

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA
ELÉTRICA DO AÇO 38MnB5 ESTAMPADO A QUENTE**

LUCAS GOMES PALLU

SÃO CARLOS -SP
2021

ANÁLISE DA SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA DO AÇO 38MnB5 ESTAMPADO A QUENTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

Co-orientadora: Dr^a. Jéssica Santana

São Carlos-SP
2021



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Lucas Gomes Pallu

RA: 727398

TÍTULO: Análise da soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 38MnB5 estampado a quente

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

CO-ORIENTADOR(A): Dra. Jéssica Santana

DATA/HORÁRIO: 10/11/2021, 17h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini	10,0	10,0
Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini e Prof. Dr. Guilherme Yuuki Koga e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. Claudemiro Bolfarini

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e ajudaram em minhas conquistas.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer a minha família, que me incentivou a fazer uma faculdade, e que sempre confiaram e me apoiaram em minhas escolhas.

Gostaria de agradecer a Jessica, que além de ser minha melhor amiga e minha companheira, me ajudou em inúmeras situações e sempre esteve junto comigo tanto nos momentos bons como nos momentos difíceis.

Gostaria de agradecer ao Rodolfo e Léo, por essa incrível amizade que começou na faculdade e por toda a ajuda na Graduação naquelas longas noites de estudo.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que sempre me proporcionaram bons momentos e sempre estiveram do meu lado desde a infância.

Gostaria de agradecer ao Prof. Bolfarini, que desde o começo da graduação me proporcionou oportunidades para que eu conseguisse crescer como pessoa e profissionalmente.

Gostaria de agradecer a Jessica Santana, que me ajudou muito com esse trabalho, além de todos os ensinamentos passados nesse estágio da Benteler.

Gostaria de agradecer as pessoas da engenharia de produto e as pessoas do laboratório metalográfico da qualidade da Benteler, por toda a ajuda proporcionada nesse trabalho.

RESUMO

Com o aumento da demanda de veículos mais leves e mais seguros uma das soluções é a utilização de aços mais resistentes que podem ser conformados por meio da estampagem a quente e com espessuras menores, diminuindo o peso e mantendo a segurança. O 38MnB5 é um aço produzido para estampagem a quente que tem a premissa de alcançar até 2000MPa de Resistência a Ruptura dependendo da taxa de resfriamento imposta no processo de estampagem. Sua microestrutura após estampagem é majoritariamente composta de grãos finos de martensita, que possibilitam essa alta resistência. Por ser um grau de aço recente no mercado, informações sobre soldagem ainda estão sendo estudadas, principalmente informações sobre a soldagem por resistência elétrica, processo amplamente utilizado em peças automobilísticas. Desse modo, foi realizado um estudo da soldagem por resistência elétrica para o aço 38MnB5, o material foi caracterizado a fim de definir as propriedades mecânicas iniciais e após o processo de estampagem a quente, onde ocorre a tempera do material. O grau 38MnB5 foi estampado a quente a partir de uma linha de produção já existente na Benteler Automotive, para produção do grau 22MnB5. Por ser um processo realizado a quente e uma vez que o aço utilizado não possui revestimento, a formação de camada de óxido ocorre assim que o mesmo entra em contato com a atmosfera, durante a transferência da chapa entre o forno e a ferramenta de estampagem. Assim, o aço foi analisado quanto a soldabilidade em duas condições superficiais diferente: após estampado, contendo camada oxidada; e jateado, onde a camada de óxido foi removida. A corrente de 8,8 kA foi a que apresentou os melhores resultados quanto ao tamanho e repetibilidade da lente soldada. Perfil de microdureza Vickers HV1 foi realizado na seção transversal da solda, obtendo valores que variam de 350 a 600 HV. A macrografia da seção transversal da solda junto com os valores de microdureza possibilitam a determinação das regiões do metal base, da zona termicamente afetada e da zona fundida. A microestrutura destas regiões da solda varia entre martensita, martensita revenida e martensita revenida com ferrita precipitada no contorno do grão pré-austenítico. Para avaliar o comportamento mecânico da junta, o teste de cisalhamento foi realizado. A força de ruptura alcançada foi maior que 13,4 kN para todas as amostras ensaiadas, onde as amostras com oxidação obtiveram menor repetibilidade dos resultados. Ambas apresentaram mecanismo de falha por arrancamento, que é o mecanismo preferível para processos industriais.

Palavras-chave: Estampagem a quente. Solda por resistência elétrica. *Press Hardenable Steels*. 38MnB5.

ABSTRACT

With the increasing demand for lighter and safer vehicles one of the solutions is the use of stronger steels that can be formed by hot stamping and with smaller thicknesses, reducing weight and maintaining safety. The 38MnB5 is a steel produced for hot stamping that has the premise of reaching up to 2000 MPa of Tensile Strength depending on the cooling rate applied in the stamping process. Its microstructure after stamping is mostly composed of fine grains of martensite, which enable this high strength. Because it is a recent steel grade in the market, information about welding is still lacking, especially information about resistance spot welding, a process widely used in automotive parts. In this way, a study of resistance spot welding was performed for 38MnB5 steel, the material was characterized to define the mechanical properties initially and after the hot stamping process, where the quenching of the material is carried out. The 38MnB5 grade was hot stamped from an existing production line at Benteler Automotive, to produce the 22MnB5 grade. Because it is a hot process and because the steel used is uncoated, the oxide layer formation takes place as soon as it meets the atmosphere, during the transfer of the plate from the furnace to the stamping tool. Thus, the steel was analyzed for weldability in two different surface conditions: after stamping, containing an oxidized layer; and blasted, where the oxide layer was removed. The 8.8 kA current was the one that presented the best results regarding the size and repeatability of the welded plug. Vickers HV1 microhardness profile was determined on the weld cross section, showing values ranging from 350 to 600 HV. The macrography of the weld cross section together with the microhardness values enable the determination of the base metal, the heat-affected zone, and the fused zone. The microstructure of these weld regions varies between martensite, tempered martensite, and tempered martensite with precipitated ferrite on the pre-austenitic grain boundary. To evaluate the mechanical behavior of the joint, shear testing was performed. The rupture force reached was higher than 13.4 kN for all tested samples, where the samples with oxidation obtained lower repeatability of the results. Both presented a pull-out failure mechanism, which is the preferred mechanism for industrial processes.

Keyword: Hot-Forming. Resistance Spot Welding. Press Hardenable Steels. 38MnB5.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Componentes estruturais automotivos destacados de acordo com o tipo de aço geralmente utilizado. A Pillar, B Pillar e C Pillar demonstrados em vermelho (aço de ultra-alta resistência) (Fonte: © Volvo Cars).	4
Figura 2: Comparação da curva tensão-deformação de aços utilizados na indústria automobilística (BILLUR, 2019).	4
Figura 3:Relação entre Alongamento e Tensão de Ruptura de alguns aços AHSS (SHOME, 2015).....	5
Figura 4: Microestrutura típica de um aço DP, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicando os grãos de ferrita (F) e martensita (M) (SHOME, 2015).	5
Figura 5: Microestrutura típica de um aço TRIP, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicando os grãos de bainita (B), martensita (M) e austenita retida (RA) na matriz ferrítica (SHOME, 2015).....	6
Figura 6: Imagem de microestrutura típica Martensítica, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (SHOME, 2015).....	7
Figura 7: Diagrama de fases Fe-C (BILLUR, 2019).	8
Figura 8: Curva tensão deformação do aço 22Mn5B, em condições antes (curva vermelho) e depois (curva azul) da têmpera (BILLUR, 2019).	9
Figura 9: Diagrama CCT (Transformações a Resfriamento Contínuo) do aço 22MnB5 e os efeitos dos elementos de liga (BILLUR, 2019).....	10
Figura 10: Modificações da microestruturas dentro do processo de conformação a quente. 1) Material em sua fase inicial com microestrutura composta por ferrita, como recebido; 2) Material na condição austenítica, após aquecimento a temperaturas acima de A_{c3} ; 3) Material após estampagem e têmpera dentro da ferramenta, microestrutura martensítica (BILLUR, 2019).....	11
Figura 11: Esquema do processo de estampagem a quente, convencional e direto, e a respectiva temperatura aproximada atingida em cada etapa. (BILLUR, 2019).	12
Figura 12: Formação da solda no processo de soldagem por resistência elétrica (MODENESI, 2000).....	14
Figura 13: Microestrutura típica de uma solda por resistência elétrica em um aço de	

baixo carbono. (MANLADAN, 2015).....	14
Figura 14: Dimensões de amostras para realização de teste de cisalhamento segundo a norma ISO 14273 (ISO 14273, 2002).....	15
Figura 15: Disposição das amostras na realização do teste de cisalhamento, junto a direção de aplicação das forças segundo a norma ISO 14273 (ISO 14273, 2002)..	15
Figura 16: Dimensões de amostras para realização de teste de arrancamento segundo a norma ISO 14272 (ISO 14272, 2000).....	16
Figura 17: Tipos de mecanismos de fratura encontrados no processo de soldagem por resistência elétrica. (a) Mecanismo de Fratura Interfacial. (b) Mecanismo de Fratura Interfacial Parcial. (c) Mecanismo de Falha por arrancamento. (MODENESI, 2000).....	17
Figura 18: Posição das amostras retiradas da barra de proteção de porta produzida com o aço 38MnB5. (Fonte: Próprio autor)	20
Figura 19: Dimensões do eletrodo de cobre utilizado no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. (Fonte: Próprio autor)	21
Figura 20: Curvas Tensão x Deformação do 38MnB5. (a) material como recebido; (b) material após estampagem a quente. (Fonte: Próprio autor).....	24
Figura 21: Microestrutura do Aço 38MnB5 como recebido pela usina. Microestrutura ferrítica com cementita esferoidizada. (Fonte: Próprio autor).....	25
Figura 22: Microestrutura predominantemente martensítica do 38MnB5 após processo de estampagem a quente, obtidas a partir de MEV. (a) Microestrutura com aumento de 500x. (b) Microestrutura com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	26
Figura 23: Camada descabonetada e camada oxidada presente no aço 38MnB5 após processo de estampagem a quente, utilizando forno sem controle de oxigênio. (a) Parte inferior da chapa. (b) Parte superior da chapa. (Fonte: Próprio autor)	27
Figura 24: Camada descabonetada presente no aço 38MnB5 após processo de Jateamento Abrasivo. (a) Parte inferior da chapa. (b) Parte superior da chapa. (Fonte: Próprio autor)	28
Figura 25: Diâmetro da lente da solda, medido por ultrassom de peças soldadas com corrente elétrica de: (a) 6,7kA. (b) 7,5 kA. (c) 7,5 kA. (Fonte: Próprio autor) ...	29
Figura 26: Diâmetro da lente da solda medido por ultrassom de peças soldadas com	

corrente elétrica de: (a) 8 kA; (b) 8,2 kA; (c) 8,4 kA; (d) 8,6 kA; (e) 8,8 kA; (f) 9 kA. (Fonte: Próprio autor)	30
Figura 27: Gráfico de Diâmetro da lente da solda pela corrente elétrica utilizada para amostras de aço 38MnB5 Oxidadas. (Fonte: Próprio autor)	31
Figura 28: Gráfico de diâmetro da lente da solda pela corrente elétrica utilizada para amostras de aço 38MnB5 Jateadas. (Fonte: Próprio autor).....	31
Figura 29: Parâmetros de solda obtidos no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica no aço 38MnB5 Jateado utilizando uma corrente de 8,8 kA. (Fonte: Próprio autor)	32
Figura 30: Macrografia mostrando o perfil de microdureza Vickers e as regiões da solda realizado na amostra Jateada soldada com corrente de 8,8 kA (primeira amostra). (Fonte: Próprio autor).....	32
Figura 31: Perfil de microdureza Vickers (HV1) realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (primeira amostra). (Fonte: Próprio autor)	33
Figura 32: Macrografia mostrando o perfil de microdureza Vickers e as regiões da solda realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (segunda amostra). (Fonte: Próprio autor).....	33
Figura 33: Perfil de microdureza Vickers (HV1) realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (segunda amostra). (Fonte: Próprio autor).....	34
Figura 34: Macrografia mostrando as 10 áreas de análise microestrutural realizada na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA. (Fonte: Próprio autor)	34
Figura 35: Área 1 (MB). Microestrutura fina predominantemente martensítica. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	36
Figura 36: Área 2 (MB / ZTA-MB). Microestrutura fina predominantemente martensítica. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	37
Figura 37: Área 3 (ZTA-MB). Microestrutura de martensita revenida. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	37
Figura 38: Área 4 (ZTA-MB / ZTA-ZF). Microestrutura de martensita, martensita revenida e martensita revenida com precipitação de ferrita no contorno de grão pré-	

austenítico. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (c) Análise em MO com aumento de 500x. (d) Análise em MO com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	38
Figura 39: Área 5 (ZTA-ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	38
Figura 40: Área 6 (ZTA-ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	39
Figura 41: Área 7 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	39
Figura 42: Área 8 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	40
Figura 43: Área 9 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor).....	40
Figura 44: Área 10 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)	41
Figura 45: Tamanho da lente de solda, força de ruptura e tipo de fratura das amostras Jateadas, soldadas com 8,8 kA de corrente elétrica, ensaiadas no teste de cisalhamento. (Fonte: Próprio autor)	42
Figura 46: Tamanho da lente de solda, força de ruptura e tipo de fratura das amostras Oxidadas, soldadas com 8,8 kA de corrente elétrica, ensaiadas no teste de cisalhamento. (Fonte: Próprio autor)	43
Figura 47: Amostras de teste de cisalhamento soldadas por solda a ponto por resistência elétrica. (a) Amostra contendo desalinhamento das chapas soldadas. (b) Amostra alinhada. (Fonte: Próprio autor)	43
Figura 48: Fractografia dos pontos de solda após teste de cisalhamento. (a) Fractografia da amostra oxidada. (b) Fractografia da amostra jateada. (Fonte:	

Próprio autor)	44
Figura 49: Fractografia dos pontos de solda após teste de cisalhamento até a separação completa das chapas. (a) Aspecto geral da fratura. (b) Fratura por tensão da região superior da solda. (c) Fratura por tensão da região inferior da solda. (Fonte: Próprio autor)	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química especificada para o grau 38MnB5 (Fonte: Usina fornecedora).....	19
--	----

LISTA DE SIGLAS

DP: Aço *Dual-Phase*.

MS: Aço Martensítico.

TRIP: Aço *Transformation-Induced Plasticity*.

PHS: *Press Hardenable Steels*.

HSLA: *High Strength Low Alloy*.

HV: Unidade de medida de Dureza Vickers.

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura.

MO: Microscopia Ótica.

LE: Limite Elástico medido em ensaio de tração.

LR: Limite de Resistencia a Ruptura medido em ensaio de tração.

ZF: Zona Fundida.

ZTA: Zona Termicamente Afetada.

ZTA-ZF: Zona Termicamente Afetada próxima ao Zona Fundida.

ZTA-MB: Zona Termicamente Afetada próxima ao Metal Base.

MB: Metal Base.

Ac1: Temperatura crítica em que perlita inicia se transformar em austenita durante o aquecimento.

Ac3: Temperatura crítica em que ferrita se transforma completamente em austenita durante o aquecimento.

M_s: Temperatura de início da transformação martensítica durante resfriamento rápido de um aço.

M_f: Temperatura de fim da transformação martensítica durante resfriamento rápido de um aço.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 AÇOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA	3
2.1.1. Aços Dual-Phase (DP)	5
2.1.2. Aços Transformation-Induced Plasticity (TRIP)	6
2.1.3. Aços Martensíticos	6
2.1.3.1. Aço 22MnB5	9
2.2. ESTAMPAGEM A QUENTE (<i>HOT STAMPING OU HOT FORMING</i>)	11
2.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1. MATERIAL	19
3.2. PRODUÇÃO DA PEÇA	19
3.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA	20
3.4. TESTE DE TRAÇÃO E CISALHAMENTO	21
3.5. MICRODUREZA	21
3.6. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO 38MnB5	23
4.2. MICROESTRUTURA DO AÇO 38MnB5	24
4.2.1. Material como recebido	24
4.2.2. Material pós Estampagem a Quente	25
4.2.3. Material após Jateamento Abrasivo	27
4.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTENCIA ELÉTRICA	28
4.3.1. Teste de Corrente Elétrica	28
4.3.2. Perfil de Microdureza	32
4.3.3. Microestrutura das Regiões da Solda	34
4.3.4. Teste de Cisalhamento	41
5. CONCLUSÕES	47

1. INTRODUÇÃO

Na indústria automobilística, um dos desafios encontrados é a redução de peso sem comprometer a segurança dos veículos, e por este motivo, há uma constante busca de aprimoramento dos materiais metálicos utilizados em peças estruturais. No Brasil, o aço é o material mais utilizado na fabricação de estruturas de automóveis, tornando-se o foco de novas tecnologias relacionadas a materiais para este setor. O desenvolvimento de aços de ultra alta resistência possibilitam a utilização de chapas mais finas, diminuindo o peso final do carro, sem comprometimento da segurança dos passageiros.

Um dos processos amplamente empregado para a fabricação de peças estruturais é o de estampagem a quente, em que são utilizados aços com alta temperabilidade que são conformados em altas temperaturas e passam por um processo de têmpera, possibilitando alcançar resistências acima de 1500 MPa (SHOME, 2015). Neste contexto, o 38MnB5 é um aço desenvolvido especificamente para estampagem a quente, com a premissa de alcançar até 2000 MPa de resistência a ruptura dependendo das condições de processamento. No entanto, possuir um alto nível de resistência não é condição suficiente para a seleção de um aço aplicado à produção de peças estruturais automobilísticas; há a necessidade de propriedades adicionais tais como homogeneidade microestrutural e soldabilidade. Em particular, a soldabilidade é uma propriedade fundamental, visto que a soldagem por resistência elétrica, processo em que a união das chapas ocorre a partir de aquecimento por efeito Joule, é amplamente utilizada na junção das peças estruturais com o objetivo de criar a carroceria do automóvel.

Assim, como o 38MnB5 é um aço recentemente desenvolvido, o estudo a respeito da soldabilidade deste aço a partir de soldagem por resistência elétrica torna-se um tópico de alta relevância para sua aplicação na indústria automobilística. Dessa forma, este trabalho tem como objetivos principais:

- i. Avaliar a soldabilidade do aço 38MnB5 estampado a quente pelo processo de soldagem a resistência elétrica;
- ii. Definir a corrente elétrica que proporcione uma solda com tamanho acima do mínimo especificado;
- iii. Realizar a caracterização microestrutural e a análise das propriedades mecânicas do 38MnB5 após o processamento em estampagem a

quente e após o processo de soldagem por resistência elétrica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 AÇOS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Aços avançados de alta resistência (AHSS – *Advanced High Strength Steels*) e aços de ultra-alta resistência (UHSS – *Ultra-high Strength Steels*) são amplamente investigados para a área de aços estruturais. Isso porque, esses aços possuem excelentes propriedades mecânicas, como um elevado limite de resistência que pode alcançar até 2000 MPa, produto das tecnologias de processamento termomecânico existentes atualmente, que proporcionam um grande endurecimento por tratamento térmico (SHOME, 2015).

Para a indústria automobilística, esses aços são uma alternativa a diminuição de peso de componente estruturais da carroceria, permitindo que essas peças estruturais sejam fabricadas com menores espessuras, mantendo uma elevada resistência mecânica e, o mais importante, sem comprometer a segurança veicular. As principais aplicações são vistas em: Pilar A, B e C (*A pillar, B pillar, C pillar*), viga transversal do teto (*roof rails, roof bow*) e barra de proteção de porta (*door beam*). (SHOME, 2015).

Essas peças fazem parte da categoria de peças estruturais automotivas (Figura 1) que possuem como objetivo dar a estrutura de sustentação do automóvel além de promover a segurança dos passageiros. Ao serem solicitadas em um impacto, essas peças agem de acordo com a sua função (que pode depender do local do carro em que ela se encontra), com intuito de absorver a energia do choque em forma de deformação ou resistir a deformação para proteger o passageiro. As peças estruturais que costumam compor as partes frontal e traseira do automóvel possuem espaço para que a deformação absorva o impacto, minimizando o choque. Já as peças estruturais laterais não possuem tanto espaço para deformar, necessitando uma resistência elevada para proteger o passageiro em caso de uma batida lateral, podendo possuir tecnologias que possibilitam uma deformação direcionada para uma região em que o passageiro não se encontra.

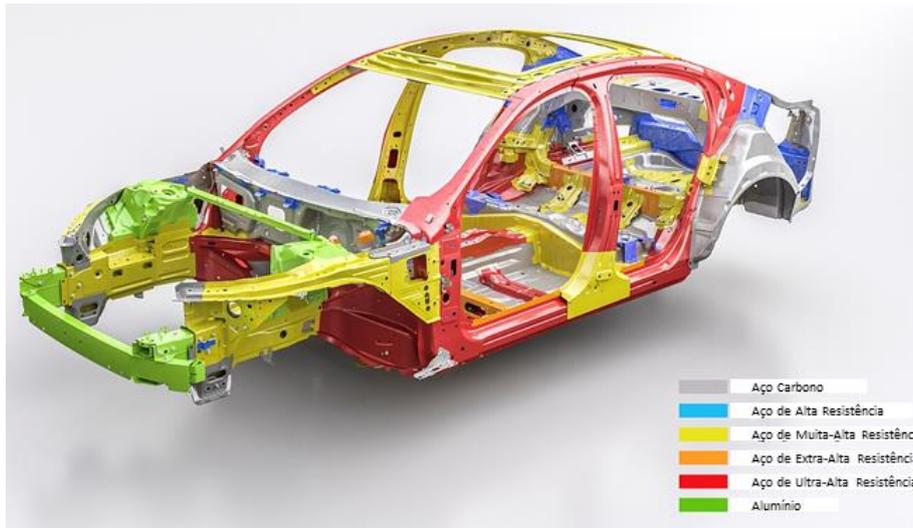


Figura 1: Componentes estruturais automotivos destacados de acordo com o tipo de aço geralmente utilizado. A Pillar, B Pillar e C Pillar demonstrados em vermelho (aço de ultra-alta resistência) (Fonte: © Volvo Cars).

Os AHSS mais comuns aplicados nessa indústria são os Dual-Phase (DP), os Martensíticos (MS), os *Transformation-Induced Plasticity* (TRIP) (SHOME, 2015) e os *Press Hardenable Steels* (PHS), que são tipos de aços martensíticos tendo como principal aplicação a prensagem a quente. Esses aços possuem diferentes microestruturas, o que proporciona propriedades mecânicas variadas, que podem ser ilustradas pelas Figura 2 e 3.

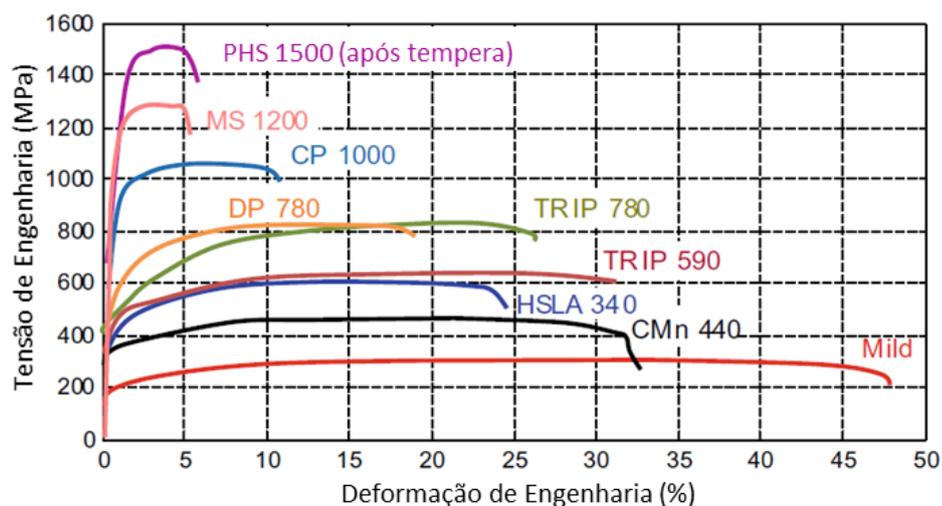


Figura 2: Comparação da curva tensão-deformação de aços utilizados na indústria automobilística (BILLUR, 2019).

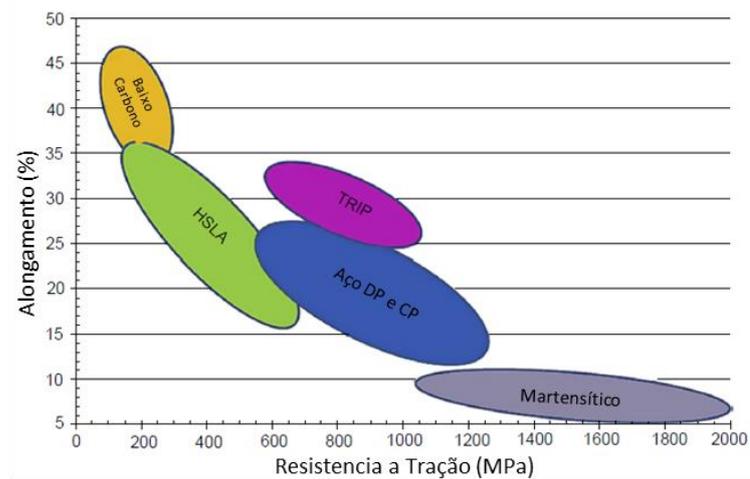


Figura 3: Relação entre Alongamento e Tensão de Ruptura de alguns aços AHSS (SHOME, 2015).

2.1.1. Aços Dual-Phase (DP)

Aços *Dual-Phase* possuem microestrutura composta por matriz ferrítica e ilhas de martensita (Figura 4). Essa microestrutura é formada a partir do aquecimento, até o campo austenita + ferrita, seguido de tempera para transformar a austenita em martensita. O limite de resistência desses aços varia de 500 a 1180 MPa, dependendo da fração de martensita presente na microestrutura. Portanto, quanto maior a fração volumétrica de martensita presente, maior será o limite de resistência (SHOME, 2015).

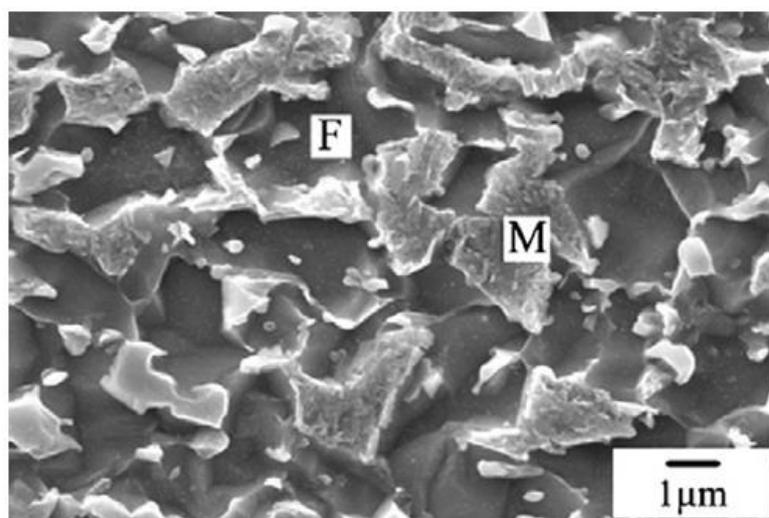


Figura 4: Microestrutura típica de um aço DP, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicando os grãos de ferrita (F) e martensita (M) (SHOME, 2015).

2.1.2. Aços Transformation-Induced Plasticity (TRIP)

Aços Transformation-Induced Plasticity (TRIP) apresentam microestrutura multifásica, contendo tipicamente: ferrita, bainita e austenita retida (Figura 5). Possuem um mecanismo de deformação que consiste na transformação da austenita retida em martensita a partir da deformação plástica do material. Isso permite que possuam resistência a ruptura similar aos aços DP (de 500 a 1000 MPa), mas com maiores percentuais de alongamento (de 10 a 30 %) (SHOME, 2015).

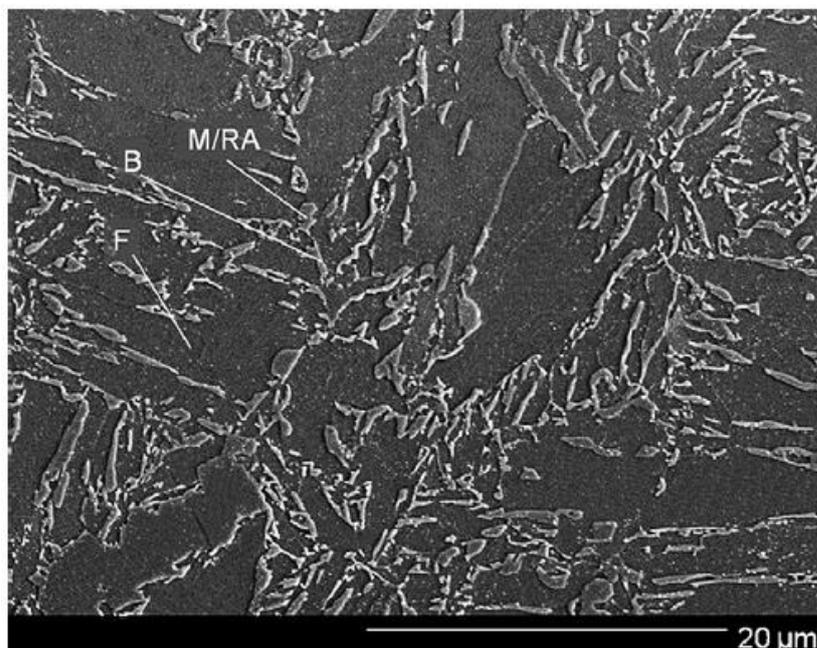


Figura 5: Microestrutura típica de um aço TRIP, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), indicando os grãos de bainita (B), martensita (M) e austenita retida (RA) na matriz ferrítica (SHOME, 2015).

2.1.3. Aços Martensíticos

Aços martensíticos possuem microestrutura predominantemente martensítica (Figura 6), resultado de um rápido resfriamento a partir da austenita, onde não ocorre tempo para a difusão do carbono. Esses aços geralmente possuem uma resistência a fratura entre 900 e 1600 MPa, podendo atingir resistências de até 2000 MPa dependendo do tratamento térmico e da composição química, onde a concentração de carbono tem maior influência. Possuem concentrações elevadas de manganês, a fim de aumentar a temperabilidade do aço, diminuindo o tempo

necessário para a formação de uma estrutura totalmente martensítica (SHOME, 2015).

Portanto, para que a martensita seja formada, o aço deve se encontrar em uma temperatura acima das curvas A_{c3} e A_{cM} , onde a temperatura A_{c3} corresponde a temperatura de transformação completa da ferrita em austenita e a temperatura A_{cM} corresponde a temperatura de transformação da cementita em austenita, como é possível observar no diagrama de fases da Figura 7. Em seguida, é necessário um resfriamento rápido de modo a alcançar a temperatura M_s , temperatura de início da transformação martensítica, chegando até a temperatura M_f , temperatura de fim da transformação martensítica, assim concluindo com 100 % da transformação de fase.

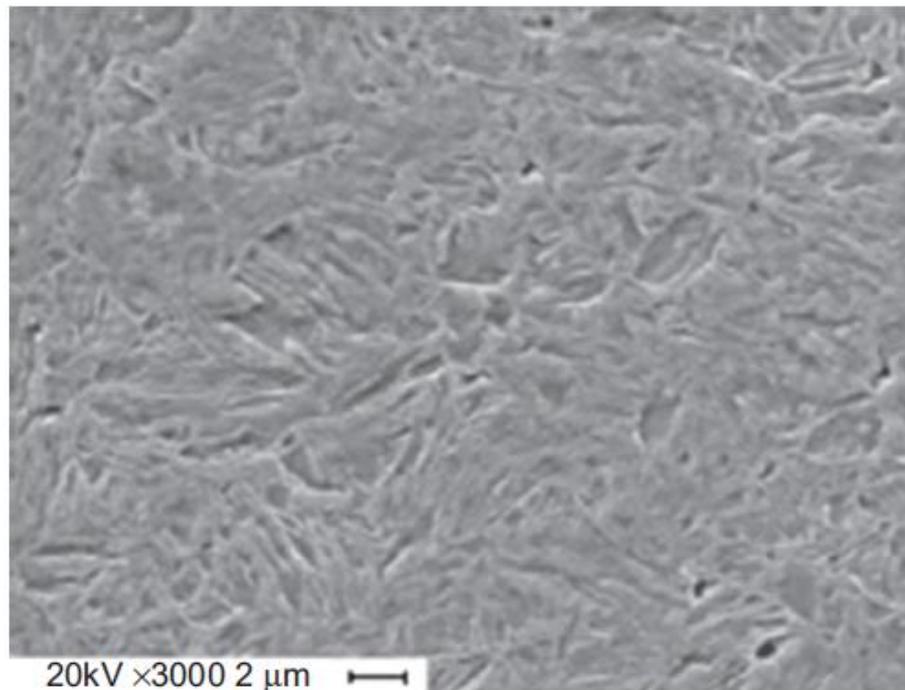


Figura 6: Imagem de microestrutura típica Martensítica, obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) (SHOME, 2015).

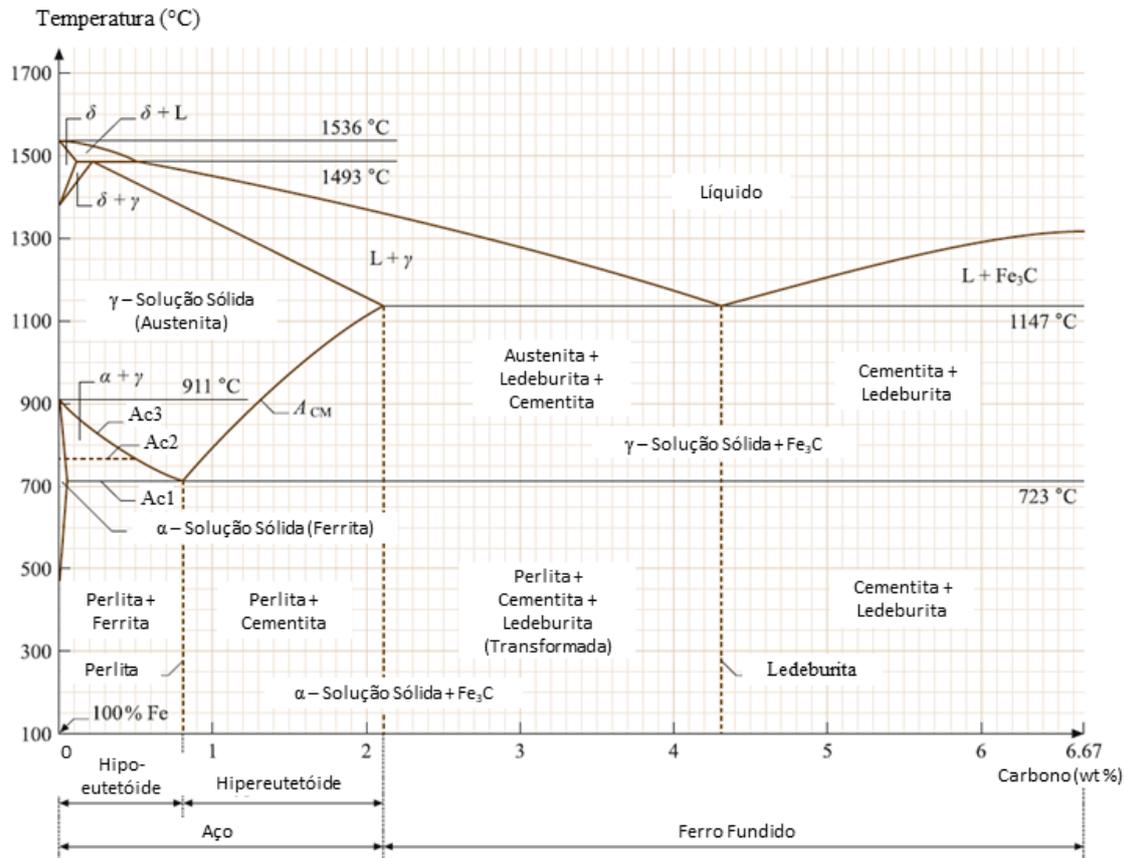


Figura 7: Diagrama de fases Fe-C (BILLUR, 2019).

Devido à elevada resistência mecânica e baixa ductilidade, aços martensíticos apresentam reduzida conformabilidade sendo inviáveis para estampagem a frio. Para utilização de aços com esse nível de resistência em peças estampadas, adota-se o processo de estampagem a quente. Os aços para aplicação nesse processo, com baixas concentrações de boro (de 0,002 a 0,005 %), já garantem que a transformação martensítica ocorra durante o resfriamento do aço da ferramenta de estampagem. Dessa forma, no processo de estampagem a quente, é possível a fabricação de peças com geometrias complexas e microestrutura majoritariamente martensítica, uma vez que o aço é estampado no estado austenítico em elevadas temperaturas, onde a plasticidade é maior que na temperatura ambiente. Na Figura 8 são apresentadas as curvas tensão-deformação onde nota-se a diferença das propriedades mecânicas, desse grupo de materiais, antes e depois do processo de estampagem a quente, comparando material temperado ao não temperado.

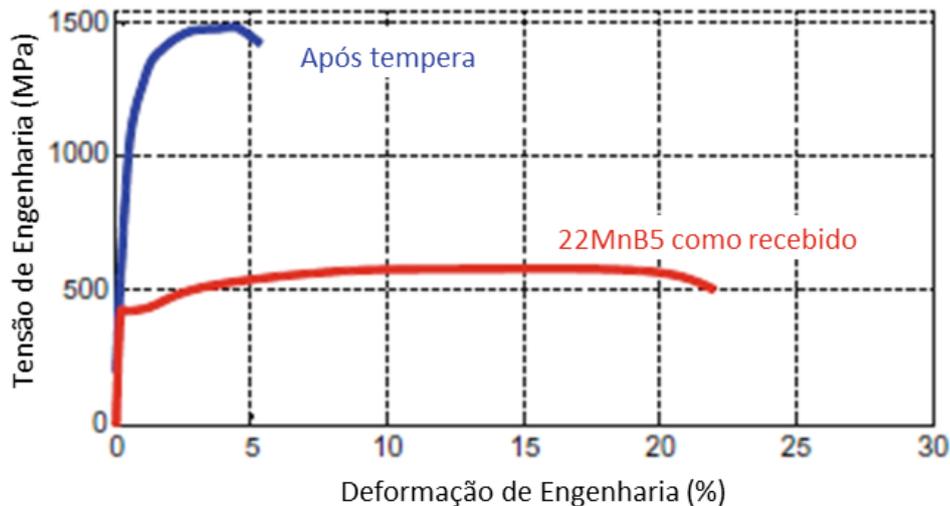


Figura 8: Curva tensão deformação do aço 22Mn5B, em condições antes (curva vermelho) e depois (curva azul) da têmpera (BILLUR, 2019).

Os aços de estampagem a quente por serem submetidos a altas temperaturas no processo de estampagem, geralmente possuem revestimento, que evita a formação de óxidos e a descarbonetação do material. Caso seja utilizado um aço sem revestimento, é necessária a utilização de atmosfera inerte (Nitrogênio), para que seja minimizado esses efeitos não desejados. No entanto, aços contendo revestimento podem apresentar problemas quando soldados, como a criação de defeitos e a dificuldade de união das chapas.

2.1.3.1. Aço 22MnB5

O aço 22MnB5 possui uma composição química composta de 0,22 % de carbono, 1,18 % de manganês, e 0,002 % de boro. Ele é um aço tipicamente utilizado em estampagem a quente por sua elevada resistência a ruptura após a tempera além da excelente temperabilidade e boa soldabilidade (BILLUR, 2019).

Com o aumento do teor de carbono no aço, ocorre um aumento da dureza e resistência mecânica, mas uma diminuição da ductilidade e soldabilidade. O carbono também influencia a transformação de fase do aço, de modo a diminuir a temperatura de começo da transformação martensítica, como é visualizado na Figura 9 (BILLUR, 2019).

O manganês também possui efeitos no aço semelhantes ao carbono como o aumento da dureza e resistência mecânica e diminuição da ductilidade e soldabilidade, no entanto ele também é usado como um desoxidante. A presença do manganês também aumenta o endurecimento do aço, mas em concentrações acima de 2 % pode causar problemas de distorção e trincas após a tempera. O Mn diminui a temperatura de austenitização e a temperatura de começo da transformação martensítica (Figura 9), apesar de não ser tão eficaz como o carbono. Por fim, em aços de baixo carbono, o manganês retarda a formação de bainita, o que beneficia os processos que possuem como objetivo a obtenção de uma microestrutura 100 % martensítica (BILLUR, 2019).

Elementos como Ti, Al, V, Zr e B proporcionam um endurecimento do aço por meio da formação de carbeto. O boro é o mais efetivo desses elementos, necessitando de concentrações pequenas (0,001 a 0,003 %) para que o efeito seja efetivo. Além disso, o boro aumenta a temperabilidade do aço por meio do atraso da formação de ferrita e perlita (Figura 9) (BILLUR, 2019).

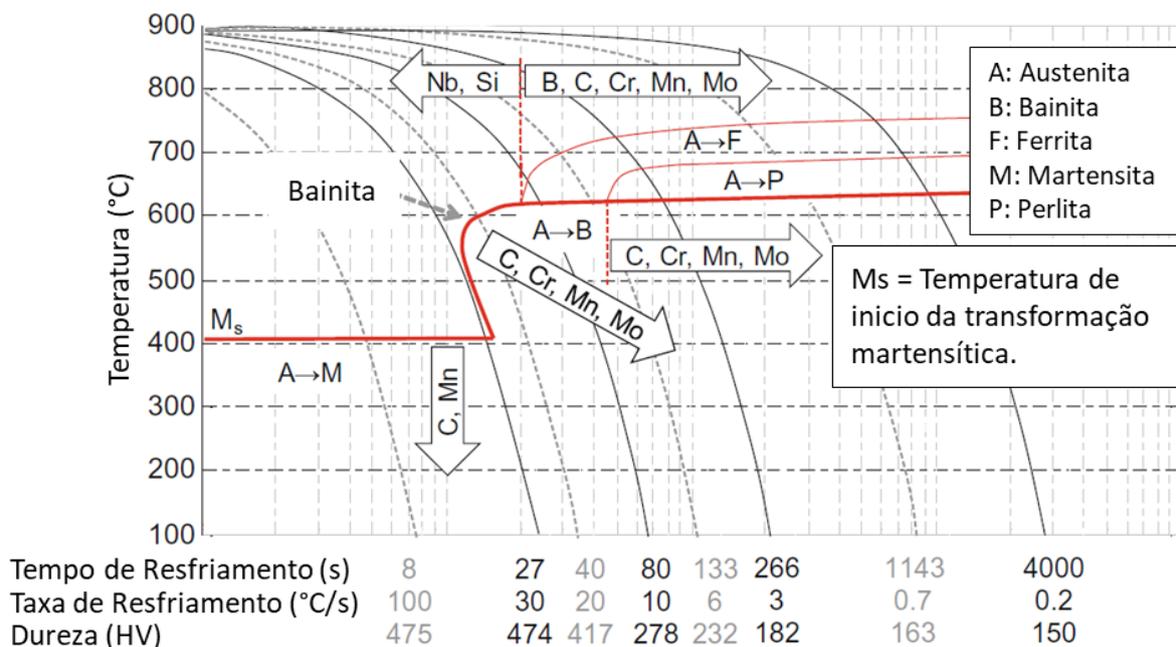


Figura 9: Diagrama CCT (Transformações a Resfriamento Contínuo) do aço 22MnB5 e os efeitos dos elementos de liga (BILLUR, 2019).

2.2. ESTAMPAGEM A QUENTE (*HOT STAMPING OU HOT FORMING*)

Estampagem a quente é uma tecnologia que permite a conformação de aços de ultra alta resistência em geometrias complexas. Isso é possível a partir da prensagem do aço em uma temperatura em torno de 950 °C contendo uma microestrutura austenítica que ocorre simultaneamente ao resfriamento, proporcionando uma tempera no material. Assim, quando o material sai do forno, ele começa a resfriar ao ar, e quando entra em contato com a ferramenta para começar a conformação, ocorre uma intensificação da taxa de resfriamento por conta desse contato. Esse processo de tempera eleva a resistência a ruptura desse material para um campo entre 1000 e 2000 MPa. Na Figura 10 são ilustradas as modificações que ocorrem no material dentro do processo de estampagem a quente, enfatizando a mudança de alongamento e resistência a ruptura em cada parte do processo.

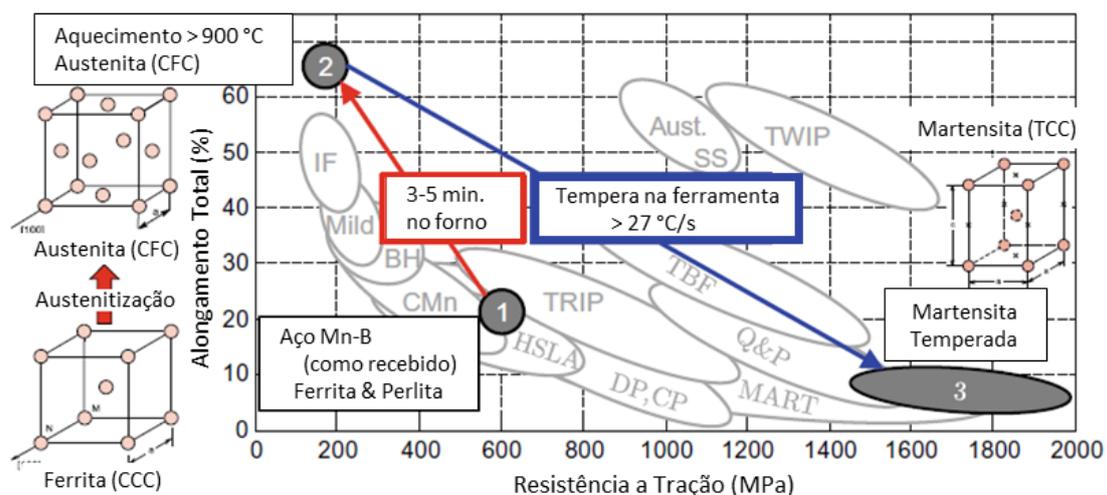


Figura 10: Modificações das microestruturas dentro do processo de conformação a quente. 1) Material em sua fase inicial com microestrutura composta por ferrita, como recebido; 2) Material na condição austenítica, após aquecimento a temperaturas acima de Ac3; 3) Material após estampagem e têmpera dentro da ferramenta, microestrutura martensítica (BILLUR, 2019).

O processo produtivo inicia com o corte das bobinas de aço em *blanks* figurados. Em seguida esses *blanks* são aquecidos acima da temperatura de austenitização (Ac3), em forno a gás com atmosfera controlada, permanecendo sob aquecimento até a homogeneização do material. Por fim, os *blanks* são rapidamente transferidas para a ferramenta, para minimizar o efeito do contato com o ar, e

estampados ainda quentes na geometria desejada. Assim, ainda dentro da ferramenta a peça é resfriada simultaneamente com a deformação imposta pela prensa, a partir de um sistema de resfriamento interno da ferramenta, atingindo a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas desejadas. As etapas desse processo, com suas respectivas temperaturas, estão esquematizadas na Figura 11.

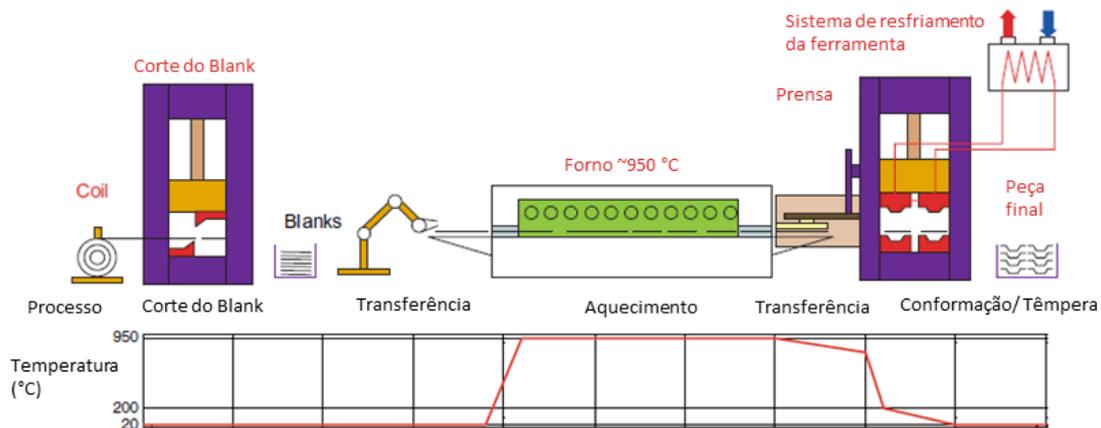


Figura 11: Esquema do processo de estampagem a quente, convencional e direto, e a respectiva temperatura aproximada atingida em cada etapa. (BILLUR, 2019).

Esse processo de conformação necessita de menores cargas na prensa, comparado a estampagem a frio, pelo fato de o material ser mais facilmente conformado, por se encontrar em seu estado austenítico. Conseqüentemente, também apresenta um menor nível de *springback* (BILLUR, 2019), por se tratar de uma conformação a quente com resfriamento abaixo de M_f dentro da ferramenta, enquanto a prensa se encontra fechada. O *springback* pode ser definido como um efeito de recuperação elástica que ocorre após a retirada de restrições pós conformação, proporcionando mudanças indesejáveis na geometria da chapa conformada (SILVA, 2012).

Apesar da necessidade de utilização de um forno para aquecer as peças a serem conformadas, o menor gasto energético para a conformação das peças e a possibilidade de conformação de peças complexas compensa o alto consumo de energia gerado para manter a temperatura na faixa de austenitização dentro do forno (em torno de 930 °C).

Para que o material atinja austenitização completa de sua microestrutura, é necessário que este passe um determinado período específico no forno, para homogeneizar a temperatura do *blank*. Esse tempo de austenitização depende principalmente da espessura do material a ser estampado. No entanto, aços que possuem revestimento, antes do período austenítico de homogeneização, necessitam passar por um período de encharque, a temperaturas abaixo de Ac1, a fim de estabilizar o revestimento. Já os aços sem revestimento, não precisam desse período de encharque, o que diminui o tempo de ciclo do forno.

2.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

A soldagem a ponto por resistência elétrica consiste em um processo de união de chapas por meio da passagem de uma corrente elétrica entre dois eletrodos. Proporciona um aquecimento localizado do material, a partir do efeito joule, causado pela resistência à passagem da corrente elétrica do material.

Geralmente, são utilizados dois eletrodos cilíndricos que transmitem a corrente elétrica através das chapas sobrepostas a serem soldadas, enquanto é aplicada uma pressão perpendicular às chapas. A corrente entre os eletrodos, que passa pelo material, provoca o aquecimento localizado, por efeito Joule. O material agora em elevada temperatura possui maior plasticidade, o que permite que ocorra deformação plástica no material causada pela tensão aplicada pelos eletrodos. Além do aumento de plasticidade, ocorre uma fusão localizada na interface entre as chapas, que se mantém no local ocorrido por conta da pressão aplicada localmente. Dessa forma, a fusão das duas chapas juntamente com a deformação plástica de cada uma delas, forma um ponto de solda, que é ilustrado pela Figura 12. Logo após o resfriamento dos eletrodos, que conseqüentemente causa o resfriamento do local da solda, ocorre a solidificação da região fundida (MODENESI, 2000).

O rápido ciclo de aquecimento e resfriamento do processo de soldagem a ponto por resistência provoca um gradiente de temperatura na região da solda. Dessa forma, após o resfriamento, é possível distinguir três zonas formadas a partir desse processo de soldagem, que podem ser visualizadas na Figura 13. A primeira é a Zona de Fusão (ZF), onde ocorre uma fusão do metal seguida de um resfriamento rápido. O tamanho da Zona Fundida determina a área de junção das placas, e é controlada pela quantidade de energia fornecida na soldagem. A

segunda zona é a Zona Termicamente Afetada (ZTA), onde não ocorre fusão do metal, mas o calor proveniente do processo de soldagem proporciona modificações microestruturais, que variam com a distância em relação a Zona Fundida dependendo do material base. Por fim, temos a zona denominada Metal Base (MB), que consiste em toda a parte da chapa que não é afetada pelo processo de soldagem, apresentando uma microestrutura sem modificações provenientes do processo (MANLADAN, 2015).

Após o processo de soldagem por resistência elétrica, é possível observar variações de dureza entre as zonas citadas anteriormente. Essa variação é proveniente do ciclo térmico causado no material e depende da composição química e da microestrutura inicial do metal base (MB), junto a temperatura e a taxa de resfriamento alcançadas no processo (MANLADAN, 2015).

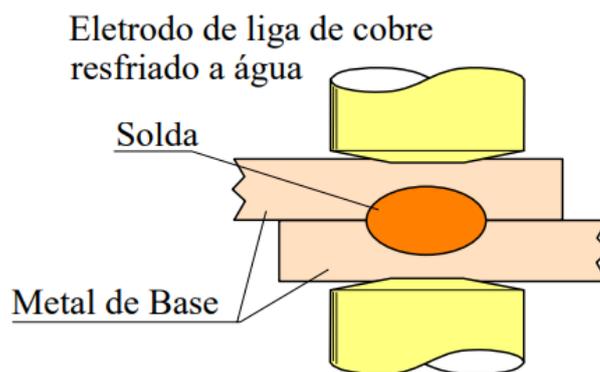


Figura 12: Formação da solda no processo de soldagem por resistência elétrica (MODENESI, 2000).

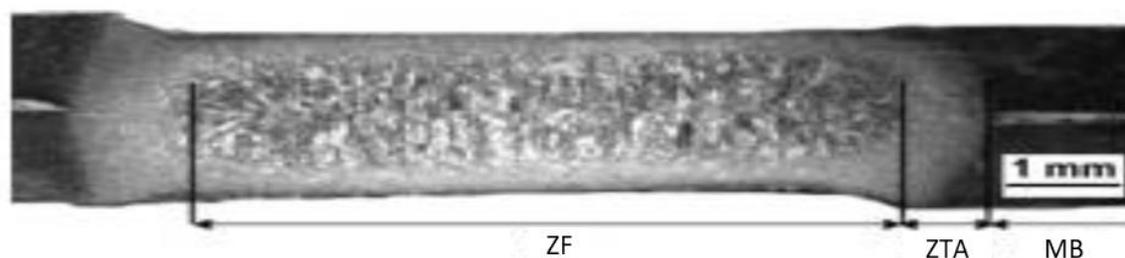


Figura 13: Microestrutura típica de uma solda por resistência elétrica em um aço de baixo carbono. (MANLADAN, 2015)

O comportamento mecânico das juntas soldadas por solda a resistência

elétrica geralmente é medido por meio de dois testes, o teste de cisalhamento (*tensile-shear*), e o teste de arrancamento (*cross-tension*) (MANLADAN, 2015). O teste de cisalhamento consiste em um teste de tração em uma amostra composta de duas chapas soldadas entre si por um ponto de solda, onde cada chapa possui um dimensões especificadas pela norma ISO 14273. Nesse teste é medido o valor da tensão máxima suportada pela junta quando solicitada por forças paralelas a chapa em sentidos opostos. Nas Figuras 14 e 15 podemos visualizar a geometria desse corpo de prova pós soldagem e o sentido de aplicação das forças no ensaio mecânico.

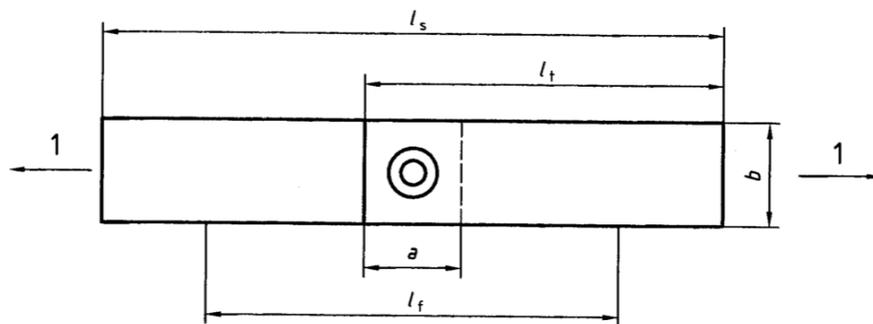


Figura 14: Dimensões de amostras para realização de teste de cisalhamento segundo a norma ISO 14273 (ISO 14273, 2002).

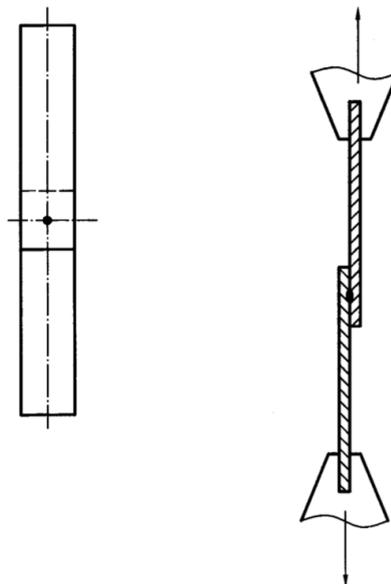


Figura 15: Disposição das amostras na realização do teste de cisalhamento, junto a direção de aplicação das forças segundo a norma ISO 14273 (ISO 14273, 2002).

O teste de arranchamento consiste novamente em um teste de tração, mas agora em um diferente sentido de aplicação da força aplicada, que segue a norma ISO 14272. Neste teste é medido o valor da tensão máxima suportada pela junta quando solicitada por uma força perpendicular a chapa em sentidos opostos. A Figura 16 mostra a geometria da amostra pós soldagem, em que o sentido de aplicação das forças trativas do ensaio são perpendiculares a superfície da chapa.

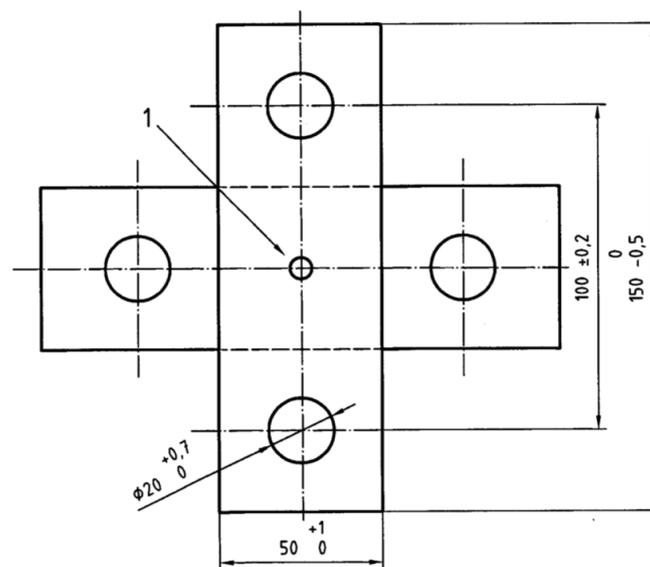


Figura 16: Dimensões de amostras para realização de teste de arranchamento segundo a norma ISO 14272 (ISO 14272, 2000).

Um modo qualitativo de se medir a resistência mecânica dessas juntas é a partir do modo de falha após esses ensaios mecânicos, que também é capaz de indicar a capacidade de absorção de energia e de suporte de carga (MANLADAN, 2015). Para esse processo de soldagem, existem três modos de falha: A fratura interfacial (*interfacial fracture* IF), a fratura interfacial parcial (*partial interfacial fracture* PIF) e a fratura por arrancamento (*pullout failure* PF).

O modo de falha de fratura interfacial consiste em uma fratura geralmente iniciada a partir de um entalhe em uma das extremidades da lente, na região entre as duas placas soldadas. Essa falha ocorre de modo que a trinca propaga pelo meio da lente soldada, separando as duas metades da lente, como é possível visualizar no esquema da Figura 17 (a). Esse modo de falha possui pequenas deformações

plásticas.

O modo de falha de fratura interfacial parcial começa igual ao modo de falha de fratura interfacial, mas no meio da propagação da trinca pela região central da lente soldada, a trinca muda de direção, propagando até a superfície de uma das chapas. Dessa forma, ocorre a remoção de parte da lente soldada como é possível visualizar na Figura 17 (b).

O modo de falha por arrancamento consiste em uma fratura que ocorre ao redor da lente soldada, de modo a arrancar a lente de uma das chapas (Figura 17 (c)). Essa fratura pode ser iniciada tanto no metal base, quanto na zona termicamente afetada, dependendo da microestrutura de cada região. A fratura por arrancamento apresenta uma maior absorção de energia e uma maior deformação quando comparada com o modo de falha de fratura interfacial, fazendo com que seja o modo de falha preferível nos processos industriais. Dessa forma, os parâmetros de soldagem a ponto, por resistência elétrica, geralmente são otimizados a produzirem este modo de falha.

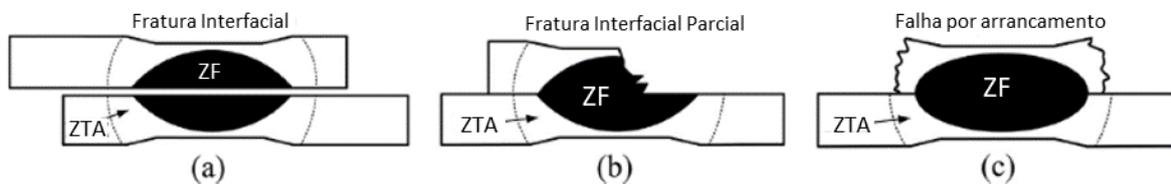


Figura 17: Tipos de mecanismos de fratura encontrados no processo de soldagem por resistência elétrica. (a) Mecanismo de Fratura Interfacial. (b) Mecanismo de Fratura Interfacial Parcial. (c) Mecanismo de Falha por arrancamento. (MODENESI, 2000)

Em pontos de solda por resistência elétrica, a resistência mecânica da junta é controlada pelo tamanho da lente soldada de modo que quanto maior a lente, maior será a resistência mecânica da junta. Isso ocorre por se tratar de uma maior área de junção entre as duas chapas soldadas. Além disso, o tamanho da lente também possui influência no modo de falha, de modo a favorecer a fratura interfacial para pequenos tamanhos de lente e favorecer a fratura por arrancamento em grandes tamanhos de lente (MANLADAN, 2015). Dessa maneira, para que a lente seja aprovada, segundo boas práticas industriais, a mesma deve ser maior que $4\sqrt{t}$, onde t é a espessura da chapa utilizada no processo de soldagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

O material utilizado foi o aço ligado ao boro de grau 38MnB5, com composição química especificada apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química especificada para o grau 38MnB5 (Fonte: Usina fornecedora).

Composição Química								
	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% B	% Nb
38MnB5	0,37	0,80	1,50	0,025	0,005	0,01	0,005	0,10
Especificação	Max	Max	Max	Max	Max	Min	Max	Max

3.2. PRODUÇÃO DA PEÇA

Para a realização deste trabalho, foram produzidas peças de barra de proteção de porta (*door beam*) com uma geometria já produzida na Benteler, feitas com o material 38MnB5 com espessura de 1,2 mm.

O primeiro passo de produção dessa peça foi o corte em *blanks* figurados. Após estarem em um formato específico para a estampagem, eles foram aquecidos em um forno de esteira. O aquecimento ocorreu em formato de rampa, de modo a variar de 880 a 930 °C por 7 minutos. Em seguida os *blanks* aquecidos foram retirados do forno e colocados na ferramenta de estampagem a quente, onde ocorre a estampagem da peça e o resfriamento do material, de modo a proporcionar uma tempera dentro da ferramenta.

Com a peça produzida, metade delas foram submetidas a um processo de jateamento abrasivo. Essas amostras jateadas foram nomeadas de Peças Jateadas, enquanto as peças que não passaram por esse processo foram nomeadas de Peças Oxidadas. Em seguida foram retirados, de ambas as peças, corpos de prova de formato retangular para serem utilizados nos testes de cisalhamento, seguindo a norma ISO 14273, com dimensões de 105x30 mm e amostras de tração em formato de gravatas das posições sinalizadas na Figura 18.

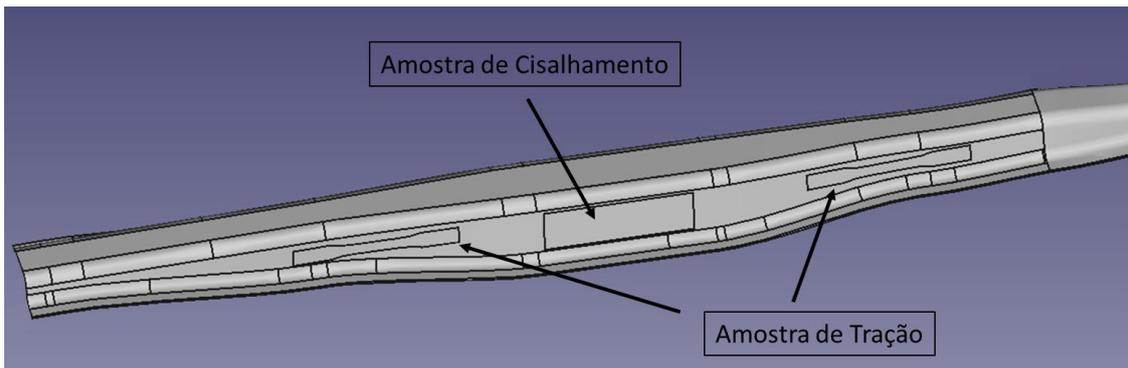


Figura 18: Posição das amostras retiradas da barra de proteção de porta produzida com o aço 38MnB5. (Fonte: Próprio autor)

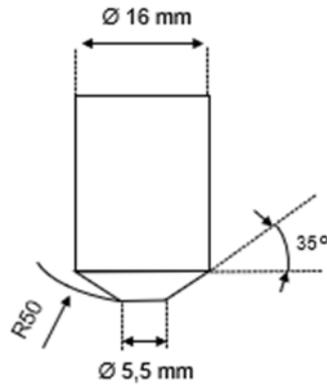
Os corpos de prova foram retirados utilizando um equipamento de laser, de modo a proporcionar uma ótima repetibilidade dimensional e acabamento. A influência do laser na microestrutura foi medida e considerada insignificante para as análises desse trabalho.

Do restante das peças produzidas, foram cortadas amostras com geometrias complexas não padronizadas utilizando o corte por plasma ou corte por fita. Essas amostras em questão foram utilizadas para os testes de corrente elétrica do processo de soldagem por resistência elétrica.

3.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Para esse trabalho, os parâmetros de soldagem a ponto por resistência elétrica foram baseados em estudos preliminares, realizados na Benteler da Alemanha em um aço com grande similaridade ao 38MnB5. Dessa forma, os parâmetros de soldagem utilizados para esse trabalho são:

- Eletrodo de cobre, com tamanho de 16 mm de base e 5,5 mm de diâmetro da ponta (Figura 19);
- Pulso único;
- Força do eletrodo de 4,5 kN;
- Pré-pressão (*Squeeze time*) de 2000 ms;
- Tempo de pós-solda (*Hold time*) de 250 ms;
- Tempo de soldagem (*Weld time*) de 340 ms.



Geometria do Eletrodo

Figura 19: Dimensões do eletrodo de cobre utilizado no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica. (Fonte: Próprio autor)

Para a determinação da corrente a ser utilizada no trabalho, foram realizados experimentos para determinar a corrente ideal a ser utilizada nesse aço junto a esses parâmetros apresentados. Para isso, foram soldadas 44 amostras, com correntes de 6,7 kA, 7,5 kA, 8 kA, 8,2 kA, 8,4 kA, 8,6 kA, 8,8 kA e 9 kA. Nesses experimentos, foram medidos os tamanhos das lentes de solda utilizando um equipamento ultrassom para determinar a corrente que proporciona o maior e mais consistente tamanho de lente de solda.

3.4. TESTE DE TRAÇÃO E CISALHAMENTO

Foram realizados testes de tração no material como recebido e no material após estampagem a quente. Este último, utilizando gravatas de tamanho A30 (DBL 4093, 2020) e foram ensaiados utilizando um equipamento modelo Instron Serie 4485.

Também foram realizados no mesmo equipamento de ensaios, os testes de cisalhamento das amostras soldadas, de modo a seguir a norma ISO 14273.

3.5. MICRODUREZA

Nesse trabalho foram realizados perfis de Microdureza Vickers HV1 (1 kgf) na seção transversal da solda, passando pelas regiões do metal base, da zona termicamente afetada e da zona fundida. Esses perfis foram realizados em sentido diagonal, começando pela chapa superior e terminando na chapa inferior, passando

pela zona fundida. Foi utilizado o Micro-durometro DuraScan para todas as análises de microdureza realizadas.

3.6. ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Nesse trabalho foram realizadas análises da microestrutura do material base como recebido, do material pós processo de estampagem a quente, após jateamento abrasivo e após processo de soldagem por resistência elétrica.

Para todas as análises microestruturais, as amostras foram cortadas na transversal com uma cortadeira *Cut Off*, embutidas, lixadas e polidas em pasta de diamante 3 μm . Foram atacadas com Nital 20 % por aproximadamente 5 segundos e em seguida polidas para limpeza final da superfície.

As amostras do material base como recebido tiveram sua microestrutura analisada por meio da microscopia óptica (MO). Para o material após processo de conformação e após jateamento abrasivo foram feitas análises via MO para determinação da microestrutura e do tamanho da camada descarbonatada e oxidada existente após cada processo.

As amostras pós processo de soldagem foram analisadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para determinação da microestrutura de cada região da solda.

As análises por MO foram realizadas a partir de microscópio BX60M da marca Olympus utilizando uma câmera Olympus UC30. Já as análises por MEV foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UFSCar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AÇO 38MnB5

Foram realizados ensaios mecânicos no material base, como recebido, e no material após o processamento por estampagem a quente, em condições reais em grande escala. Os resultados das curvas realizadas podem ser visualizados na Figura 20, e trazem resultados esperados que demonstram conformidade do material recebido, com limite de escoamento de 426 MPa e limite de resistência de 568 MPa. No entanto, os resultados apresentados das amostras após processamento, apresentam valores de limite de escoamento de 1285 MPa e limite de resistência de 1674 MPa, inferiores aos previstos para este grau.

Esses valores inferiores provavelmente se devem ao fato de o processamento desse material, em grande escala, ter sido realizado em uma ferramenta já utilizada na produção de uma barra de proteção de porta que utiliza um material próximo (22MnB5), com parâmetros de processo que não se encontram otimizados para o 38MnB5. Uma suposição, é que a taxa de resfriamento dentro do ferramental, no processo de prensagem, não foi elevada o suficiente para atingir a microestrutura refinada necessária para alcançar os 2000 MPa de limite de resistência. Mas esse ponto, ainda precisa ser mais amplamente discutido e avaliado.

Ainda assim, os ensaios de soldabilidade foram realizados a fim de avaliar o comportamento desse novo *grade*, com composição química e comportamento mecânico diferentes de seu antecessor, o 22MnB5.

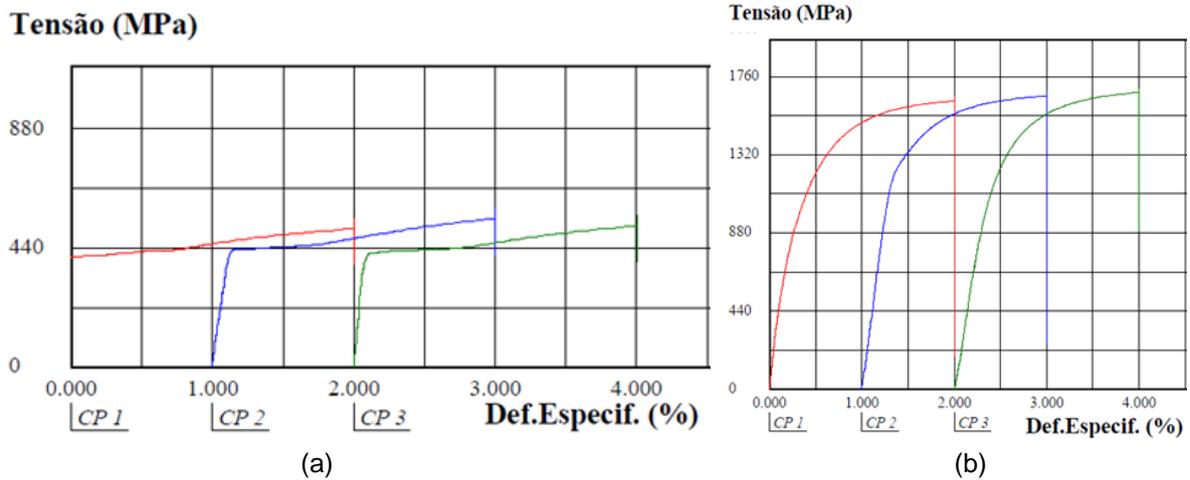


Figura 20: Curvas Tensão x Deformação do 38MnB5. (a) material como recebido; (b) material após estampagem a quente. (Fonte: Próprio autor)

4.2. MICROESTRUTURA DO AÇO 38MnB5

4.2.1. Material como recebido

O aço 38MnB5 é recebido da usina em forma de bobina com espessura de 1,2 mm, produzida a partir de laminação a frio seguida de processo de recozimento para alívio das tensões. Na Figura 21 podemos visualizar a microestrutura do material como recebido com uma matriz ferrítica contendo cementita esferoidizada bem distribuída, devido ao recozimento. É possível observar também, o sentido da laminação conforme a direção dos grãos ferríticos.

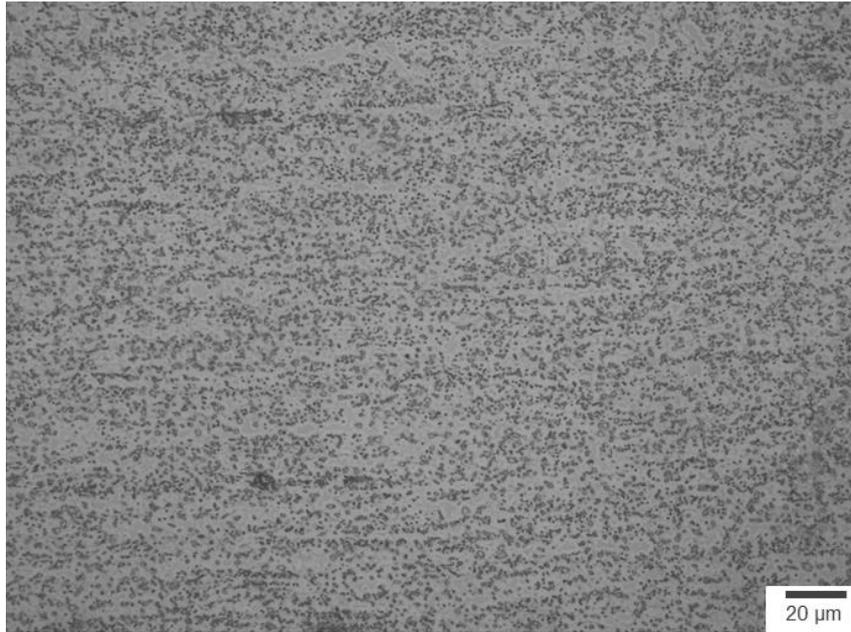


Figura 21: Microestrutura do Aço 38MnB5 como recebido pela usina. Microestrutura ferrítica com cementita esferoidizada. (Fonte: Próprio autor)

4.2.2. Material pós Estampagem a Quente

No processo de estampagem a quente, o material sofre uma total austenitização no forno, com temperatura em torno de 930 °C por 7 minutos. Em seguida, ele é transferido por meio de uma pinça mecânica, até a ferramenta de estampagem. Esse tempo de saída do forno até chegar na ferramenta ocorre em torno de 8 segundos, fazendo com que o material sofra um resfriamento ao ar em uma taxa de aproximadamente 25 °C/s. Além de um pré resfriamento, durante a transferência o material em contato com a atmosfera sofre descarbonetação e oxidação. Já na ferramenta ocorre o processo de estampagem, conformando a peça até a geometria desejada. Junto com a conformação, o material passa pela tempera, ocasionada pela ferramenta refrigerada, com uma taxa de resfriamento de aproximadamente 100 K/s. Assim, a peça é retirada da ferramenta em uma temperatura em torno de 180 °C, e termina de resfriar ao ar.

A partir do processo de estampagem a quente, o material que antes possuía microestrutura ferrítica com cementita esferoidizada passa a apresentar microestrutura predominantemente martensítica. Esta pode ser observada na Figura 22. Nessa microestrutura podemos visualizar aspectos microestruturais que levam a possibilidade da existência de bainita ou martensita revenida. Como explicado por

Taylor et al (TAYLOR, 2018), a distinção de martensita, martensita revenida e bainita é de difícil determinação, mas quando comparado com valores de dureza, que serão apresentados mais à frente nesse trabalho, é possível questionar a existência dessas fases. A hipótese que vai de acordo com a discussão presente no trabalho de Taylor et al (TAYLOR, 2018) é de que seria provável a presença de martensita auto revenida, por se tratar de um processo industrial que pode ter taxas de resfriamento menores que as ideais, onde essas menores taxas de resfriamento poderiam proporcionar um maior tempo para o auto revenimento da martensita ocorrer. Somado ao fato de o processo industrial e a ferramenta de estampagem utilizados, não terem sido desenvolvidos especificamente para esse novo grau de aço. Assim, tais fases podem ter sido formadas e conseqüentemente a resistência do material final diminuída.

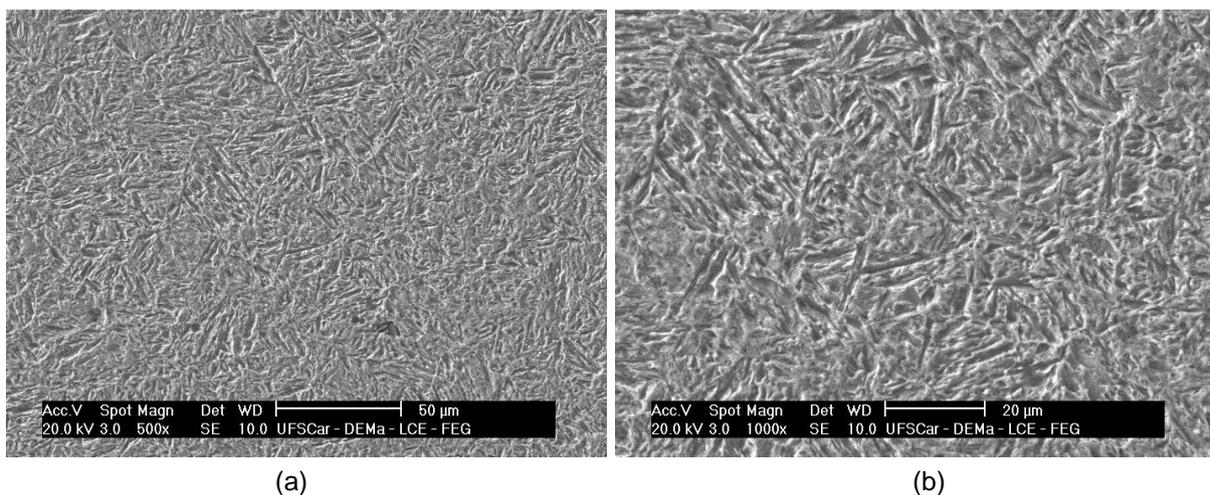


Figura 22: Microestrutura predominantemente martensítica do 38MnB5 após processo de estampagem a quente, obtidas a partir de MEV. (a) Microestrutura com aumento de 500x. (b) Microestrutura com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

Como mencionado, devido às altas temperaturas em que o processo ocorre somado à ausência de controle de atmosfera para essa produção experimental, era esperado que o material sofresse tanto oxidação quanto descarbonetação, que podem ser visualizadas na Figura 23. Na parte superior da chapa a descarbonetação foi de 0,02 mm e na parte inferior da chapa a descarbonetação foi de 0,05 mm. Apesar de esses serem valores comumente encontrados em processos de estampagem a quente utilizando aços não revestidos, posteriormente

será apresentado dados sobre a influência dessa oxidação e descarbonetação no processo de soldagem por resistência elétrica estudado nesse trabalho.

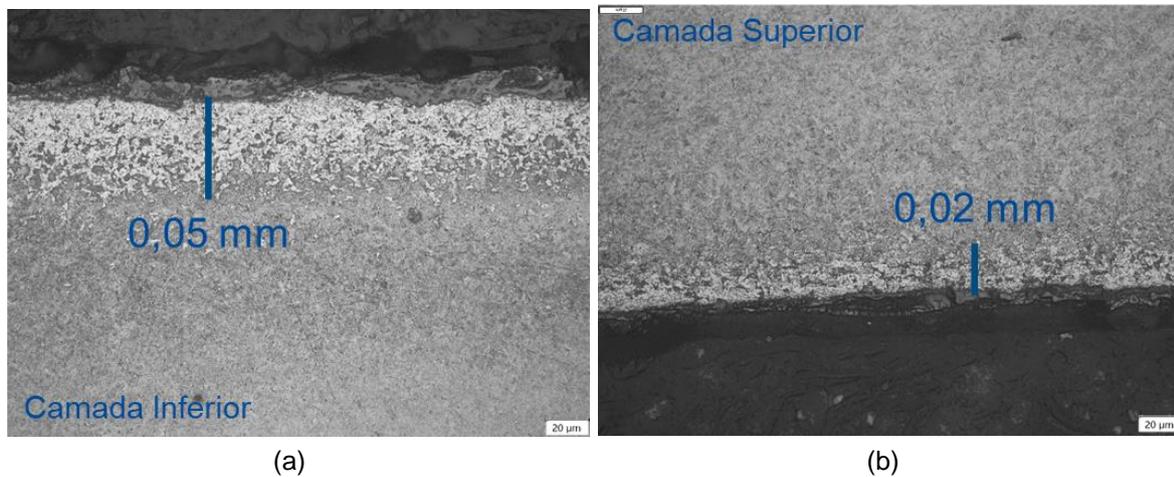


Figura 23: Camada descarbonetada e camada oxidada presente no aço 38MnB5 após processo de estampagem a quente, utilizando forno sem controle de oxigênio. (a) Parte inferior da chapa. (b) Parte superior da chapa. (Fonte: Próprio autor)

4.2.3. Material após Jateamento Abrasivo

Após a produção da peça conformada, algumas peças foram submetidas ao processo de Jateamento abrasivo, com o objetivo de retirar a camada de óxido formada no forno. Na Figura 24 podemos observar que a camada de óxido foi retirada, mas a camada descarbonetada permaneceu praticamente a mesma.

Vale ressaltar que geralmente as peças estruturais utilizadas na indústria automobilística quando feitas utilizando um aço não revestido, passam pelo processo de jateamento abrasivo para a retirada do oxido que se forma mesmo quando utilizado um forno com controle de oxigênio, uma vez que mesmo um rápido contato com a atmosfera, durante a transferência entre o forno e a ferramenta, é suficiente para formação da camada de óxido superficial.

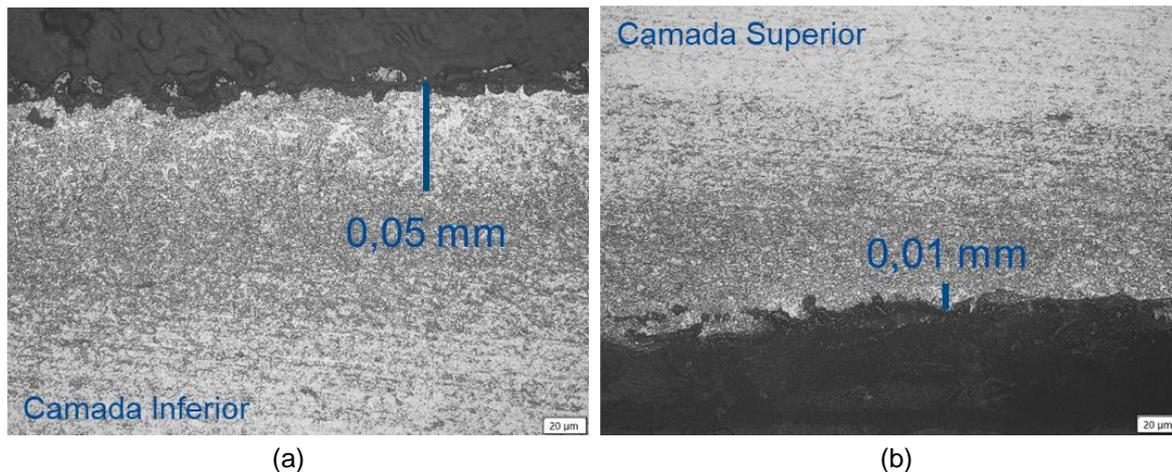


Figura 24: Camada descabonetada presente no aço 38MnB5 após processo de Jateamento Abrasivo. (a) Parte inferior da chapa. (b) Parte superior da chapa. (Fonte: Próprio autor)

4.3. SOLDAGEM A PONTO POR RESISTENCIA ELÉTRICA

4.3.1. Teste de Corrente Elétrica

A partir de estudos prévios em um aço similar ao 38MnB5 realizados pela Benteler da Alemanha, foi iniciado o estudo para determinação da corrente elétrica que proporciona o melhor resultado junto aos parâmetros previamente estabelecidos. Esse estudo começou com uma corrente elétrica de 6,7 kA, que corresponde ao valor da corrente média utilizada pelo aço similar, analisando em seguida uma corrente de 7,5 kA, correspondente a corrente máxima utilizada para o aço similar.

Para que uma solda a ponto seja aceitável, é necessário que ela tenha um diâmetro maior que $4\sqrt{t}$, onde t é a espessura da chapa utilizada. No caso desse trabalho, como a chapa utilizada tem uma espessura de 1,2 mm, o diâmetro mínimo aceitável deve ser de 4,4 mm.

Para a corrente de 6,7 kA, foram soldadas 8 amostras, sendo 4 amostras contendo óxido e 4 amostras sem óxido, que são as amostras que passaram pelo processo de jateamento abrasivo. Essas amostras obtiveram diâmetros de solda variando de 4 a 5,4 mm, como é possível observar na Figura 27. Ficando apenas um ponto de solda com diâmetro abaixo do mínimo especificado.

Para a corrente de 7,5 kA, foram soldadas 12 amostras, sendo 6 amostras oxidadas e 6 amostras jateadas como é possível visualizar na Figura 25. O diâmetro de solda dessas amostras variou entre 3,8 e 5,4 mm. Dessa forma, para essa

corrente, tivemos 2 pontos com diâmetro abaixo do especificado. Apesar de encontrar valores abaixo do especificado, uma explicação que pode contemplar esse acontecimento é o fato de a geometria das amostras utilizadas não ser totalmente plana, por terem sido retiradas de locais complexos da barra de proteção de porta, proporcionando amostras que não se encaixam perfeitamente. Dessa forma, é possível obter resultados que não seriam vistos em uma produção planejada.

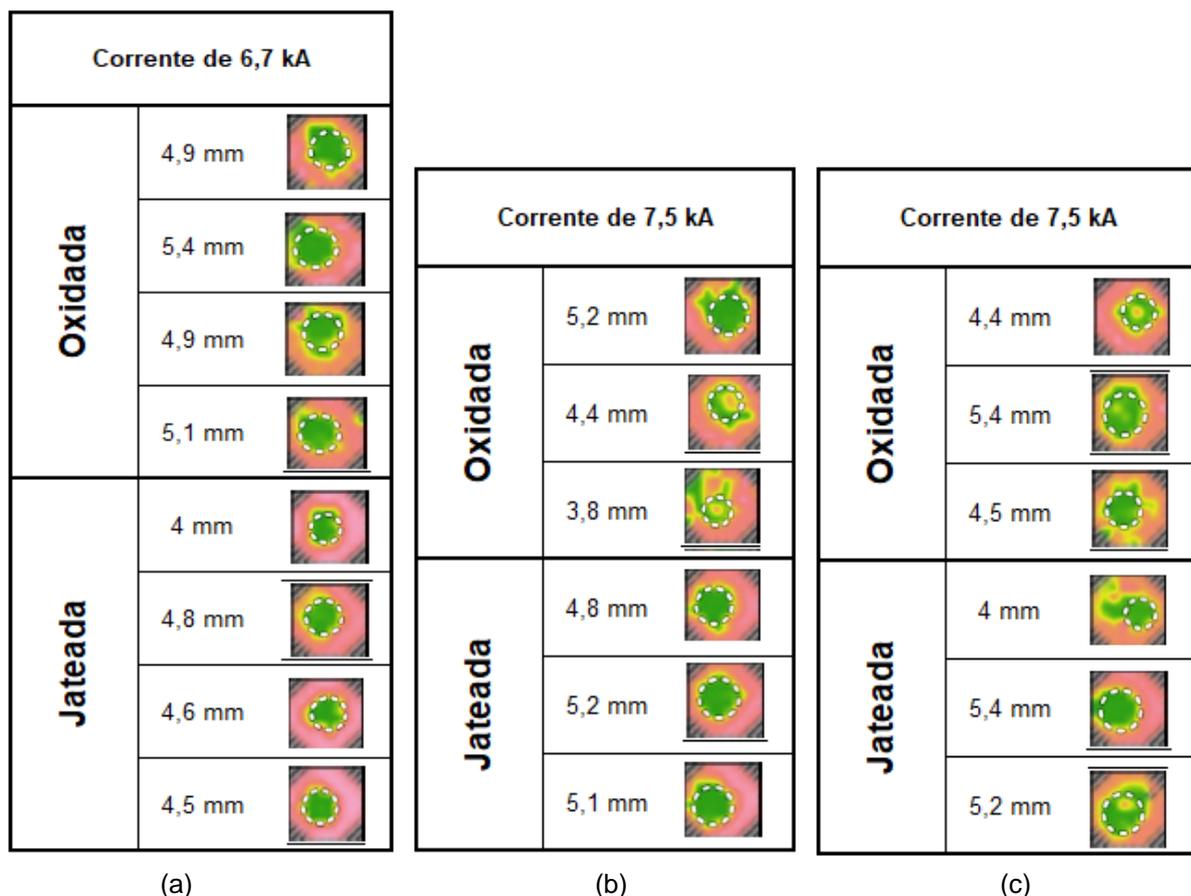


Figura 25: Diâmetro da lente da solda, medido por ultrassom de peças soldadas com corrente elétrica de: (a) 6,7kA. (b) 7,5 kA. (c) 7,5 kA. (Fonte: Próprio autor)

A partir desses resultados obtidos para essas duas correntes elétricas, foi decidido continuar o teste de corrente, pois esses valores não apresentaram resultados totalmente satisfatórios por apresentarem valores abaixo do mínimo aceito e por conta da qualidade da solda vista nos ensaios de ultrassom. Dessa maneira, foi realizado um estudo mais completo, variando a corrente de 8 kA até 9 kA com um passo de 0,2 kA.

Para as correntes de 8 a 9 kA, foram soldados 24 pontos, que podem ser visualizados na Figura 26 com seus respectivos tamanhos medidos por ultrassom. Todos, dentre os 24 pontos, apresentaram tamanhos maiores que 5 mm, acima do mínimo especificado. A Figura 27 mostra um gráfico contendo os tamanhos das lentes de solda para as amostras Oxidadas e a Figura 28 para as amostras Jateadas.

Nos gráficos é possível notar que a corrente de 8,8 kA apresenta resultados com grande uniformidade, com proximidade 6 mm de diâmetro. Correntes acima de 8,8 kA estão tendendo a diminuir o tamanho da solda. Assim, esta corrente foi escolhida para a realização do restante do trabalho.

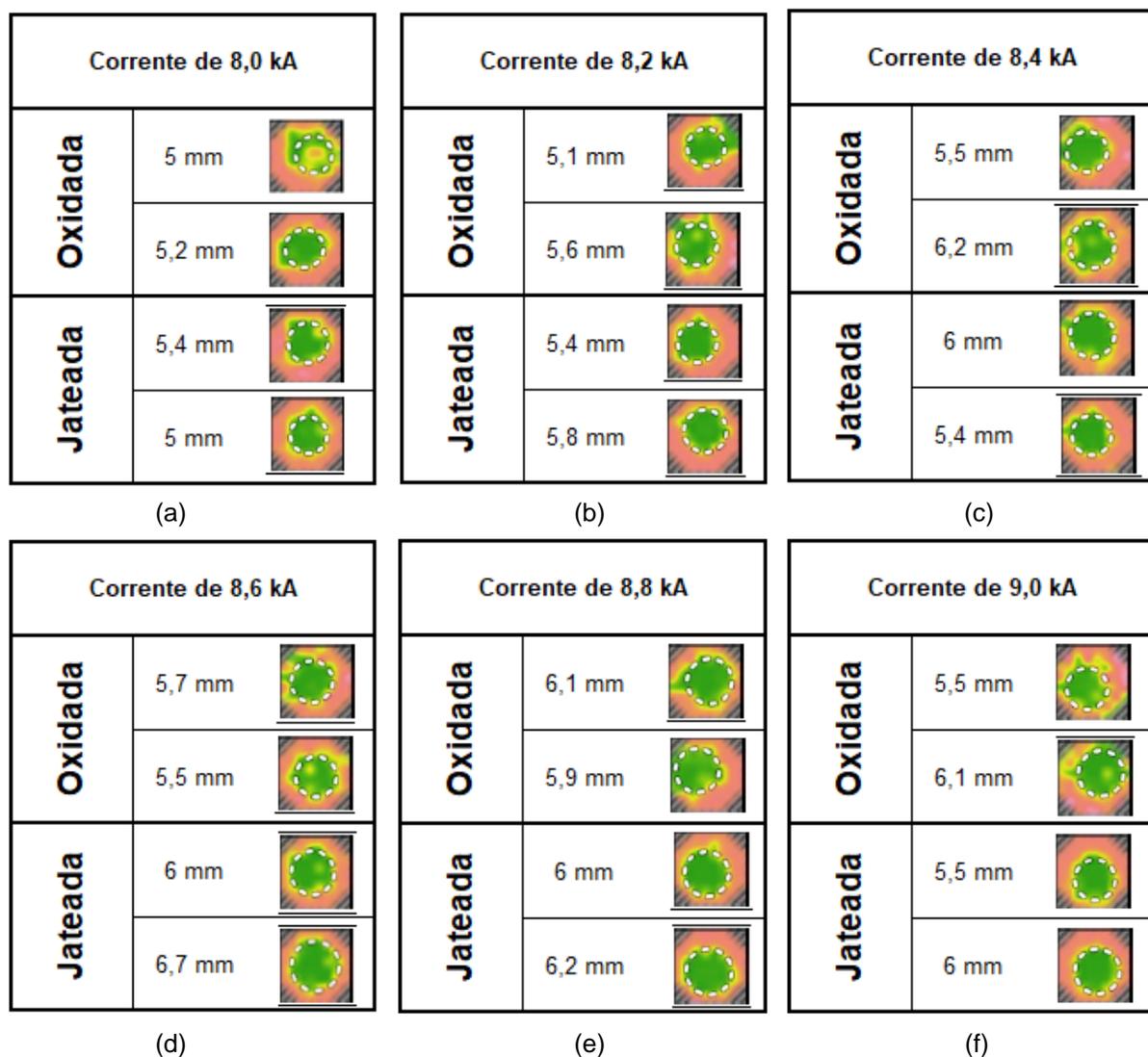


Figura 26: Diâmetro da lente da solda medido por ultrassom de peças soldadas com corrente elétrica de: (a) 8 kA; (b) 8,2 kA; (c) 8,4 kA; (d) 8,6 kA; (e) 8,8 kA; (f) 9 kA. (Fonte: Próprio autor)

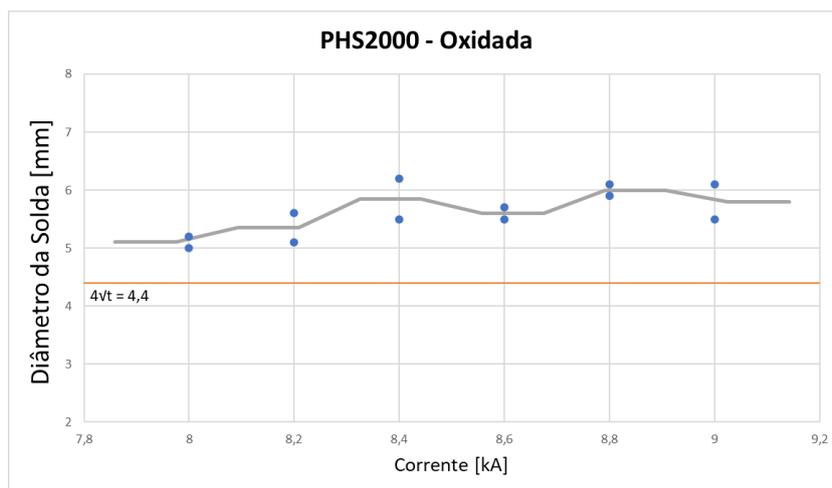


Figura 27: Gráfico de Diâmetro da lente da solda pela corrente elétrica utilizada para amostras de aço 38MnB5 Oxidadas. (Fonte: Próprio autor)

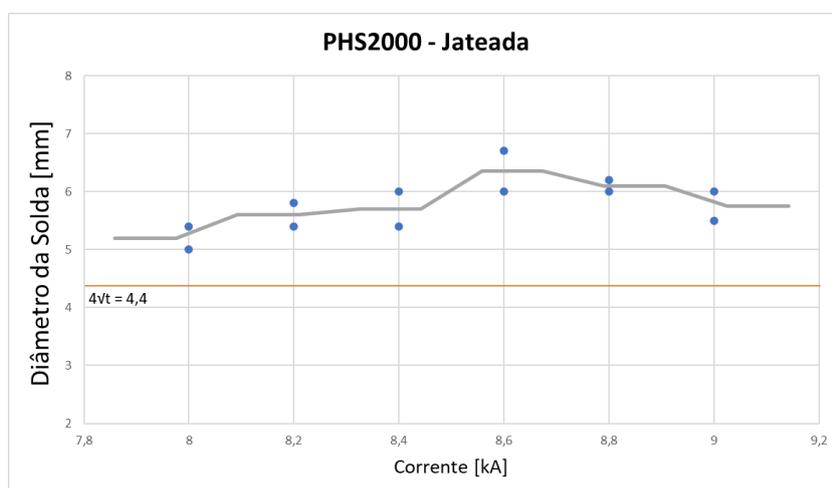


Figura 28: Gráfico de diâmetro da lente da solda pela corrente elétrica utilizada para amostras de aço 38MnB5 Jateadas. (Fonte: Próprio autor)

A partir da corrente elétrica selecionada, foram realizadas análises das condições da solda por meio de um corte transversal, analisando sua macrografia. Na Figura 29 está demonstrado os parâmetros obtidos a partir de uma soldagem utilizando corrente de 8,8 kA. Tem-se que o diâmetro da solda confirmou o resultado obtido por ultrassom, permanecendo em torno de 6 mm e a profundidade de indentação do eletrodo superior e inferior sendo respectivamente 0,27 e 0,30 mm. Já a penetração na chapa superior e inferior tiveram um resultado de respectivamente 0,69 e 0,70 mm, demonstrando uma boa penetração causada pelo processo de soldagem.

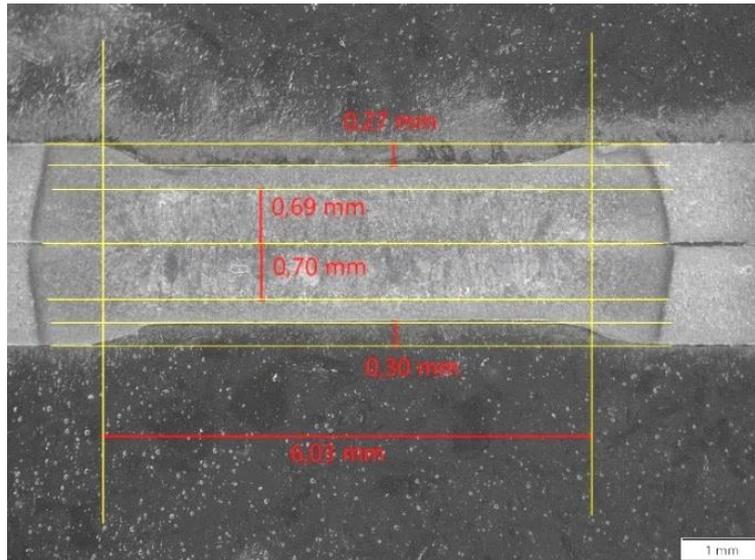


Figura 29: Parâmetros de solda obtidos no processo de soldagem a ponto por resistência elétrica no aço 38MnB5 Jateado utilizando uma corrente de 8,8 kA. (Fonte: Próprio autor)

4.3.2. Perfil de Microdureza

Nas duas amostras Jateadas soldadas com a corrente de 8,8 kA, foram realizados perfis de Microdureza Vickers (1 kgf), de modo a atravessar a amostra passando por todas as regiões de solda, do metal base (MB1) da chapa superior até o metal base da chapa inferior (MB2). A Figura 30 referente a macrografia da primeira amostra analisada, mostrando as regiões determinadas pelo perfil de microdureza que pode ser visto na Figura 31. O metal base dessa amostra possui uma média de 505 HV de dureza tanto para a chapa superior quanto para a inferior, passando a ter 350 HV de dureza, no mínimo encontrado, dentro da zona termicamente afetada (ZTA) e alcançando um valor médio de 555 HV na zona fundida (ZF).

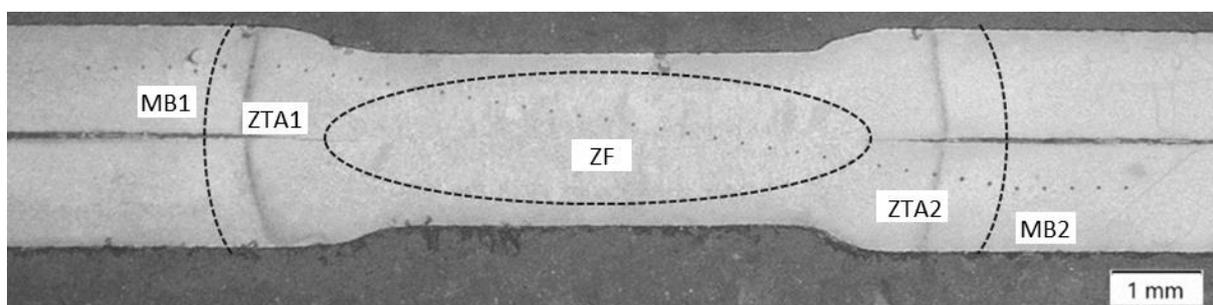


Figura 30: Macrografia mostrando o perfil de microdureza Vickers e as regiões da solda realizado na amostra Jateada soldada com corrente de 8,8 kA (primeira amostra). (Fonte: Próprio autor)

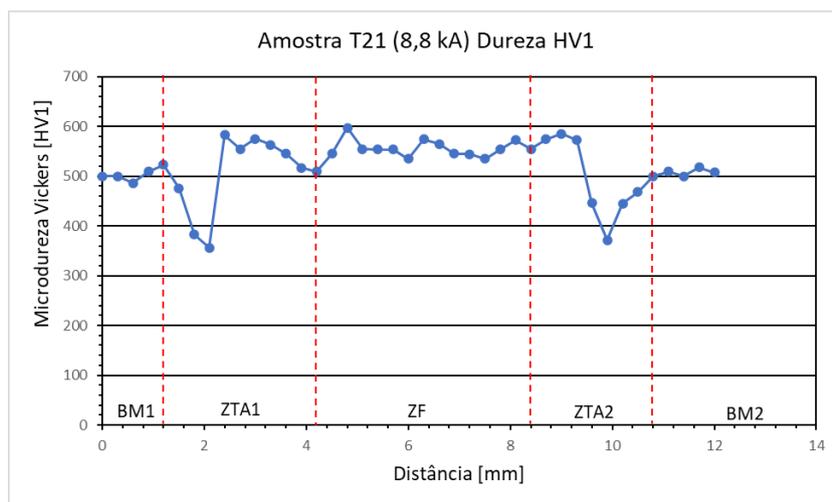


Figura 31: Perfil de microdureza Vickers (HV1) realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (primeira amostra). (Fonte: Próprio autor)

Para a segunda amostra analisada, os valores de dureza são bem próximos, mas superiores aos valores encontrados na primeira amostra. As regiões MB1 e MB2 apresentam valores médios de 570 HV, a menor dureza encontrada também foi observada na ZTA, com um valor de 380 HV, e a ZF teve uma média de 560 HV. Essa amostra pode ser visualizada na Figura 32 e os valores das durezas no gráfico da Figura 33.

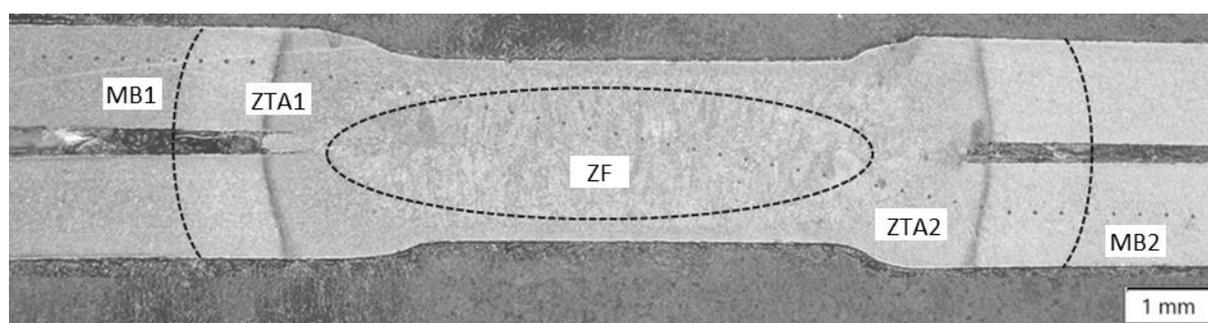


Figura 32: Macrografia mostrando o perfil de microdureza Vickers e as regiões da solda realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (segunda amostra). (Fonte: Próprio autor)

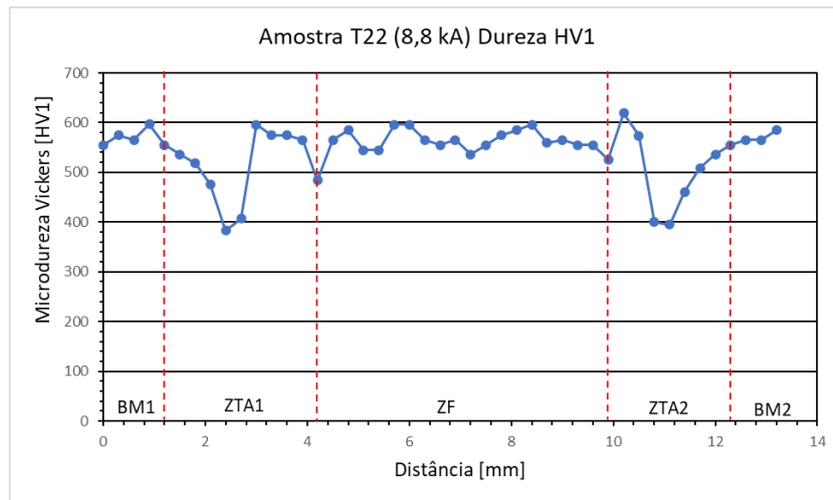


Figura 33: Perfil de microdureza Vickers (HV1) realizado na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA (segunda amostra). (Fonte: Próprio autor)

4.3.3. Microestrutura das Regiões da Solda

Para a análise microestrutural da solda a ponto realizada, com corrente de 8,8 kA, a amostra foi dividida em 10 áreas (visualizadas na Figura 34) com o intuito de observar a microestrutura de todas as regiões da solda. Na área 1 se encontra o material base (MB); A área 2 se encontra na área de transição entre o metal base e a ZTA; as áreas 3, 4, 5 e 6 se encontram na ZTA, onde essa pode ser dividida entre ZTA-MB (zona termicamente afetada próxima ao metal base, que vai da área 3 até a área 4) e ZTA-ZF (zona termicamente afetada próxima a zona fundida, que vai da área 4 até a área 6); as áreas 7, 8 e 10 se encontram na Zona Fundida; a área 9 se encontra na transição inferior da Zona Fundida para a Zona Termicamente Afetada bem próxima a superfície inferior da chapa.

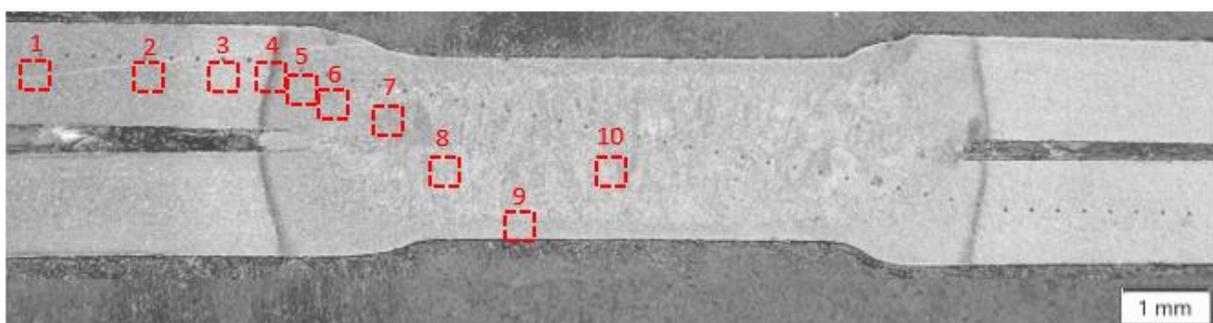


Figura 34: Macrografia mostrando as 10 áreas de análise microestrutural realizada na amostra Jateada, soldada com corrente de 8,8 kA. (Fonte: Próprio autor)

A microestrutura encontrada na área 1, que pode ser visualizada na Figura 35, possui grande similaridade com a microestrutura do 38MnB5 após estampagem a quente apresentado anteriormente, contendo microestrutura composta predominantemente por martensita. Essa região do metal base não apresenta modificação microestrutural em comparação com a amostra após estampagem a quente por ser uma região que não é afetada pelo fluxo de calor proveniente da solda por resistência elétrica.

Na região 2 (Figura 36), temos uma microestrutura visualmente parecida com a região 1, com grãos finos predominantemente martensíticos. Como essa área se encontra bem na fronteira entre o começo da ZTA e o metal base, temos uma influência muito pequena proveniente do calor produzido no processo de soldagem, não proporcionando modificações microestruturais visíveis. Essa região representa o ponto em que a dureza começa a diminuir em relação ao metal base.

A região 3 (Figura 37) possui uma microestrutura predominantemente martensítica, mas contendo indícios de revenimento causado pelo calor proveniente do processo de soldagem. Esse calor eleva a temperatura dessa área até próximo da temperatura A_{c1} , proporcionando o revenimento da microestrutura martensítica que pode ser comprovado pela diminuição da dureza dessa área em relação ao Metal Base.

Na região 4 (Figura 38) temos a transição entre a ZTA-MB (no lado esquerdo da imagem) e a ZTA-ZF (no lado direito da imagem). Nela podemos visualizar com facilidade o gradiente de calor proporcionado pelo processo de soldagem, em que o calor vem da direita para a esquerda da imagem, vindo da ZF em direção ao MB. A modificação microestrutural causada pelo calor nessa região ocorre de forma que, na microestrutura na parte esquerda da imagem, o material alcança temperaturas até a A_{c1} , proporcionando o revenimento da martensita (assim como é visto na região 3). Com o aumento do calor fornecido ao material, no centro da imagem, temos temperaturas entre A_{c1} e A_{c3} , dando indícios de formação de austenita em alta temperatura junto com a formação de ferrita nos contornos dos grãos austeníticos, promovendo uma microestrutura final de martensita com ferrita precipitada nos contornos pré-austeníticos, o que promove os menores valores de dureza encontrados na amostra soldada. Seguindo agora para a parte direita da imagem (Começo da ZTA-ZF), temos uma região em que a temperatura alcança a

Ac3, o que promove a austenitização da microestrutura, e em seguida uma tempera proveniente do resfriamento da ferramenta de soldagem. Assim, a microestrutura se torna predominantemente martensítica, com grãos ligeiramente grosseiros por se tratar de uma tempera a partir de grandes grãos austeníticos. Essas microestruturas encontradas seguem de acordo com os resultados apresentados na literatura (PAVEEBUNVIPAK, 2019).

Nas regiões 5 e 6 (Figura 39 e 40) temos microestruturas referentes a ZTA-ZF em que quanto mais próxima da ZF, mais grosseiros os grãos martensíticos se encontram. A explicação é a mesma apresentada no parágrafo anterior para a parte direita da região 4, onde começa a ZTA-ZF.

A microestrutura das regiões 7, 8, 9 e 10 (Figuras 41, 42, 43 e 44) são referentes a ZF. Nessa zona o material é submetido a temperaturas acima da temperatura de fusão, o que proporciona a junção das placas a partir do metal fundido. Esse material em seguida é resfriado rapidamente, o que proporciona a formação de uma estrutura predominantemente martensítica com direção a extração de calor, que é realizada pela ferramenta de soldagem que toca a superfície de cada chapa. Também é possível visualizar pequenos espaços vazios de formato redondo distribuídos por essa microestrutura, que podem estar presentes por conta do resfriamento a partir do metal fundido.

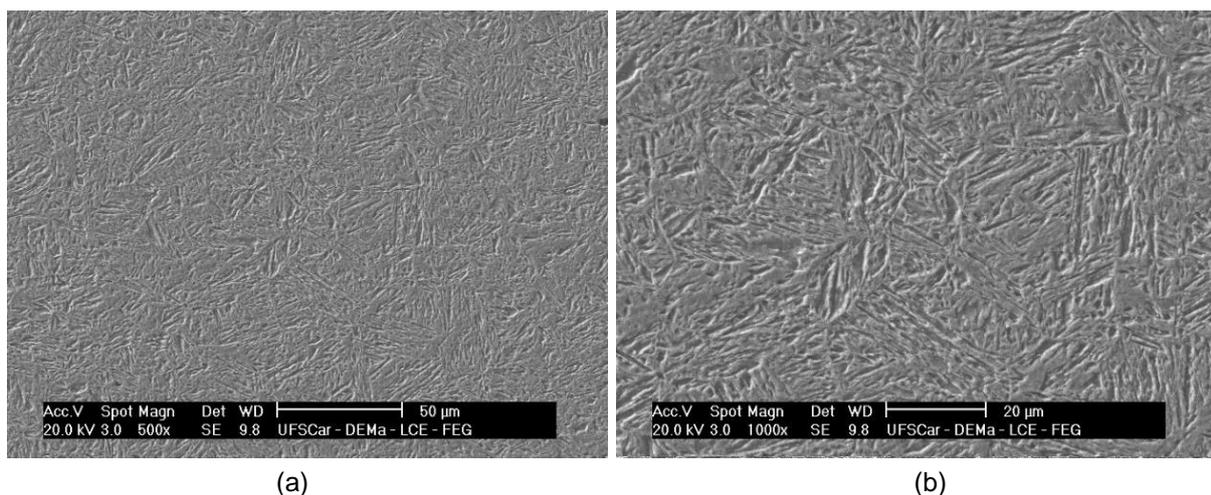


Figura 35: Área 1 (MB). Microestrutura fina predominantemente martensítica. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

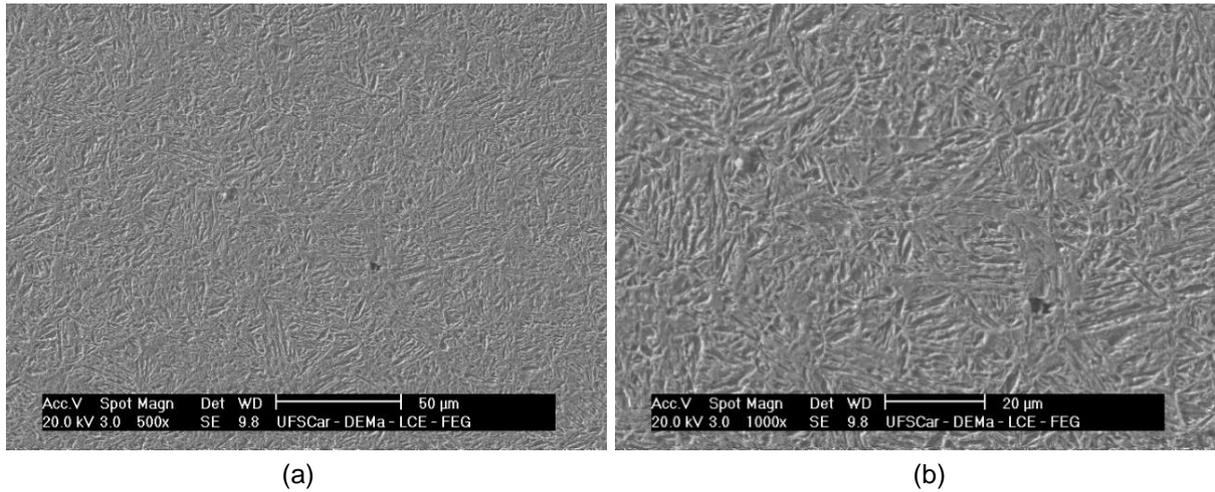


Figura 36: Área 2 (MB / ZTA-MB). Microestrutura fina predominantemente martensítica. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

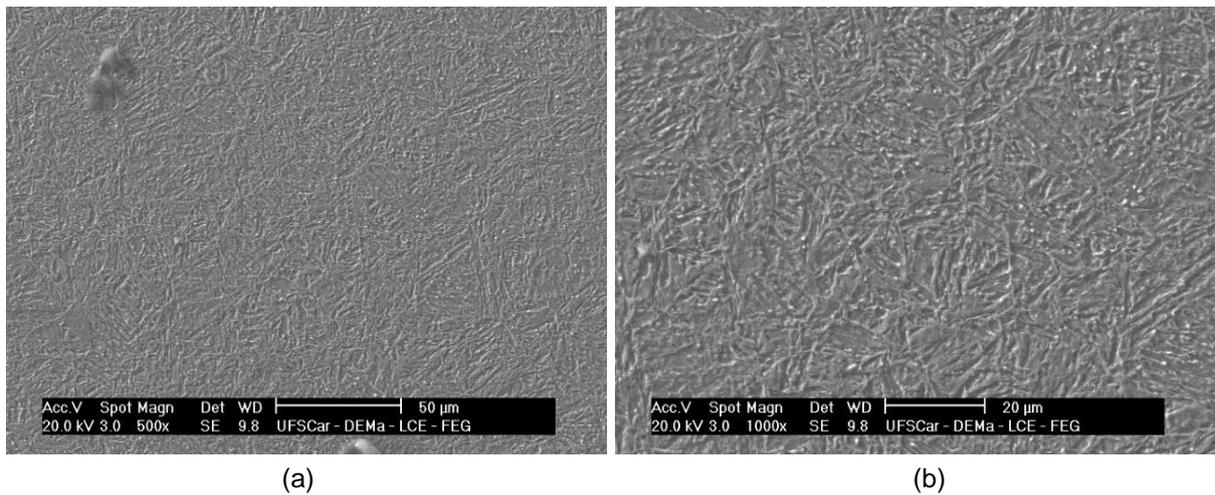


Figura 37: Área 3 (ZTA-MB). Microestrutura de martensita revenida. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

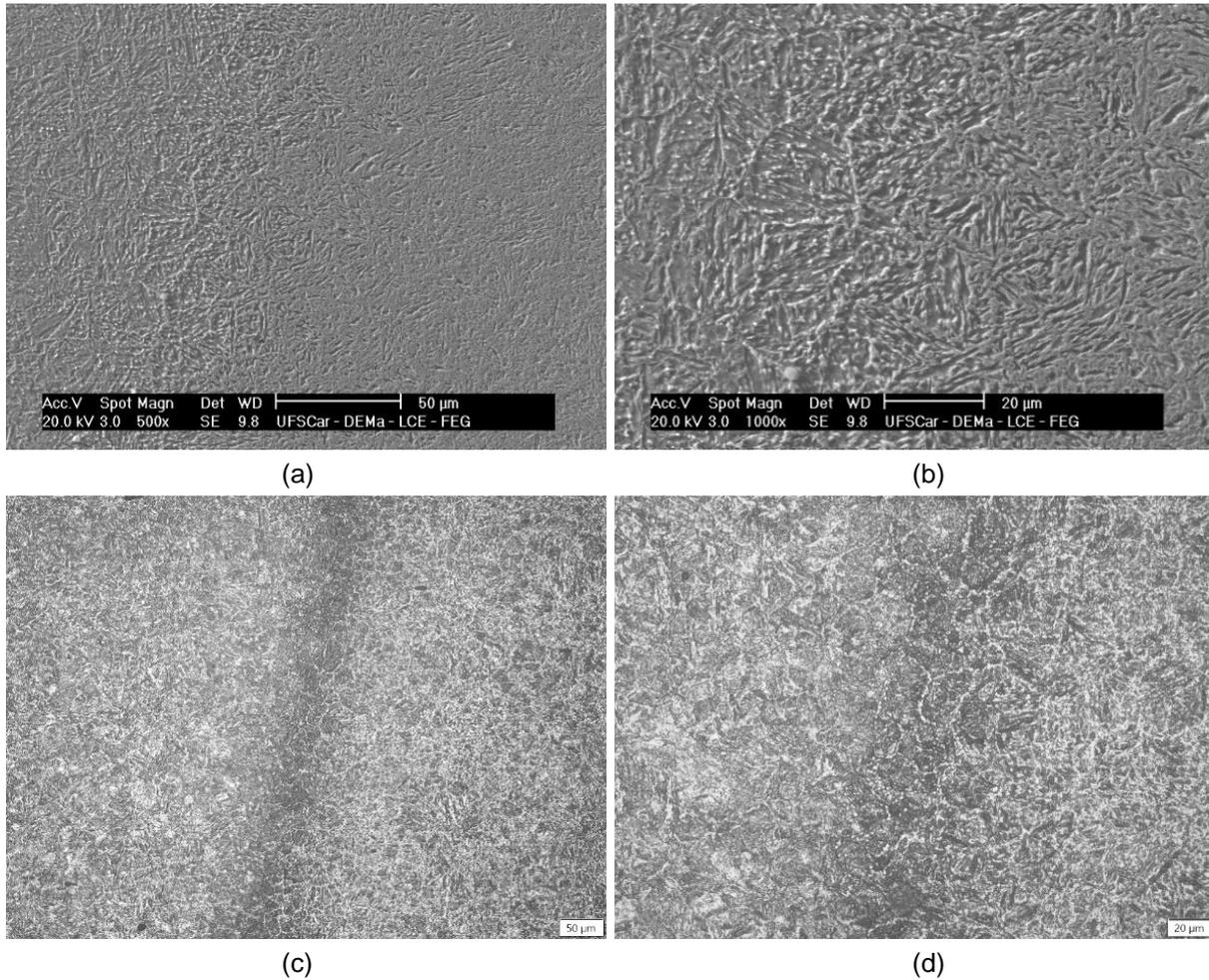


Figura 38: Área 4 (ZTA-MB / ZTA-ZF). Microestrutura de martensita, martensita revenida e martensita revenida com precipitação de ferrita no contorno de grão pré-austenítico. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (c) Análise em MO com aumento de 500x. (d) Análise em MO com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

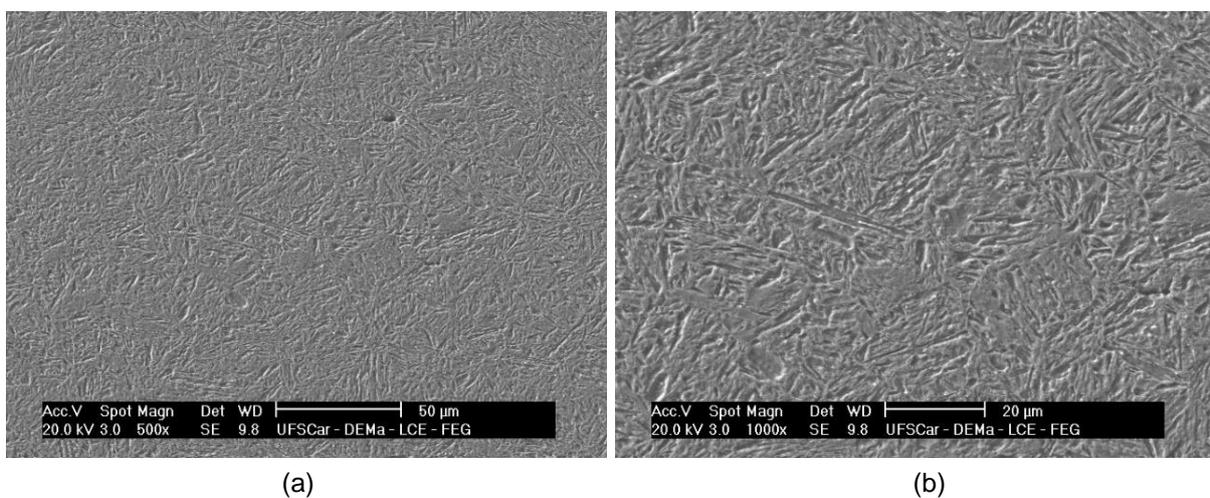


Figura 39: Área 5 (ZTA-ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

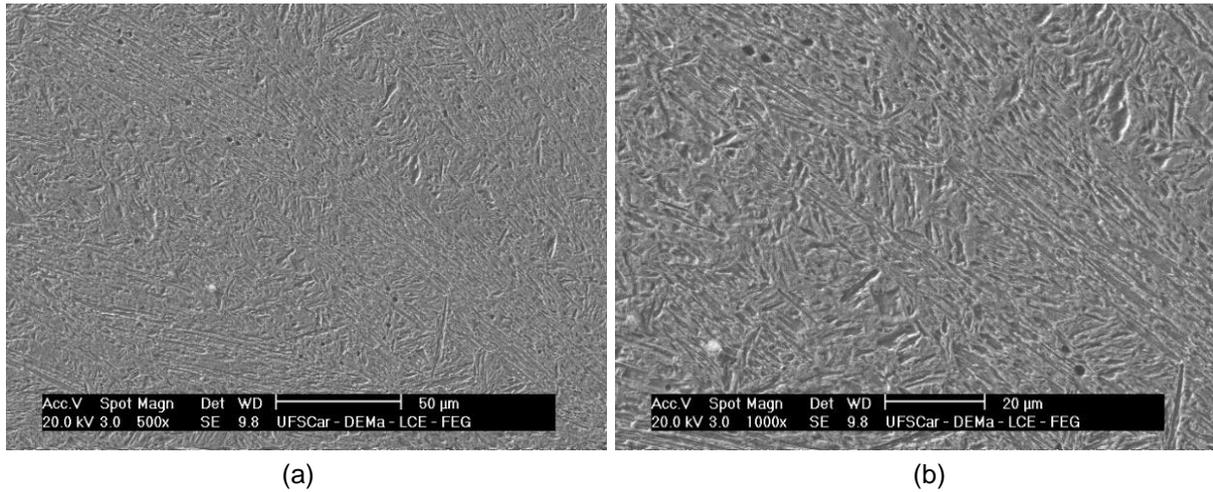


Figura 40: Área 6 (ZTA-ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

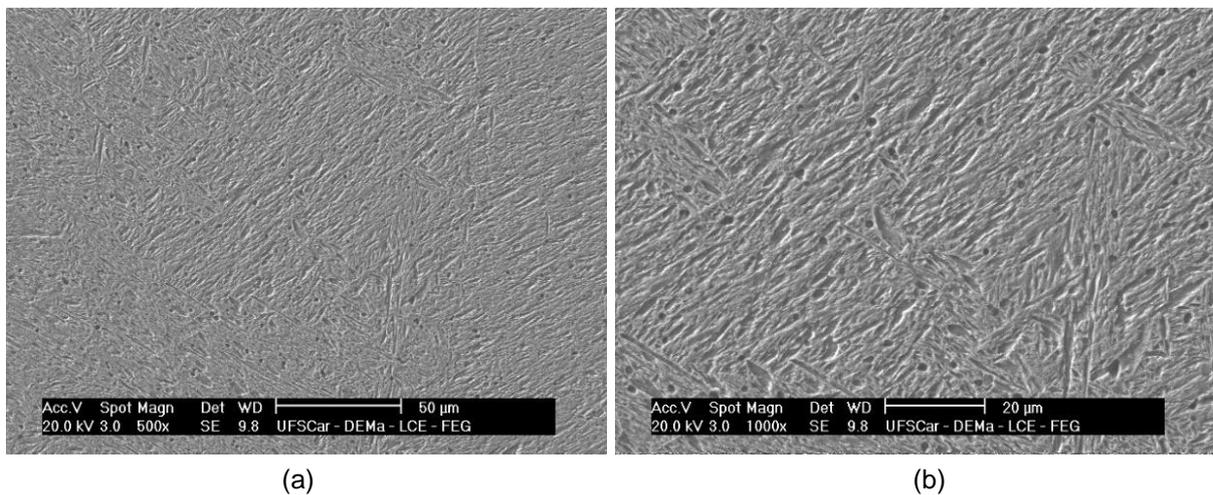


Figura 41: Área 7 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

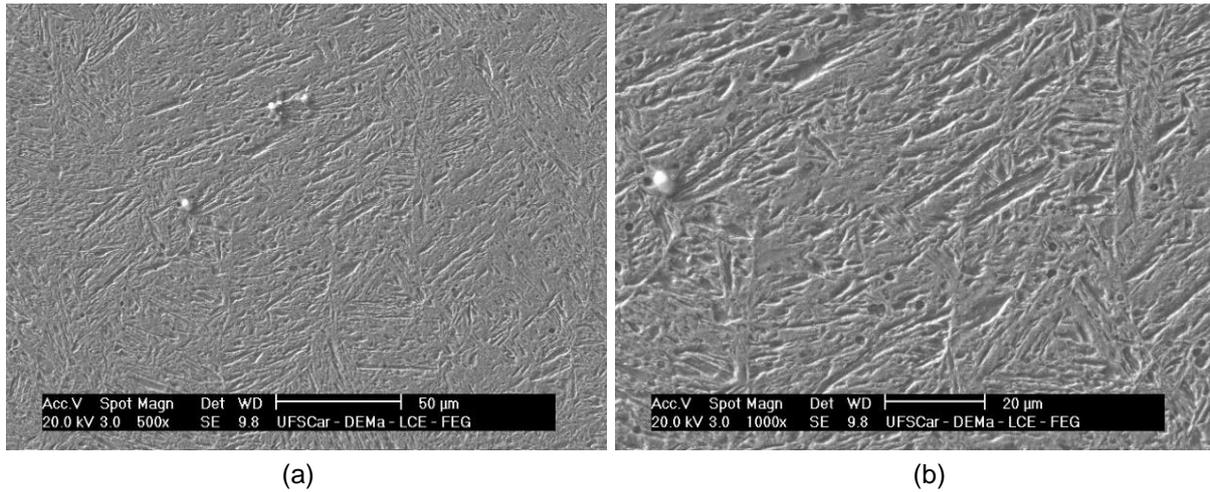


Figura 42: Área 8 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

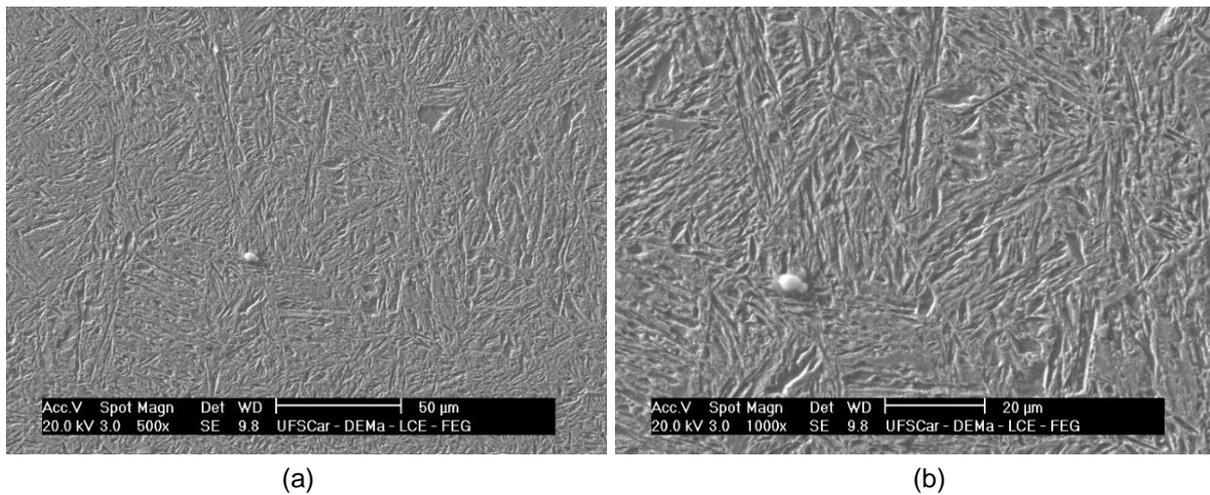


Figura 43: Área 9 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

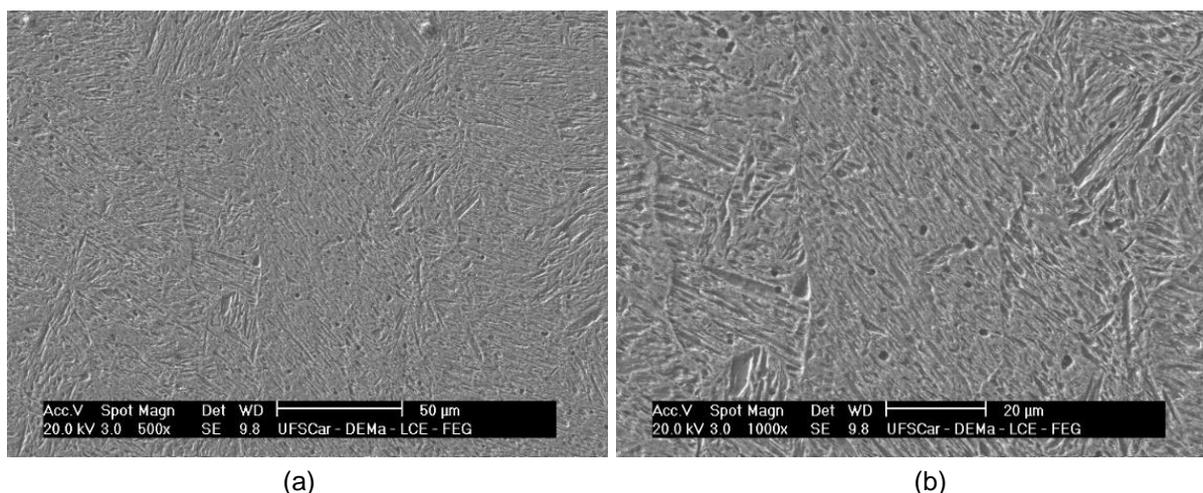


Figura 44: Área 10 (ZF). Microestrutura grosseira de martensita proveniente do metal fundido. (a) Análise em MEV com aumento de 500x. (b) Análise em MEV com aumento de 1000x. com aumento de 1000x. (Fonte: Próprio autor)

4.3.4. Teste de Cisalhamento

Na Figura 45 podemos visualizar os resultados dos testes para as amostras Jateadas. Nessas amostras, a média do tamanho da lente de solda foi de 5,74 mm, enquanto a média da força de ruptura ficou em valores de 13,93 kN, com uma dispersão de $\pm 0,44$ kN, demonstrando uma boa repetibilidade. O teste também ocasionou a fratura das cinco amostras a partir de falha por arrancamento, o que corrobora um bom resultado. Uma vez que, esse é o mecanismo fratura de solda visado para aplicações automobilísticas, por ser menos frágil e possuir uma maior porcentagem de deformação antes da separação das chapas.

Os resultados do teste de cisalhamento referentes as amostras Oxidadas, podem ser visualizadas na Figura 46. Temos uma média do tamanho de lente de solda de 5,80 mm e a média da força de ruptura de 16,19 kN, com uma dispersão de $\pm 2,71$ kA. Nestas amostras oxidadas tivemos o aparecimento de dois pontos com valores extremamente elevados fora do esperado, em que existem indícios de que o motivo pode ser associado a um desalinhamento das chapas soldadas (visualizado na Figura 47), que modifica a distribuição das forças aplicadas no teste de cisalhamento. Esse desalinhamento foi causado a partir da dificuldade de se soldar amostras com tamanho tão reduzidos, que necessitam ser fixadas utilizando um alicate, por falta de suporte específico. Ao desconsiderar os valores acima do esperado, a média da força de ruptura cai para 14,02 kN, com uma dispersão de $\pm 0,54$ kN. O mecanismo de falha de todas as amostras oxidadas também foi a partir

de falha por arrancamento.

A partir da comparação dos ensaios nos dois tipos de amostras, temos que a presença do óxido parece não alterar a média do tamanho da lente de solda, mas altera a geometria dessa lente. É visível que as lentes das amostras jateadas possuem uma geometria mais arredondada e uniforme, enquanto as lentes das amostras oxidadas possuem a presença de poros e uma geometria não uniforme.

Ao se comparar as amostras oxidadas e jateadas, desconsiderando os testes das amostras oxidadas que podem ter sofrido influências da geometria dos corpos-de-prova, temos que os resultados de tamanho de lente, de força de ruptura e de mecanismos de falha são semelhantes. Dessa maneira, esse resultado demonstra que a oxidação superficial presente no material após o processo de estampagem a quente não parece influenciar de forma significativa a resistência da solda por resistência elétrica. No entanto, é visível através da imagem por ultrassom a existência de poros que podem ser um fator de risco para esse processo quando aplicado na indústria. Assim, a utilização do jateamento abrasivo após o processo de conformação a quente deve ser considerado em processos industriais para promover a melhor qualidade e uniformidade geométrica da solda.

Corrente de 8,8 kA				
Jateada	Tamanho de Solda	Força de Ruptura (kN)	Tipo de Fratura	
	5,5 mm		14,33	Falha por Arrancamento
	6,4 mm		14,57	Falha por Arrancamento
	6,0 mm		13,43	Falha por Arrancamento
	5,4 mm		13,69	Falha por Arrancamento
	5,4 mm		13,62	Falha por Arrancamento
	Média		13,93 ± 0,44	

Figura 45: Tamanho da lente de solda, força de ruptura e tipo de fratura das amostras Jateadas, soldadas com 8,8 kA de corrente elétrica, ensaiadas no teste de cisalhamento. (Fonte: Próprio autor)

Corrente de 8,8 kA			
Oxidada	Tamanho de Solda	Força de Ruptura (kN)	Tipo de Fratura
	5,8 mm 	18,90	Falha por Arrancamento
	6,4 mm 	13,66	Falha por Arrancamento
	5,5 mm 	14,79	Falha por Arrancamento
	5,5 mm 	19,97	Falha por Arrancamento
	5,8 mm 	13,62	Falha por Arrancamento
	Média	16,19 ± 2,71	

Figura 46: Tamanho da lente de solda, força de ruptura e tipo de fratura das amostras Oxidadas, soldadas com 8,8 kA de corrente elétrica, ensaiadas no teste de cisalhamento. (Fonte: Próprio autor)



(a)



(b)

Figura 47: Amostras de teste de cisalhamento soldadas por solda a ponto por resistência elétrica. (a) Amostra contendo desalinhamento das chapas soldadas. (b) Amostra alinhada. (Fonte: Próprio autor)

Como mencionado, o mecanismo de fratura de todas as amostras soldadas foi a partir de falha por arrancamento. Esse mecanismo segundo (MANLADAN, 2015) é o preferível em processos industriais. Algumas fractografias das superfícies fraturadas obtidas nos testes de cisalhamento podem ser visualizadas na Figura 48. É possível observar que a fratura tem início na ZTA, que é a região da solda com menor resistência, tanto para as amostras Oxidadas quanto para as Jateadas. Também é possível visualizar estrias de tensão na Figura 50, que mostra a fratura do teste de cisalhamento após a separação completa das placas, em que a lente de solda permanece em uma das chapas.



Figura 48: Fractografia dos pontos de solda após teste de cisalhamento. (a) Fractografia da amostra oxidada. (b) Fractografia da amostra jateada. (Fonte: Próprio autor)



(a)



(b)



(c)

Figura 49: Fractografia dos pontos de solda após teste de cisalhamento até a separação completa das chapas. (a) Aspecto geral da fratura. (b) Fratura por tensão da região superior da solda. (c) Fratura por tensão da região inferior da solda. (Fonte: Próprio autor)

5. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou as propriedades mecânicas do aço grau 38MnB5 após processamento por estampagem a quente e após processo de soldagem por resistência elétrica, junto a análise microestrutural nessas condições. Também foi determinado um valor de corrente elétrica para obter resultados com boa repetibilidade e elevado tamanho de lente. Fundamentado nos resultados apresentados no tópico 4, é possível concluir que:

- O aço 38MnB5 quando estampado em produção industrial não alcançou as propriedades mecânicas esperadas de $LR = 2000$ MPa. Uma hipótese para esse acontecimento é que a ferramenta da produção industrial não é produzida especificamente para esse aço, possuindo taxas de resfriamento diferentes das ideais para este grau.
- A microestrutura do aço 38MnB5 após estampagem a quente é composta majoritariamente de martensita, com indícios de martensita revenida ou bainita, necessitando de mais investigações para de fato diferenciar as possíveis fases. Esse material apresenta uma camada de descarbonetação que varia de 0,01 a 0,05 mm causado pelo tempo que o material passa no forno antes do processo de estampagem a quente. Porém nessa dimensão, não se acredita que ela possa ser a causa da diminuição da resistência mecânica observada.
- A partir de testes de corrente elétrica para o processo de soldagem por resistência elétrica para o aço 38MnB5, chegou-se à conclusão de que a corrente de 8,8 kA proporciona diâmetros de solda de tamanhos elevados e uniformes, variando em torno de 6 mm (tamanho acima do mínimo especificado de 4,4 mm).
- A microestrutura das regiões da solda variou em função do fluxo de calor proveniente do processo de soldagem. No MB temos indícios de martensita/martensita revenida. Na ZTA temos martensita (ZTA-ZF), martensita revenida (ZTA-MB) e indícios de martensita com ferrita precipitada no contorno de grão pré-austenítico (interface entre ZTA-MB e ZTA-ZF) dependendo da proximidade com a ZF. Na ZF temos indícios de martensita de forma mais grosseira que no MB.

- A resistência mecânica das soldas alcançou resultados satisfatórios, com força de ruptura média de 13,9 kN e tipo de fratura de falha por arrancamento, que é o modo de falha preferível para processos industriais. Também foi observado que a existência de óxido superficial não altera a resistência final da solda, mas altera a qualidade e uniformidade da lente de solda, se tornando preferível a utilização de um processo de jateamento abrasivo após estampagem a quente para retirada desse óxido.

REFERÊNCIAS

BILLUR, Eren. Hot stamping of ultra high-strength steels. **From a technological and business perspective**. Cham, 2019.

DBL 4093. Body Parts Manufactured from Press-Hardened Steel Sheets. Mercedes-Benz Standard; 2020

ISO 14273. Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds. ISO standard; 2002.

ISO 14272. Specimen dimensions and procedure for cross tension testing resistance spot and embossed projection welds. ISO standard; 2000.

MANLADAN, S. M.; ABDULLAHI, Ibrahim; HAMZA, Mukhtar Fatihu. A review on the application of resistance spot welding of automotive sheets. **J. Eng. Technol**, v. 10, p. 20-37, 2015.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução aos Processos de Soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, 2000.

PAVEEBUNVIPAK, K.; UTHAISANGSUK, V. Characterization of Static Performance and Failure of Resistance Spot Welds of High-Strength and Press-Hardened Steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 28, n. 4, p. 2017-2028, 2019.

SHOME, M.; TUMULURU, M. Introduction to welding and joining of advanced high-strength steels (AHSS). In: **Welding and joining of advanced high strength steels (AHSS)**. Woodhead Publishing, 2015. p. 1-8

SILVA, Érika Aparecida da. **Estudo do efeito springback em aços avançados de alta resistência aplicados a indústria automobilística**. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

TAYLOR, Tom; MCCULLOCH, John. Effect of Part/Die Boundary Conditions on Microstructural Evolution during Hot Stamping 2000 MPa Class Boron Steel. **steel research international**, v. 89, n. 6, p. 1700495, 2018.

VARBAI, Balázs et al. Shear tension strength of resistant spot welded ultra high strength steels. **Thin-Walled Structures**, v. 142, p. 64-73, 2019.