção do ponto, ocasionada pela penetração excessiva dos eletrodos no material, gerando perda de metal no local da solda. A expulsão de material pode ser causada não apenas por excesso de corrente, mas também por quantidades inadequadas de tempo e pressão. Em geral, são definidos valores limite de corrente de expulsão, com as variáveis tempo e força constantes, durante o desenvolvimento de tabelas para juntas soldadas com frequência. A Figura 7 exibe uma fotografia de dois pontos de solda que apresentam expulsão de metal fundido e indentação excessiva (PODRZAJ, SIMONCIC, 2011; BRANCO, 2019).

Figura 7 - Expulsão de metal fundido na soldagem por pontos



Fonte: PODRZAJ, SIMONCIC (2011)

2.1.5.2 Tempo de Soldagem

O tempo de soldagem é definido como o tempo de liberação da corrente elétrica, mas está ligado também a etapas anteriores e posteriores a esta, sendo quantificado em ciclos ou segundos. O tempo de pré-pressão ou de compressão, é a lacuna entre a aplicação inicial da força dos eletrodos nas peças, e a liberação da corrente. O tempo compreendido desde o início da liberação da corrente, até o instante em que ela atinge o valor nominal definido, chama-se tempo de soldagem (ASARI, 2018; BRANCO, 2019).

O calor gerado é proporcional ao tempo, e varia de forma quadrática com a corrente, desde que a resistência seja mantida constante. Isso significa que o tempo de soldagem pode ser reduzido até um valor limite, desde que a corrente seja aumentada para possibilitar a obtenção de um ponto de solda com boas propriedades. A redução do tempo de soldagem

contribui para acelerar o processo, e reduzir a ocorrência de defeitos comuns em soldas realizadas com tempos considerados longos. As perdas de calor causadas por condução e radiação aumentam com a temperatura do metal, e conseqüentemente com o tempo de soldagem (AWS, 2007; BRANCO, 2019).

O tempo de soldagem precisa ser suficiente para que o calor da superfície se espalhe pelo metal adjacente, para formar um ponto de solda com tamanho adequado. No entanto, tempos de soldagem muito longos acarretam em problemas como expulsão de material, indentação excessiva, e em casos extremos, a fusão na superfície de contato entre o eletrodo e a chapa, produzindo um furo no metal de base e aderência de material no eletrodo (AWS, 2007; BRANCO, 2019).

Se o tempo de soldagem for curto demais, o ponto de solda formado apresenta diâmetro pequeno, resultando em baixas propriedades mecânicas. Em juntas com chapas mais espessas ou com aços de alta resistência mecânica, podem ocorrer mais facilmente ocorrências de falta de solda, em procedimentos com tempo de soldagem baixo. Entretanto, aumentar o tempo não produzirá uma solda, se a densidade de corrente estiver aquém do necessário. Em chapas de grande espessura, é comum aplicar a corrente em mais de um pulso, pois uma taxa elevada de corrente pode causar uma grande expulsão de material em um tempo de soldagem longo (AWS, 2007; KARANDE, INANDAR, 2017; BRANCO, 2019).

Após a corrente ser desligada, inicia o ciclo do tempo de pós-pressão ou tempo de espera. Nesta fase, os eletrodos ainda estão aplicando pressão nas chapas, enquanto acontece o resfriamento que promove a solidificação do ponto de solda. Se os eletrodos forem removidos antes da solidificação acontecer, o ponto pode apresentar diâmetro pequeno ou na pior das hipóteses, ser puxado pelo eletrodo, soltando-se da chapa. Por outro lado, tempos de pós-pressão muito longos fazem com que o calor das peças se dissipe pelo eletrodo, que poderá superaquecer (ASARI, 2018; BRANCO, 2019).

2.1.5.3 Força de Soldagem

A força de soldagem está presente em todos os ciclos do processo de soldagem por pontos, para manter as superfícies das peças extremamente próximas na região em que ocorrerá a união, além de assegurar a continuidade da corrente elétrica na junta. A força de soldagem contribui significativamente para a realização de pontos de solda com boa qualidade, sem defeitos. Uma das razões para isso é a redução da resistência de contato na interface entre as chapas, a medida que a pressão exercida pelos eletrodos aumenta até um valor ideal, pois os

pontos mais altos das superfícies das peças são deformados e a área de contato aumenta (AWS, 2007; BRANCO, 2019).

Ao mesmo tempo que a aplicação de pressão nas peças facilita a passagem de corrente, a resistência de contato na interface diminui, portanto, a medida que a força aplicada pelos eletrodos aumenta, é preciso elevar também a corrente até um valor próximo do limite para a junta. Isso é necessário pois uma queda na resistência causa uma redução do calor gerado, e o aumento da densidade de corrente pode compensar essa perda. Aumentar o tempo de soldagem também pode ser uma alternativa, e pode ser realizada simultaneamente à elevação da corrente, para que nenhuma das variáveis atinja níveis muito elevados (AWS, 2007).

A resistência à passagem de corrente é o parâmetro mais difícil de ser controlado na soldagem por pontos, e a aplicação de uma força de soldagem que exerça boa pressão nas chapas, faz com que o processo dependa mais da resistência individual das peças, ao invés da existente no contato entre as chapas. Isso é desejável pois o material apresenta uma resistência mais uniforme, acarretando em menores variações na geração de calor, e conseqüentemente maior estabilidade no controle dos demais parâmetros, para um mesmo conjunto de chapas (AWS, 2007).

2.1.5.4 Resistências de Contato e Resistência Elétrica dos Materiais

É possível que durante o processo de soldagem por pontos, os parâmetros estejam adequados, e mesmo assim ocorram problemas ou defeitos que comprometam um ou mais pontos de solda. Fatos como esse podem ser causados por variações na resistência à passagem de corrente, um parâmetro complexo, que depende das condições de todas as superfícies que estão em contato, da proximidade destas e da composição química dos materiais. A resistência de contato é afetada com a presença de impurezas, que podem aumentar consideravelmente a resistência na interface, gerando um aquecimento excessivo com expulsão severa de metal fundido. Em razão disso, todas as superfícies que estarão em contato, devem estar limpas e sem a presença de contaminantes (AWS, 2007; UIJL, 2015).

As propriedades mecânicas e a composição do material também influenciam na resistência à passagem de corrente, que aumenta na soldagem de aços mais robustos. Isso ocorre devido à menor suscetibilidade do material à deformação, e aos aumentos na resistência elétrica seguidos de uma queda na condutividade térmica, causados pela presença de elementos de liga e da microestrutura característica desses componentes. Isso significa que uma menor densidade de corrente é requerida para soldar materiais com elevada resistência mecânica. A resistência

elétrica do material pode ser calculada através da equação (2) (MAGDALENA, 2014; UIJL, 2015).

$$R_{material} = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

Em que:

ρ é a resistividade elétrica do material [Ohm-m];

L é o comprimento do percurso realizado pela corrente elétrica [m];

A é a área transversal ao percurso da corrente [m²].

2.1.5.5 Diâmetro do Ponto de Solda

O diâmetro do ponto é uma característica importante para definir a qualidade da solda, pois está diretamente ligado à resistência ao cisalhamento e performance geral da junta. A área de contato da capa de eletrodo com a peça, combinada com os parâmetros aplicados determina o diâmetro do ponto de solda. O diâmetro mínimo de ponto para uma dada junta pode ser determinado a partir de equações que levam em conta a espessura do material, mas os valores podem variar de acordo com a composição química e a aplicação do componente. A equação (3) é normalmente utilizada para calcular o diâmetro mínimo de pontos de solda (UIJL, 2015).

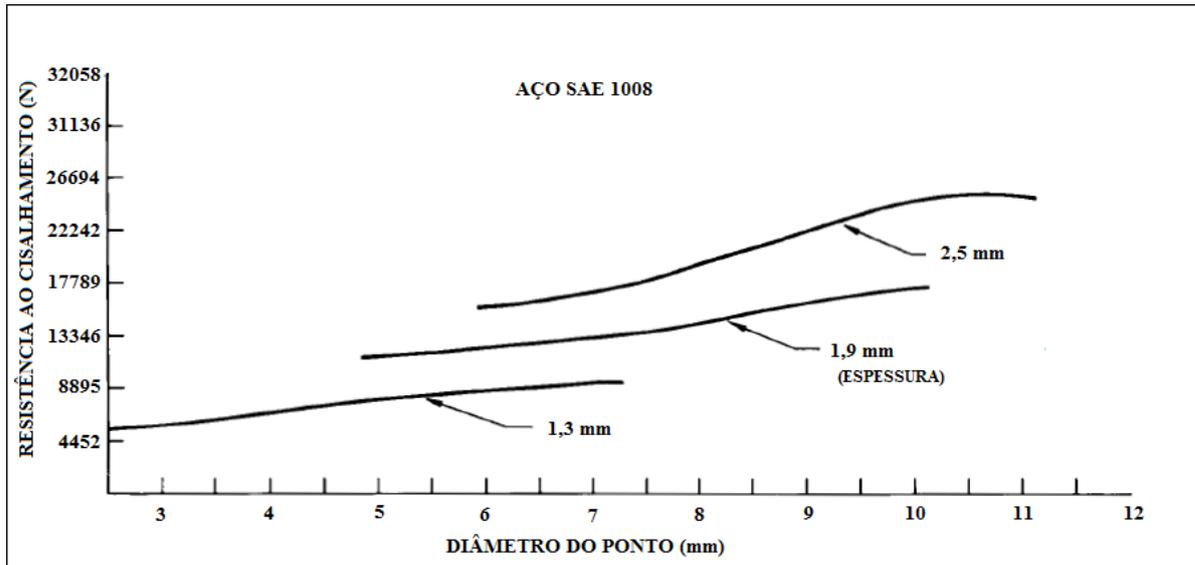
$$d_{min} = 4\sqrt{t} \quad (3)$$

Em que:

t é a espessura da chapa, em milímetros [mm].

Pontos de solda com diâmetro excessivamente grande, terão desempenho inferior nos ensaios de cisalhamento. Isso ocorre devido à redução na espessura da chapa, causada pela indentação demasiada, provocada pela alta densidade de corrente necessária para formar pontos de grande diâmetro. A Figura 8 exibe um gráfico que relaciona a resistência à força de cisalhamento com o diâmetro do ponto de solda, o aço cujo comportamento é demonstrado é um SAE 1008. Nas três espessuras analisadas, o material expõe ganhos na carga máxima suportada em conjunto com o crescimento do tamanho da solda (AWS, 2007; UIJL, 2015).

Figura 8 - Resistência ao cisalhamento vs. diâmetro do ponto



Fonte: Adaptado de AWS (2007)

O desempenho desejado nas juntas soldadas depende da aplicação, portanto, devem ser observados os diâmetros mínimos para pontos de solda de acordo com as solicitações da junta. A Tabela 1 demonstra um exemplo do BMW Group Standard GS 96002-2 (conforme UIJL, 2015, p. 20), que determina valores mínimos de diâmetros para categorias A, B e C, de acordo com a espessura da chapa.

Tabela 1 - Diâmetro dos pontos de solda para categorias A, B e C

Espessura da chapa (mm)	Diâmetro mínimo de ponto de solda (mm)	
	Categoria A e B	Categoria C
$\geq 0,70 < 0,85$	3,0	2,7
$\geq 0,85 < 1,10$	3,5	3,0
$\geq 1,10 < 1,25$	3,9	3,3
$\geq 1,25 < 1,50$	4,1	3,5
$\geq 1,50 < 1,60$	4,3	3,7
$\geq 1,60 < 1,75$	4,4	3,8
$\geq 1,75 \leq 1,80$	4,7	4,0
$> 1,80 \leq 2,00$	5,0	4,2
$> 2,00 \leq 2,25$	5,3	4,5
$> 2,25 \leq 2,50$	5,5	4,8

Fonte: Adaptado de UIJL (2015)

As soldas de categoria A se referem à juntas que podem colocar em risco a vida humana, se falharem. As soldas falhas em categoria B podem interromper o funcionamento do produto, e as de categoria C são juntas cuja falha impõe apenas um aspecto negativo ao produto. Conforme exibido na Tabela 1, o diâmetro do ponto aumenta com a espessura das chapas, e deve ser maior nas juntas que recebem maiores solicitações. Cabe ressaltar que em materiais com baixo percentual de carbono e de elementos de liga, o diâmetro máximo de ponto obtido é maior do que em aços de alta resistência, pois nos aços macios a faixa de corrente aplicável é mais abrangente (UIJL, 2015).

2.1.5.6 Eletrodos e Capas de Eletrodo

Os eletrodos são componentes fabricados em materiais com boa condutibilidade elétrica, e são os responsáveis por conduzir a corrente até o material que será soldado. Além disso, transferem pressão às chapas, por meio da aplicação da força de soldagem, e colaboram para o resfriamento do local da solda. O material dos eletrodos deve possuir também resistência mecânica e dureza adequadas, para suportar solicitações mecânicas e térmicas, que ocorrem de forma repetitiva no processo (AWS, 2007).

Na extremidade dos eletrodos há uma redução de área, onde são fixadas as capas de eletrodo. As capas são componentes que podem ser considerados consumíveis, uma vez que são elas que farão contato direto com as chapas soldadas, e serão expostas ao desgaste provocado pelas deformações e aportes térmicos. A partir de uma determinada quantidade de pontos de solda realizados, é necessário verificar as capas de eletrodo quanto às condições de superfície, para avaliar a necessidade de execução de procedimentos de limpeza e fresamento (BRANCO, 2019).

A medida que surgem deformações na capa do eletrodo, a área de contato com a peça aumenta, promovendo reduções na densidade de corrente e na pressão aplicada. Com o surgimento de novas deformações, a qualidade da solda segue decrescendo, e são formados pontos com aspecto visual pobre, indicando a necessidade de reparo ou de substituição das capas. O desgaste é acelerado na soldagem de materiais revestidos, pois estes podem causar erosão e corrosão nos eletrodos (AWS, 2007).

A norma ISO 5821:2009, estabelece formas e dimensões para as capas de eletrodo do processo de soldagem por pontos, as principais formas são demonstradas na Figura 9 (BRANCO, 2019; ISO 5821:2009).

Figura 9 - Forma das capas de eletrodo



Fonte: Adaptado de ISO 5821:2009

Se por algum motivo a força exercida pelos eletrodos não conseguir aproximar suficientemente as peças, a ponto de causar uma pequena redução na espessura total, a soldagem será comprometida. Com as chapas ligeiramente afastadas, a resistência de contato nas interfaces aumenta consideravelmente, e com ela a geração de calor, enquanto a pressão cai. No instante em que a corrente for liberada, ocorrerá um aquecimento excessivo das superfícies, simultaneamente à expulsão de metal fundido (AWS, 2007).

As propriedades dos materiais soldados também influenciam na vida útil das capas, que diminui com o aumento da resistência das peças, uma vez que o eletrodo será deformado por materiais de maior dureza. A Figura 10 demonstra uma capa de eletrodo nova, e outra danificada, com irregularidades na geometria, deposição de metal de base e pequenas crateras na superfície (UIJL, 2015; LYNN WELDING, 2020).

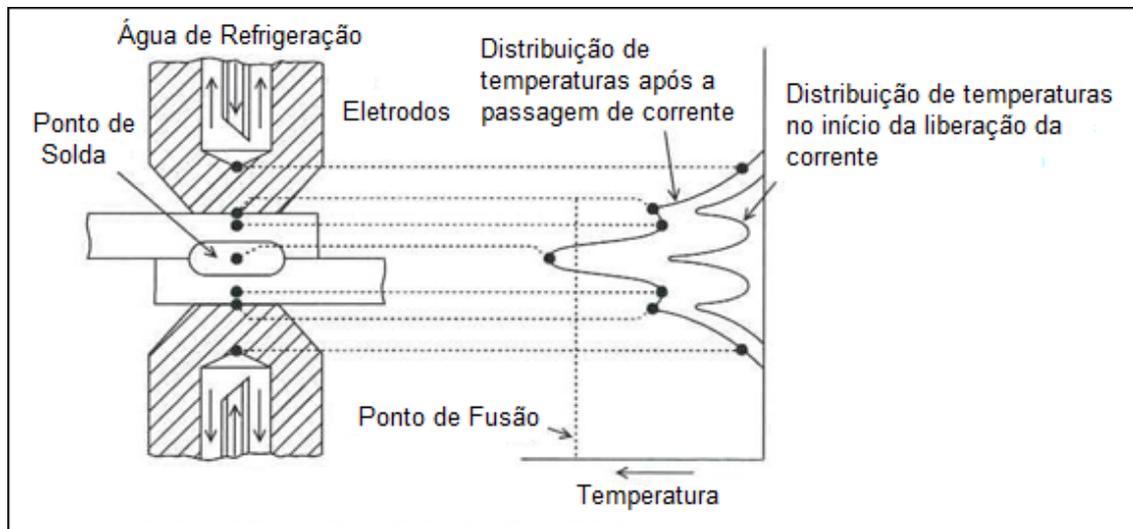
Figura 10 - Capas de eletrodo



Fonte: LYNN WELDING (2020)

A RWMA (*Resistance Welder Manufacturers Association*) estabelece as características dos materiais dos eletrodos, que normalmente são constituídos de ligas de cobre, com pequenas porcentagens de Cromo e/ou Zircônio. A refrigeração dos eletrodos normalmente é feita à base de água, que pode estar misturada com algum fluido de arrefecimento, para elevar o ponto de ebulição. A Figura 11 demonstra o sistema de refrigeração realizado por circulação de água em um par de eletrodos, além de curvas de distribuição de temperatura na junta, no início da liberação da corrente e imediatamente após esta ser encerrada (BRANCO, 2019; SHINKOKIKI, 2021).

Figura 11 - Sistema de refrigeração dos eletrodos e distribuição de temperatura



Fonte: Adaptado de SHINKOKIKI, 2021

2.1.5.7 Projetos das juntas soldadas por pontos

Os projetos de uniões realizadas por pontos configuram sempre em juntas sobrepostas, e devem levar em conta alguns aspectos, para que o procedimento possa ser realizado e preserve a integridade dos materiais, como por exemplo, espaçamento entre pontos, distância da borda, encaixe entre as peças e acessibilidade conjunta. A acessibilidade conjunta se refere ao fato de que ambos os eletrodos devem ter contato com as chapas para desempenhar as suas funções, sem que ocorra interferências da pinça com outras partes da peça, causando desalinhamento dos eletrodos e desvios de corrente (AWS, 2007).

Em todos os produtos ou peças soldados por pontos, é delimitada uma distância entre estes, que deve ser suficientemente próxima para assegurar a continuidade da união, porém distante o suficiente para evitar o surgimento excessivo de regiões frágeis na superfície das

chapas, que normalmente são de pequena espessura. Além disso, em juntas com numerosos pontos de solda, uma porção da corrente aplicada acaba se desviando por pontos adjacentes, em alguns casos exigindo a liberação de uma corrente maior do que a necessária para fundir a região (RWMA, 2003; AWS, 2007).

O espaçamento mínimo entre os pontos pode variar de acordo com os projetos, em juntas com duas chapas o espaçamento mínimo recomendado é de três vezes o diâmetro do ponto. Para juntas compostas de três chapas, o espaçamento mínimo pode ser maior, pois nesses casos são utilizados níveis de corrente e tempo de soldagem maiores. A sobreposição de junta mínima admitida para as chapas é determinada como duas vezes a distância da borda, e esta última deve levar em conta as características dos materiais para evitar problemas causados pelo aquecimento excessivo (AWS, 2007).

2.2 AÇOS

Pode-se definir o aço como uma liga ferro-carbono, cuja quantidade de carbono varia de 0,008% até 2,11%. Os aços comerciais não são ligas binárias, ou seja, possuem em sua composição alguns elementos secundários, que também podem ser consideradas impurezas oriundas dos processos de fabricação. As propriedades mecânicas do aço variam basicamente com a quantidade de carbono, elementos de liga presentes no material, tratamentos térmicos e processos de fabricação da peça (CHIAVERINI, 2008).

2.2.1 Aços Empregados em Carrocerias Automotivas

A liga mais comum do mundo, o aço, oferece uma combinação de resistência, versatilidade e conformabilidade não encontrada em nenhum outro material de baixo custo. Nos automóveis, o aço é o material com maior número de aplicações, sendo o principal elemento encontrado na construção de carrocerias e chassis, desde 1920. A crescente busca pelo desenvolvimento de automóveis mais seguros e eficientes, promoveu a utilização de aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels*, AHSS) em carrocerias, a partir dos anos 2000 (BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014; SARNA, 2015).

O emprego dos AHSS somou-se à aplicação dos aços de alta resistência convencionais (*High Strength Steels*, HSS), que continuam sendo utilizados nas estruturas automotivas. Os AHSS diferenciam-se dos HSS através de sua microestrutura multifásica, que pode conter ferrita, com porções de martensita, bainita e/ou austenita, em diferentes frações que implicam

em propriedades mecânicas únicas ou especiais. Essas características os tornam uma excelente alternativa para elevar a rigidez torcional e a resistência ao impacto das carrocerias. Também colaboram com a redução do consumo de combustível e de emissões, pois possibilitam a fabricação de peças com chapas de menor espessura (CADONI, D'IAUTO, 2009; BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014).

A designação metalúrgica classifica os aços automotivos nas seguintes categorias: aços macios (*Mild Steels*); HSS, aços de alta resistência; AHSS, aços avançados de alta resistência; e UHSS, aços de ultra alta resistência (*Ultra High Strength Steels*). Os UHSS pertencem ao grupo dos AHSS, porém são assim chamados pois sua resistência mínima à tração é de 780 MPa. Estes materiais também podem ser classificados de acordo com o limite de escoamento e a resistência mínima à tração, conforme exibido na Tabela 2. Propriedades mecânicas como alongamento e endurecimento por trabalho a frio, além dos parâmetros de conformação do material, também podem ser utilizadas para classificar os aços (TAMARELLI, 2011; BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014; NETO, FUKUGAUCHI, PEREIRA, 2020).

Tabela 2 – Classificação dos Aços de Alta Resistência

Material	Resistência à tração [MPa]	Resistência ao escoamento [MPa]
HSS	270 – 700	210 – 550
AHSS	590 – 1470	Acima de 450
UHSS	Acima de 780	Acima de 550

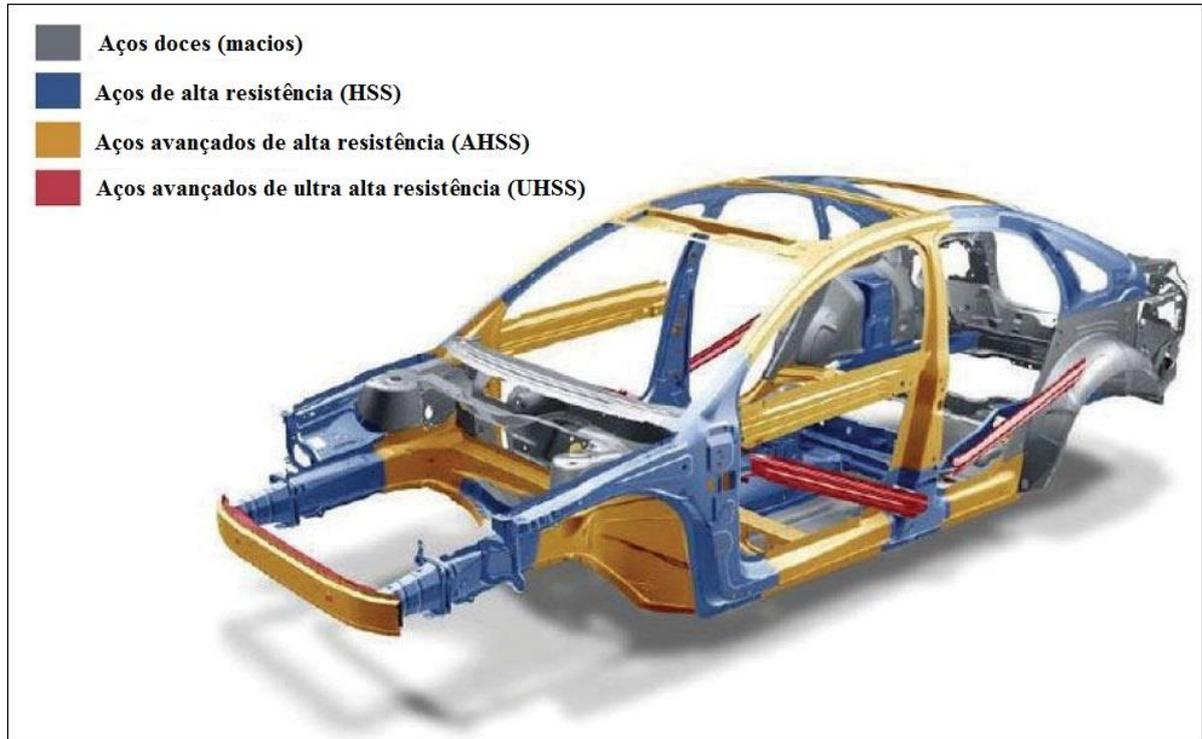
Fonte: Adaptado de TAMARELLI (2011) e HANCE (2018)

A seleção do aço que será utilizado em uma determinada peça da carroceria, depende de uma combinação de características, como por exemplo, a geometria do componente, os esforços a que estará submetido, o nível de deformação desejado em impactos, e os métodos de conformação e estampagem que serão adotados. A classificação dos aços avançados de alta resistência compreende os aços de fase dupla (*Dual-Phase*, DP), multifásicos ou de fase complexa, aços martensíticos, aços assistidos pelo efeito TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) e aços microligados (BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014).

Os aços macios são utilizados na estampagem de painéis externos da carroceria, e em peças da estrutura que devem apresentar elevada ductilidade em colisões. A espessura das chapas varia de acordo com a aplicação das peças, desde 0,75 mm, em painéis, até 2,00 mm, em componentes como reforços e longarinas. Materiais como SAE 1006 e SAE 1010, estão

entre os aços de menor resistência mais empregados em automóveis. A Figura 12 demonstra a distribuição dos aços automotivos em uma carroceria de um veículo sedan atual. Na legenda estão os quatro principais aços automotivos descritos anteriormente (SAMODAJEV, 2019).

Figura 12 - Distribuição dos aços automotivos em uma carroceria



Fonte: Adaptado de SAMODAJEV (2019)

Em geral, os aços de maior performance empregados em automóveis, são de alta resistência e baixa liga - ARBL (*High Strength Low Alloy*, HSLA), materiais desenvolvidos para apresentar um desempenho específico, com percentual de elementos de liga relativamente baixo. O nível de carbono nesses materiais também não é elevado, favorecendo a conformabilidade e a soldabilidade. Os aços de fase dupla pertencem ao grupo de ARBL, e foram bem aceitos pela indústria automotiva, figurando em diversos locais das carrocerias dos automóveis atuais, como travessas longitudinais, colunas e para-choques (TUMULURU, 2006; BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014; USIMINAS, 2021).

Grande parte dos aços automotivos de alta resistência são laminados a quente, condição que agrega melhores propriedades aos materiais. Nesse procedimento, o aço é aquecido a uma temperatura que varia de 1050 °C a 1250 °C, de acordo com o seu grau, antes de ser laminado. O resultado é um material com melhor soldabilidade, conformabilidade, boa resistência à fadiga e elevada capacidade de absorver energia (tenacidade). Um exemplo desse tipo de produto é a

série de aços LN da Usiminas. Submetidos à laminação controlada, apresentam altos valores de resistência mecânica, com nível de carbono equivalente relativamente baixo. A Usiminas fornece aços ARBL na série LN, com limites de resistência ao escoamento entre 380 MPa e 1000 MPa (BALUCH, UDIN, ABDULLAH, 2014; USIMINAS, 2021).

A resistência mecânica elevada dos UHSS, o torna um excelente material para formar os reforços de colunas laterais, pois esta área da carroceria dispõe de menor espaço para deformação. Por outro lado, possuem conformabilidade limitada, que causa fratura e retorno elástico cabal durante a formação em temperatura ambiente. Para aprimorar a resistência e solucionar os problemas citados, desenvolveu-se o processo de estampagem a quente envolvendo o uso de liga de aço ao boro e manganês (22MnB5), revestida com alumínio. Na estampagem a quente, a chapa é aquecida e imediatamente transferida para a prensa, para que a deformação ocorra na condição austenítica. O resultado é um material com microestrutura martensítica e resistência à tração que pode exceder 1500 MPa (CHOI *et. al.*, 2011).

2.2.2 Metalurgia de Soldagem

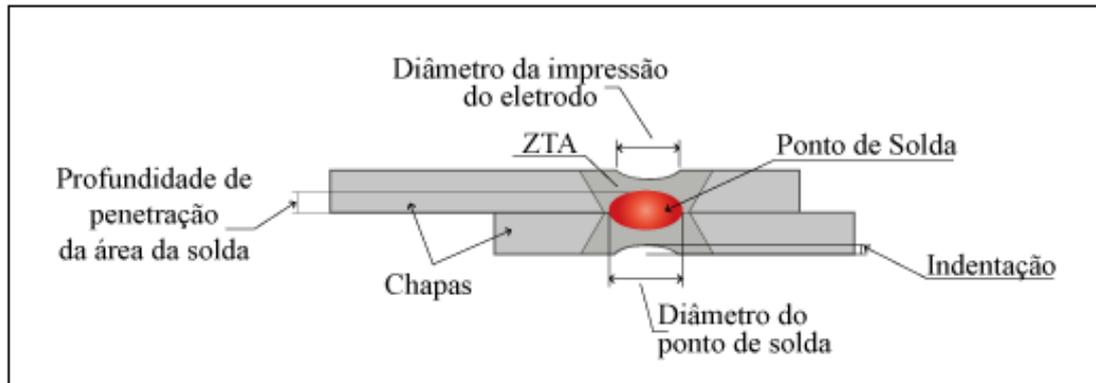
São chamadas “juntas” as regiões da peça em que a soldagem é executada. É desejável que a junta apresente constância nas propriedades mecânicas e metalúrgicas, ou seja, embora existam variações ao longo da união, não podem haver alterações repentinas e expressivas na resistência mecânica dos componentes. Em todos os processos de soldagem, as juntas possuem diferentes zonas, com terminologias específicas (MACHADO, 1996; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

A zona afetada pelo calor (*Heat Affected Zone*, HAZ) ou simplesmente ZAC, é a região lateral à zona fundida que não se diluiu, mas que teve uma intervenção térmica muito expressiva. Essa região recebeu uma temperatura elevada, com altas taxas de aquecimento e resfriamento, que provocam transformações alotrópicas em estado sólido consideráveis, como por exemplo, crescimento de grão. As mudanças provocadas nas propriedades do material, na região da junta, estão relacionadas às reações que acontecem durante a solidificação e resfriamento, e conseqüentemente da microestrutura resultante nesta área (MACHADO, 1996; SANTOS, 2015; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

Na Figura 13 é exibida a seção transversal de uma junta de topo, unida pelo processo de soldagem por pontos, em que são demonstradas as principais regiões da união. Na imagem estão representadas duas chapas de aço, o ponto de solda, com as profundidades de penetração e

indentações retratadas, além da zona termicamente afetada (ZTA) (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016; BRANCO, 2019).

Figura 13 - Seção transversal de uma soldagem de topo por pontos



Fonte: Adaptado de BRANCO (2019)

Quando submetidos à elevação de temperatura, alguns metais podem sofrer alterações na microestrutura, ditas transformações de fase. A microestrutura formada em um aço, em função da velocidade de resfriamento, pode ser obtida através de diagramas de transformação para o material específico. De modo geral, podem ser encontradas quatro diferentes fases nas microestruturas dos aços: ferrita, perlita (fina ou grossa), bainita e martensita. Materiais com diferentes microestruturas dentro de uma única liga são chamados multifásicos (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016, CALLISTER, 2020).

As combinações de ferrita com perlita grossa, e ferrita com perlita fina, são mais comuns em aços com menor teor de carbono e taxas de resfriamento menores, resultando em materiais com maior ductilidade. A microestrutura bainítica, é resultante de aços com elementos de liga e taxas de resfriamento controladas, conferindo elevada resistência mecânica combinada à boa tenacidade. A martensita surge em materiais com teor de carbono mais elevado, que foram submetidos a resfriamento rápido, ela confere alta dureza simultaneamente à fragilidade, sendo por vezes indesejável (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

A maioria dos metais tem elevada condutividade térmica, sendo assim o calor proveniente da soldagem se dissipa rapidamente pelas redondezas da peça. Essa característica pode ocasionar a formação de elevados níveis de martensita na região da solda, uma condição que pode não ser aceitável em algumas aplicações. Uma das maneiras de reduzir a formação desse tipo de microestrutura é o pré aquecimento do material, e em alguns casos manter essa temperatura após a soldagem para promover taxas de resfriamento menores (MACHADO, 1996; MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016).

A necessidade dos tratamentos térmicos depende do teor de carbono, tamanho da peça, velocidade de soldagem e temperatura inicial do processo. A equação (4) para cálculo do carbono equivalente (C_{eq}), é uma ferramenta que auxilia na avaliação da soldabilidade do material, indicando a sua sensibilidade a esse processo e a necessidade de execução de tratamentos térmicos. Segundo a AWS (2007), materiais com percentuais de C_{eq} acima de 0,40 podem ter a tendência de formação de trincas na ZTA, embora ainda estejam na faixa de C_{eq} com boa soldabilidade (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2016; AWS, 2007).

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Si}{6} \quad (4)$$

2.2.3 Soldabilidade

Os testes de soldabilidade dos aços quanto à soldagem por resistência, constituem uma importante fase do projeto de veículos. Quando uma junta é selecionada para compor a carroceria de um automóvel, constituída por uma nova combinação de materiais e espessuras, os engenheiros realizam testes de soldagem, verificando os parâmetros aplicados em conjuntos de chapas semelhantes, para posteriormente comparar o desempenho das ligas quanto à soldabilidade. Na indústria automotiva, são emitidos documentos com propriedades dos materiais, que possibilitarão ao engenheiro de soldagem desenvolver uma combinação de parâmetros que assegure a robustez do processo (UIJL, 2015).

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem por resistência para aços

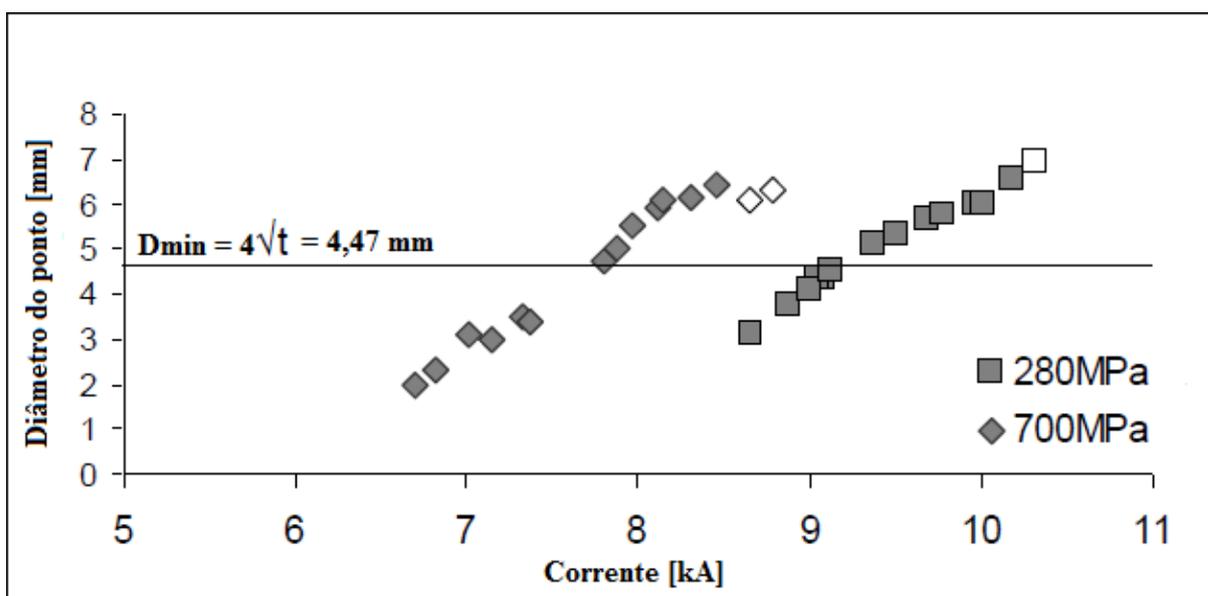
Espessura da chapa [mm]	Força de soldagem [kN]	Corrente de Soldagem [kA]	Tempo de soldagem [ms]	Diâmetro do Eletrodo [mm]
0,60 + 0,60	2,00	8,50	120	6
0,80 + 0,80	2,24	9,00	160	6
1,00 + 1,00	2,50	9,50	170	6
1,25 + 1,25	3,15	10,00	220	6
1,50 + 1,50	3,65	10,45	250	7
1,80 + 1,80	4,50	10,90	300	7
2,00 + 2,00	5,00	11,20	420	7
2,50 + 2,50	5,60	11,80	540	8

Fonte: Adaptado de ROBOT – WELDING (2021)

A inexistência de equipamentos de soldagem com inteligência artificial, e a necessidade de soldar diferentes juntas repetidas vezes, obrigou os engenheiros a desenvolverem tabelas de parâmetros de soldagem, para chapas de diferentes espessuras. A Tabela 3 demonstrada anteriormente, fornece sugestões de parâmetros para soldagem de duas chapas de aço com baixo teor de carbono, com espessura variando de 0,60 a 3,00 mm. Alguns parâmetros podem estar superdimensionados, pois dependem do equipamento em que foram aplicados, podendo ter menor intensidade em equipamentos mais eficientes. A maioria das tabelas foi difundida para aços com baixo teor de carbono, protagonistas das carrocerias até meados dos anos 1980. Entretanto, as informações contidas servem de referência para a implementação da soldagem em aços de alta resistência (UIJL, 2015; BRANCO, 2019; ROBOT-WELDING, 2021).

A soldagem a ponto está bem consolidada tanto para os aços de baixa resistência como para aços de alta resistência mecânica. Os AHSS e UHSS em comparação com aços de conformação tradicionais, tem soldagem caracterizada por faixas de corrente de soldagem menores, correntes de expulsão mais baixas e conseqüentemente, diâmetros máximos de solda menores. O gráfico da Figura 14 ilustra essa situação, pois demonstra as faixas de corrente utilizadas e os diâmetros obtidos nos pontos, para dois aços automotivos galvanizados que foram soldados com os mesmos parâmetros (exceto a corrente). Um dos aços tem resistência à tração de 280 MPa e o outro é um AHSS com resistência à tração de 700 MPa, ambas as chapas possuem espessura de 1,25 mm (UIJL, 2015).

Figura 14 – Gráfico de influência da resistência mecânica na soldabilidade



Fonte: Adaptado de UIJL (2015)

A força de soldagem utilizada nos testes foi de 4,5 kN, o tempo de 400 ms, e a capa de eletrodo é do tipo B, com diâmetro de ponta igual a 5 mm. Para faixas de corrente de soldagem definidas em padrões automotivos típicos, limitando a mesma a partir do início de expulsão, e diâmetro dos pontos calculado pela equação 2, observa-se que o aço de 280 MPa tem uma faixa de corrente de soldagem de 9,3 kA a 10,2 kA, e um diâmetro máximo de 6,55 mm. Por outro lado, no aço de 700 MPa, foram observados pontos com diâmetro adequado para níveis de corrente de 7,8 kA a 8,5 kA, em que o tamanho máximo obtido foi de 5,4 mm (UIJL, 2015).

Uma diferença relevante demonstrada na figura 20 é a menor densidade de corrente requerida pelo material de maior resistência. Os principais fatores que causam esse fenômeno são: maior resistência elétrica em todas as interfaces de contato, como resultado da maior resistência desse material à deformação; menor condutividade térmica, devido aos elementos de liga presentes, e fatores microestruturais que conferem as propriedades mecânicas ao material (UIJL, 2015).

Os testes mecânicos também são ferramentas importantes para estudos de soldabilidade, pois podem fornecer dados sobre a carga máxima suportada, modo de falha da solda, fadiga e a capacidade de absorver energia (tenacidade). Os fabricantes automotivos utilizam padrões para realizar os testes, porém para diminuir as diferenças nos resultados, foram desenvolvidos padrões mundiais na estrutura do Instituto Internacional de Soldagem (IIW - *International Institute for Welding*), que são publicados como padrões ISO. Os principais ensaios que podem ser realizados para avaliar a soldagem por pontos são de resistência ao cisalhamento, micro dureza, arrancamento total do ponto e ensaios de metalografia (UIJL, 2015, BRANCO, 2019).

A indústria automotiva tem adotado em grande escala o emprego dos AHSS de fase dupla (*Dual Phase*, DP), e desde então há uma curva ascendente de aprendizado com a soldagem de aços DP. Com o intuito de avaliar a expulsão de material em amostras de aço automotivo 800 DP, Mikno *et al.* (2021) aplicou correntes de soldagem de 7,5 kA em duas chapas de 1,0 mm de espessura, para um tempo de soldagem de 240 ms em pulso único. Após observar indícios de expulsão, reduziu a corrente de soldagem para 7,0 kA, definiu um intervalo de 100 ms e aplicou um segundo pulso com duração de 250 ms. A força de soldagem mensurada nos testes que não resultaram em expulsão foi de 2,20 kN, e cerca de 1,90 kN nos testes com presença de expulsão.

Tumuluru (2006), em um trabalho cujo objetivo era avaliar a soldagem por pontos na soldagem de aços bifásicos revestidos de alta resistência, utilizou faixas de corrente de 8 a 12 kA na soldagem de duas chapas de 2 mm de espessura, de um aço DP com 780 MPa de resistência à tração. Nessas condições obteve pontos com diâmetro de 5,7 mm a 8,0 mm.

Valores de corrente acima de 12 kA resultaram em expulsão de metal fundido, em relação aos valores de força e tempo de soldagem utilizados no experimento.

Com o objetivo de repetir o experimento em um material de maior resistência mecânica, Tumuluru (2006) utilizou duas chapas com espessura de 2 mm cada, com limite de resistência à tração de 980 MPa, obtendo pontos com diâmetros satisfatórios em uma faixa de corrente entre 7,6 kA e 9,5 kA. Abaixo de 7,6 kA, foram gerados pontos com diâmetro pequeno e a partir de 9,5 kA, ocorreu expulsão de material. O diâmetro dos pontos obtidos ficou entre 5,1 mm e 6,3 mm.

Os experimentos realizados por Tumuluru (2006), demonstraram que aços de fase dupla com limite de resistência à tração de 780 MPa e 980 MPa, apresentaram comportamento de soldagem semelhante ao de aços com limite em 590 MPa, podendo ser soldados com programações comuns e fáceis de serem implantadas. O autor percebeu em testes de arrancamento total do ponto, que o limite de resistência da solda é extremamente semelhante ao do material, quando o tamanho da solda é adequado. Constatou que as falhas causadas por cargas menores que as suportadas pelo material ocorreram em pontos cujo diâmetro era inferior ao diâmetro mínimo para a junta em questão.

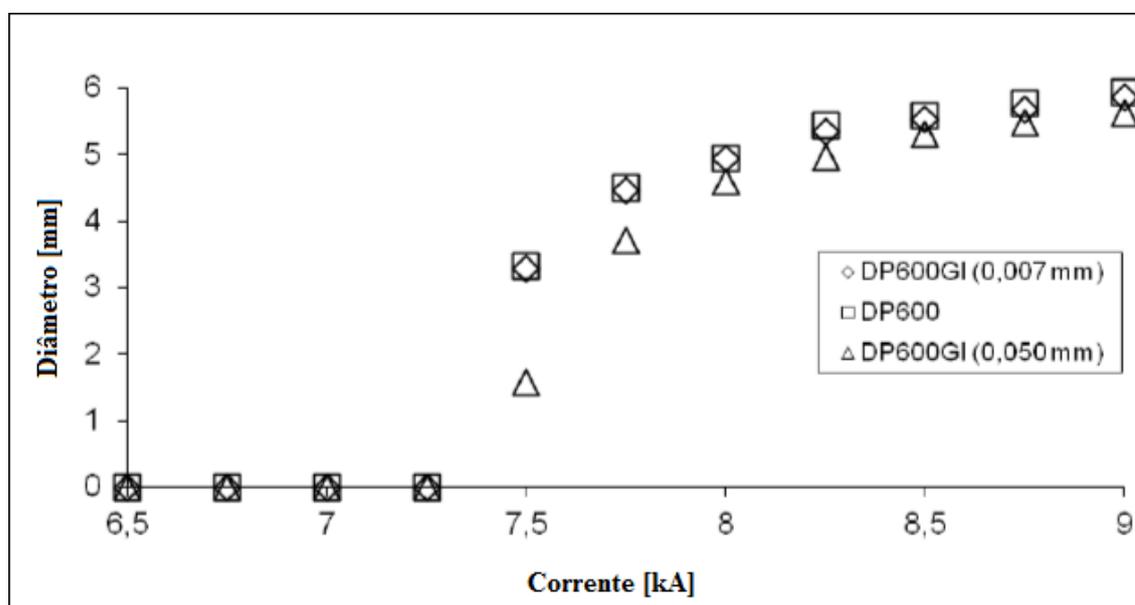
A soldagem de aços ao boro com revestimento de alumínio (22MnB5), em aço GA780DP, foi estudada por Choi *et. al.* (2011) a partir de experimentos que utilizaram chapas de 1,6 mm e 2,0 mm de espessura, respectivamente. Ambos os materiais possuem nível elevado de carbono equivalente (C_{eq}), devido à grande quantidade de elementos de liga, e podem apresentar a formação de microestrutura martensítica na região da solda, conferindo fragilidade à junta. A diferença significativa nas propriedades mecânicas entre os materiais, como o limite de resistência à tração de 580 MPa para o GA780DP, em relação aos cerca de 1480 MPa do 22MnB5, alertam que a resistência da solda deve ser elevada, para atender aos requisitos de tais propriedades mecânicas.

A soldagem da junta foi realizada com a corrente variando entre 5 kA e 9,5 kA, para uma força de eletrodos de 6 kN, e tempo de solda de 340 ms. Pontos com diâmetro mínimo aceitável foram obtidos para valores de corrente a partir de 8 kA, com crescimento ocorrendo até 9kA, e início de decrescimento do tamanho a partir deste nível. De maneira análoga, os ensaios de cisalhamento por tração demonstraram que a carga suportada pelo 22MnB5 aumentou simultaneamente com o diâmetro do ponto, e ultrapassou o valor mínimo definido para a espessura de 1,6 mm, quando a corrente atingiu densidade de 8 kA. A resistência ao cisalhamento continuou a aumentar até a corrente de 9 kA, e a partir de então caiu

consideravelmente devido à presença de expulsão nos pontos soldados com 9,5 kA (CHOI *et. al.*, 2011).

O revestimento aplicado nos aços para prevenir a corrosão, pode influenciar na soldabilidade. A Figura 15 demonstra a influência da espessura da camada de revestimento, a partir dos resultados de uma simulação realizada em software, na soldagem de aço DP600, em juntas com duas chapas de 1,0 mm de espessura. Foram avaliadas três situações, na primeira o material possui camada de revestimento com espessura padrão utilizada na indústria automotiva, de 0,007 mm. Na seguinte, o aço DP600 está sem revestimento e na última, a camada de revestimento tem espessura aumentada para 0,050 mm (UIJL, 2015).

Figura 15 – Gráfico de influência da espessura do revestimento na soldabilidade



Fonte: Adaptado de UIJL (2015)

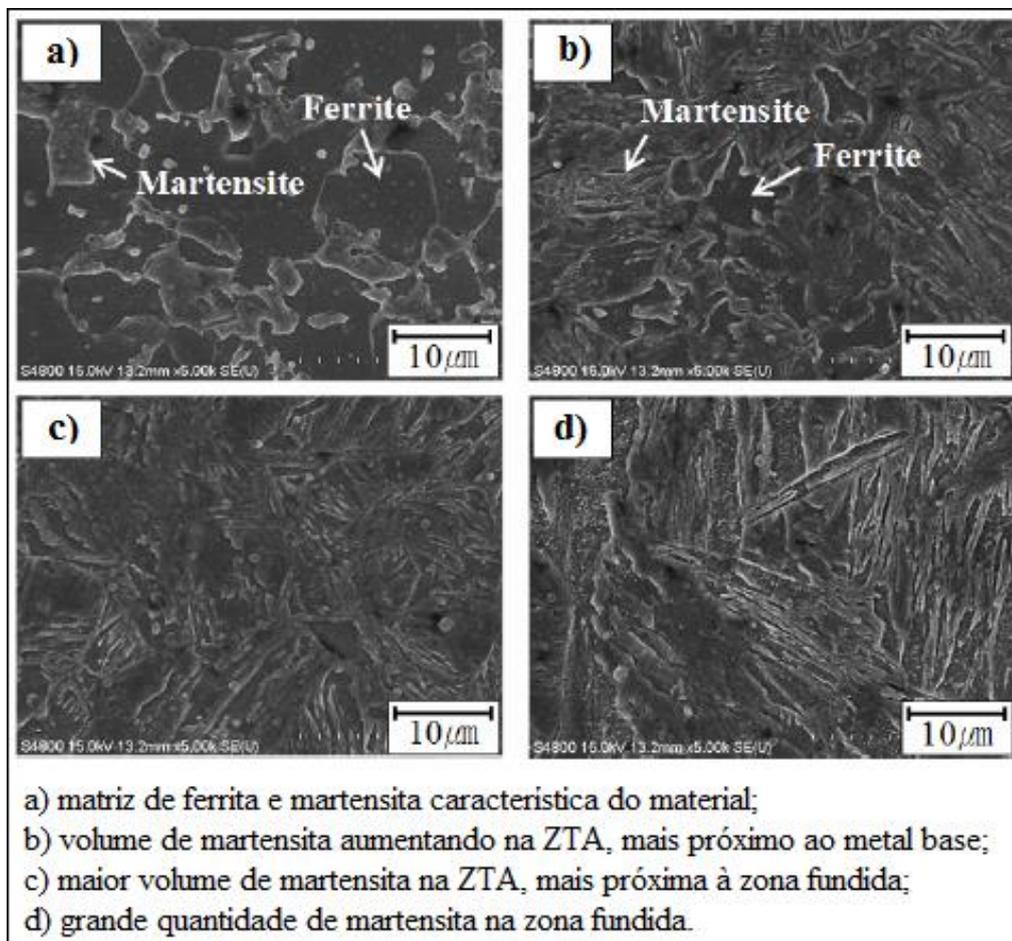
A chapa com revestimento padrão apresentou comportamento muito semelhante ao do material não revestido, enquanto a última teve a soldabilidade um pouco afetada, no que diz respeito ao diâmetro e densidade de corrente ideal. A simulação realizada no software *Sorpas* considerou capas de eletrodo do tipo B, com diâmetro de ponta igual a 6 mm, força de soldagem de 4 kN e tempo de liberação de corrente igual a 300 ms. A densidade de corrente aplicada variou de uma faixa de 6,5 kA a 9,0 kA, porém a soldagem só ocorreu a partir de 7,5 kA, quando os pontos começaram a apresentar diâmetro acima de 3 mm. (UIJL, 2015).

A soldagem por pontos provoca alterações na microestrutura dos materiais, que normalmente apresenta características diferentes ao longo da região da solda e da ZTA. De acordo com Tumuluru (2006), as taxas de resfriamento em chapas de até 2 mm de espessura

estão na faixa de 250° C por segundo, e são mais do que suficientes para a formação de martensita, logo, é esperada a presença desta fase na zona fundida e na ZTA. A soldagem de uma junta composta de aço 22MnB5 ($t = 1,6$ mm) e GA780DP ($t = 2,0$ mm), revelou diferentes microestruturas para ambos os materiais, no ponto de solda específico e em seus arredores. O resultado obtido no aço GA780DP é exibido na Figura 16 (TUMULURU, 2006; CHOI *et al.*, 2011).

O aço GA780DP é constituído de uma matriz de ferrita e martensita, conforme fotografia a, e percebe-se que o volume de martensita aumenta gradativamente na zona termicamente afetada (ZTA), mais próxima do metal base, como exibido na fotografia b. Na fotografia c observa-se a formação de martensita mais fina na ZTA, numa região mais próxima à zona de fusão, em relação à martensita presente nesta última, que é exibida na fotografia d. Esse acontecimento ocorre pois a austenização é incompleta na ZTA, pois mesmo quando ocorre a formação dos grãos de austenita, seu crescimento é interrompido pela formação de martensita (CHOI *et al.*, 2011).

Figura 16 – Microestrutura do aço GA780DP após soldagem



Fonte: Adaptado de CHOI *et al.* (2011)

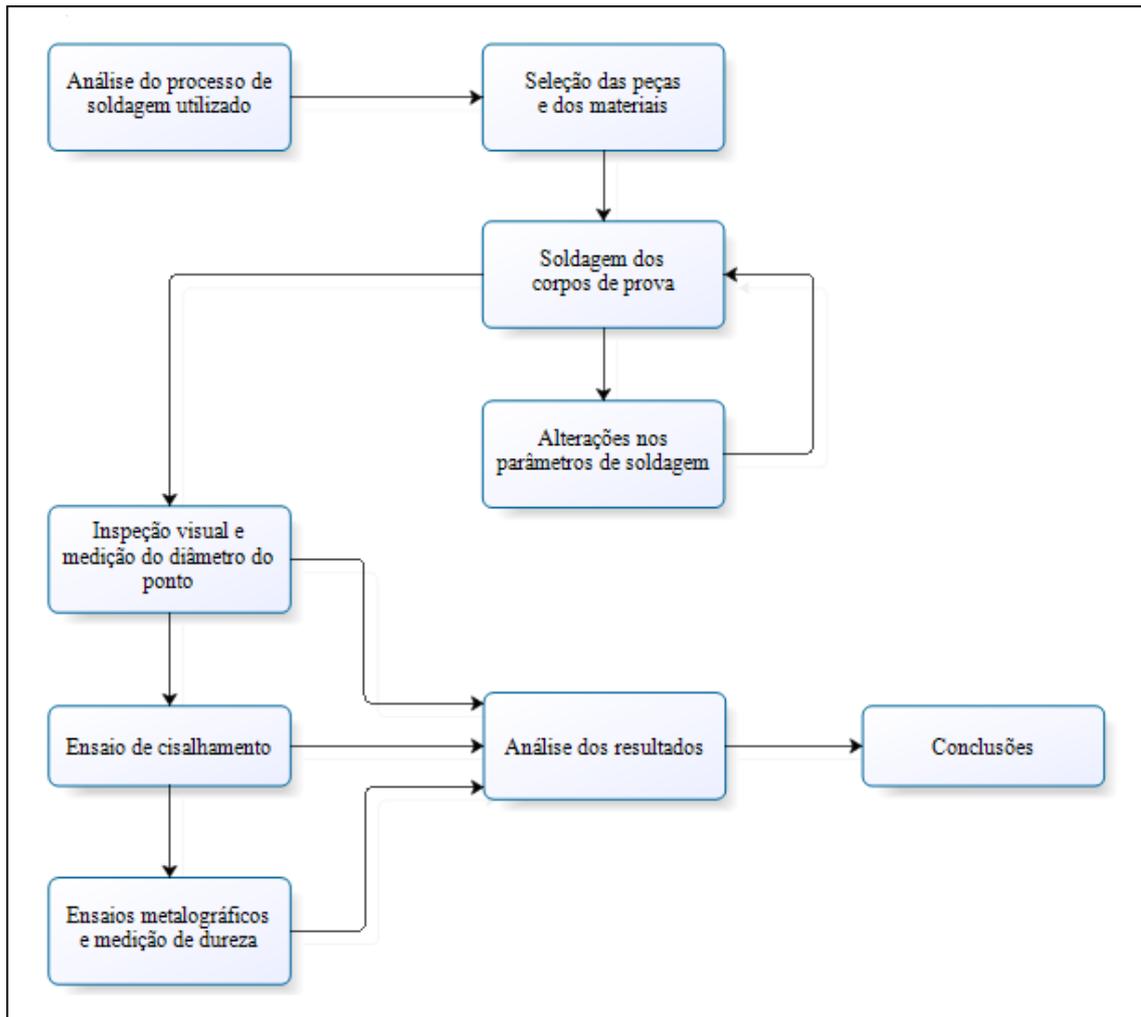
Uma das maneiras de avaliar a influência dos parâmetros na soldagem a ponto, consiste na realização de testes, em que tanto a seleção dos parâmetros como a análise são realizadas através do Método de Taguchi. É um método utilizado em experimentos, para analisar processos cujo resultado final depende de vários fatores. Através da escolha sistemática ou aleatória de combinações, dispostas em forma de matriz, permite identificar os efeitos individuais de cada variável (SANTOS, 2017; THAKUR *et. al.*, 2020).

Na soldagem por resistência, o Método de Taguchi é utilizado para definir a influência individual de cada variável, na soldagem de uma determinada junta. Uma vez inseridas em um programa como o Minitab, a matriz de parâmetros e a matriz de resultados, o método pode indicar também o nível mais adequado de cada parâmetro. Normalmente são aplicados três níveis para cada variável nos experimentos, mas tanto a quantidade de níveis, como a quantidade de parâmetros podem ser maiores, de acordo com a matriz selecionada. Esse processo acelera a obtenção da condição ideal e minimiza custos provocados por testes intermediários (YASIN *et. al.*, 2020; THAKUR *et. al.*, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e a metodologia, para a análise da influência dos parâmetros de soldagem por resistência, em aços empregados em carrocerias automotivas. A Figura 17 demonstra o fluxograma de atividades executadas.

Figura 17 - Fluxograma de Atividades



Fonte: o autor (2021)

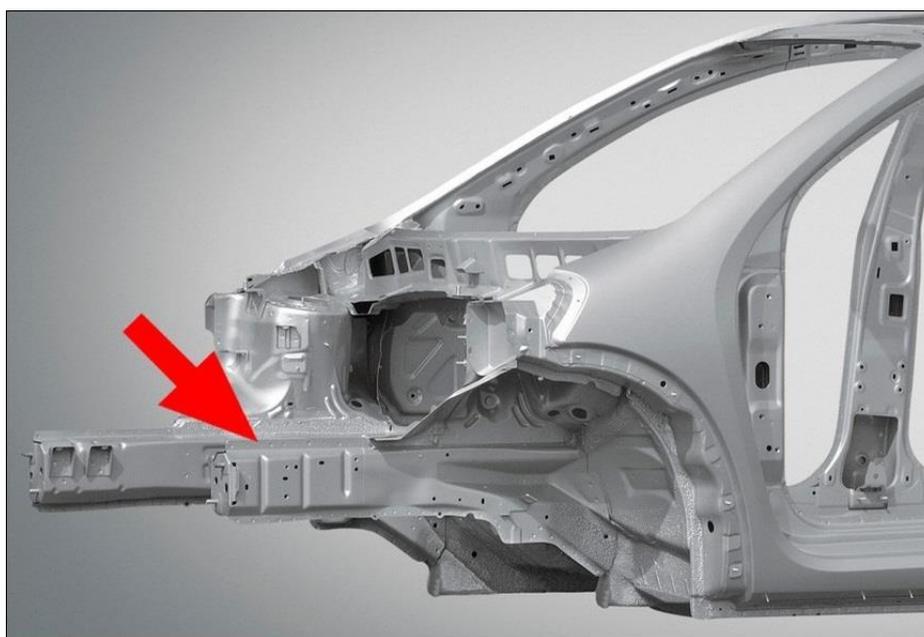
3.1 MATERIAIS

As amostras analisadas representam dois conjuntos de peças de automóveis, compostos com duas chapas de aço em cada um deles. Estes componentes são normalmente soldados em reparos de veículos que sofreram colisão frontal ou lateral, quando a instalação de uma nova peça for necessária para devolver ao veículo as suas características físicas. O primeiro conjunto de chapas que passou pelo procedimento de soldagem por pontos, representa as longarinas

dianteiras de um automóvel, através dos materiais e espessuras selecionados. A junta é composta de duas chapas de aço ao carbono SAE 1010, cada uma com espessura de 2,0 mm, usualmente utilizada nestes componentes.

As longarinas são travessas longitudinais que atuam como componentes estruturais, sendo responsáveis por absorver energia em impactos, e com substituição considerada obrigatória quando houver danos nas regiões de deformação programada. Em geral são compostas por um perfil em forma de C, e uma chapa externa que promove o fechamento da peça. Em alguns casos, a substituição de apenas uma das peças é suficiente e viável para o conserto do veículo, entretanto, a instalação deve ser feita no local indicado (sem cortes), e a utilização de soldagem por pontos é o procedimento mais adequado para essa aplicação. A Figura 18 exibe a representação da parte dianteira de uma carroceria, em que a longarina está sendo indicada (CESVI, 2013; SCHAUN, 2019).

Figura 18 – Longarina dianteira de veículo



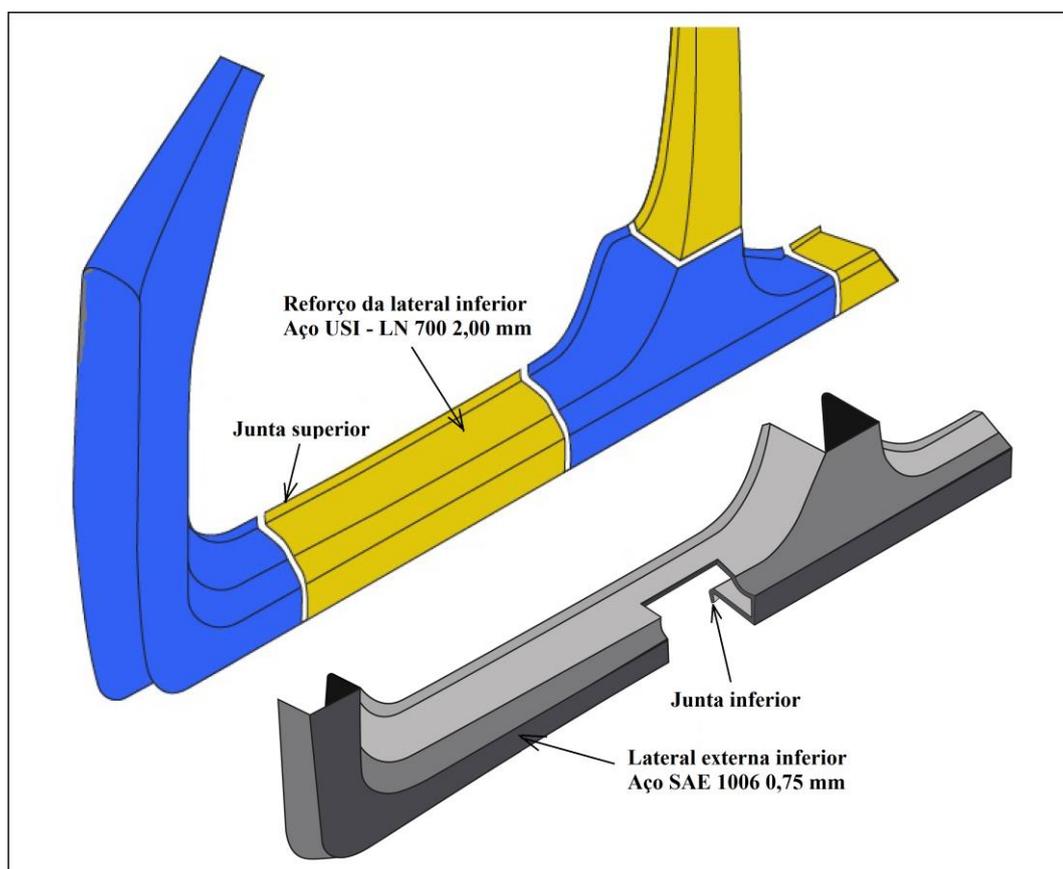
Fonte: SCHAUN (2019)

O segundo conjunto de amostras soldadas e examinadas foi composto por uma chapa de aço ao carbono SAE 1006, com espessura de 0,75 mm, e uma chapa de aço de alta resistência USI - LN 700, de laminação controlada, com espessura de 2,00 mm. Esse conjunto representa a união do painel lateral externo, no reforço interno longitudinal da carroceria, na região interna e abaixo das portas do veículo. A substituição da lateral externa inferior é comum nas oficinas

reparadoras, e a soldagem por pontos facilita o trabalho, pois descarta operações como furação e desbaste, inevitáveis quando realizada pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

A pequena espessura da chapa externa em relação à interna dificulta ainda mais a soldagem pelo processo GMAW, pois a elevada energia necessária para promover a fusão do reforço, acaba fundindo uma região maior do que a desejada na chapa menos espessa. A soldagem a ponto que será aplicada também exige atenção aos parâmetros e condições de superfícies, pois eventuais excessos nos níveis de corrente poderão danificar a chapa externa, através de expulsão excessiva de material fundido. Por outro lado, se os parâmetros forem baixos, haverá falta de solda na junta. A Figura 19 ilustra os componentes do automóvel que os corpos de prova estarão representando.

Figura 19 – Lateral externa inferior e reforços da carroceria



Fonte: O autor (2021)

A seleção dos materiais que representam as estruturas veiculares, ocorreu através de uma análise comparativa da composição química de amostras de peças genuínas, com os dados de aços disponíveis comercialmente. As análises de composição química dos materiais foram realizadas pelo laboratório de ensaios e calibração CQS, de São Leopoldo – RS. O equipamento

utilizado foi um espectrômetro de emissão ótica modelo Foundry Master Pro, fabricado pela Oxford Instruments e com certificado de calibração emitido pela Metrosul. Os resultados estão anexados a este texto.

A Tabela 4 exibe a composição química dos materiais adquiridos para a construção dos corpos de prova, através dos dados obtidos nos certificados de conformidade de cada material. Os certificados foram fornecidos pelos estabelecimentos em que os materiais foram comprados, e contém dados relacionados à composição química, dureza, dimensões, entre outros. Estes documentos encontram-se na seção de apêndices.

Tabela 4 – Composição química dos materiais

Material	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%Cr	%Nb	%V	%Ti
SAE 1006	0,0352	0,0110	0,2460	0,0150	0,0071	0,0410	0,0160	-	-	-
SAE 1010	0,0860	0,0100	0,3750	0,0120	0,0060	0,0380	-	-	-	-
USI - LN 700	0,1000	0,0400	1,6700	0,0190	0,0040	0,0260	0,5700	0,0551	0,0040	0,1040

Fonte: Certificados de conformidade dos materiais (2021)

A Tabela 5 demonstra as principais propriedades mecânicas dos materiais empregados na construção dos corpos de prova.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos materiais

Material	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência [MPa]	Alongamento [%]	Dureza Brinell
SAE 1006	285	330	20	95
SAE 1010	305	365	20	105
USI - LN 700	≥700	≥750	12	-

Fonte: Certificados de conformidade dos materiais (2021); USIMINAS (2021); MATWEB (2021)

3.2 METODOLOGIA

Ao todo foram analisados 54 corpos de prova, que foram submetidos ao processo de soldagem a ponto, sendo que 27 amostras representaram a longarina, e as outras 27 representaram o conjunto da lateral inferior do veículo. Os corpos de prova foram divididos em grupos com 3 amostras, totalizando 9 grupos para cada conjunto de materiais. Cada um deles foi soldado com os parâmetros de soldagem em níveis idênticos, a fim de assegurar uma

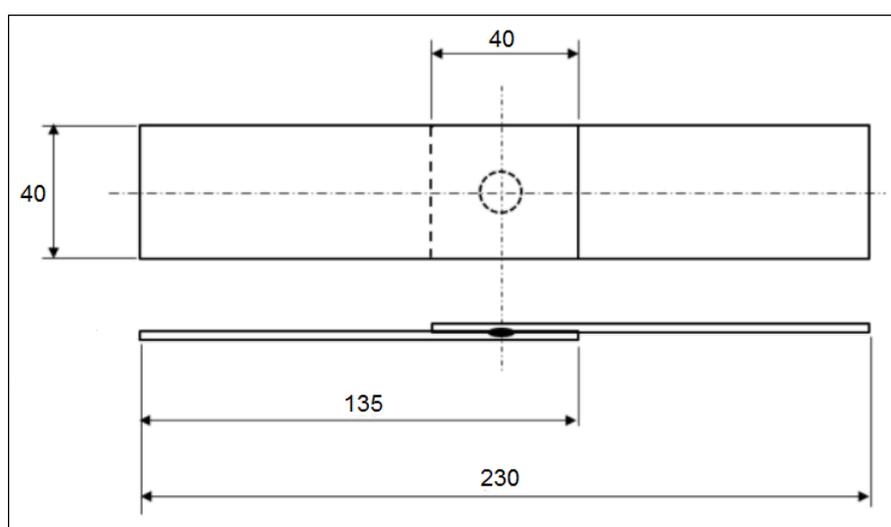
quantidade mínima de corpos de prova para os ensaios e testes executados. A definição dos parâmetros de soldagem ocorreu de forma sistemática.

As juntas soldadas foram avaliadas primeiramente por inspeção visual, para a identificação de problemas ou defeitos superficiais graves. Em seguida, foi executada a medição do diâmetro dos pontos, em todos os corpos de prova. Posteriormente, foram executados os ensaios de cisalhamento, metalográfico e de microdureza na seção transversal das juntas. A realização destes testes teve como objetivo fornecer resultados, que permitiram a análise da influência dos parâmetros aplicados, na qualidade da solda e no comportamento dos materiais.

3.2.1 Confecção e Preparação dos Corpos de Prova

O modelo de corpo de prova utilizado é o padrão estabelecido pela norma ISO 14270, para ensaios de cisalhamento de tração, cuja representação é exibida na Figura 20. O comprimento é de 135 mm e a largura de 40 mm, com uma sobreposição de 40 mm. No entanto, este modelo de corpo de prova pôde ser utilizado em outros ensaios que foram realizados, pois um terço das amostras teve o local da junta seccionado, e embutido para permitir as demais análises (UIJL, 2013).

Figura 20 – Representação do corpo de prova



Fonte: Adaptado de UIJL (2013)

Para a construção dos corpos de prova, as chapas adquiridas foram encaminhadas a uma empresa terceirizada, que executou o corte a laser das amostras, garantindo a precisão das dimensões e bom acabamento. A preparação das chapas antes da soldagem, prosseguiu com a limpeza para a remoção de impurezas como óleo e graxa. Foram utilizadas flanelas descartáveis

para a aplicação de solução desengraxante, e em seguida foi executada a marcação do local do ponto de solda em todas as peças, com o auxílio de esquadro e paquímetro analógico.

3.2.2 Parâmetros de Soldagem

Os parâmetros corrente, tempo e força de soldagem foram considerados em três níveis distintos, para cada uma das juntas analisadas. O nível intermediário de ambos os parâmetros foi o ponto de partida para a definição das demais intensidades, esse valor foi obtido em testes realizados com o equipamento operando no modo semi-autônomo, na soldagem de juntas semelhantes. A partir de então, foram definidos um nível abaixo e um acima para cada uma das variáveis, dentro de faixas aplicáveis para estes materiais, identificadas na elaboração do referencial teórico. A ideia consistiu no desenvolvimento de duas matrizes, com 9 combinações de parâmetros em cada uma, resultando em um total de 18 ensaios. A Tabela 6 indica os níveis das variáveis aplicados no procedimento, para as duas situações.

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem e seus níveis

Junta	Parâmetro de soldagem	Corrente [kA]	Força [kN]	Tempo [ms]
SAE 1010 2,00 mm + SAE 1010 2,00 mm (Longarina)	Nível 1	7,4	2,4	460
	Nível 2	8,2	2,7	490
	Nível 3	9,0	3,0	520
SAE 1006 0,75 mm + USI - LN 700 2,00 mm (Lateral/Reforço)	Nível 1	7,0	2,0	380
	Nível 2	8,0	2,4	420
	Nível 3	9,0	2,8	460

Fonte: O autor (2021)

Inicialmente, seriam utilizadas duas matrizes L9 de Taguchi, em que os níveis são pré-selecionados de acordo com um modelo específico da matriz. Entretanto, o procedimento prosseguiu com os arranjos desenvolvidos pelo autor, que permitem a comparação dos resultados obtidos em diferentes faixas de corrente. A corrente é o parâmetro que mais afeta a geração de calor na junta, de acordo com a equação (1), alterando as propriedades dos pontos e a resistência na junta. A intensidade da corrente também altera significativamente o consumo de energia do equipamento, e o desgaste dos eletrodos.

O desenvolvimento das matrizes prosseguiu com a seleção sistemática de uma combinação de parâmetros, para que as combinações subsequentes fossem escolhidas a partir de intervalos fixos, até chegar ao número total de ensaios desejados. Esse conjunto de valores selecionados pode ser chamado de amostragem sistemática. As combinações dos parâmetros de soldagem aplicados ao longo dos nove ensaios, que foram realizados para cada um dos conjuntos de materiais, estão expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de soldagem selecionados

Ensaio	Espécimes	SAE 1010 2,00 mm + SAE 1010 2,00 mm			SAE 1006 0,75 mm + USI LN 700 2,00 mm		
		Corrente [kA]	Força [kN]	Tempo [ms]	Corrente [kA]	Força [kN]	Tempo [ms]
1	3	7,40	2,40	460	7,00	2,00	380
2	3	7,40	2,70	490	7,00	2,40	420
3	3	7,40	3,00	520	7,00	2,80	460
4	3	8,20	2,40	460	8,00	2,00	380
5	3	8,20	2,70	490	8,00	2,40	420
6	3	8,20	3,00	520	8,00	2,80	460
7	3	9,00	2,40	460	9,00	2,00	380
8	3	9,00	2,70	490	9,00	2,40	420
9	3	9,00	3,00	520	9,00	2,80	460

Fonte: O autor (2021)

Em virtude de a força de soldagem e o tempo de liberação de corrente sofrerem alterações simultaneamente, foi conveniente obter uma relação entre as duas variáveis, para facilitar a exibição dos resultados. O produto da força pelo tempo resulta na grandeza física conhecida como Impulso, cuja unidade é o N.s, e é definido como produto da força média aplicada sobre um corpo em um determinado intervalo de tempo (HELERBROCK, 2021b).

Para a avaliação do tamanho da solda e da resistência ao cisalhamento, foi selecionada a equação *Larger-is-better* (maior é melhor), que integra o memorial de cálculos do método de Taguchi. Essa equação considera os maiores valores obtidos nos resultados, como os mais satisfatórios. A fórmula está representada pela equação (5), e as respostas obtidas com ela correspondem à razão (ou relação) de sinal e ruído (THAKUR *et. al.*, 2020).

$$S/R = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \quad (5)$$

Em que:

S/R é relação de sinal e ruído [dB];

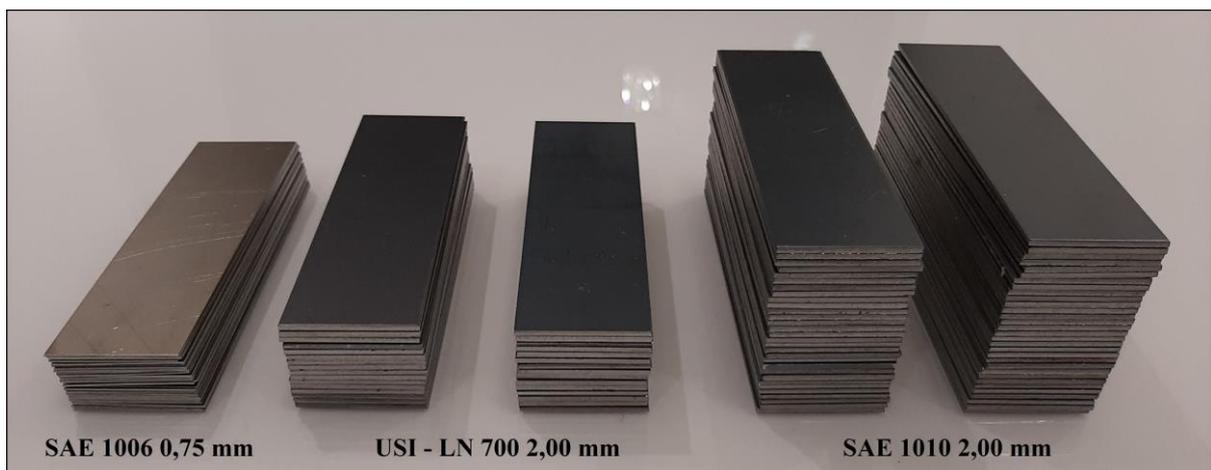
n é o número de repetições em um ensaio;

y_i é o valor das respostas.

3.2.3 Procedimento e Equipamento de Soldagem

Após a definição dos parâmetros e a preparação das chapas, foi executado o procedimento de soldagem nos corpos de prova. A Figura 21 exhibe os materiais que compõem as amostras, antes do procedimento de soldagem. A máquina utilizada no processo de soldagem é uma solda a ponto do tipo inversora, fabricada pela empresa francesa GYS®, modelo GYSpot 100 RCX. Este equipamento está adequado para a soldagem de todos os aços utilizados atualmente na indústria automotiva, incluindo aços ao Boro e UHSS, com ou sem revestimento (GYS, 2021).

Figura 21 - Amostras antes da soldagem



Fonte: O autor (2021)

A tensão nominal do equipamento é de 400 V (Volts), e opera com um transformador MFDC (multifásico de corrente contínua), que recebe a energia da rede com elevada tensão e transforma em energia de baixa tensão. Um retificador controlado atua para regular a densidade de corrente elétrica e transformar a corrente alternada em corrente contínua. A corrente máxima

de soldagem é de 10 kA, enquanto a força máxima de soldagem é de 3,5 kN na pinça do tipo “C”, e 5 kN na pinça do tipo “X”.

A pinça de solda utilizada nos procedimentos de soldagem é a pinça suspensa de tipo “C”, e as capas de eletrodo são de tipo B1, com diâmetro de ponta igual a 8 mm. O material dos eletrodos é uma liga de Cobre Cromo Zircônio (1% Cr e 0,25% Zr). As capas de eletrodo foram substituídas no início de cada experimento, sendo utilizadas apenas durante os nove ensaios de cada conjunto de materiais, para que eventuais desgastes não influenciassem na qualidade e tamanho da solda. A temperatura ambiente no momento da soldagem das peças era de 21° C, as chapas não foram pré aquecidas, e o resfriamento ocorreu ao ar, de forma natural. A Figura 22 exibe uma fotografia do equipamento (GYS, 2021).

Figura 22 – Máquina de solda a ponto multifuncional



Fonte: GYS (2021)

3.2.4 Inspeção e Medição do Tamanho da Solda

Após o processo de soldagem, a superfície dos pontos de solda foi inspecionada visualmente em todos os corpos de prova, para averiguar a presença de defeitos superficiais graves que acarretariam na inutilização de alguma determinada amostra. Em seguida foi

realizada a medição do diâmetro resultante dos pontos de solda, com o auxílio de um paquímetro analógico. Uma das formas de relacionar o diâmetro medido com os parâmetros aplicados em cada ensaio, foi a realização de cálculos do calor gerado no material, durante o procedimento de soldagem, através da equação (1).

Posteriormente, foi realizada uma inferência estatística no *software* Excel. A ferramenta utilizada chama-se análise de variância (ANOVA), e demonstra para um ou mais grupos de resultados, se existem diferenças estatísticas entre estes, para um determinado intervalo de confiança considerado. A análise também permitiu concluir se as variáveis envolvidas no processo, tiveram influência significativa nas respostas. Esta inferência estatística foi aplicada também na avaliação de outros resultados, sendo comumente utilizada em trabalhos que estudam a soldagem por pontos (THAKUR *et. al.*, 2020).

3.2.5 Ensaio de Cisalhamento

O objetivo principal do ensaio de cisalhamento, foi fornecer a carga máxima suportada pelo ponto de solda, quando submetido a um carregamento cisalhante, colaborando para a análise da influência dos parâmetros na qualidade da junta. Os resultados podem demonstrar se os pontos de solda suportam cargas semelhantes às resistidas pelo material base, e permitem a identificação do modo de fratura do ponto, dentre os definidos pela AWS (AWS, 2007; UIJL, 2013).

Foram realizados ensaios de cisalhamento em 36 corpos de prova, 18 para cada conjunto de materiais, de modo que foram testadas duas amostras para cada configuração de parâmetros. Não foram realizados três ou mais ensaios para cada combinação, em virtude da sobrecarga de atividades no laboratório da instituição. Os testes foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos, no Bloco D da Universidade de Caxias do Sul, e o equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Emic DL 20000. A norma que rege este ensaio é a ASME IX, cuja última edição é de 2019.

3.2.6 Ensaio Metalográfico

O ensaio metalográfico foi realizado no laboratório de micrografia da Universidade de Caxias do Sul. A preparação das amostras ocorreu de acordo com a norma ABNT NBR 13284/95. Para serem analisados, os corpos de prova tiveram que ser cortados em tamanho reduzido, preservando a região da junta, que foi seccionada posteriormente na região central do

ponto de solda. A seção central concentra a maior área da zona fundida (ZF), e pode conter defeitos que comprometam o desempenho da junta, sendo mantida aparente nos embutimentos.

Além da ZF, foi mantida nas amostras cortadas uma porção de metal de base (MB), para que pudessem ser observados a zona afetada pelo calor (ZAC) e o material original. Após seccionadas, as amostras foram embutidas a quente, com a utilização de uma mistura de bakelit marrom e preto como matéria prima. Posteriormente, os embutimentos passaram por um processo de lixamento com água. A granulometria das lixas iniciou em 150, passou por 240, 320, 400 e 600, até finalizar em 1200. Em seguida, foram polidas com pasta diamantada de 3 microns, em uma politriz Maxiplan, equipada com pano de polimento especial.

Com a superfície das amostras adequada para observação, estas foram atacadas com Nital 2%, conforme norma ABNT NBR 8108. Na sequência, foram observadas e fotografadas no microscópio óptico Zeiss Observer D1m. As regiões analisadas em cada junta foram o MB, a ZTA e a ZF, as ampliações definidas foram 50, 100 e 500 vezes. Os resultados permitiram a verificação da microestrutura resultante nos diferentes pontos da junta. Na Figura 23 é possível observar os seis embutimentos que foram realizados, com as 18 amostras analisadas.

Figura 23 - Embutimentos com amostras



Fonte: O autor (2021)

3.2.7 Ensaio de Microdureza

As amostras desenvolvidas para o ensaio metalográfico foram então submetidas ao ensaio de microdureza, que utilizou a escala Vickers. A norma adotada neste ensaio é a ABNT NBR ISO 6507-1/19, e o equipamento utilizado foi o microdurômetro Shimadzu HMV

Microhardness Tester, que equipa o laboratório de ensaios mecânicos da Universidade de Caxias do Sul.

As medições foram realizadas em cinco pontos diferentes de cada amostra, totalizando 90 aferições. A carga aplicada teve intensidade de 0,3 kg. As informações geradas permitiram traçar um perfil de dureza para as diferentes regiões das juntas analisadas (MB, ZAC e ZF). Além de fornecer a dureza resultante ao longo da junta, este teste colaborou para a identificação de algumas fases na microestrutura. A Figura 24 retrata uma imagem do equipamento utilizado nas medições de dureza.

Figura 24 - Microdurômetro Shimadzu



Fonte: O autor (2021)

4 RESULTADOS

4.1 TAMANHO DA SOLDA

A avaliação do tamanho da solda forneceu os resultados para o diâmetro obtido nos pontos de solda, em todos os corpos de prova envolvidos neste estudo. Uma das formas de relacionar o diâmetro medido com os parâmetros aplicados em cada ensaio, foi a realização de cálculos do calor gerado no material, durante o procedimento de soldagem.

4.1.1 Calor Gerado no Procedimento de Soldagem

Previamente ao cálculo do calor gerado em cada chapa, foram estimadas as resistências elétricas dos materiais utilizados nos corpos de prova, através da equação (2). Em função de apresentar valor extremamente baixo, devido às forças de soldagem aplicadas, a resistência de contato foi desconsiderada, e portanto, não está acrescida à resistência elétrica do material. As chapas adquiridas não possuem revestimentos, logo, é excluída a necessidade de cálculo da resistência à passagem de corrente desta camada. Os dados utilizados e os resultados dos cálculos estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades físicas e resistência elétrica dos materiais

Material	Área de contato - A [m²]	Percurso da corrente - L [m]	Resistividade do material - ρ [Ohm-m] (Material Specifications, 2021)	Resistência elétrica - R [Ohm]
SAE 1006	$5,0265 \times 10^{-5}$	0,00075	$1,4300 \times 10^{-7}$	$2,5962 \times 10^{-6}$
SAE 1010	$5,0265 \times 10^{-5}$	0,002	$1,7400 \times 10^{-7}$	$5,6898 \times 10^{-6}$
USI LN 700	$5,0265 \times 10^{-5}$	0,002	$1,8000 \times 10^{-7}$	$5,2522 \times 10^{-6}$

Fonte: O autor (2021)

Uma vez conhecidas as resistências elétricas de cada chapa, e os parâmetros de soldagem aplicados em cada ensaio, calculou-se o calor gerado (watts) em cada procedimento de soldagem, através da lei de Joule, representada pela equação (1). Os resultados para os três materiais utilizados estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Calor gerado na soldagem

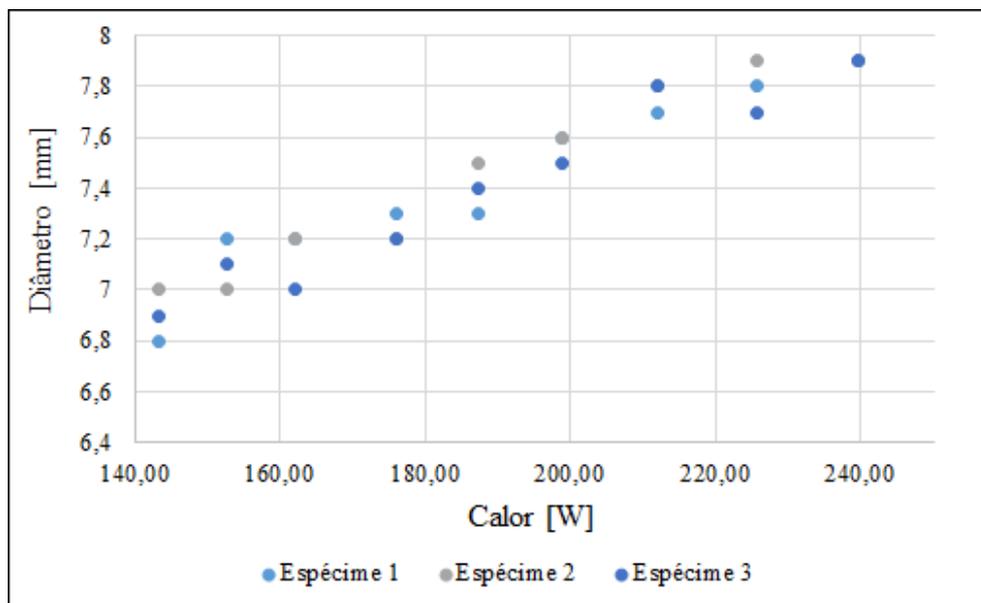
Ensaio	Calor gerado [watt – W]		
	SAE 1006 0,75 mm	SAE 1010 2,00 mm	USI - LN 700 2,00 mm
1	48,342	143,32	133,36
2	53,431	152,67	147,39
3	58,519	162,02	161,43
4	63,141	175,99	174,18
5	69,787	187,47	192,52
6	76,433	198,94	210,85
7	79,912	212,00	220,45
8	88,324	225,83	243,65
9	96,736	239,66	266,86

Fonte: O autor (2021)

4.1.2 Diâmetro dos Pontos no Material SAE 1010

A Figura 25 exibe o gráfico dos diâmetros dos pontos de solda, obtidos através de medições nos corpos de prova compostos por chapas de aço SAE 1010, com 2 mm de espessura, que representam a longarina automotiva. Foram avaliadas 3 amostras diferentes, para cada um dos nove ensaios executados.

Figura 25 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material SAE 1010



Fonte: O autor (2021)

A Figura 25 mostra um crescimento gradativo no diâmetro dos pontos, a medida que os parâmetros de soldagem eram alterados e a quantidade de calor gerado aumentava. Nenhum dos pontos apresentou diâmetro inferior ao mínimo calculado através da equação (3), que é de aproximadamente 5,65 mm para esta chapa. A quantidade de calor gerada no ensaio 9, superior em 60,50% em relação ao primeiro teste, resultou em um ganho na média dos diâmetros, de aproximadamente 12,60 %. Através de uma análise de variância (ANOVA), em que foi realizado o teste considerando fator duplo sem repetição, e significância de 5%, foi obtido o valor de P superior a 0,05 para amostras de um mesmo grupo. Por outro lado, o valor de P encontrado para grupos diferentes é inferior a 0,05, indicando que existe diferença significativa nos diâmetros dos pontos, de acordo com a quantidade de calor gerada.

Os resultados para a relação de sinal e ruído calculados pela equação (5), para os diâmetros dos pontos dos 27 espécimes avaliados, estão expostos na Tabela 10. Os maiores valores obtidos para a relação, correspondem aos ensaios que promoveram a formação de pontos com diâmetro mais expressivo. O crescimento gradual nos diâmetros converge para os ganhos no calor gerado no material, demonstrado na Tabela 9.

Tabela 10 - Diâmetros dos pontos e relação sinal-ruído em SAE 1010

Ensaio	Diâmetro no espécime 1 [mm]	Diâmetro no espécime 2 [mm]	Diâmetro no espécime 3 [mm]	Relação sinal-ruído
1	6,80	7,00	6,90	16,78
2	7,20	7,00	7,10	17,02
3	7,20	7,20	7,00	17,06
4	7,30	7,20	7,20	17,19
5	7,30	7,50	7,40	17,38
6	7,60	7,60	7,50	17,58
7	7,70	7,80	7,80	17,80
8	7,80	7,90	7,70	17,84
9	7,90	7,90	7,90	17,95

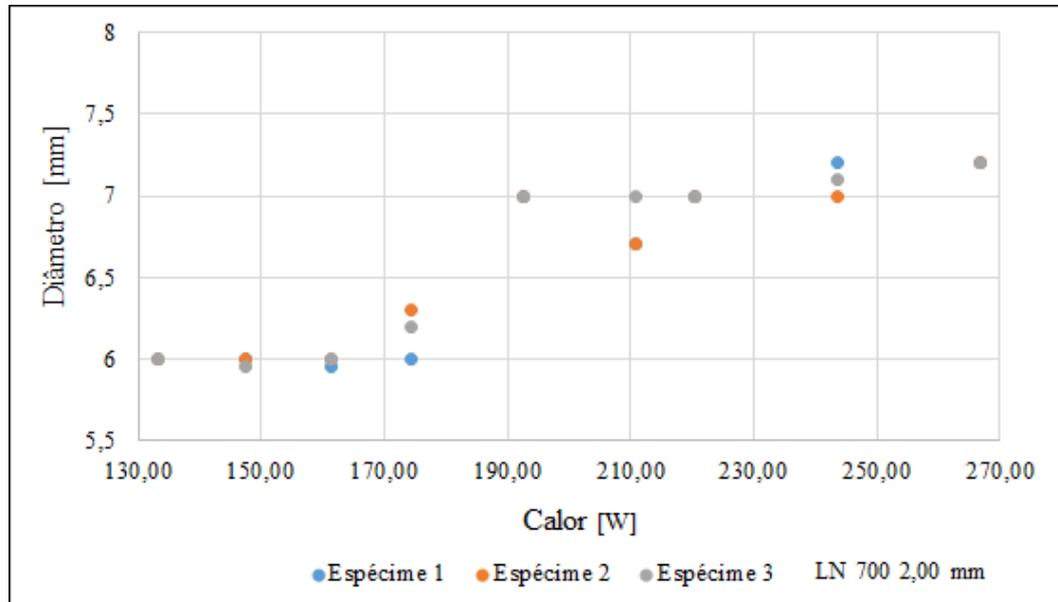
Fonte: O autor (2021)

4.1.3 Diâmetro dos Pontos nos Materiais SAE 1006 e USI - LN 700

Os corpos de prova que representam o conjunto de painel lateral e reforço do veículo, também passaram por uma avaliação do tamanho da solda. Os dados referentes às amostras

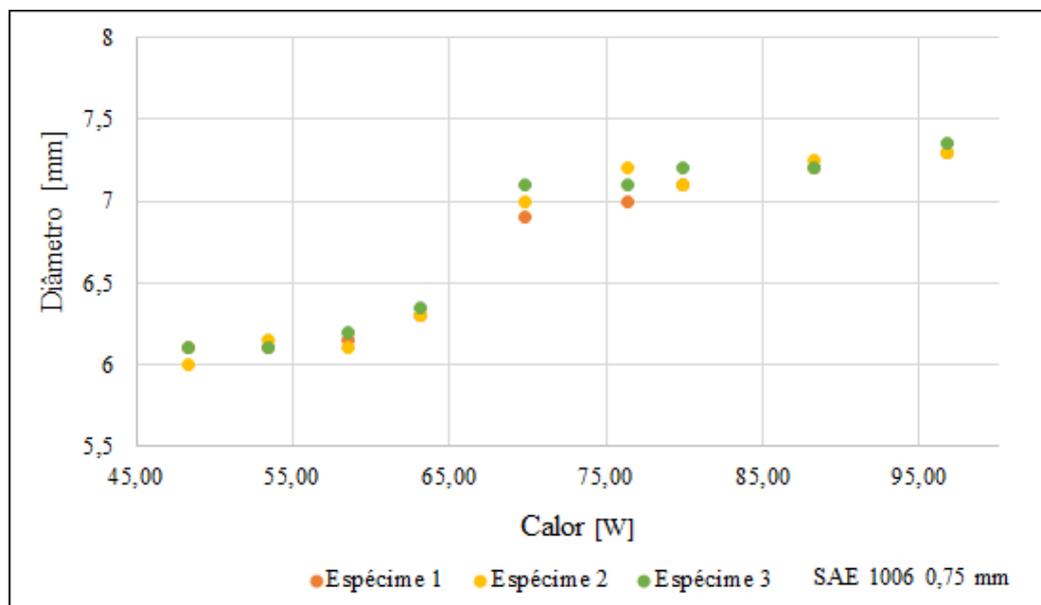
compostas pelos materiais SAE 1006 (espessura de 0,75 mm) e USI - LN 700 (espessura de 2,00 mm), aparecem nos gráficos das Figura 26 e 27.

Figura 26 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material USI – LN 700



Fonte: O autor (2021)

Figura 27 - Gráfico de diâmetro dos pontos vs. calor em material SAE 1006



Fonte: O autor (2021)

Nenhum dos pontos apresentou diâmetro menor que o mínimo estipulado pelos cálculos realizados com a equação (3), que é de 3,5 mm para a chapa SAE 1006, e 5,65 mm para o material USI – LN 700. Embora os resultados obtidos no material com menor espessura,

estejam bem acima do mínimo recomendado, isto se deve ao fato de que o diâmetro de ponta da capa de eletrodo adotado foi de 8,00 mm. Este tamanho de ponta foi escolhido devido à espessura da chapa de alta resistência, e conseqüentemente foi utilizado em par para a soldagem do conjunto. Logo, os diâmetros obtidos na chapa de 0,75 mm são em decorrência da capa de eletrodo empregada, não tendo sido causados por excesso de corrente ou indentação excessiva.

Como pode ser observado nas figuras, houve crescimento no diâmetro dos pontos, porém de modo um pouco diferente ao que ocorreu nos corpos de prova da longarina. Nos primeiros três ensaios, o diâmetro se manteve praticamente inalterado. No quarto ensaio, em que a corrente foi acrescida em um nível, e os parâmetros tempo e força de soldagem voltaram ao nível mínimo, houve um pequeno aumento. A partir do quinto ensaio, quando os níveis intermediários de tempo e força começaram a atuar, surge um ganho mais notável. Nos ensaios seguintes, o diâmetro se manteve praticamente constante, apresentando pequenos ganhos nos ensaios 8 e 9.

O crescimento máximo registrado para a média dos diâmetros é de aproximadamente 16,5%. Para estes materiais também foi efetuada uma análise de variância (ANOVA), que revelou não haver diferença significativa entre os diâmetros de um mesmo grupo, porém confirmou a diferença estatística entre os grupos, soldados com intensidades de variáveis diferentes. O aumento observado nos diâmetros dos pontos, foi comprovado pela obtenção de maiores resultados para a relação sinal e ruído, calculados pela equação (5) “maior é melhor”, a medida que a quantidade de calor aumentava após cada ensaio, conforme a Tabela 9.

Tabela 11 - Diâmetros dos pontos e relação sinal-ruído em SAE 1006

Ensaio	Diâmetro no espécime 1 [mm]	Diâmetro no espécime 2 [mm]	Diâmetro no espécime 3 [mm]	Relação sinal-ruído
1	6,10	6,00	6,00	15,66
2	6,10	6,15	6,00	15,73
3	6,15	6,10	6,00	15,78
4	6,30	6,30	6,00	16,01
5	6,90	7,00	7,00	16,90
6	7,00	7,20	7,10	17,02
7	7,10	7,10	7,20	17,07
8	7,20	7,25	7,20	17,17
9	7,30	7,30	7,35	17,29

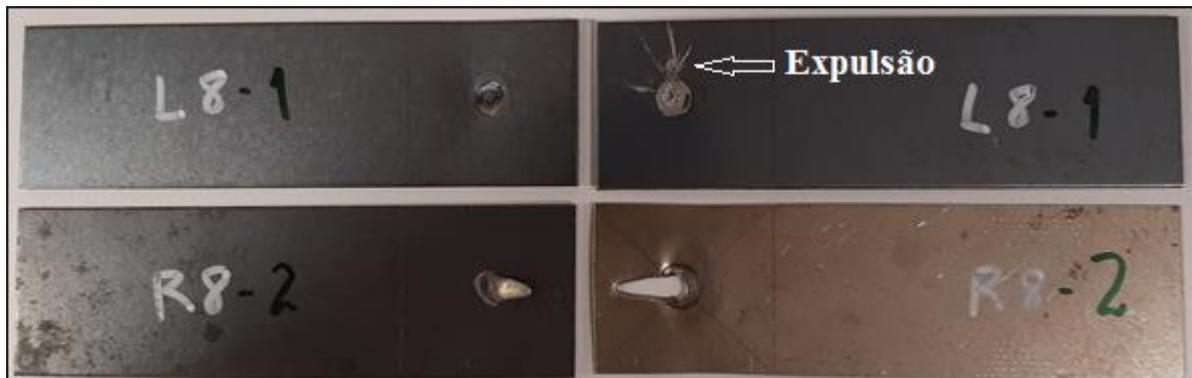
Fonte: O autor (2021)

4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Foram realizados 9 ensaios para cada conjunto de materiais, com dois espécimes cada, totalizando 36 corpos de prova testados. A Figura 28 exibe duas amostras que romperam após o teste. As amostras identificadas com a letra “L” representam a longarina, e a letra “R” diz respeito ao conjunto de lateral e reforço. O número que acompanha as letras indica o número do ensaio e conseqüentemente, os parâmetros aplicados, que podem ser verificados na Tabela 7. Após o traço está identificado o espécime testado no respectivo ensaio.

Na parte direita da amostra L8-1, é possível observar a presença de expulsão de material, em pequena quantidade na região interna da junta. A expulsão de metal fundido pode ter ocorrido em função do nível elevado de corrente (9,0 kA) que foi aplicado nesta amostra, uma vez que corresponde a um dos ensaios com alta intensidade dos parâmetros. Na amostra R8, não há presença de expulsão em nenhum dos dois materiais.

Figura 28 - Corpos de prova após ensaio de cisalhamento



Fonte: O autor (2021)

Os dois principais modos de falha observados em testes de cisalhamento são arrancamento total de ponto e fratura na interface. No primeiro, a fratura ocorre no MB ou na ZTA, ao longo do perímetro da solda, com o ponto sendo completamente arrancado de uma das chapas, permanecendo intacto. A fratura na interface é caracterizada por falha da solda na região de contato das chapas, separando o ponto em duas partes, conforme ocorreu na amostra L8-1.

É comum acontecer uma combinação destes modos de falha, semelhante ao observado na amostra R8-2, em que uma parte do ponto foi arrancado de uma das chapas, e o restante rompeu na interface. Essa condição pode acontecer com mais facilidade em juntas como a R8 (composta por SAE 1006 0,75 mm e LN 700 2,00 mm), em que uma das chapas possui

espessura e resistência mecânica significativamente menores. (RADAKOVIC, TUMULURU, 2008).

4.2.1 Resistência ao Cisalhamento no Material SAE 1010

O desempenho das juntas compostas por duas chapas de aço SAE 1010 quanto ao cisalhamento, foi avaliado em 18 amostras, soldadas com nove combinações de parâmetros diferentes. A Tabela 12 exibe os resultados de cisalhamento para os nove ensaios executados, juntamente com as repostas da relação sinal-ruído calculadas através da equação (5).

Tabela 12 - Resistência ao cisalhamento e relação sinal-ruído em SAE 1010

Ensaio	Espécime 1 [kN]	Espécime 2 [kN]	Relação sinal-ruído
1	13,49	10,10	21,17
2	14,81	11,91	22,36
3	11,02	13,74	21,70
4	11,56	13,55	21,90
5	7,79	12,59	19,43
6	13,62	13,68	22,70
7	10,53	11,97	20,97
8	14,28	13,94	22,99
9	13,09	14,27	22,70

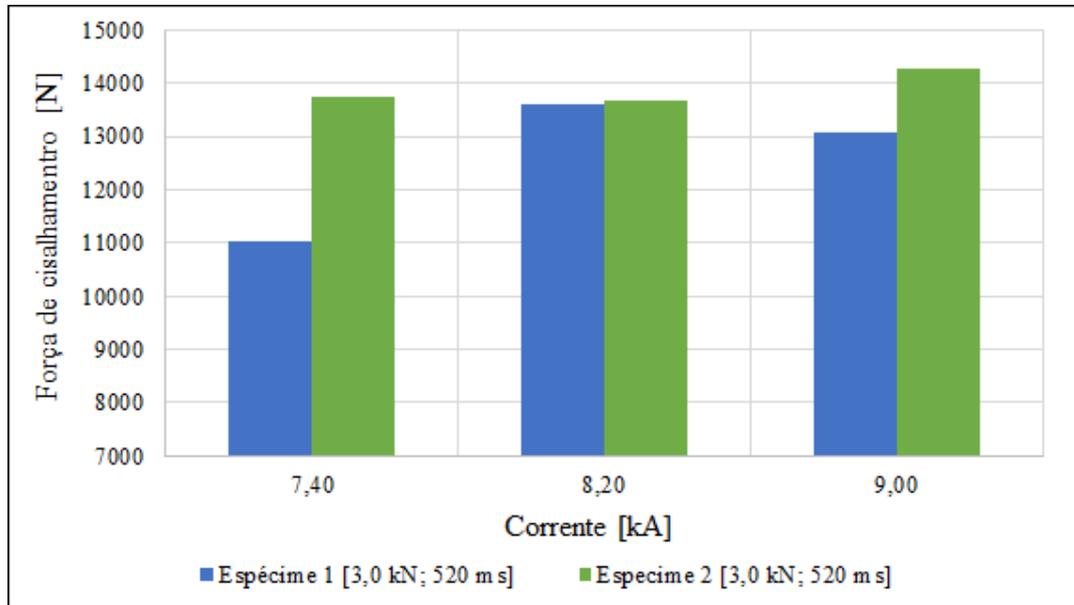
Fonte: O autor (2021)

Através de uma análise de variância executada para os resultados da Tabela 12, constatou-se que não há diferenças estatísticas entre as repostas obtidas. A realização da ANOVA ocorreu de forma semelhante à efetuada na seção anterior, e todos os resultados estão concentrados no Apêndice J. Não foram encontradas variações significativas entre as cargas suportadas por um mesmo grupo de amostras, nem mesmo entre os diferentes grupos, dado que o valor de P ficou acima de 0,05 em ambos os casos. O maior valor encontrado para a relação sinal-ruído foi registrado no oitavo ensaio, realizado com nível máximo de corrente e níveis intermediários de força e tempo de soldagem.

O gráfico exibido na Figura 29, mostra a resistência ao cisalhamento de seis amostras para três níveis distintos de corrente de soldagem. Os seis corpos de prova cujo comportamento aparece no gráfico, foram soldados com os níveis máximos de força e tempo de soldagem

aplicados, de 3,0 kN e 520 ms, respectivamente. Desta forma, é possível verificar a influência da corrente na resistência ao cisalhamento.

Figura 29 - Resistência ao cisalhamento vs. corrente em SAE 1010



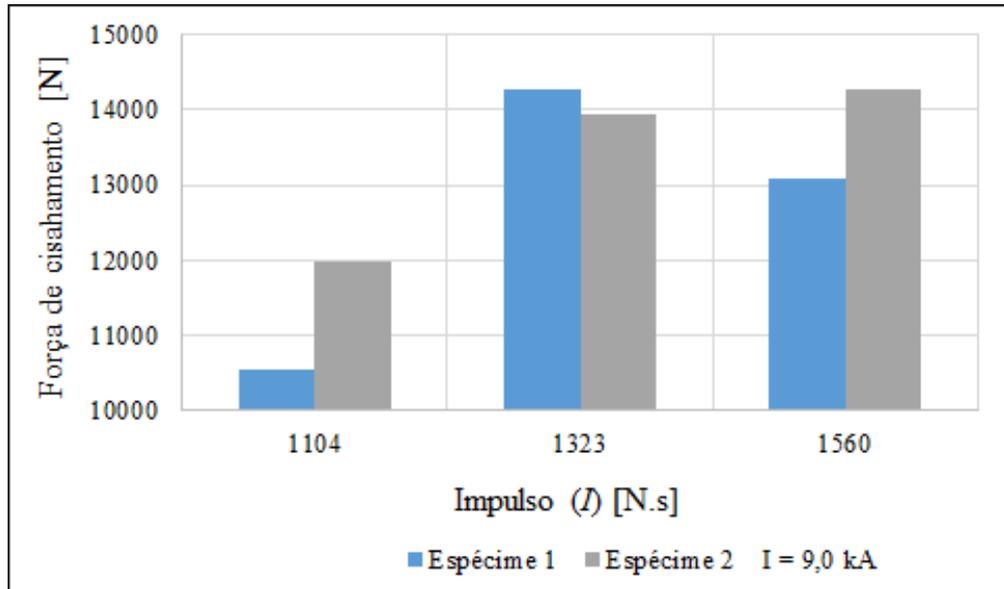
Fonte: O autor (2021)

Embora os resultados não sejam estatisticamente diferentes (de acordo com ANOVA), a carga suportada mais baixa foi registrada na corrente de 7,4 kA, e a mais alta foi observada na corrente de 9,0 kA. Os corpos de prova soldados com 8,2 kA apresentaram resultados bastante próximos e satisfatórios, indicando que esta intensidade de corrente pode estar adequada, combinada a estes valores de força e tempo.

O desempenho das amostras de acordo com as variações nos níveis de tempo e força de soldagem também foi avaliado. O produto da força pelo tempo é conhecido na Física como impulso, cuja unidade é o N.s. Essa grandeza foi utilizada para representar a combinação dessas duas variáveis, simplificando os gráficos. A Figura 30 retrata o gráfico de resistência ao cisalhamento para 6 corpos de prova, soldados com corrente de 9,0 kA, força variando de 2,4 kN a 3,0 kN, e tempo de 460 ms a 520 ms.

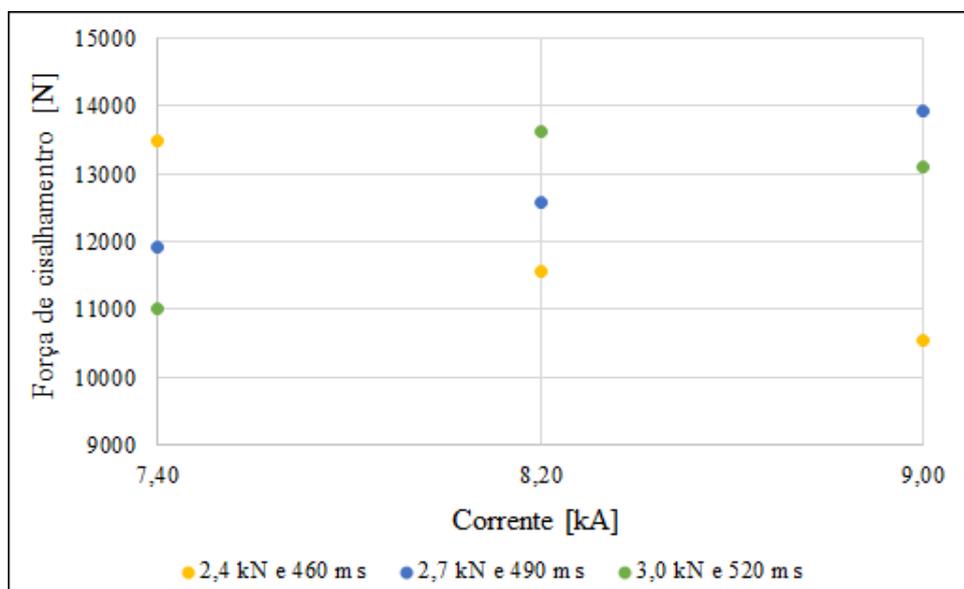
Os resultados mostram que, nessa faixa de corrente e para este material, os ganhos na intensidade da força e do tempo permitiram a obtenção de melhores resultados na resistência da junta ao cisalhamento. Entretanto, a partir de um certo valor de impulso, algumas amostras apresentaram ligeira queda na resistência, provavelmente causada pelo tempo de soldagem longo. Combinado ao alto nível de corrente, tempos longos podem provocar indentação excessiva, uma vez que se trata de uma variável que influencia diretamente na geração de calor.

Figura 30 - Resistência ao cisalhamento vs. impulso em SAE 1010



Os níveis intermediários de força e tempo de soldagem de 2,7 kN e 490 ms, que correspondem a um impulso de 1323 N.s, proporcionaram uma junta com cerca de 20,3% (em média) mais resistência ao cisalhamento, em relação à soldada com 2,4 kN e 460 ms (impulso de 1104 N.s). Os valores de P obtidos na inferência realizada com ANOVA, revelaram que não existem diferenças estatísticas entre os resultados, para um intervalo de confiança de 95%. Na Figura 31, está ilustrado um gráfico de dispersão, da força de cisalhamento em função da corrente, para 9 corpos de prova diferentes.

Figura 31 - Gráfico de resistência ao cisalhamento vs. corrente para diferentes impulsos



Conforme pode ser observado na figura, os corpos de prova unidos com a menor intensidade de impulso, apresentaram queda na resistência ao cisalhamento, a medida que a corrente aumentava. Isso indica que, a resistência de contato poderia estar elevada, em função do baixo nível de força aplicado, aumentando a geração de calor e promovendo a expulsão de metal fundido. Ou ainda, a elevação da corrente não foi suficiente para promover a formação adequada do ponto de solda, uma vez que o tempo de liberação de energia poderia estar abaixo do ideal.

Por outro lado, as três amostras soldadas com os valores de 2,7 kN de força e 490 ms de tempo, demonstraram um ganho crescente na resistência ao carregamento cisalhante, a medida que a corrente de soldagem aumentou, chegando a 14,5% em 9,0 kA. Quanto aos espécimes unidos com os níveis máximos de tempo e força de soldagem, houve um ganho de aproximadamente 19,1% na resistência da junta soldada com 8,2 kA, ante o espécime unido com 7,4 kA. A análise estatística realizada com ANOVA indicou que os resultados não são estatisticamente diferentes.

4.2.2 Resistência ao Cisalhamento na Junta de SAE 1006 e USI – LN 700

A junta que representa o conjunto da lateral inferior e reforço do veículo, também teve 18 corpos de prova avaliados no ensaio de cisalhamento, cujos resultados estão exibidos na Tabela 13. As respostas da razão sinal-ruído também estão apresentadas.

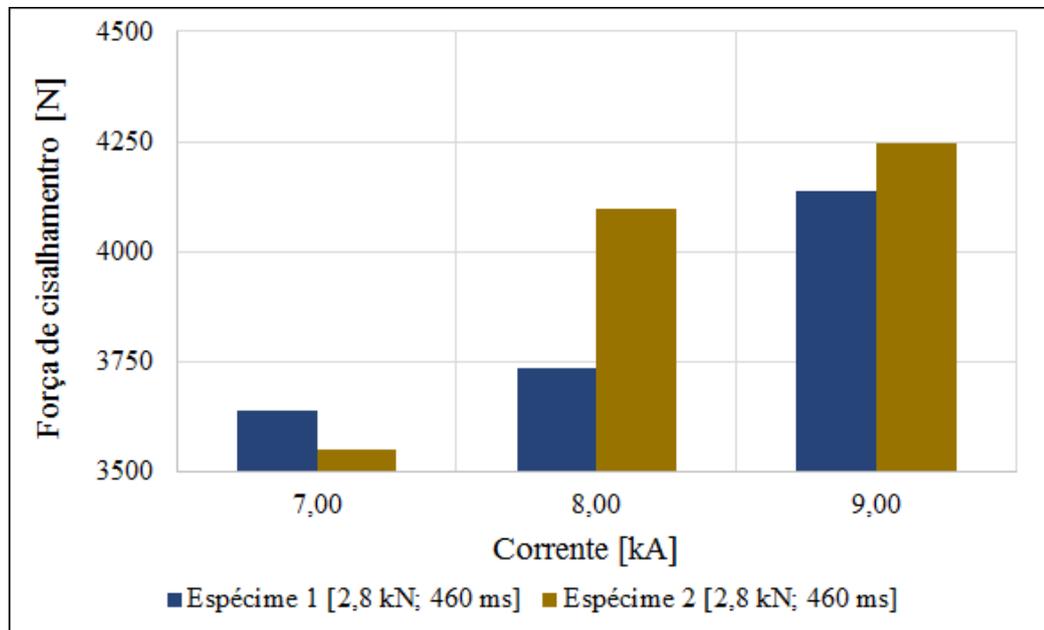
Tabela 13 - Cargas de cisalhamento e relação sinal-ruído em SAE 1006/LN 700

Ensaio	Espécime 1 [kN]	Espécime 2 [kN]	Relação sinal-ruído
1	3,69	4,11	11,78
2	3,75	3,79	11,53
3	3,64	3,55	11,11
4	4,29	4,10	12,45
5	4,07	4,41	12,53
6	3,74	4,10	11,83
7	4,32	3,79	12,11
8	3,95	4,22	12,21
9	4,14	4,25	12,45

Fonte: O autor (2021)

A análise de variância realizada para os dados da Tabela 13, revelou que os resultados não são estatisticamente diferentes, considerando significância de 5% em um teste para fator duplo, sem repetição. Entretanto, os valores mais altos para a razão sinal-ruído, foram obtidos nos ensaios em que foram aplicados os níveis mais elevados das variáveis de soldagem. O gráfico presente na Figura 32 aponta o desempenho de seis amostras quanto à resistência ao carregamento cisalhante, para três níveis de corrente: 7,0 kA, 8,0 kA e 9,0 kA. O intervalo de tempo e a força de soldagem aplicados no processo de soldagem destes espécimes, foram de 460 ms e 2,8 kN.

Figura 32 - Resistência ao cisalhamento vs. corrente em SAE 1006/LN 700



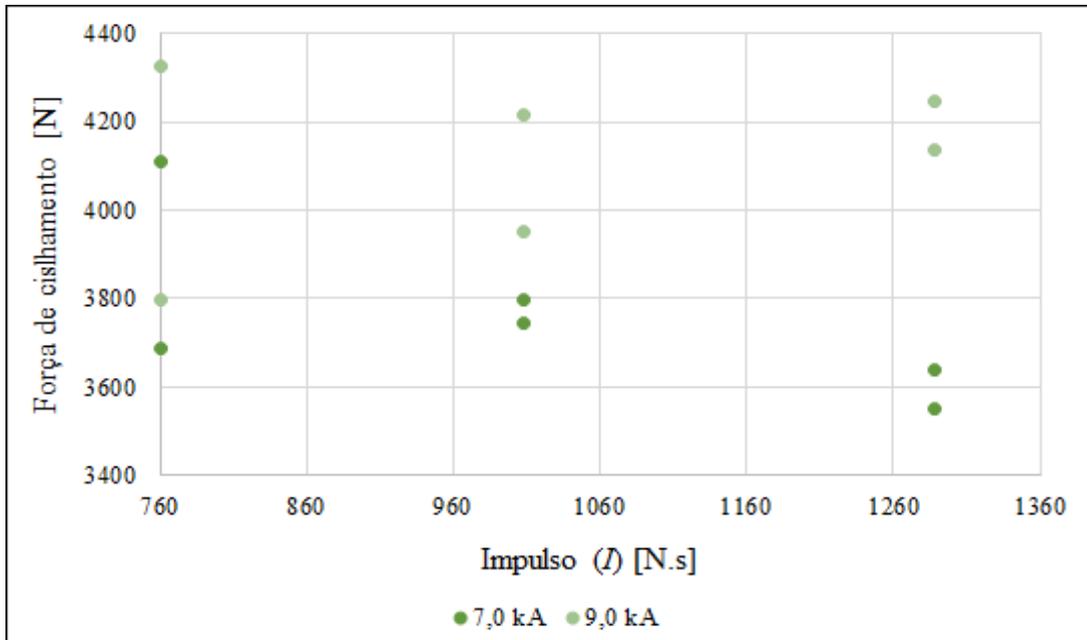
Fonte: O autor (2021)

A análise de variância efetuada com os resultados da força de cisalhamento que compõem o gráfico, revelou que não há diferença significativa entre os valores obtidos com as diferentes correntes. No entanto, foi observado um aumento médio na força suportada, de 8,27% na faixa de corrente de 8,0 kA, em relação à de 7,0 kA. O ganho na resistência ao cisalhamento em 9,0 kA foi em média de 6,54%, em comparação à obtida em 8,0 kA, e de 14,81% em relação à média calculada para 7,0 kA.

As diferenças registradas entre os espécimes soldados nas mesmas condições, para as faixas de corrente mais baixas, indicaram que a intensidade desta estava abaixo do ideal para a junta, favorecendo a formação de regiões com falta de fusão no ponto de solda. A resistência ao cisalhamento, em função dos níveis de impulso de soldagem aplicados, para duas faixas de

corrente selecionadas, é demonstrada na Figura 33. São exibidos os resultados para seis corpos de prova soldados em 7,0 kA, e seis em 9,0 kA.

Figura 33 - Gráfico de resistência ao cisalhamento vs. impulso em 7,0 kA e 9,0 kA



Fonte: O autor (2021)

Embora no impulso mais baixo aplicado, podem ser observados dois casos de amostras que registraram bons resultados, nos níveis seguintes é notável um melhor agrupamento desses valores. É possível visualizar a tendência de aumento na resistência ao cisalhamento, na corrente de 9,0 kA, e queda na carga suportada em 7,0 kA, a medida que as intensidades da força e do tempo de soldagem crescem. O teste realizado com ANOVA, revelou diferença significativa entre as cargas resistidas pelas amostras soldadas em 9,0 kA, em relação às amostras unidas em 7,0 kA, no impulso de 1288 N.s. O intervalo de confiança considerado foi igual a 5%.

A corrente é a variável que mais influencia na geração de calor na junta, afetando o diâmetro do ponto e promovendo a fusão adequada na interface das chapas, de acordo com sua intensidade. Em razão disso, a corrente de 9,0 kA mostrou-se mais eficiente para esta junta, diminuindo a probabilidade de ocorrência de pontos com pequenos diâmetro e penetração, que resultam em menor resistência mecânica. A queda nas forças de cisalhamento registradas em 7,0 kA, é explicada por fatores já discutidos nos resultados, como a necessidade de elevar a corrente a medida que a força de soldagem é acrescida.

4.3 MICROESTRUTURA

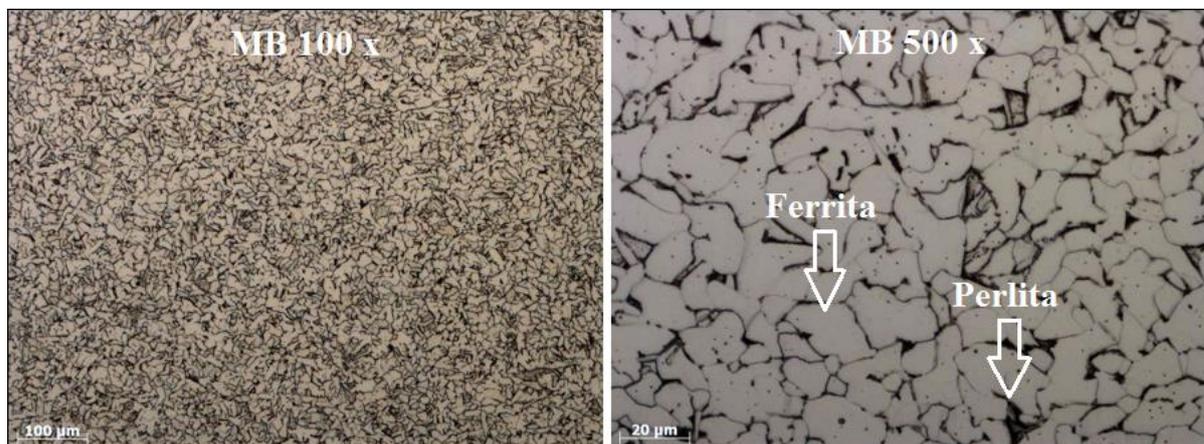
Através de observações nas micrografias de diferentes amostras, para um mesmo conjunto de materiais, não foram observadas variações significativas na microestrutura de zonas específicas (ZF, ZTA e MB). Os níveis dos parâmetros executados, influenciaram no tamanho das zonas, mas não em sua microestrutura.

4.3.1 Microestrutura na Junta com Aço SAE 1010

Os embutimentos que continham amostras com o material SAE 1010, utilizado para representar as longarinas, foram observados através de microscopia óptica, para que fosse analisada a microestrutura nas regiões do ponto de solda, na zona afetada pelo calor, e no metal de base. A microestrutura deste material, semelhante a de outros aços com baixo teor de carbono, é constituída basicamente por ferrita, com perlita nos contornos de grão. As micrografias do metal de base (MB), com ampliações de 100 e 500 vezes, podem ser observadas na Figura 34. O ataque químico efetuado nas amostras utilizou Nital com 2% de concentração.

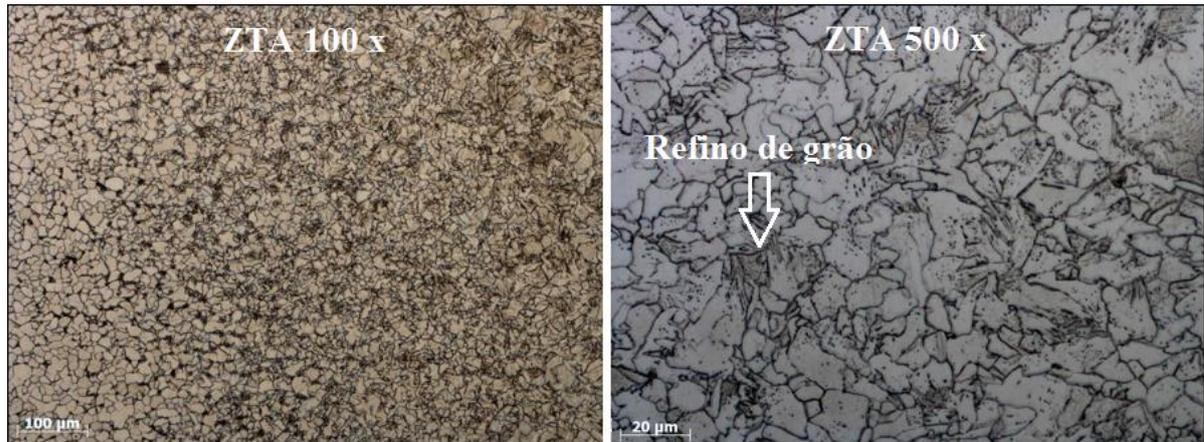
A micrografia da zona termicamente afetada (ZTA) pelo processo de soldagem, permite a visualização da microestrutura obtida no local, indicando a sensibilidade do material ao procedimento e um possível comportamento deste em áreas próximas à junta. A Figura 35 exhibe as micrografias da zona de transição do MB para a ZTA (100 x), e da ZTA (500 x). Na zona de transição do MB para a ZTA, pode ser observado o fenômeno de refino de grão, que ocorreu de forma parcial na região. A microestrutura obtida nessa área confere ao material maiores resistência e ductilidade, em relação ao metal base original (MODENESI, 2012).

Figura 34 - Micrografias no metal de base do aço SAE 1010



Fonte: O autor (2021)

Figura 35 - Micrografias na zona de transição e ZTA do aço SAE 1010



Fonte: O autor (2021)

Na Figura 36, estão retratadas as micrografias da zona fundida (ZF). Todas as regiões foram fotografadas no microscópio óptico Zeiss Observer D1m. A microestrutura observada na ZF é composta por diferentes tipos de ferrita. É possível perceber a presença de grande quantidade de ferrita acicular (AF). Esta fase é reconhecida por grãos pequenos em formato agulhado, que garantem boa resistência ao material devido à sua ordenação desarranjada. Estão presentes também, em menores quantidades, ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)) e ferrita intragranular poligonal (PF(I)) (BAPTISTA *et. al.*, 2011; MODENESI, 2012).

Figura 36 - Micrografias na zona fundida do aço SAE 1010



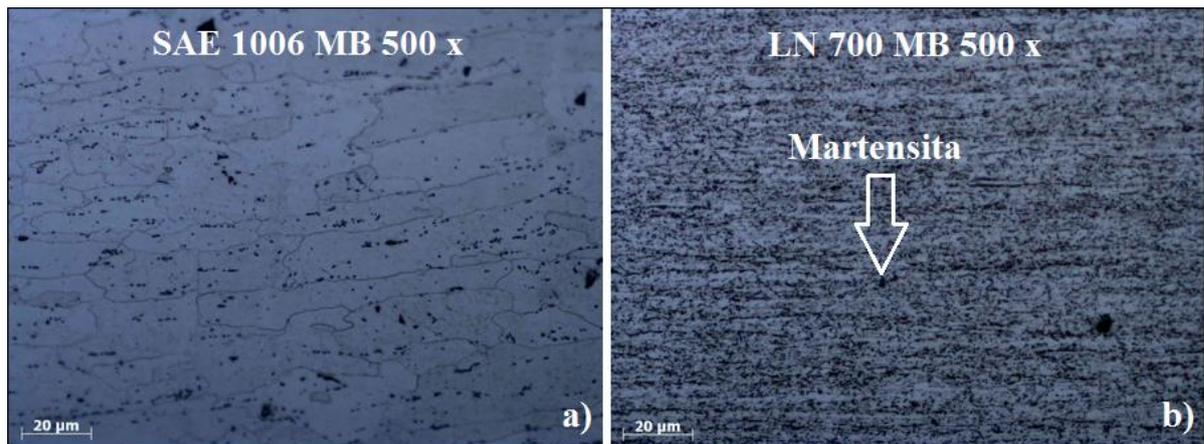
Fonte: O autor (2021)

4.3.2 Microestrutura na Junta Composta por Aços SAE 1006 e USI – LN 700

O material SAE 1006 apresentou microestrutura semelhante ao SAE 1010, diferenciada por grãos maiores e alongados no sentido de laminação, além de uma menor concentração de

perlita, características evidenciadas na Figura 37 (a). O aço ARBL LN 700 possui matriz constituída por grãos de ferrita extremamente delgados e alongados no sentido de laminação, caracterizando-o com uma microestrutura de granulação refinada, que justifica a elevada resistência mecânica. Além disso, foi constatada a presença de algumas agulhas de martensita, conforme exibido na Figura 37 (b) (ESMELINDRO, 2015).

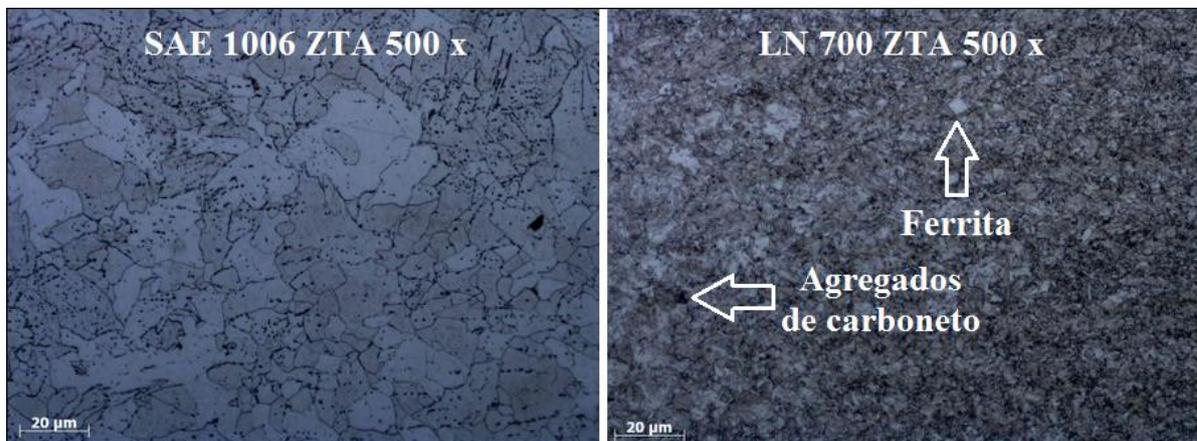
Figura 37 - Micrografias no metal de base em SAE 1006 e USI - LN 700



Fonte: O autor (2021)

Na ZTA do aço SAE 1006, observou-se a redução no tamanho dos grãos de ferrita, que se deve em partes, à aplicação de pressão pelos eletrodos, no momento da soldagem. No LN 700, foi constatada uma matriz ferrítica, evidenciada pelos grãos de coloração clara, além de agregados de carboneto, que possuem coloração escura e aparecem em pequena quantidade nos aços ARBL, mas que conferem elevada dureza ao material. As micrografias da ZTA dos dois materiais estão expostas na Figura 38 (ESMELINDRO, 2015).

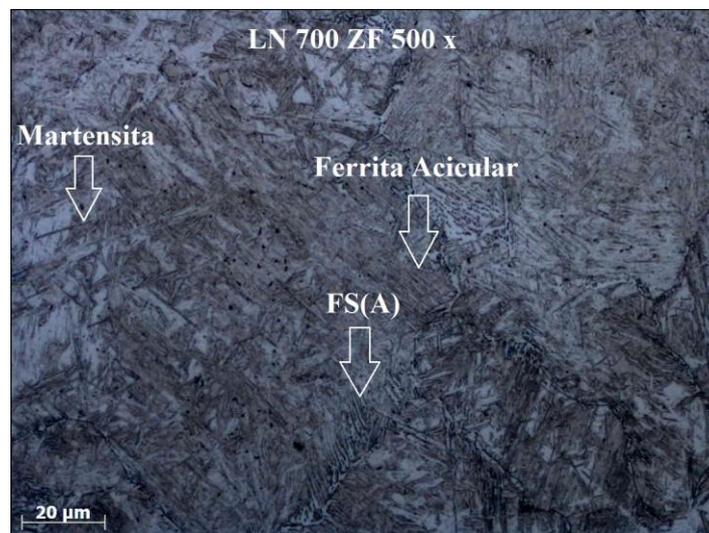
Figura 38 - Micrografias da ZTA nos aços SAE 1006 e USI - LN 700



Fonte: O autor (2021)

A Figura 39 mostra a microestrutura na ZF para o aço de alta resistência LN 700. Na imagem, é possível conferir a obtenção de ferrita acicular (AF), ferrita com segunda fase alinhada (FS(A)), e martensita, além de outros tipos de ferrita. A martensita está presente devido à alta taxa de resfriamento do processo, bem como ao nível de carbono equivalente do material (aproximadamente 0,50). Em geral, as micrografias revelaram que a soldagem a ponto aumentou a resistência dos materiais, na ZF e na ZTA (ESMELINDRO, 2015; BRANCO, 2019).

Figura 39 - Micrografia da zona fundida no aço USI - LN 700



Fonte: O autor (2021)

4.4 MICRODUREZA

Foram realizadas 135 medições de microdureza Vickers HV 0,3 (carga de 0,3 kg), sendo 45 em cada material utilizado nos corpos de prova. Em cada amostra presente nos embutimentos, foram analisadas três regiões: metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). No MB e na ZTA, foram feitas duas leituras em cada amostra, totalizando 5 pontos por peça, que permitem a geração de um gráfico de perfil de dureza. A tabela com todos os resultados das medições de dureza está anexada a este texto, no Apêndice I.

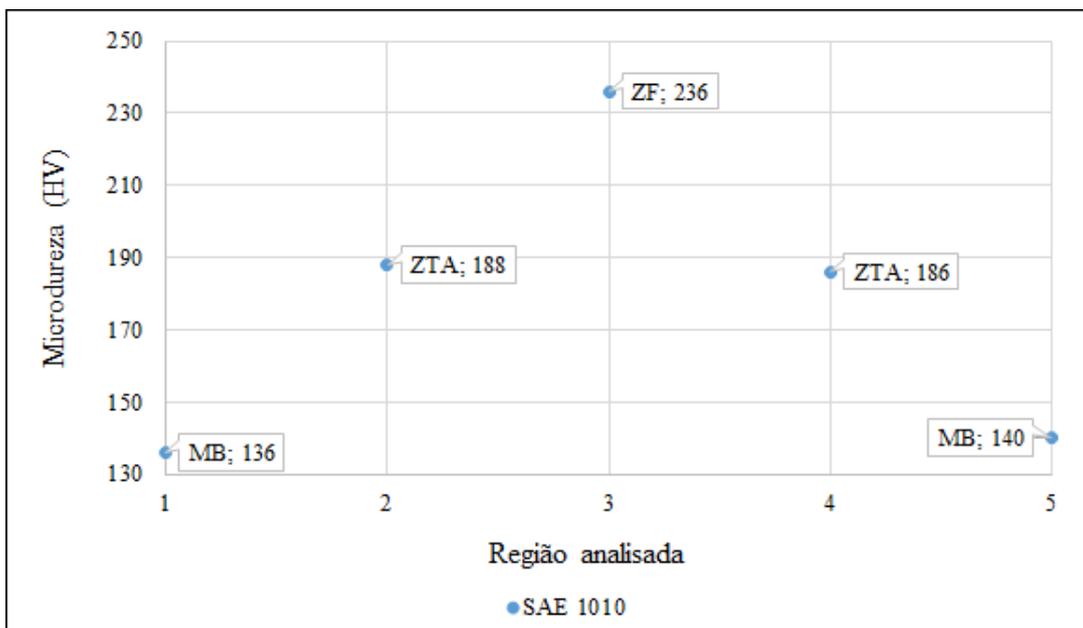
Uma inferência estatística realizada com a análise de variância (ANOVA), indicou que os resultados medidos são estatisticamente diferentes, para as três regiões verificadas das juntas soldadas. Por outro lado, não foi encontrada diferença significativa entre resultados de um mesmo material, para diferentes ensaios. Os dados que representam as medições, estão nos

gráficos dos perfis de dureza, para cada um dos modelos de juntas analisadas. Para fins representativos, os valores de dureza que compõem os gráficos, são as médias calculadas de cada zona das juntas.

4.4.1 Microdureza na Junta da Longarina: Material SAE 1010

O material SAE 1010 demonstrou variações significativas na dureza, apresentando um perfil ascendente, do metal de base até a zona fundida, em que foram registrados os valores máximos, cerca de 74% superiores aos encontrados no MB. Os valores de microdureza registrados na ZTA são inferiores ao da ZF (cerca de 21%), o que indica um aumento da dureza na ZTA em relação ao metal de base, provocado pela redução no tamanho dos grãos, observada na Figura 35. A Figura 40 exibe o gráfico do perfil de microdureza média, para as juntas formadas pelo material SAE 1010.

Figura 40 - Microdureza na junta com material SAE 1010



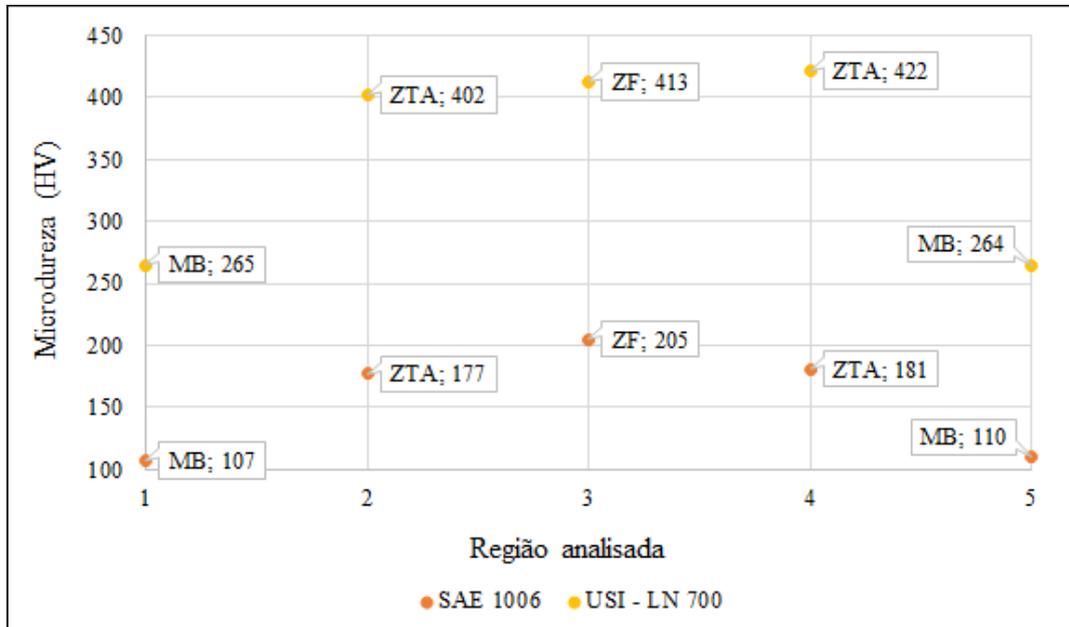
Fonte: O autor (2021)

4.4.2 Microdureza na Junta da Lateral Inferior: SAE 1006 e USI – LN 700

O aço SAE 1006 apresentou um perfil de dureza semelhante ao do aço SAE 1010, porém com magnitudes menores nas três regiões analisadas, em virtude da menor quantidade de carbono que contém. O material LN 700 apresentou em sua microestrutura a presença de martensita, cuja quantidade cresceu na ZTA e na ZF, justificando os níveis de dureza

encontrados nas amostras desse material, que ultrapassaram 400 HV na ZF e na ZTA. O gráfico com os valores médios de microdureza para estes materiais está representado na Figura 41.

Figura 41 - Microdureza na junta com materiais SAE 1006 e USI - LN 700



Fonte: O autor (2021)

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- a) A quantidade de calor gerado na soldagem a ponto por resistência, varia com a intensidade dos parâmetros do processo, e com os materiais utilizados. Essa variação influencia nas características e na resistência do ponto. Foram observados resultados melhores de resistência ao cisalhamento e de tamanho dos pontos, nas juntas unidas com maiores níveis de calor.
- b) A corrente é o parâmetro que mais influencia na geração de calor na junta, conforme estabelecido pela Lei de Joule. Os dados comprovaram que o diâmetro do ponto e a sua resistência ao cisalhamento, podem apresentar resultados satisfatórios ou não, de acordo com o nível de corrente aplicado.
- c) A força de soldagem influencia na qualidade da solda e na resistência do material, entretanto, o nível de pressão exercida pelos eletrodos, não deve ser demasiado para a junta. Aumentar a força de soldagem implica na necessidade de elevar a corrente, uma vez que quanto mais pressão atuar sobre as chapas, menor a resistência de contato, e consequentemente, o calor produzido.
- d) O tempo de soldagem é uma variável que influencia diretamente no nível de calor gerado nos materiais, afetando as características da junta. Aumentar o tempo simultaneamente com a força, mostrou-se uma alternativa para melhorar a resistência dos pontos, sem elevar a corrente a níveis de expulsão.
- e) Para os valores aplicados nos parâmetros de soldagem deste trabalho, não foram observadas variações significativas, na microestrutura e na microdureza, para uma determinada região (MB, ZTA e ZF), de um mesmo conjunto de materiais.
- f) Para a definição de uma combinação de parâmetros, na soldagem de uma determinada junta, deve-se levar em conta o material e a espessura das chapas. Ambos influenciam no calor gerado quando a corrente é liberada, em função de sua resistividade característica e do percurso que será realizado pela energia.
- g) A melhor combinação de parâmetros obtida na soldagem da junta com duas chapas de aço SAE 1010, foi a executada no ensaio 8, que promoveu a formação de pontos com diâmetro médio de 7,8 mm, e gerou a maior razão de sinal e ruído para a resistência ao cisalhamento. A corrente aplicada foi de 9,0 kA, a força de soldagem de 2,7 kN e o tempo de liberação de corrente de 490 ms.

h) Entre as combinações de parâmetros aplicadas na soldagem da junta que representa a lateral do automóvel, composta pelos materiais SAE 1006 e USI – LN 700, destaca-se a executada no ensaio 5. A corrente aplicada foi de 8,0 kA, combinada à força de soldagem de 2,4 kN e tempo de 420 ms. Estas intensidades, que correspondem ao nível intermediário de cada uma das variáveis aplicadas, foram suficientes para gerar pontos com diâmetro médio de 7,0 mm, e a melhor média de resistência ao cisalhamento, de 4,24 kN (maior razão de sinal e ruído).

i) O objetivo geral e os objetivos específicos foram atingidos, uma vez que foi executada uma avaliação completa da influência do processo e dos níveis dos parâmetros aplicados, sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas das juntas analisadas. Além da escolha de uma combinação ideal para cada conjunto de materiais, o experimento permitiu a visualização de limites que devem ser respeitados, e que podem ser utilizados para a seleção de intensidades das variáveis na soldagem de juntas semelhantes.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do trabalho realizado, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- a) Aumentar a quantidade de ensaios realizados, em pelo menos 60%. Isso permitirá a implementação total do Método de Taguchi, para a seleção e avaliação dos parâmetros, garantindo a análise individual de cada variável. Além disso, possibilitará a realização de todos os gráficos e análises que foram efetuadas neste estudo.
- b) Aumentar a quantidade de corpos de prova por ensaio. Sendo assim, poderão ser realizados mais ensaios de cisalhamento para um mesmo grupo de amostras.
- c) Trabalhar com um grupo de corpos de prova que utilize apenas chapas de aço de alta resistência, com a mesma espessura, para melhor avaliar o comportamento desse material na soldagem a ponto por resistência.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS). **Welding Handbook** Vol. 3: Welding Processes, Part 2. 9th ed. Miami, Florida: AWS, 2007. *E-book*.

ASARI, Rashidi. Resistance Spot Welding – Impact of Process Parameters on Weld Nugget Formation. **Research Gate**, 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/326550920>. Acesso em 28 de abr. de 2021.

BALUCH, Nazim, UDIN, Zulkifli M., ABDULLAH, CS. Advanced High Strength Steel in Auto Industry: an Overview. **Engineering, Technology and Applied Science Research** vol. 4 n. 4, Ago. 2014. Disponível em: <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/444>. Acesso em 08 de maio de 2021.

BAPTISTA, Carlos A. R. P., VERSUTO, Bruno C. B., OLIVEIRA, Fernanda P., TORRES, Marcelo A. S., COSTA, Douglas H. S. Mechanical and Microstructural Characterization of Flash-Welded Joints in HSLA Steels. **21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering**, 24 a 28 de out. de 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/300806066>. Acesso em 29 de out. de 2021.

BASIS and Point of Resistance Welding. **Shinkokiki Co., Ltd.** Disponível em: <https://shinkokiki.co.jp/en/knowledge/miracle>. Acesso em 08 de maio de 2021.

BRANCO, Hideraldo. **Soldagem por Resistência: Máquinas, Processos e Aplicações**. Curitiba: MEPE, 2019.

CADONI, Ezio, D'IAUTO, Fabio. Dynamic behaviour of Advanced High Strength Steels used in the automobile structures. **Dymat** vol. 1, set. 2009. Disponível em: <https://www.dymat-proceedings.org/articles/dymat/abs/2009/01/dymat09018/dymat09018.html>. Acesso em 06 de maio de 2021.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. *E-book*.

CAMILLO, Jim. Optimizing the Spot Welding Process. **Assembly Magazine**, 2021. Disponível em: <https://www.assemblymag.com/articles/96297-optimizing-the-spot-welding-process>. Acesso em 21 de abr. de 2021.

CARY, Howard B. The History of Welding. **Modern Welding Technology**, ed. 4 1998. Disponível em: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding/>. Acesso em 10 de abril de 2021.

CESVI (CENTRO DE EXPERIMENTAÇÃO E SEGURANÇA VIÁRIA). Análise da Deformação da Longarina. **Cesvi Brasil**, 2013. Disponível em: <https://www.cesvibrasil.com.br/site.aspx/detalhe-estudo-e-pesquisa/analise-da-deformacao-da-longarina>. Acesso em 01 de jun. de 2021.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7 ed., ampl. e rev. São Paulo: ABM, 2008.

CHOI, Hong-Seok, PARK, Geun-Hwan, LIM, Woo-Seung, LIM, Woo-Seung, KIM, Byung-min. Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 25 n. 6, mar. 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-011-0408-x>. Acesso em 01 de junho de 2021.

ESMELINDRO, Oséias M. O. **Comportamento da Vida em Fadiga de Junta Soldada do Aço LN-700**. 2015. 80 f. Tese (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo, Brasil 2015. Disponível em: <http://tede.upf.br/jspui/bitstream/tede/370/1/2015OseiasMatiasdeOliveiraEsmelindro.pdf> Acesso em 01 de novembro de 2021.

GÁLÁN, Jesus, SAMEK, Ludovic, VERLEYSSEN, Patricia, VERBEKEN, Kim, HOUBAERT, Yvan. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia** v. 48 n. 2 p. 118–131. mar./apr. 2012. Disponível em: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1231>. Acesso em 14 de março de 2021.

GEARY, Don Geary. **Soldagem**. 2 ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. *E-book*.

GIANT Spot Weld Gun mounted on Kuka Robot (BMW 5-Series Production). **Imgur**, 2016. Disponível em: <https://imgur.com/r/engineeringporn/qEeJK>. Acesso em 08 de maio de 2021.

GYSPOT Inverter 100 R-CX. **GYS Welding and Cutting Chargers Car Body Repair**, 2021. Disponível em: https://www.gys.fr/prod-022317-K475/_K475/GYSPOT_INVERTER_100_R-CX/fi. Acesso em 10 de jun. de 2021.

HANCE, Brandon. Advanced High Strength Steel (AHSS) Performance Levels. **SAE International Journal of Materials and Manufacturing** abr. 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/324196777>. Acesso em 07 de jun. de 2021.

HELERBROCK, Rafael. Efeito Joule. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/efeito-joule.htm>. Acesso em 10 de abr. de 2021a.

HELERBROCK, Rafael. Impulso. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/impulso.htm>. Acesso em 17 de outubro de 2021b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5821:2009**: Resistance welding - Spot welding electrode caps. Genebra, Suíça, 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/45871.html>. Acesso em 08 de maio de 2021.

JAMISON, Henry. **Master Hands – Chevrolet Manufacturing (1936)**. Youtube, 10 nov. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Pr8rCNaASlc>. Acesso em 18 de março 2021. 21:31.

KARANDE, Jeevan A., INANDAR, K. H. Effect of Process Parameters on Resistance Spot Welding - A Review. **International Journal of Advance Research in Science and**

Engineering v. 06 n. 10. out. 2017. Disponível em:
http://www.ijarse.com/images/fullpdf/1508157895_3052_ijarse.pdf. Acesso em 30 de abr. de 2021.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Ed. do Autor, 1996. *E-book*.

MAGDALENA, Filipe S. **Análise Simulatória do Processo de Soldagem a Ponto por Resistência em União de Chapas de Aço Baixo Carbono Tipo Intersticial**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET. Rio de Janeiro, p. 88. 2014.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. *E-book*.

MATERIAL Specifications. **Elgin Fasteners Group**. Disponível em:
<https://www.elginfasteners.com/resources/materials/material-specifications/>. Acesso em: 19 de out. de 2021.

MATWEB, Your Source for Materials Information. **Matweb Material Property Data**. Disponível em: <http://www.matweb.com/>. Acesso em 08 de jun. de 2021.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: editora do autor, 2012. *E-book*. Disponível em:
<https://www.passeidireto.com/arquivo/5643854/soldabilidade-dos-acos-transformaveis-ufmg/10>. Acesso em 25 de out. de 2021.

MIKNO, Zygmunt, KORZENIOWSKY, M., PILARCZYK, Adam, KUSTRON, Pawel. Analysis of resistance welding processes and expulsion of liquid metal from the weld nugget. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, fev. 2018. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/322187628>. Acesso em 21 de maio de 2021.

NETO, Antonio R. F., FUKUGAUCHI, Cristina S., PEREIRA, Marcelo S. Indústria Automotiva: Aços Avançados de Alta Resistência – Revisão. **Sinergia: Revista Científica do Instituto Federal São Paulo**, v. 21, n. 1, p. 25-33, jan./jun. 2020. Disponível em:
<https://ojs.ifsp.edu.br/index.php/sinergia/article/view/854>. Acesso em 09 de maio de 2021.

O QUE é solda por resistência? **Isotron**. Disponível em: <https://isotron.com.br/solda-por-resistencia/>. Acesso em 09 de maio de 2021.

PODRZAJ, Primož, SIMONCIC, Samo. Resistance Spot Welding Control Based on Fuzzy Logic. **Research Gate**, 2011. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/publication/225539764>. Acesso em 24 de abr. de 2021.

RADAKOVIC, D. J., TUMULURU, M. Predicting Resistance Spot Weld Failure Modes in Shear Tension Tests of Advanced High-Strength Automotive Steels. **Welding Journal** v. 87, p. 96-105, abr. 2008. Disponível em:
http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_2008_04_s96.pdf. Acesso em 24 de out. de 2021.

RESISTANCE WELDER MANUFACTURER'S ASSOCIATION (RWMA). **Resistance Welding Manual**: Revised Fourth Edition. Florida, USA: 2003. *E-book*.

SAMODAJEV, Nina. Advanced High Strength Steel (AHSS) for Stronger, Lighter and Safer Cars. **Matmatch**, 2019. Disponível em: <https://matmatch.com/blog/advanced-high-strength-steel-stronger-lighter-safer-cars/>. Acesso em 12 de maio de 2021.

SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo dos. **Processos de soldagem**: conceitos, equipamentos e normas de segurança. São Paulo: Erica, 2015. *E-book*.

SANTOS, Virgílio M. O que é o Método de Taguchi (Design Robusto) no Seis Sigma? **F2MS Educação e Consultoria**, 2017. Disponível em: <https://www.fm2s.com.br/taguchi-design-robusto-seis-sigma/>. Acesso em 17 de jun. de 2021.

SARNA, Satyendra Kumar. Steels for Automotive Applications. **Ispat Guru**, 2015. Disponível em: <https://www.ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/>. Acesso em 09 de maio de 2021.

SCHAUN, André. O que é carroceria com deformação programada? **AUTOESPORTE**, 2019. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/carros/noticia/2019/09/o-que-e-carroceria-com-deformacao-programada.gh.html>. Acesso em 26 de jun. de 2021.

SPECIAL Considerations When Resistance Spot Welding Aerospace Grade Aluminum. **Lynn Welding**, 2020. Disponível em: <https://www.aerospacewelding.com/blog/spot-welding-aerospace-grade-aluminum>. Acesso em 07 de maio de 2021.

SOLDA a Ponto Traz Maior Segurança ao Veículo. **Brasil Mecânico Digital**, 2017. Disponível em: <http://brasilmecanico.com.br/2017/03/solda-a-ponto-traz-maior-seguranca-ao-veiculo/>. Acesso em 19 de abr. de 2021.

SPOT Welding Machine Premium Spot Vision for car repair. **Elmatech GmbH**, 2021. Disponível em: <https://www.elmatech-gmbh.de/index.php/en/elma-tech-products/resistance-welding-technology/spot-welding-systems-with-elma-tech-manually-guided-welding-guns/premiumspot-vision-multifunction-spot-welding-machine-for-bodywork-repair>. Acesso em 15 de abr. de 2021.

SPOT Welding Parameters. **Robot Welding**. Disponível em: http://www.robotwelding.com/Welding_parameters.htm. Acesso em 12 de jun. de 2021.

TAMARELLI, Carrie M. **AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications**, 2011. Materials Science and Engineering University of Michigan. Disponível em: <https://www.studocu.com/row/document/american-university-of-beirut/mechanics-of-materials/lecture-notes/ahss-101-the-evolving-use-of-advanced-high-strength-steels-for-automotive-applications-lr/4911590/view>. Acesso em 12 de maio de 2021.

THAKUR, A. G., RAO, T. E., MUKHEDKAR, M. S. e NANDEDKAR, V. M. Application of Taguchi Method for Resistance Spot Welding of Galvanized Steel. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences** v. 5, n. 11, p. 22-26, nov. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267381820>. Acesso em 18 de set. de 2021.

TUMULURU, Murali D. Resistance Spot Welding of Coated High Strength Dual Phase Steels. **Welding Journal**, v. 85, n. 8, p. 31-37, ago. 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/291767794>. Acesso em 27 de maio de 2021.

UIJL, Nick Den. Performance of Resistance Spot-Welded Joints in Advanced High-Strength Steel in Static and Dynamic Tensile Tests. **Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde**, jul. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/271925194>. Acesso em 12 de jun. de 2021.

UIJL, Nick Den. **Resistance Spot Welding of Advanced High Strength Steels**. 2015. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Twente, Holanda, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283089497>. Acesso em 14 de maio de 2021.

USIMINAS. **Catálogo de Tiras a Quente, 2021**. Belo Horizonte: Usiminas, jun. de 2021. 28 p. Disponível em: https://d335luupugsy2.cloudfront.net/cms/files/76429/1624973325Tiras_a_Quente-130621.pdf

YASIN, Nor A. M., ALISIBRAMULISI, Anizahyati, SALLEH, Zuraidah, GHAZALI, Farizah A., PAWAN, Anuar. Optimization of Resistance Spot Welding (RSW) Parameters by using Taguchi Method. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering**, V. 9 I. 3, Jan. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342638366>. Acesso em 17 de jun. de 2021.

APÊNDICE A – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DO PAINEL LATERAL



CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

Rua Metalúrgica Guidali, nº. 95 - São Leopoldo/RS - (51) 3081-5600
 cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br

Relatório de Ensaio de Análise Química - 3739/21

Chemical Analysis Test Report - 3739/21



Cliente/Cliant: Fundação Universidade de Caxias do Sul

OS: 7391

Informações complementares/Additional information: Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 Bairro Petrópolis - Caxias do Sul - RS

Interessado/interested:

1 - INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE INFORMATION PROVIDED BY THE APPLICANT

Identificação de amostra: CASCO

2 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES ADDITIONAL INFORMATION

Método - Method: E415 Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

Condições Ambientais: Temperatura 23°C (±5°C) / Umidade relativa $\leq 70\%$ Ambient Conditions: Temperature 23°C (±5°C) / Relative humidity $\leq 70\%$

Local da Atividade: Instalações fixas do Laboratório "CQS Laboratório" / Place of Activity: fixed installations of the Laboratory "CQS Laboratory"

3 - RASTREABILIDADE METROLÓGICA METROLOGICAL TRACEABILITY

Descrição/Description	Identificação/Identification	Certificado/Certified	Emitido/Issued	Validade/Validity
Termohigrômetro - Thermohygrometer	TH-2	0WQAW220	Metrosul	jan/22
Espectrômetro de Emissão Óptica, fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro, padrões de calibração - Optical Emission Spectrometer, manufacturer Oxford Instruments, Foundry Master Pro model, calibration standards NIST SR 315/32, NIST SR 315A, SR 315/311, SR 315/315, SR 315/310 Fabricante: Jilon Nel, Alemanha.				

4 - RESULTADOS RESULTS

Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean Value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)	Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean Value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)
Ferro (Fe)	99,6300	0,0001	Vanádio (V)	0,0050	0,0004
Carbono (C)	0,0192	0,0050	Tungstênio (W)	0,0050	0,0001
Silício (Si)	0,0087	0,0021	Chumbo (Pb)	0,0072	0,0013
Manganês (Mn)	0,0040	0,0014	Estanho (Sn)	0,0039	0,0002
Fósforo (P)	0,0117	0,0006	Boro (B)	0,0001	0,0001
Enxofre (S)	0,0074	0,0007	Cálcio (Ca)	0,0001	0,0001
Cromo (Cr)	0,0243	0,0006	Zinco (Zn)	0,0072	0,0004
Molibdênio (Mo)	0,0065	0,0039	Bismuto (Bi)	0,0010	0,0001
Níquel (Ni)	0,0191	0,0020	Ársênio (As)	0,0053	0,0005
Alumínio (Al)	0,0512	0,0066	Nitrogênio (N)	0,0020	0,0001
Cobalto (Co)	0,0048	0,0003	Selênio (Se)	0,0018	0,0012
Cobre (Cu)	0,0095	0,0016	Antimônio (Sb)	0,0176	0,0011
Níobio (Nb)	0,0044	0,0005	Tântalo (Ta)	0,0998	0,0135
Titânio (Ti)	0,0654	0,0007			

5 - NOTAS NOTES

Informativa - Informative.

Data de Ensaio / Testing date: 05/07/2021

Data de Emissão / Issue date: 05/07/2021


 Luiz Fernando Fernandes Bosqueroli
 Signatário Autorizado - Authorized Signatory

FIM DO RELATÓRIO END OF REPORT

Este relatório atende aos requisitos do norma ABNT NBR ISO/IEC 17025. O laboratório é reconhecido pelo INMETRO sob o número 77491, o qual avalia sua competência e competência sua rastreabilidade a partir da realização de medição. This report meets the requirements of ABNT NBR ISO/IEC 17025. The laboratory is recognized by the INMETRO under number 77491, which evaluates its competence and its traceability to the process of measurement.

A amostragem enviada para análise é realizada pelo próprio cliente. As informações contidas neste documento referem-se exclusivamente às amostras enviadas/fornechidas, as mesmas foram analisadas criticamente e autorizadas antes de sua liberação pelo signatário responsável pelo envio. Any data for analysis is confirmed by the customer. The information provided in this document refers exclusively to the samples tested/analyzed, they were analyzed critically and authorized prior to their release by the signatory responsible for the issue.

Este documento não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido no íntegro. This document may not be reproduced without the approval of the laboratory.

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br / (51) 3081-5600

APÊNDICE B – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DO REFORÇO

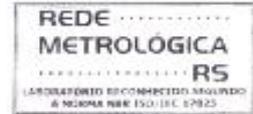


CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

Rua Metalúrgica Giacalli, n.º. 85 - São Leopoldo/RS - (51) 3081-5600
 cqs@cqs-laboratorios.com.br - www.cqs-laboratorios.com.br

Relatório de Ensaio de Análise Química - 3736/21

Chemical Analysis Test Report - 3736/21



Cliente/Cliem: Fundação Universidade de Caxias do Sul

OS: 7391

Informações complementares/Additional information: Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130 Bairro Petrópolis - Caxias do Sul - RS

Interessado/interested:

1 - INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE INFORMATION PROVIDED BY THE APPLICANT

Identificação da amostra: REFORÇO

2 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES ADDITIONAL INFORMATION

Método - Method: F415 Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

Condições Ambientais: Temperatura 23°C (±2°C) / Umidade relativa ≤70% - Ambient Conditions: Temperature 23°C (±2°C) / Relative humidity ≤70%

Local de Atividade: Instalações fixas do Laboratório "CQS Laboratório" - Base of Activity: Fixed installations of the Laboratory "CQS Laboratory".

3 - RASTREABILIDADE METROLÓGICA METROLOGICAL TRACEABILITY

Descrição/Description	Identificação/identification	Certificado/Certified	Emitido/Issued	Validade/Validity
Termohigrômetro - Thermohyrometer	TH 2	0WQAWZ20	Metrasul	jan/22

Espectrômetro de Emissão Óptica - fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro, padrões de calibração - Optical Emission Spectrometer, manufacturer Oxford Instruments - Foundry Master Pro model, calibration standards SUS BH 19/52, RG 14/469, RE 12/183, RH 18/46, RF 54/10 fabricante - Ulrich Neel, Alemanha.

4 - RESULTADOS RESULTS

Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)	Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)
Ferro (Fe)	96,8000	0,0001	Vanádio (V)	0,0033	0,0005
Carbono (C)	0,2097	0,0345	Tungstênio (W)	0,0050	0,0001
Sílica (Si)	0,4650	0,0005	Chumbo (Pb)	0,0217	0,0003
Manganês (Mn)	2,1600	0,0401	Estanho (Sn)	0,0058	0,0005
Fósforo (P)	0,0285	0,0013	Boro (B)	0,0005	0,0001
Enxofre (S)	0,0013	0,0006	Cálcio (Ca)	0,0005	0,0003
Cromo (Cr)	0,0295	0,0013	Zinco (Zn)	0,0109	0,0012
Molibdênio (Mo)	0,0041	0,0001	Zinco (Zn)	0,0012	0,0004
Níquel (Ni)	0,0152	0,0017	Bismuto (Bi)	0,0025	0,0004
Alumínio (Al)	0,0283	0,0007	Ársênio (As)	0,0143	0,0005
Cobalto (Co)	0,0059	0,0005	Nitrogênio (N)	0,0032	0,0009
Cobre (Cu)	0,0265	0,0012	Selênio (Se)	0,0050	0,0005
Níobio (Nb)	0,0010	0,0001	Antimônio (Sb)	0,0154	0,0024
Titânio (Ti)	0,0020	0,0002	Tântalo (Ta)	0,1113	0,0051

5 - NOTAS NOTES

Informativo - Informative.

Data de Ensaio - Testing date: 09/07/2021

Data de Emissão - Issue date: 09/07/2021

FIM DO RELATÓRIO END OF REPORT

Luiz Fernando Fernandes Bosquedini
 Signatário Autorizado - Authorized Signatory

This report attends the requests of the norm ABNT NBR ISO/IEC 17025. O laboratório é reconhecido pelo INMETRO sob o número 17493, o qual avalia sua competência e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. This report meets the requirements of ABNT NBR ISO / IEC 17025. The laboratory is recognized by the INMETRO under number 17493 which certifies its competence and proves its traceability to national standards of measurement.

A constituinte enviada para análise é realizada pelo próprio cliente. As informações contidas neste documento referem-se exclusivamente às amostras analisadas/enunciadas, as mesmas foram analisadas criticamente e autorizadas antes de sua liberação pelo signatário responsável pelo ensaio. Such a sample for analysis is performed by the customer. The information contained in this document refers exclusively to the samples tested / analyzed; they were analyzed critically and authorized prior to their release by the signatory responsible for the issue.

Este documento não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido no íntegro. This document may not be reproduced without the approval of the laboratory, except if reproduced in its entirety.

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - cqs@cqs-laboratorios.com.br - www.cqs-laboratorios.com.br / (51) 3081-5600

APÊNDICE C – RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA DA LONGARINA

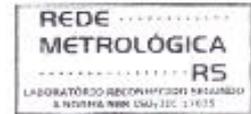


CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO

Rua Metalúrgica Guidali, nº. 85 - São Leopoldo/RS - (51) 3081-5600
 cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br

Relatório de Ensaio de Análise Química - 3737/21

Chemical Analysis Test Report - 3737/21



Cliente/Cient: Função Universidade de Caxias do Sul

OS: 7391

Informações complementares/Additional information: Rua Francisco Getúlio Vargas, 1180 Barro Petrópolis - Caxias do Sul - RS

Interessado/Interested:

1 - INFORMAÇÕES FORNECIDAS PELO SOLICITANTE INFORMATION PROVIDED BY THE APPLICANT

Identificação da amostra: LONGARINA

2 - INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES ADDITIONAL INFORMATION

Método - Method: E-15 Test Method for Analysis of Carbon and Low Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry.

Condições Ambientais: Temperatura 23°C (±5°C) / Umidade relativa $\leq 70\%$ Ambient Conditions: Temperature 23°C (±5°C) / Relative humidity $\leq 70\%$

Local da Atividade: Instalações fixas do Laboratório "CQS Laboratório" / Place of Activity: Fixed installations of the Laboratory "CQS Laboratory".

3 - RASTREABILIDADE METROLÓGICA METROLOGICAL TRACEABILITY

Descrição/Description	Identificação/Identification	Certificado/Certified	Emitido/Issued	Validade/Validity
Termohigrômetro - Thermohygrometer	TH-2	OWQAW220	Metrocal	jan/22

Espectrômetro de Emissão Ótica, fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro, padrões de calibração - Optical Emission Spectrometer, man. fabricante Oxford Instruments, Foundry Master Pro model, calibration standards NIST 3113/92, RG 14/93, RE 12/183, RH 18/16, RH 10/10 fabricante: Minich Hall, Alemanha.

4 - RESULTADOS RESULTS

Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean Value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)	Elemento Químico Chemical Element	Valor Médio Mean Value (%)	Desvio padrão Standard deviation (%)
Ferro (Fe)	99,0000	0,0001	Vanádio (V)	0,0020	0,0012
Carbono (C)	0,1150	0,0081	Tungstênio (W)	0,0055	0,0019
Silício (Si)	0,0159	0,0004	Chumbo (Pb)	0,0151	0,0014
Manganês (Mn)	0,5450	0,0107	Estanho (Sn)	0,0029	0,0007
Fósforo (P)	0,0173	0,0002	Boro (B)	0,0005	0,0002
Enxofre (S)	0,0058	0,0007	Cálcio (Ca)	0,0003	0,0002
Cromo (Cr)	0,0158	0,0001	Zircônio (Zr)	0,0081	0,0010
Molibdênio (Mo)	0,0024	0,0017	Zinco (Zn)	0,0025	0,0007
Níquel (Ni)	0,0053	0,0025	Bismuto (Bi)	0,0020	0,0006
Alumínio (Al)	0,0456	0,0009	Arsênio (As)	0,0040	0,0007
Cobalto (Co)	0,0020	0,0003	Nitrogênio (N)	0,0020	0,0001
Cúprico (Cu)	0,0075	0,0009	Selênio (Se)	0,0042	0,0004
Niôbio (Nb)	0,0326	0,0015	Antimônio (Sb)	0,0175	0,0038
Titânio (Ti)	0,0013	0,0008	Tântalo (Ta)	0,1040	0,0081

5 - NOTAS NOTES

Informativo - Informative.

Data de Ensaio / Testing date: 09/07/2021

Data de Emissão / Issue date: 09/07/2021


 Luiz Fernando Fernandes Bisquerolli
 Signatário Autorizado - Authorized Signatory

FIM DO RELATÓRIO / END OF REPORT

Este relatório atende aos requisitos da norma ABNT NBR 15211: 2015. O laboratório é reconhecido pela INMETRO sob o número 17401, o qual atesta sua competência e comprova sua rastreabilidade a padrões nacionais de referência. This report meets the requirements of ABNT NBR 15211:2015. The laboratory is recognized by the INMETRO under number 17401, which attests its competence and proves its traceability to national standards of reference.

A amostragem enviada para análise é realizada pelo próprio cliente. As informações contidas neste documento referem-se exclusivamente às amostras analisadas/destacadas, as mesmas foram analisadas unicamente e autorizadas pelas de sua liberação pelo signatário responsável pela emissão. Sampling and/or analysis is performed by the customer. The information contained in the document refers exclusively to the samples received/analyzed, they were analyzed directly and authorized prior to their release by the signatory responsible for the report.

Este documento não pode ser reproduzido sem a aprovação do laboratório, exceto se for reproduzido na íntegra. This document may not be reproduced without the approval of the laboratory, except if reproduced in its entirety.

CQS LABORATÓRIO DE ENSAIO E CALIBRAÇÃO - cqs@cqslaboratorios.com.br - www.cqslaboratorios.com.br / (51) 3081-5600

APÊNDICE D – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DO AÇO SAE 1006

ARCELORMITTAL BRASIL S.A.		Certificado de Qualidade / Mill Sheet / Quality Certificate				Pág 1 de 01
Usina / Plant: ArceLorMittal Vega		Ordem de Venda / Order No: 9444982 / 000010	Nº do pedido do cliente / Buyer ref. No: 23335	Nº do certificado / Certificate / Customer Ref. No: 003649670501	Data de emissão / Issue Date: 29.07.2021	
BR 280 km 11 S/Nº Morro Grande, São Francisco do Sul, SC, 89240-000, CNPJ: 17.488.701/0108-44, Tel/Fone: (5647) 3471-8660, Fax: (5647) 3471-8601		Consumidor / Customer: TRICHES FERRO AÇO LTDA		Cliente final / End user: TRICHES FERRO AÇO LTDA		Part Number: CONFORME NORMA
Aplicação / Application: TUBOS DE PEQUENO DIÂMETRO - USO GERAL / SMALL DIAMETER TUBES - GENERAL		Produto / Product: Bobina Laminada a Frio / Cold Rolled Coil		Norma do Produto / Product Standard: SAE1006 COM DUREZA		Revestimento / Coating:
Espessura / Thickness (MM) 0,75		Largura / Width (MM) 1.200		Borda / Edge: Natural		Tipo de dimensão / type of dimension: Nominal
				Óleo / Oil: Sim/Yes		Tipo de Óleo / Oil Type: QK
				Aspecto Superficial / Surface Aspect: X		Cond. Especial / Special Cond.: NORMAL
						Nº Protocolo / No Protocol:

Composição Química / Chemical Composition (%) - L - Análise de Panela / Ladle Analysis - P - Análise de Produto / Product Analysis

Cartão	Cód.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N	H	Sr	Ti	B	Ca
248485	L	0,2352	0,0119	0,2489	0,0150	0,0071	0,0410	0,0089	0,0050	0,0190	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024		0,0010	0,0000	0,0002	0,0004

Nº da amostra / Sample No.	Tensão / Tensile Unidade / Unit = MPa Base / Base =		Anisotropia / Anisotropy				Dobramento / Bending Base =	Dureza / Hardness Test: ROCKWELL B	Grão / Grain	Inclusões / Inclusion	Revestimento / Coating
	σ _{0.2} / σ _{0.01} σ _{UTS}	ε _{0.2}	R _m	R _{p0.2}	R _{p0.01}	R _{p0.05}					
2915070	F							43			

Número do lote / Lot ID	Nº do nota fiscal / Invoice Number	Peso Bruto / Net weight	Peso Líquido / Gross Weight	Comprimento Real / Real Length (m)	Amostra 1 / Sample 1	Amostra 2 / Sample 2	Diagnóstico / Codes	Obs.
21870746A	000481753	8,160	8,179	2485483	1,110,00	2915070	(1) INSCRIÇÃO / POSITION (2) INCLUIÇÕES / INCLUSIONS A - Sulco / Groove B - Rompimento / Fracture C - Mancha / Stain D - Ocas / Scale E - Trilhos / Grooves F - Fenda / Crack G - Manchas / Stains H - Manchas / Stains I - Manchas / Stains J - Manchas / Stains K - Manchas / Stains L - Manchas / Stains M - Manchas / Stains N - Manchas / Stains O - Manchas / Stains P - Manchas / Stains Q - Manchas / Stains R - Manchas / Stains S - Manchas / Stains T - Manchas / Stains U - Manchas / Stains V - Manchas / Stains W - Manchas / Stains X - Manchas / Stains Y - Manchas / Stains Z - Manchas / Stains	

Carlos Alberto Ferreira
 Gerente de Assistência Técnica a Clientes
 Customer Technical Support Manager

APÊNDICE E – CERTIFICADO DE CONFORMIDADE DO AÇO SAE 1010

		PANATLANTICA IND. E COM. DE TUBOS LTDA. RODOVIA RST - 453 - KM 80 - CAXIAS DO SUL Fone: (54) 3211-8500 Fax: (54) 3211-8502 www.panatlantikatubos.com.br															
CERTIFICADO DE CONFORMIDADE																	
Cliente	SCARELI METALURGIA LTDA					Data	29/07/2021		Nr. do Certificado	000.306.200							
Produto	CQ 2.00x1200x3000 SAE 1010				Pedido	1114933			Nota Fiscal	0581691							
Norma	CQ NBR 11888 ESPESSURA				Apo	SAE 1010			Código do Produto	600341							
Rebarba Interna Removida 100%		NA		Eddy Current 100%		NA		Inspeção Visual 100%		AP		Quant. Peças	3,33				
CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS *																	
PARÂMETROS				ESPECIFICAÇÃO								LAUDO					
COMPRIMENTO (mm)				-0 +20								AP					
DIÂMETRO/LARGURA/DIMENSIONAL EXTERNO (mm)				-0 +22								AP					
ESPESSURA (mm)				+/- 0,15								AP					
ROSCA/DIÂMETRO NOMINAL (DN)				NA								AP					
ANÁLISE QUÍMICA **																	
VOLUME	AÇO/BOBINA	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Al	%Nb	%Ti	%Cu	%Cr	LAUDO					
ESPECIFICADO	SAE 1010	0,08 A 0,13	0,30 A 0,60	0,04 MAX	0,05 MAX							AP					
ENCONTRADO	A972660201	0,0860	0,3750	0,0120	0,0060	0,0100	0,0380					AP					
												AP					
ANÁLISE FÍSICA																	
EXPANSÃO MÁXIMA 15%		NA		* DOBRAMENTO		NA		Acabamento Zincado Elet.		NA		* LE (MPa)		* LR (MPa)		* AL (%)	
ACHATAMENTO (NBR 6154)		NA		* EMBUTIMENTO		NA		Acabamento Zincado Fogo		NA		ESP	NA		ESP	NA	
* DUREZA [HRB]		NA		* TESTE HIDROSTÁTICO		NA						ENC	NA		ENC	NA	
OBSERVAÇÕES * VALORES REFERENTES AO LOTE FORNECIDO, QUANDO SOLICITADO NO PEDIDO E DE ACORDO COM A NORMA DO AÇO. ** VALORES TRANSCRITOS DO CERTIFICADO DE USINA.																	
Atestamos que os materiais acima identificados foram produzidos, testados e inspecionados e estão em conformidade com os requisitos especificados pela norma em referência.																	
												 _____ Natália Viegas Machado					
AP = APROVADO NA = NÃO APLICÁVEL AR = AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA BR = AÇO DE BAIXA RESISTÊNCIA																	

APÊNDICE F – PROPRIEDADES E NOTA FISCAL DO AÇO USI – LN 700

Descrição																	
CHAPA PCP 5700 MC 02,00																	
LE	LRT	ALONG.	CARBONO	MANGANES	FOSFORO	ENXOFRE	SILICIO	ALUMINIO	TITANIO	VANADIO	NIOBIO	NITROGEN	COBRE	CROMO	NIQUEL	BORO	USINA
746	808	13	0,1000	1,6700	0,0190	0,0040	0,0400	0,0260	0,1040	0,0040	0,0551	0,0057	0,0100	0,5700	0,0100	0,0003	USIMINAS

RECEBEMOS DE PCP SERVIÇOS DE CORTE EM AÇO LTDA OS PRODUTOS CONSTANTES DA NOTA FISCAL INDICADA AO LADO		NF-e Nº. 0002823 SÉRIE 1
DATA DE RECEBIMENTO	IDENTIFICAÇÃO E ASSINATURA DO RECEBEDOR	

	Identificação do emissor PCP SERVIÇOS DE CORTE EM AÇO LTDA RUA DENARTE CRUZ 78 SAO JOSE CAXIAS DO SUL – RS CEP 95041-160 – 5430284474	DANFE DOCUMENTO AUXILIAR DA NOTA FISCAL ELETRÔNICA 0 – ENTRADA 1 – SAÍDA Nº. 0002823 FL. 1 / 1 SÉRIE 1	 CHAVE DE ACESSO 4321 0809 1291 3300 0307 5500 1000 0028 2317 3320 8441 Consulta de autenticidade no portal nacional da NF-e www.nfe.fazenda.gov.br/portal ou no site da Sefaz Autorizadora
NATUREZA DA OPERAÇÃO VENDA DE MERCADORIA ADQUIRIDA OU RECEBIDA DE		PROTÓCOLO DE AUTORIZAÇÃO DE USO 143210170719271 23/08/2021 08:53:23	
INSCRIÇÃO ESTADUAL 0290515637		INSCR. EST. SUBS. TRIBUTÁRIO 09.129.133/0003-07	
DISTRITINA TÁRIFAS/EMITENTE NOME / RAZÃO SOCIAL PEGORINI CHAPEAÇÃO E PINTURA DE VEICULOS LTDA(0007318)		CNPJ / CPF 92.078.468/0001-17	
ENDEREÇO RUA ITO RUSCHEL RAUBER 353		BAIRRO / DISTRITO PLANALTO	
MUNICÍPIO CAXIAS DO SUL		CEP 95080-170	
FONE / FAX 5432131255		UF RS	
INSCRIÇÃO ESTADUAL 0290325900		DATA DA EMISSÃO 23/08/2021	
DATA DA ENTRADA/SAÍDA 23/08/2021		HORA DE SAÍDA 08:53:23	

FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR	FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR	FATURA/DUPLIC.	VENCIMENTO	VALOR
0002823/01	23/08/2021	750,75						

CÁLCULO DO IMPOSTO		BASE DE CÁLCULO DO ICMS		VALOR DO ICMS		BASE DE CÁLCULO DO ICMS ST		VALOR DO ICMS SUBSTITUÍDO		VALOR TOTAL DOS PRODUTOS	
		715,00		125,13		0,00		0,00		715,00	
VALOR DO FRETE		VALOR DO SEGURO		VALOR DO DESCONTO		OUTRAS DESPESAS		VALOR DO IPI		VALOR TOTAL DA NOTA	
0,00		0,00		0,00		0,00		35,75		750,75	

TRANSPORTADORA / VEÍCULO TRANSPORTADOR		FRETE POR CONTA		CÓDIGO ANTT		PLACA DO VEÍCULO		UF		CNPJ	
NOME / RAZÃO SOCIAL		1 = Destinatário/Remetente						RS		00.000.000/0000-00	
DESTINATÁRIO								RS		INSCRIÇÃO ESTADUAL	
ENDEREÇO		MUNICÍPIO									
- S/N											
QUANTIDADE		ESPÉCIE		MARCA		NUMERO		PESO BRUTO		PESO LÍQUIDO	
1,00				PCP SERVIÇOS				65,000		65,000	

DADOS DOS PRODUTOS / SERVIÇOS													
CÓDIGO	DESCRIÇÃO PRODUTO / SERVIÇO	NCM / SH	CST	CFOP	UN	QUANT.	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL	B.CÁLC. ICMS	VALOR ICMS	VALOR IPI	ALÍQUOTAS ICMS	ALÍQUOTAS IPI
PCP000016	CHAPA AR 700 02,00 X 1.200 X DIVERSOS	72254090	000	5102	kg	65,00	11,00	715,00	715,00	125,13	35,75	17,50	5,00

CÁLCULO DO ISSQN		INSCRIÇÃO MUNICIPAL		VALOR TOTAL DOS SERVIÇOS		BASE DE CÁLCULO DO ISSQN		VALOR DO ISSQN	
				0,00		0,00		0,00	

DADOS ADICIONAIS	RESERVADO AO FISCO
INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES - / PEDEDO(S):	

APÊNDICE G – ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM SAE 1010

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos
 REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

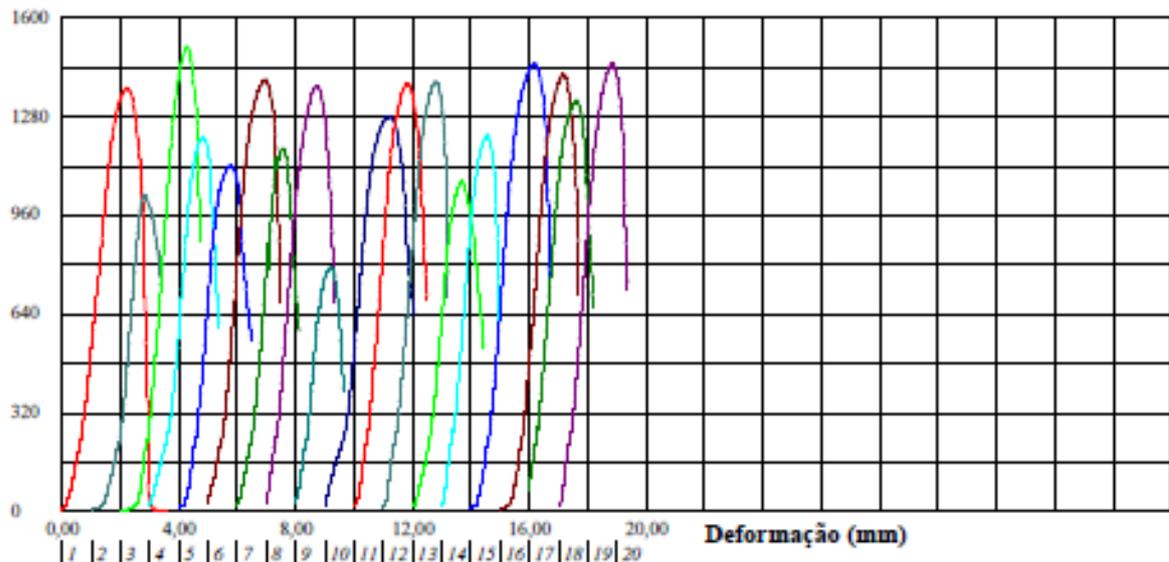
Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Celula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **28/09/2021** Hora: **13:56:28** Trabalho n° **3177**
 Programa: **Test versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO SIMPLES**
 Ident. Amostra: > Cliente: **ENG. MECÂNICA** T.(°C): **21,9** Identif. n°: **L1 A L9** S.S N°: **#00526720/21** Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Velocidade de ensaio (mm/min)	Ident. nº	Força Máxima (kgf)
CP 1	10	L1-1	1376
CP 2	10	L1-2	1030
CP 3	10	L2-1	1510
CP 4	10	L2-2	1215
CP 5	10	L3-1	1124
CP 6	10	L3-2	1401
CP 7	10	L4-1	1179
CP 8	10	L4-2	1382
CP 9	10	L5-1	794
CP 10	10	L5-2	1284
CP 11	10	L6-1	1389
CP 12	10	L6-2	1395
CP 13	10	L7-1	1074
CP 14	10	L7-2	1221
CP 15	10	L8-1	1456
CP 16	10	L8-2	1421
CP 17	10	L9-1	1335
CP 18	10	L9-2	1455

Observações: 0
 - Os corpos de prova romperam na solda.: 1

Força (kgf)



Observação:

IDENTIFICAÇÃO DO CLIENTE: 18 CORPOS DE PROVA DE CHAPAS SOLDADAS COM SOLDA PONTO; ALUNO: EDUARDO PEGORINI; PROF.: VICTOR HUGO VELASQUES ACOSTA; ESTÁGIO II EM ENG. MECÂNICA GRADE 122G (EQUIVALENTE A TCC II); IDENTIFICADAS POR: L1-1, L1-2, L2-1, L2-2, L3-1, L3-2, L4-1, L4-2, L5-1, L5-2, L6-1, L6-2, L7-1, L7-2, L8-1, L8-2, L9-1, L9-2.

APÊNDICE H – ENSAIOS DE CISALHAMENTO EM SAE 1006/USI – LN 700

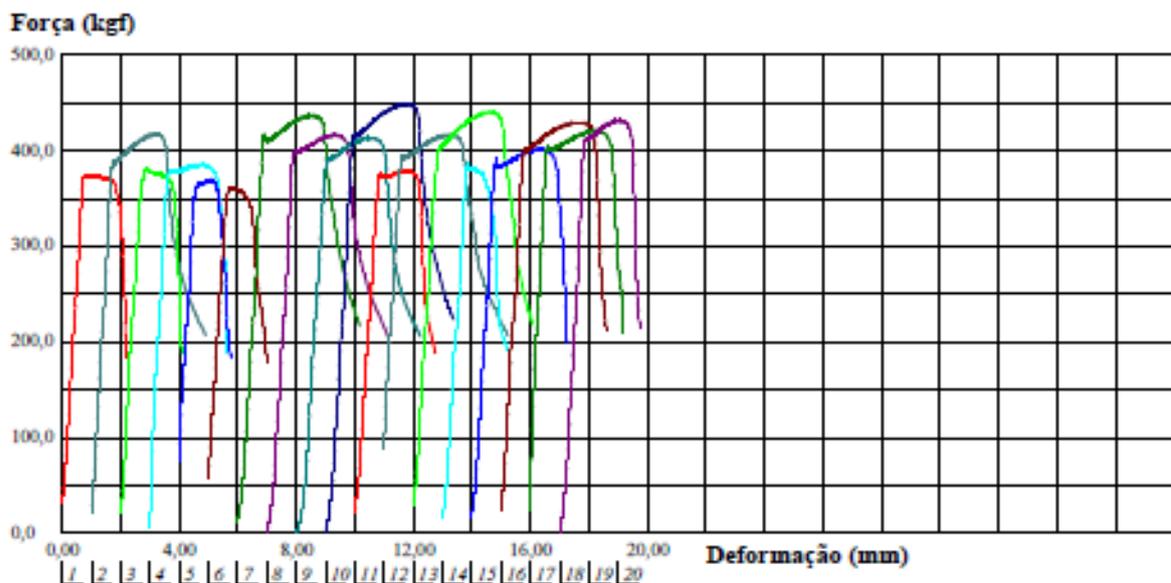
UCS - Laboratório de Ensaio Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

Relatório de Ensaio

Maquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 12** Extensômetro: - Data: **28/09/2021** Hora: **14:53:38** Trabalho n° **3178**
 Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **20T_TRAÇÃO SIMPLES**
 Ident. Amostra: > Cliente: **ENG. MECÂNICA** T.(°C): **21,9** Identif. n°: **R1 - R9** S.S N°: **#005226720/21** Folha: **02 de 02**

Corpo de Prova	Velocidade de ensaio (mm/min)	Ident. n°	Força Máxima (kgf)
CP 1	10	R1-1	376
CP 2	10	R1-2	419
CP 3	10	R2-1	382
CP 4	10	R2-2	387
CP 5	10	R3-1	371
CP 6	10	R3-2	362
CP 7	10	R4-1	438
CP 8	10	R4-2	418
CP 9	10	R5-1	415
CP 10	10	R5-2	450
CP 11	10	R6-1	381
CP 12	10	R6-2	418
CP 13	10	R7-1	441
CP 14	10	R7-2	387
CP 15	10	R8-1	403
CP 16	10	R8-2	430
CP 17	10	R9-1	422
CP 18	10	R9-2	433

Observações: 0
 - Os corpos de prova romperam na solda.: 1



Observação: 18 CORPOS DE PROVA DE CHAPAS SOLDADAS COM SOLDA PONTO; ALUNO: EDUARDO PEGORINI; PROF.: VICTOR HUGO VELASQUES ACOSTA; ESTÁGIO II EM ENG. MECÂNICA GRADE 122G (EQUIVALENTE A TCC II); IDENTIFICADAS POR: L1-1, R1-2, R2-1, R2-2, R3-1, R3-2, R4-1, R4-2, R5-1, R5-2, R6-1, R6-2, R7-1, R7-2, R8-1, R8-2, R9-1, R9-2.

APÊNDICE I – RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE MICRODUREZA

Material	Amostra	MB	ZAT	ZF	ZAT	MB
SAE 1010	1	145	189	235	184	145
	2	136	188	220	178	143
	3	148	180	255	186	149
	4	134	186	225	185	140
	5	136	200	243	200	139
	6	141	197	238	188	142
	7	121	175	210	185	131
	8	130	190	236	186	135
	9	142	188	243	190	139
SAE 1006	1	110	184	211	198	113
	2	106	178	200	181	109
	3	109	171	213	179	111
	4	101	162	200	161	107
	5	107	180	206	184	106
	6	112	185	215	178	110
	7	105	160	186	162	111
	8	108	170	198	183	106
	9	104	177	205	181	112
USI – LN 700	1	255	431	428	450	270
	2	261	400	405	423	258
	3	257	415	422	430	264
	4	268	393	381	391	266
	5	271	398	413	417	260
	6	259	422	430	435	272
	7	266	388	410	422	260
	8	270	402	400	407	256
	9	265	411	424	410	267

Fonte: O autor (2021)

APÊNDICE J – RESULTADOS DAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Diâmetro dos pontos em SAE 1010						
Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor	3,02	8	0,3775	56,625	2,7603E-10	2,59109618
Espécime	0,02	2	0,01	1,5	0,252889649	3,633723468
Erro	0,106667	16	0,006667			
Total	3,146666667	26				

Fonte: O autor (2021)

Diâmetro dos pontos em SAE 1006						
Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor	6,822963	8	0,85287	283,4154	9,41E-16	2,591096
Espécime	0,016852	2	0,008426	2,8	0,090642	3,633723
Erro	0,048148	16	0,003009			
Total	6,887962963	26				

Fonte: O autor (2021)

Diâmetro dos pontos em LN 700						
Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor	6,825740741	8	0,853217593	112,8912711	1,32774E-12	2,59109618
Espécime	0,009074074	2	0,004537037	0,600306279	0,560542509	3,633723468
Erro	0,120925926	16	0,00755787			
Total	6,955740741	26				

Fonte: O autor (2021)

Força de cisalhamento em SAE 1010/SAE 1010						
Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor + Pressão	26,87021111	8	3,358776389	0,986950948	0,507182756	3,438101233
Espécime	1,717422222	1	1,717422222	0,504651485	0,497646332	5,317655072
Erro	27,22547778	8	3,403184722			
Total	55,81311111	17				

Força de cisalhamento em SAE 1006/LN 700

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Calor + Pressão	0,758454	8	0,09480675	1,948091688	0,182432178	3,438101233
Espécime	0,030094222	1	0,030094222	0,6183769	0,454311701	5,317655072
Erro	0,389331778	8	0,048666472			
Total	1,17788	17				

Fonte: O autor (2021)

Força de cisalhamento em gráfico da Figura 29

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Corrente	2,202533	2	1,101267	1,234881	0,447451	19
Espécime	2,6136	1	2,6136	2,930702	0,229041	18,51282
Erro	1,7836	2	0,8918			
Total	6,599733	5				

Fonte: O autor (2021)

Força de cisalhamento em gráfico da Figura 30

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Força + Tempo	9478477	2	4739239	10,21636	0,089156	19
Espécime	862869,6	1	862869,6	1,860084	0,305827	18,51282
Erro	927774,8	2	463887,4			
Total	11269121	5				

Fonte: O autor (2021)

Força de cisalhamento em gráfico da Figura 31

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Corrente	1,8E+09	2	8,99E+08	0,964424	0,455176	6,944272
Impulso	1,81E+09	2	9,07E+08	0,97223	0,452788	6,944272
Erro	3,73E+09	4	9,32E+08			
Total	7,34E+09	8				

Fonte O autor (2021)

Força de cisalhamento em gráfico da Figura 32

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Corrente	358404,3	2	179202,2	7,008252	0,124871	19
Espécime	24448,17	1	24448,17	0,956121	0,431284	18,51282
Erro	51140,33	2	25570,17			
Total	433992,8	5				

Fonte: O autor (2021)

Microdurezas em SAE 1010

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	1074,296	8	134,287	2,367643	0,06772	2,591096
Zona	39387,19	2	19693,59	347,2219	6,62E-14	3,633723
Erro	907,4815	16	56,71759			
Total	41368,96	26				

Fonte: O autor (2021)

Microdurezas em LN 700

Fator	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	1535,852	8	191,9815	1,332862	0,296485	2,591096
Zona	128149,4	2	64074,7	444,8488	9,49E-15	3,633723
Erro	2304,593	16	144,037			
Total	131989,8519	26				

Fonte: O autor (2021)