

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

FELIPE RODRIGUES DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA DE AÇO SAE 1020 COM  
TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2018

FELIPE RODRIGUES DIAS

**CARACTERIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA DE AÇO SAE 1020 COM  
TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Silvia Midori Higa.

Coorientador: Rafael Tiossi.

LONDRINA

2018



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

**FELIPE RODRIGUES DIAS**

### **CARACTERIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA DE AÇO SAE 1020 COM TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 25 de outubro de 2018 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Me. Diego Ruben Martin  
(Editora e Distribuidora Educacional S/A)

---

Prof. Dr. Marcio Andreato Batista Mendes  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Silvia Midori Higa  
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por ter me capacitado a realizar todas as minhas obrigações durante o período da graduação.

Aos meus pais, Cristovam e Inês, que me educaram e me ajudaram a trilhar meus caminhos e completar as dificuldades enfrentadas, sempre aconselhando da maneira a tomar as melhores decisões.

Gostaria de agradecer a minha namorada Luiza, por toda dedicação e amor durante a minha caminhada da graduação, estando sempre ao meu lado nos momentos de felicidade e de dificuldade.

Agradeço também ao apoio da minha professora e orientadora Silvia Midori Higa que pacientemente me acolheu como orientando e me passou seus ensinamentos de forma brilhante e serena.

Estendo meus agradecimentos aos professores Diego Martin e Marcio Andreato que me ajudaram de forma participativa durante minha graduação, bem como na execução deste trabalho.

Aos meus amigos Gabriel Benassi Yamashita e Heloise Gomes de Oliveira, pela parceria durante toda a graduação e por toda a ajuda prestada durante esse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que participaram de forma direta ou indireta durante essa etapa cheia de dificuldades e sucesso que foi a graduação em Engenharia de Materiais na minha vida.

## RESUMO

DIAS, F. R. **Caracterização da junta soldada de aço SAE 1020 com tratamento térmico pós soldagem**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

A soldagem é um processo de união de materiais muito utilizado para a fabricação de peças metálicas, na montagem de estruturas e na manutenção dessas. Entretanto, o aquecimento localizado que leva à coalescência das superfícies, promove alterações na microestrutura e nas propriedades do material, resultando em regiões distintas na junta soldada, as quais são denominadas de metal de base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Este projeto é baseado na caracterização de uma junta soldada de aço SAE 1020 obtida através do processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), onde foram aplicados dois tratamentos térmicos de recozimento subcrítico em diferentes temperaturas a fim de comparar seus efeitos na microestrutura, propriedades mecânicas e resistência à corrosão da junta. Cada região da junta soldada foi avaliada quanto às suas características microestruturais, medidas de energia absorvida no impacto, medidas de microdureza Vickers, a fim de se construir um perfil de microdureza ao longo da junta e medidas da taxa de corrosão através de um ensaio de imersão em solução de cloreto. Todos os ensaios foram realizados nas três condições (como recebida, recozida à 600°C e recozida à 700°C). A partir dos resultados, observou-se um aumento no tamanho de grão na região da ZTA mais próxima a linha de fusão; uma redução nas tensões residuais da região da ZTA com o aumento da energia absorvida por impacto; diminuição na dureza da junta após a realização dos tratamentos térmicos e diminuição da resistência à corrosão das amostras tratadas termicamente.

**Palavras-chave:** SMAW. Aço SAE 1020. Corrosão. Dureza. Impacto.

## ABSTRACT

DIAS, F. R. **Characterization of SAE 1020 welded steel joint with heat treatment after welding**. 2018. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

Welding is a process of joining materials widely used for the manufacture of metal parts, in the assembly of structures and in the maintenance of these. However, the localized heating leading to coalescence of the surfaces promotes changes in the microstructure and material properties, resulting in distinct regions in the weld joint, which are referred to as base metal (MB), thermally affected zone (ZTA), and zone fused (ZF). This project is based on the characterization of a SAE 1020 welded steel joint obtained through the welded electrode process (SMAW), where two subcritical annealing thermal treatments were applied at different temperatures in order to compare its effects on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of the gasket. Each region of the welded joint was evaluated for its microstructural characteristics, impact energy absorbed on the impact, Vickers microhardness measurements, in order to construct a microhardness profile along the joint and measurements of the corrosion rate through an immersion test in chloride solution. All assays were performed under the three conditions (as received, treated at 600 ° C and treated at 700 ° C). From the results, an increase in grain size was observed in the ZTA region closest to the melting line; a reduction in the residual stresses of the ZTA region with the increase of energy absorbed by impact; decrease in the hardness of the joint after the accomplishment of the thermal treatments and decrease of the resistance to the corrosion of the samples treated thermally.

**Keywords:** SMAW. SAE 1020 steel. Corrosion. Hardness. Impact.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união. ....	15
Figura 2 - Regiões da junta soldada. ....	16
Figura 3 - Representação esquemática do processo de soldagem por eletrodo revestido. ....	17
Figura 4 - Esquema do equipamento básico da solda com eletrodo revestido. ....	18
Figura 5 - Microestrutura do aço SAE 1020: (a) 20X e (b) 40X, com ataque químico com Nital 3%. ....	20
Figura 6 - Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento ( $\alpha$ = Ferrita, $\gamma$ = Austenita, P = Perlita). ....	22
Figura 7 - Perfil de dureza em uma junta soldada de aço SAE 1020. ....	23
Figura 8 - Diagrama de fases Ferro - Carbono. ....	25
Figura 9 - Junta de solda de aço SAE 1020. ....	26
Figura 10 - Equipamento de soldagem. ....	27
Figura 11 - Ilustração do corte transversal para a retirada das amostras. ....	28
Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho. ....	29
Figura 13 - Amostras para caracterização microestrutural: (A) como recebida, (B) recozida à 600°C e (C) recozida à 700°C. ....	30
Figura 14 - Posições das indentações no ensaio de microdureza. ....	31
Figura 15 - Local onde foi retirado o corpo de prova para o ensaio de impacto. ....	31
Figura 16 - Aparato para o ensaio de imersão. ....	33
Figura 17 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda. ....	34
Figura 18 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à direita e 500X à esquerda. ....	34
Figura 19 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita. ....	35
Figura 20 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda. ....	36
Figura 21 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à esquerda e 500X à direita. ....	36

Figura 22 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita.....	36
Figura 23 - ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda. ....	37
Figura 24 - ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à esquerda e 500X à direita.....	38
Figura 25 – ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita.....	38
Figura 26 - Valores do ensaio de microdureza para as três amostras.....	39
Figura 27 - Corpos de prova para o ensaio de impacto: (A) como recebida, (B) recozida à 600°C e (C) recozida à 700°C.....	40
Figura 28 - Aparato após (A) 24 horas, (B) 48 horas e (C) 72 horas. ....	41
Figura 29 - ZTA 100X da amostra como recebida.....	42
Figura 30 - ZTA 100X da amostra recozida à 600°C.....	42
Figura 31 - ZTA 100X da amostra recozida à 700°C.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do aço SAE 1020.....	20
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1020. ....	21
Tabela 3 - Parâmetros da soldagem.....	26
Tabela 4 - Composição química em massa do consumível E7018.....	27
Tabela 5 - Classificação das condições de cada grupo de amostras.....	29
Tabela 6 - Valores de energia absorvida no ensaio de impacto para as 3 amostras. ....	40
Tabela 7 - Taxa de corrosão em mm/ano para as 3 amostras.....	41
Tabela 8 - Classificação da taxa de corrosão.....	41

## LISTA DE SIGLAS

MB	Metal de Base
MS	Meta de Solda
ZTA	Zona termicamente afetada
SMAW	Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido
ZF	Zona Fundida

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	12
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	12
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	12
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	13
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	14
<b>4.1</b>	<b>Soldagem</b> .....	14
4.1.1	Definição do processo .....	14
4.1.2	Classificação dos processos de soldagem .....	14
4.1.3	Influências do processo de soldagem no material .....	16
<b>4.2</b>	<b>Soldagem com eletrodo revestido</b> .....	17
4.2.1	Definição .....	17
4.2.2	Equipamentos utilizados e consumíveis .....	18
4.2.3	Variáveis elétricas e operacionais .....	19
<b>4.3</b>	<b>Aço SAE 1020</b> .....	20
4.3.1	Composição química .....	20
4.3.2	Microestrutura .....	20
4.3.3	Propriedades mecânicas .....	21
4.3.4	Aplicações .....	21
<b>4.4</b>	<b>Soldagem de aço SAE 1020</b> .....	22
4.4.1	Efeitos na microestrutura.....	22
4.4.2	Efeito nas propriedades mecânicas e na taxa de corrosão .....	22
<b>4.5</b>	<b>Tratamento térmico</b> .....	24
4.5.1	Recozimento .....	24
4.5.1.1	Recozimento Subcrítico .....	25
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	26
<b>5.1</b>	<b>Material</b> .....	26
<b>5.2</b>	<b>Métodos</b> .....	28
5.2.1	Tratamento térmico .....	29
5.2.2	Caracterização Microestrutural .....	30
5.2.3	Propriedades Mecânicas .....	30
5.2.4	Ensaio de imersão.....	32
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	34
<b>6.1</b>	<b>Caracterização Microestrutural</b> .....	34
<b>6.2</b>	<b>Propriedades mecânicas</b> .....	39
<b>6.3</b>	<b>Ensaio de imersão</b> .....	40
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	44
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	45
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46

## 1 INTRODUÇÃO

Classificado como um aço baixo carbono, devido a sua concentração média de 0,20% de carbono, o aço SAE 1020 tem sua composição formada pelos seguintes elementos de liga: carbono, manganês, fósforo e enxofre. Em função das baixas concentrações desses elementos, esse aço apresenta como principais propriedades uma elevada ductilidade e uma baixa temperabilidade, que conferem as características de elevada soldabilidade e elevada forjabilidade.

Na atualidade, o aço SAE 1020 apresenta uma vasta gama de aplicações na indústria, como: anéis de engrenagem, virabrequins, eixos, tubulações soldadas, parafusos, dentre outros. Ressalta-se que, para a fabricação e reparo das peças de aço SAE 1020, um dos processos mais utilizados é a soldagem.

A soldagem é o processo de união mais utilizado em peças metálicas, devido sua alta versatilidade e custo. Porém, o uso da soldagem traz efeitos ao material que alteram suas propriedades e microestrutura. Com o aquecimento localizado e a deposição de metal fundido da junta de solda, ocorre a formação de regiões distintas do metal de base (MB) que são conhecidas como zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF).

O aquecimento localizado promove alterações na microestrutura do material como, o aumento no tamanho de grão, geração de tensões residuais e a variação na composição de fases presentes. Essas alterações promovem mudanças nas propriedades como, o aumento da dureza e a diminuição da resistência à corrosão, podendo levar a falha do material durante sua aplicação.

Com isso, o presente projeto tem como objetivo caracterizar uma junta soldada de aço SAE 1020 oriunda do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. Para isso, foram realizados dois tratamentos térmicos de recozimento subcrítico, onde foram feitos ensaios para obtenção da microestrutura de cada região, das propriedades mecânicas da região da zona termicamente afetada com medidas de energia absorvida no impacto e medidas de microdureza Vickers, e ainda, foi realizado um ensaio de imersão em solução de cloretos para o cálculo da taxa de corrosão. Todos os ensaios foram realizados sob as três condições (como recebida, recozida à 600°C e recozida à 700°C).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar uma junta soldada de aço SAE 1020 obtida por soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

### **2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, foram definidos:

- Identificar e caracterizar as diferentes regiões ao longo da junta soldada;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico na dureza ao longo da junta soldada por meio de um perfil de microdureza;
- Avaliar o comportamento mecânico da ZTA em termos da energia absorvida no ensaio de impacto;
- Avaliar o efeito do tratamento térmico na resistência à corrosão da junta soldada por meio de ensaio de imersão.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Tendo em vista a alta gama de aplicações do aço SAE 1020, seu baixo custo e a sua elevada soldabilidade, muitas peças fabricadas com esse material utilizam o processo de soldagem durante sua fabricação e em eventuais reparos. Essas peças em sua maioria são submetidas a esforços elevados em consequência da sua aplicação, como no caso das engrenagens, tubulações, parafusos, dentre outros.

A soldagem por eletrodo revestido é um processo de soldagem com uma diversidade de aplicações devido a sua alta versatilidade e baixo custo. Uma das áreas onde mais se utiliza a soldagem por eletrodo revestido é na manutenção de tubulações de transporte de insumos das indústrias de petróleo e gás, álcool e produtos químicos diversos. Com isso, o controle dos parâmetros de soldagem nesse caso é essencial para a prevenção de danos materiais e financeiros.

Com isso, o entendimento das propriedades de uma junta soldada é de grande relevância para a área da engenharia como um todo, como também para o setor financeiro de uma empresa.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 Soldagem

#### 4.1.1 Definição do processo

A soldagem se destaca como o processo de união de metais mais utilizado industrialmente, e é definida como o processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios metais, na região de ligação entre os materiais que estão sendo unidos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009, p.18).

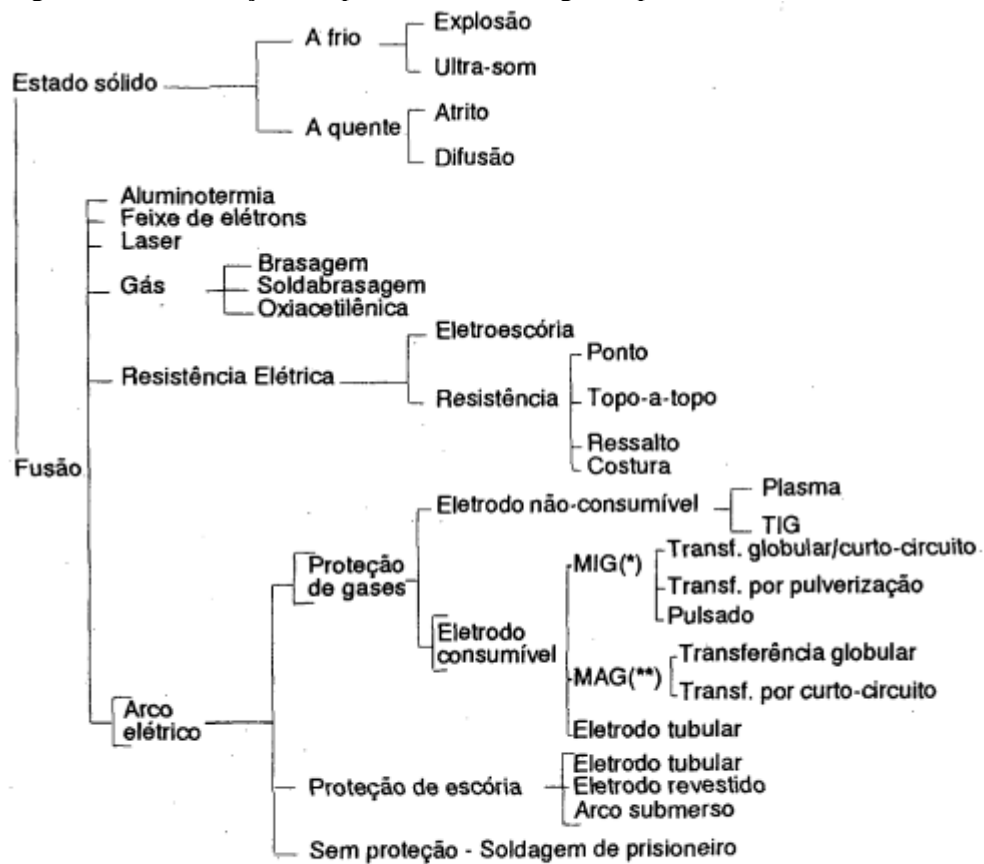
Outra visão, do ponto de vista operacional, estabelece que a soldagem é o processo que promove a coalescência localizada de materiais metálicos e não-metálicos, gerada pelo aquecimento dessa região, com ou sem aplicação de pressão. Em muitos casos, para favorecer a coalescência e, de acordo com a espessura das peças a serem unidas, são adicionados metais de adição, que apresentam composição química e propriedades mecânicas muitas vezes superiores ao do metal que está sendo soldado (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009; GROOVER, 2007, p. 689).

#### 4.1.2 Classificação dos processos de soldagem

Os processos de soldagem podem ser classificados em função de dois parâmetros: tipo de fonte de energia utilizada ou natureza da união. Usando a classificação por tipo de fonte de energia podemos dividir em quatro tipos: fonte mecânica, onde o calor é gerado através do atrito, por ondas de choque ou por deformação plástica do material; fonte química, onde o calor é gerado através de reações químicas exotérmicas; fonte elétrica, onde o calor é gerado pela passagem de corrente elétrica ou pela formação de um arco elétrico; e fonte radiante, onde o calor é gerado por radiação eletromagnética ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992, p. 3).

Em geral, são classificados na AWS (*American Welding Society*) mais de 50 tipos de soldagem. A Figura 1 representa o tipo de classificação pela natureza da união, usando a distinção entre soldagem no estado sólido e por fusão.

Figura 1 - Classificação dos processos de soldagem a partir da natureza da união.



Observ.: (\*) com argônio ou hélio.

(\*\*) com argônio, oxigênio, CO<sub>2</sub> ou misturas desses gases.

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 3).

Os processos de soldagem apresentam particularidades em termos das características dos consumíveis e não-consumíveis utilizados, como os eletrodos e gases de proteção dos processos a arco elétrico. Além disso, os processos se diferem uns dos outros pela maior ou menor necessidade de habilidade do soldador; pelo fator de ocupação, que considera o tempo efetivo em que o arco elétrico foi mantido em relação ao tempo total da soldagem devido às etapas de limpeza e troca dos eletrodos, por exemplo; pela taxa de deposição do metal; pela possibilidade de emprego de robôs manipuladores para realização da solda; entre outros (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Além disso, de acordo com as características de cada processo, esses acabam sendo indicados especificamente para os metais ferrosos, como aços baixo carbono e aços inoxidáveis, e para os metais não-ferrosos, como o alumínio, magnésio e titânio. A espessura das peças é também um fator limitante para a escolha do processo de soldagem. Ao final, espera-se que através do controle dos parâmetros de soldagem e da utilização adequada dos

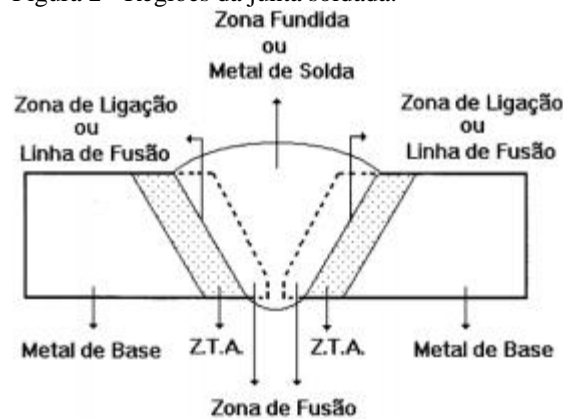


metais de adição, gases e fluxos de proteção, a qualidade da solda seja elevada, isenta de defeitos.

#### 4.1.3 Influências do processo de soldagem no material

Em decorrência da elevada temperatura e da deposição de um metal de adição, ocorre o aparecimento de regiões bem definidas que são as principais áreas de interesses para o estudo de uma junta de solda, essas regiões são conhecidas como: zona termicamente afetada (ZTA), zona de ligação ou linha de fusão (LF), metal base (MB) e zona fundida ou metal de solda (MS), no qual é inserido o metal de adição. Uma esquematização dessas regiões é apresentada na Figura 2:

Figura 2 - Regiões da junta soldada.



Fonte: Barbedo (2011, p. 19).

As características microestruturais dessas regiões dependem da composição do metal de adição e do MB e das condições térmicas na qual a junta foi submetida (BARBEDO, 2011, p. 19).

Durante o resfriamento, alterações que ocorrem na zona fundida e na ZTA. Em relação à zona fundida, o metal líquido não é fortemente super-resfriado devido ao metal base ser aquecido até seu ponto de fusão, fazendo que o cordão de solda seja constituído predominantemente de grãos colunares e grosseiros. Na região da ZTA acontece uma distinção de três regiões características, com alterações diferentes na microestrutura, são elas: a região mais próxima da zona fundida que é chamada de região de crescimento de grão, onde ocorre a formação de grãos grosseiros; a região intermediária chamada de região de refino de grão, onde ocorre a formação de uma estrutura fina de ferrita e perlita; e a região mais próxima do metal base chamada de região intercrítica, onde apresentam mudanças

microestruturais cada vez menos perceptíveis (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

A partir dessas alterações na zona fundida e na ZTA, as propriedades mecânicas do material também são modificadas. Uma menor tenacidade será observada devido à formação de grãos grosseiros, podendo assim se tornar um local preferencial para a formação de trincas (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

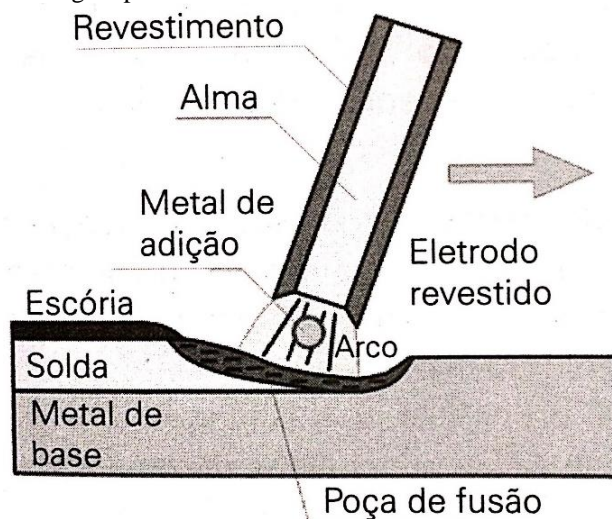
Outro fenômeno ocorrente no material submetido à soldagem são as tensões residuais. Elas ocorrem devido ao aquecimento localizado que provoca uma dilatação, que é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a uma temperatura inferior. As consequências mais observadas são a fragilização da área e uma maior suscetibilidade à corrosão sob tensão (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009, p.18).

## 4.2 Soldagem com eletrodo revestido

### 4.2.1 Definição

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, em inglês *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), tem uma vasta gama de aplicações devido ao seu baixo custo e a sua simplicidade, podendo ser definida como um processo de soldagem a arco, onde a união é produzida pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a soldar (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992, p. 31). O processo é representado na Figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática do processo de soldagem por eletrodo revestido.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2014, p. 182).

A solda é iniciada tocando-se a ponta do eletrodo na peça, assim um curto-circuito é gerado e forma-se o arco elétrico entre o material e a peça com temperatura aproximada de 3500°C. Com essa temperatura ocorre a fusão do metal base e da ponta do eletrodo, onde parte dessa extremidade fundida é depositada na cavidade formada pela fusão do metal base.

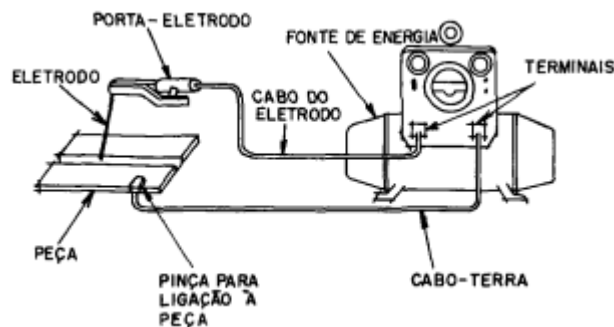
O eletrodo revestido é constituído por uma vareta do metal a ser depositado, também chamada de alma, envolta de um revestimento que apresenta como principal função, a de proteger a poça de fusão e o cordão de solda. De acordo com a composição do revestimento, torna-se possível realizar até refino secundário e acerto da composição do metal fundido. Dessa maneira, a existência de um revestimento isento de defeitos e o armazenamento adequado desses eletrodos revestidos são fatores importantes para a qualidade da solda (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

#### 4.2.2 Equipamentos utilizados e consumíveis

O equipamento básico necessário para a soldagem por eletrodo revestido é composto de fonte de energia, alicate para a fixação dos eletrodos, cabos de interligação, pinça para a ligação a peça, equipamento de proteção individual e equipamento para a limpeza da solda (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Um esquema do equipamento básico é representado na Figura 4:

Figura 4 - Esquema do equipamento básico da solda com eletrodo revestido.



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (1992, p. 32).

O uso da corrente pode ser da maneira contínua como de maneira alternada para eletrodos revestidos. No uso de maneira alternada pode se usar polaridade reversa ou polaridade direta. Algumas vantagens diferem o uso da corrente contínua ou da corrente alternada, no caso do uso da corrente contínua, tem-se uma melhor estabilidade de arco e qualidade de depósito, já com o uso da corrente alternada ocorre uma redução na

susceptibilidade ao sopro magnético e a queda de tensão através do cabo é menor, facilitando assim soldas a distância (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

Na soldagem com eletrodos revestidos, o diâmetro do eletrodo e a espessura do revestimento são os principais parâmetros que controlam a magnitude da corrente, enquanto que a voltagem e o comprimento do arco dependem do tipo de revestimento e do soldador. Eles não são ajustáveis como na soldagem com o arco protegido por gás. Apesar do tipo de corrente e polaridade do eletrodo, a transferência do líquido e dos gases principais no arco, sempre ocorrem em uma direção, ou seja, do eletrodo para a poça de fusão (LEONELLO FILHO, 2005).

Os eletrodos revestidos utilizados na soldagem manual de aço são classificados como ácidos, óxidos, básicos, rútilicos e celulósicos. As propriedades do arco e os processos que ocorrem são determinados principalmente pelo tipo de eletrodo (LEONELLO FILHO, 2005).

#### 4.2.3 Variáveis elétricas e operacionais

A tensão do arco é uma variável importante na solda por eletrodo revestido, porém não se consegue controlá-la independentemente dos outros parâmetros, devido a três razões: o controle da distância entre a peça e o eletrodo é feito manualmente não garantindo grandes precisões; à medida que a corrente é aumentada, são requeridas maiores tensões para operação; e a transferência do metal tipo globular está diretamente ligada com a variação no comprimento efetivo do arco (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

A corrente de soldagem é a variável que controla predominantemente a quantidade de fusão no MB e a penetração da solda, sendo essas o aspecto do cordão e as propriedades da junta. Controlando de forma direta a magnitude e a distribuição espacial da energia térmica disponível no arco, como também a maior parte dos fenômenos que ocorrem nessa região (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

A velocidade de avanço é outra variável de extrema importância. Apesar de ser impreciso o controle, devido ao fato da operação ser manual, a velocidade de avanço é inversamente proporcional à altura e largura do cordão. Com isso, mesmo com elevadas correntes, a energia de soldagem se mantém reduzida com a aplicação de altas velocidades de avanço (WAINER, BRANDI e MELLO, 1992).

### 4.3 Aço SAE 1020

#### 4.3.1 Composição química

A composição do aço SAE 1020 é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do aço SAE 1020 em porcentagem de massa.

C (%)	Mn (%)	P Máx. (%)	S Máx. (%)
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050

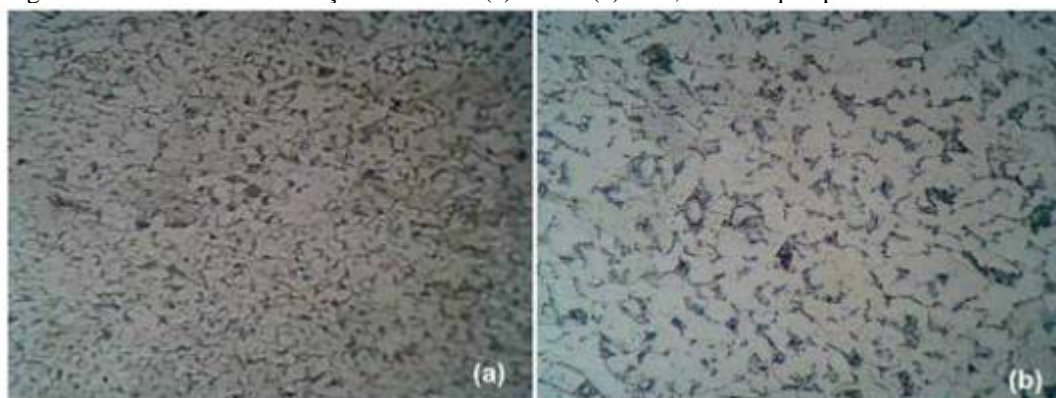
Fonte: Gerdau (2016).

O aço SAE 1020 é um aço hipoeutetóide que apresenta um baixo teor de carbono, contendo também em sua composição os elementos manganês, fósforo e enxofre. A presença desses elementos na composição propicia alterações nas propriedades. Os efeitos causados pelo fósforo e enxofre são semelhantes e indesejáveis, pois em concentrações não controladas, fragilizam o aço deixando-o quebradiço. O carbono causa um aumento na dureza e na temperabilidade como o aumento da concentração. O manganês reduz a fragilização causada pelo enxofre e promove um endurecimento acentuado (COLPAERT, 2008).

#### 4.3.2 Microestrutura

A microestrutura de um aço SAE 1020 é observada na Figura 5, sendo constituída das fases perlita e ferrita, representadas pelos grãos escuros e claros, respectivamente.

Figura 5 - Microestrutura do aço SAE 1020: (a) 20X e (b) 40X, com ataque químico com Nital 3%.



Fonte: Rodrigues et al. (2014).

A ferrita tem sua morfologia característica baseada no resfriamento, quando esse ocorre de maneira lenta, os grãos apresentam forma equiaxial, e quando ocorre mais

severamente, os grãos apresentam forma de agulhas, em materiais com elevada taxa de ferrita normalmente tem baixa dureza (COLPAERT, 2008).

A perlita não se caracteriza como uma fase, mas sim, na mistura de duas fases, ferrita e cementita, que apresentam ductilidade e alta dureza, respectivamente. A conjugação dessas duas fases propicia ao material uma elevada dureza, alta resistência mecânica, alta resistência à fadiga, alta resistência ao desgaste e uma tenacidade à fratura intermediária (COLPAERT, 2008).

#### 4.3.3 Propriedades mecânicas

A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas do aço SAE 1020 laminado.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Redução de área (%)</b>	<b>Dureza (HB)</b>	<b>Impacto (J)</b>
450	330	36,0	59	143	87

Fonte: Gerdau (2016).

O aço SAE 1020 apresenta também elevada forjabilidade, soldabilidade e usinabilidade. Um dos fatores que ocasionam a elevada soldabilidade é a baixa temperabilidade, resultado das baixas concentrações de carbono e manganês. Com a elevada temperatura advinda do processo de soldagem, é necessária uma baixa temperabilidade, para que após o resfriamento não ocorra a fragilização do material.

#### 4.3.4 Aplicações

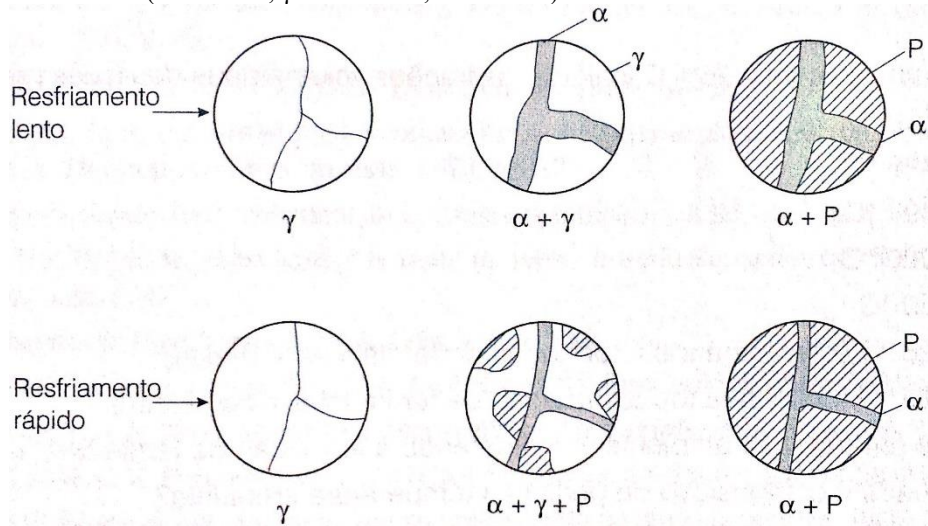
O aço SAE 1020 apresenta diversas aplicações devido ao seu baixo custo e características como alta usinabilidade, soldabilidade e forjabilidade. Alguns exemplos de aplicações são: vergalhões de construção estrutural, engrenagens, virabrequins, eixos de maquinários, tubos, entre outros.

## 4.4 Soldagem de aço SAE 1020

### 4.4.1 Efeitos na microestrutura

O aço SAE 1020, em um resfriamento lento, apresenta as fases perlita e ferrita. No processo de soldagem, muitas vezes, não se tem o controle do resfriamento do material, ocorrendo assim, um aumento na formação de perlita em relação à ferrita. Uma representação desse fenômeno é apresentada na Figura 6 (SILVA, MEI, 2006).

Figura 6 - Redução da fração volumétrica da ferrita com o aumento da taxa de resfriamento ( $\alpha$  = Ferrita,  $\gamma$  = Austenita, P = Perlita).

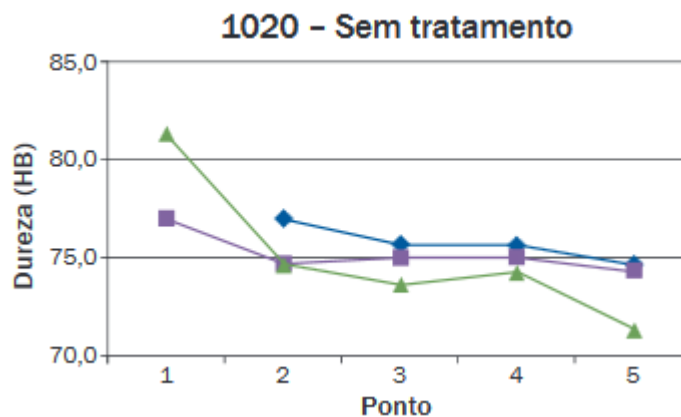


Fonte: Silva e Mei (2006, p. 21).

### 4.4.2 Efeito nas propriedades mecânicas e na taxa de corrosão

As alterações que a microestrutura do material sofre e que ocasiona efeitos nas propriedades mecânicas do material, são observados nas regiões mais próximas ao aquecimento. A Figura 7 apresenta um perfil de dureza, onde foi realizado medições em três linhas perpendiculares ao cordão de solda, sendo que o ponto 1 é a região mais próxima ao cordão e o ponto 5 é a região mais afastada.

Figura 7 - Perfil de dureza em uma junta soldada de aço SAE 1020.



Fonte: Barrios et al. (2012, p. 69).

O perfil de dureza apresenta maiores valores de dureza nas regiões mais próximas ao cordão de solda (BARRIOS et al., 2012). Com o aquecimento localizado ocasionando um aumento na formação de perlita, a dureza do material será maior na região do ponto 1, onde esse efeito foi mais evidente, em relação ao ponto 5, que é o ponto mais afastado do aquecimento.

Para que um material seja tenaz é necessária a combinação de duas propriedades, a resiliência e a ductilidade. Com o aumento da dureza em regiões próximas ao cordão, a ductilidade do material nessas regiões também é diminuída, ocorrendo a fragilização do mesmo. Devido ao fato dos materiais frágeis apresentarem menores tenacidades que materiais dúcteis, a tenacidade do material próximo às regiões do cordão será reduzida (CALLISTER, 2007).

A resistência à corrosão é diminuída por três fatores provocados pela soldagem: o aumento no tamanho de grão, onde os contornos dos grãos funcionam como área anódica e o grão funciona como área catódica, acarretando em um aumento da área catódica, conseqüentemente o aumento da susceptibilidade à corrosão; as tensões residuais, que promovem a corrosão sob tensão; e a diferença de temperatura entre a região mais próxima do cordão e a região mais afastada, causando assim uma diferença de potencial entre elas (GENTIL, 1996; MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).



## 4.5 Tratamento térmico

### 4.5.1 Recozimento

A deformação plástica sofrida por um material metálico faz com que ocorra o fenômeno de encruamento, resultando em uma deformação cristalina na microestrutura do material proporcional a intensidade dessa deformação. O encruamento resulta em um aumento da resistência mecânica e da dureza do material. A energia armazenada pelo material resultante da deformação plástica, associada ao número de imperfeições cristalinas e as discordâncias, formam uma barreira energética a volta do material a condição não conformada. Essa barreira é ultrapassada pelo aquecimento do metal a uma certa temperatura e por um determinado período (CHIAVERINI, 2008).

O termo “recozimento” se refere a um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura por um período de tempo prolongado, sendo ele então resfriado lentamente. Normalmente, o recozimento é realizado com os objetivos de (1) aliviar tensões; (2) tornar o material com menor dureza, dúctil e tenaz; e/ou (3) produzir uma microestrutura específica. É possível realizar diferentes tratamentos térmicos de recozimento; eles são caracterizados pelas mudanças que são induzidas, as quais muitas vezes são microestruturais, e que são responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas e também elétricas, quando se trata de materiais ferromagnéticos (MOZETIC, 2014).

O fenômeno do recozimento é classificado em três estágios:

- Recuperação;
- Recristalização;
- Crescimento de grão

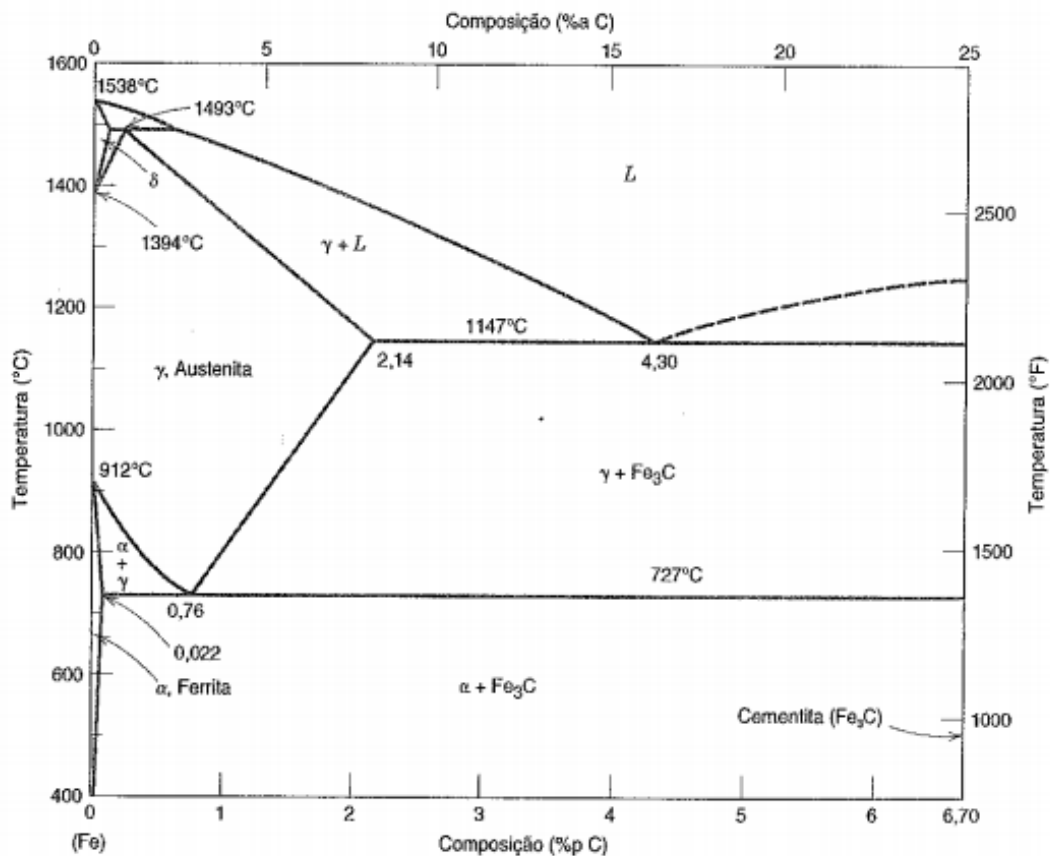
A recuperação é o primeiro estágio do recozimento e acontece em temperaturas mais baixas. Nele acontece o rearranjo de discordâncias, de modo a adquirir configurações mais estáveis, onde as tensões produzidas no encruamento são reduzidas. O estágio de recristalização ocorre logo após a recuperação, portanto em temperaturas mais altas. Esta etapa consiste na formação de novos cristais de composição e estrutura idênticas aos grãos originais não deformados. O crescimento de grão ocorre em temperatura mais elevada, onde os grãos recristalizados tendem a crescer. O mecanismo desse fenômeno consiste na absorção dos grãos circunvizinhos por parte de alguns grãos, tendo como força propulsora a energia superficial dos contornos de grão dos grãos recristalizados. É importante ressaltar que nos estágios de recuperação e recristalização não ocorre qualquer modificação nas fases do

material. Quando a temperatura for de tal ordem em que se observa essa mudança, tem-se o recozimento pleno ou total (CHIAVERINI, 2008).

#### 4.5.1.1 Recozimento Subcrítico

Os recozimentos subcríticos são realizados em temperaturas abaixo da temperatura eutetóide, ou seja, linha  $A_1$  do diagrama de fases do Ferro – Carbono, ilustrado na Figura 8. É um tratamento térmico utilizado para aliviar as tensões, em alguns casos, o recozimento subcrítico é realizado por longos períodos (mais do que 15 horas) para a esferoidização da cementita. Esta microestrutura é indicada para aumentar a ductilidade do material e facilitar a usinagem do mesmo (MOZETIC, 2014).

Figura 8 - Diagrama de fases Ferro - Carbono.



Fonte: Callister (2007, p. 188).

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Material

Este trabalho teve como material de estudo uma junta soldada de aço SAE 1020 (Figura 9) obtida por soldagem SMAW, cedida pelo SENAI de Londrina.

Figura 9 - Junta de solda de aço SAE 1020.



Fonte: Autoria própria.

A chapa de aço SAE 1020 de 15 mm de espessura foi obtida por meio do processo de laminação a quente. Os parâmetros de soldagem utilizados estão mostrados na Tabela 3. A composição química do eletrodo E7018 é apresentada na Tabela 4. Na Figura 10 é mostrado o equipamento de soldagem do SENAI utilizado para a obtenção da junta soldada deste trabalho.

Tabela 3 - Parâmetros da soldagem.

<b>Parâmetros da soldagem</b>	<b>Valores</b>
Soldadora	Eutectic Castolin DPT 300 i
Consumível	LINCOLN - E7018
Tensão	32 V
Corrente	120 A

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Composição química em massa do consumível E7018.

C(%)	Mn(%)	Si(%)	P(%)	S(%)	Ni(%)	Mo(%)	V(%)	Cr(%)
0,070	1,230	0,700	0,020	0,005	0,060	0,009	0,010	0,050

Fonte: LINCOLN LN 78® (2016).

Figura 10 - Equipamento de soldagem.



Fonte: Autoria própria.

A partir da junta soldada foram obtidas 6 amostras, em forma de fatias, por corte transversal, ilustrado na Figura 11, realizado no próprio SENAI de Londrina. Para o ensaio de impacto, foram confeccionados 9 corpos na empresa ESTAMPAR PROFASA.

Figura 11 - Ilustração do corte transversal para a retirada das amostras.

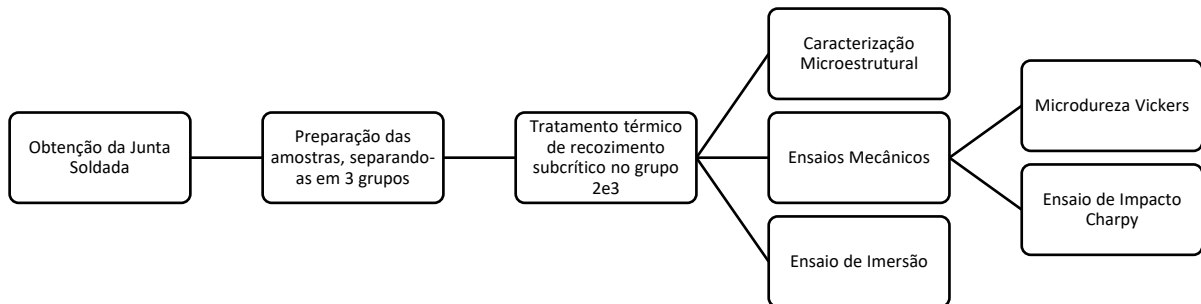


Fonte: Autorial própria.

## 5.2 Métodos

No fluxograma (Figura 12) estão ilustradas as etapas e os métodos que foram propostos e executados nesse trabalho.

Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.



Fonte: Autoria própria.

### 5.2.1 Tratamento térmico

Após a obtenção das amostras, separaram-se as em três grupos: o primeiro grupo permaneceu como recebida, o segundo grupo foi submetido a um tratamento térmico de recozimento subcrítico a temperatura de 600°C e o terceiro grupo foi submetido a um tratamento térmico de recozimento subcrítico a temperatura de 700°C, como apresentado na Tabela 5. Os parâmetros utilizados para ambos os tratamentos foram com taxa de aquecimento de 10°C por minuto, duas horas de homogeneização e resfriamento ao ar livre. Para a realização do tratamento térmico foi utilizado o forno mufla JUNG 1712. Posteriormente, repetiram-se os mesmos tratamentos sob as mesmas condições para as amostras de impacto, três amostras para cada condição.

Tabela 5 - Classificação das condições de cada grupo de amostras.

<b>Amostras</b>	<b>Condição</b>
Grupo 1	Como recebida
Grupo 2	Recozida à 600°C
Grupo 3	Recozida à 700°C

Fonte: Autoria própria.

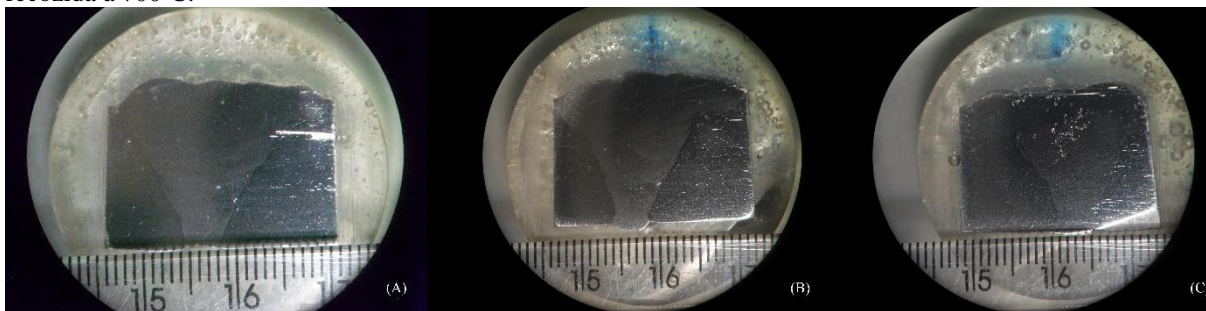
Os tratamentos térmicos foram realizados no laboratório B005 do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais DAEMA – UTFPR – Londrina.

### 5.2.2 Caracterização Microestrutural

Para a caracterização microestrutural das diferentes regiões da junta soldada, as amostras foram embutidas a frio com resina de poliéster, lixadas em lixa d'água de granulação 100, 220, 360, 600 e 1200, e seguidas de polimento em suspensão de alumina de  $1,0 \mu\text{m}$ . Para revelar a microestrutura, foi feito um ataque com Nital 2%. Com o auxílio do microscópio óptico ZEISS – Axio Scope A1 com câmera acoplada ZEISS – AxioCam ERc5s e do *software* AxioVs40, foram capturadas as imagens da microestrutura nas três regiões, antes e após o ataque. As amostras utilizadas estão apresentadas na Figura 13.

A caracterização microestrutural foi realizada no laboratório B004 do DAEMA – UTFPR – Londrina.

Figura 13 - Amostras para caracterização microestrutural: (A) como recebida, (B) recozida à  $600^\circ\text{C}$  e (C) recozida à  $700^\circ\text{C}$ .



Fonte: Autoria Própria.

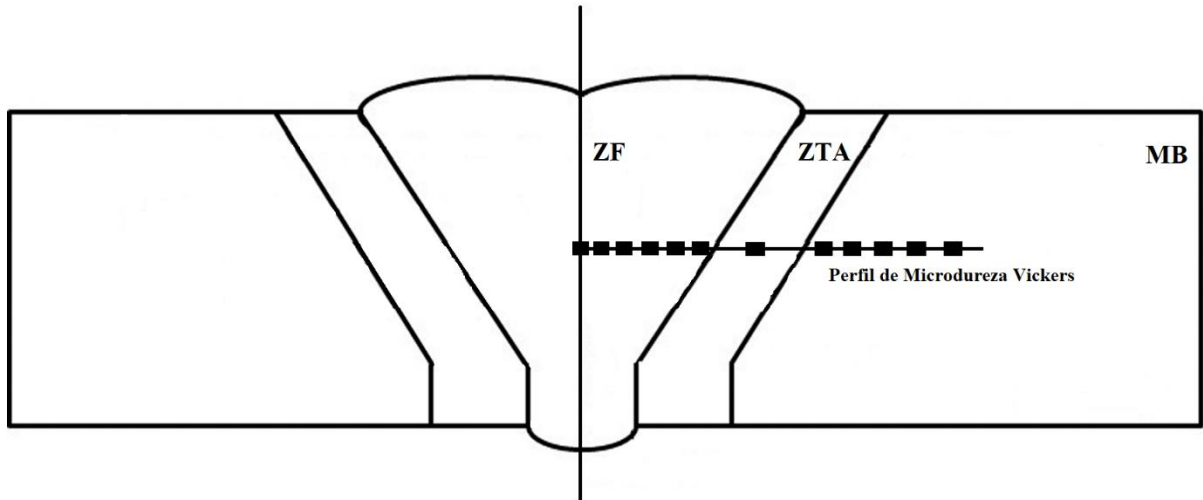
### 5.2.3 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas das diferentes regiões da junta soldada foram avaliadas por meio de medidas de microdureza e energia absorvida no ensaio de impacto na ZTA.

Após realizar o ensaio de caracterização microestrutural, utilizou-se das mesmas 3 amostras para construir um perfil de microdureza Vickers. Com o auxílio do microdurômetro FUTURE-TECH FM-800, foi feito um perfil de microdureza em cada amostra por meio de uma sequência de 12 medidas ao longo da junta soldada, a primeira indentação foi posicionada no ponto central da junta sobre seu eixo simétrico, com as demais indentações direcionadas para o MB em um eixo perpendicular ao eixo simétrico da junta. O espaçamento entre as indentações foi de 1mm, realizando-se um ajuste na sétima medida de cada amostra, afim de se obter o valor de microdureza na ZTA. A carga e o tempo utilizado foram de 1000gf

e 10s respectivamente, baseados nas recomendações da norma ASTM E384 – 16. Na Figura 14 são ilustradas as posições que foram realizadas as indentações.

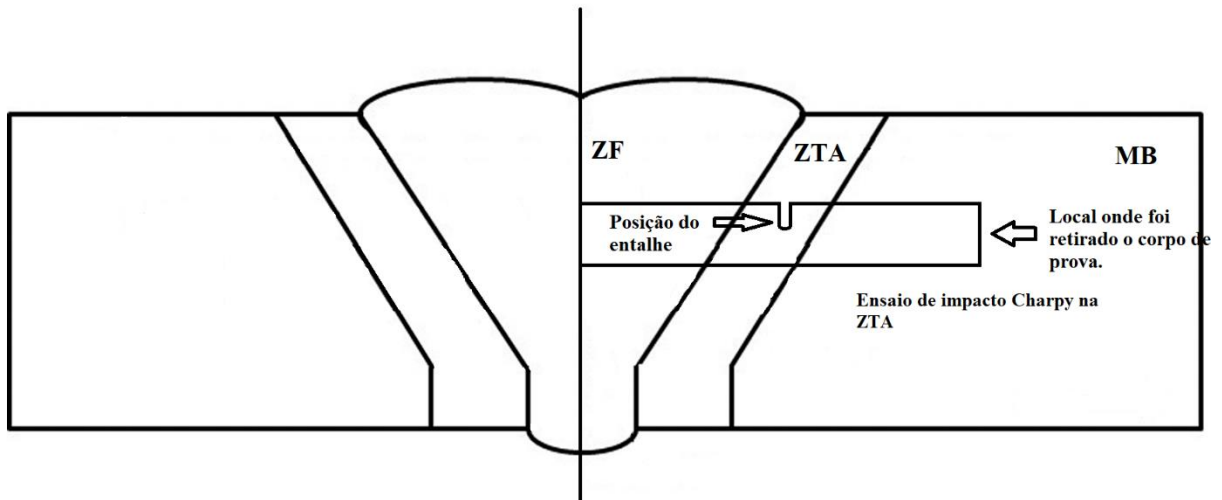
Figura 14 - Posições das indentações no ensaio de microdureza.



Fonte: Autoria Própria.

As dimensões dos corpos de prova confeccionados na empresa ESTAMPAR PROFASA, localizada na cidade de Londrina, foram definidas com base na norma NBR 6157, e o entalhe foi localizado a 2mm da linha de fusão com objetivo de medir os valores de energia absorvida na ZTA. O ensaio realizado foi do tipo Charpy, com o auxílio do equipamento PANTEC FIT-300. A posição do local onde foi retirado o corpo de prova é representada na Figura 15.

Figura 15 - Local onde foi retirado o corpo de prova para o ensaio de impacto.



Fonte: Autoria própria.

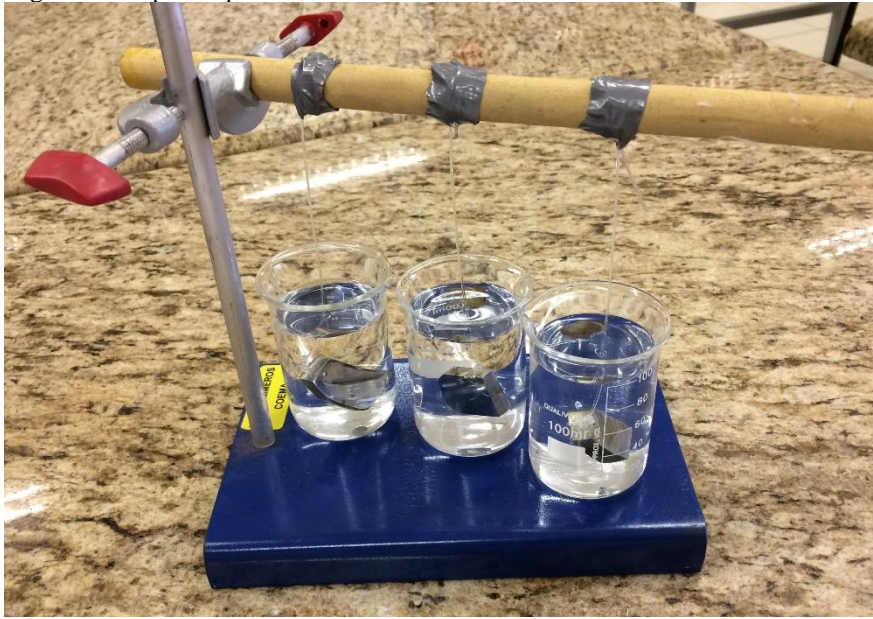


Os ensaios de microdureza e de impacto foram realizados no laboratório B006 do DAEMA – UTFPR – Londrina.

#### 5.2.4 Ensaio de imersão

A resistência à corrosão foi realizada por meio de um ensaio de imersão com um corpo de prova para cada condição de tratamento térmico (como recebida, recozida à 600°C e recozida à 700°C). Os corpos de prova foram lixados para a remoção de imperfeições, posteriormente uma face de cada amostra foi polida seguindo os mesmos métodos do polimento realizado no ensaio de caracterização microestrutural. Sua área superficial aproximada foi determinada com auxílio de um paquímetro e imagens da microestrutura antes do ensaio foram retiradas com o auxílio do microscópio óptico ZEISS – Axio Scope A1 com câmera acoplada ZEISS – AxioCam ERc5s e do software AxioVs40. Foi feito um furo transversal na lateral direita de cada amostra a fim de suspendê-las com um fio de Nylon na solução. Suas massas foram determinadas, com auxílio de uma balança de precisão BIOSCALE 2204, e o meio de imersão foi uma solução NaCl 3,5% preparada com auxílio de um agitador magnético SOLAB SL91. As amostras ficaram imersas período de 72h em temperatura ambiente. Após o período de imersão, as amostras foram retiradas da imersão, lavadas com água corrente, detergente e álcool etílico, secadas com o secador de ar quente e pesadas com a mesma balança de precisão a fim de determinar a perda de massa. O ensaio de imersão e o cálculo da perda de massa foram realizados conforme a norma ASTM G31. O aparato usado para ensaio está ilustrado na Figura 16. Os corpos de prova estão posicionados da esquerda para a direita da imagem na seguinte forma: corpo de prova como recebido, corpo de prova tratado à 600°C e corpo de prova tratado à 700°C respectivamente.

Figura 16 - Aparato para o ensaio de imersão.



Fonte: Autoria própria.

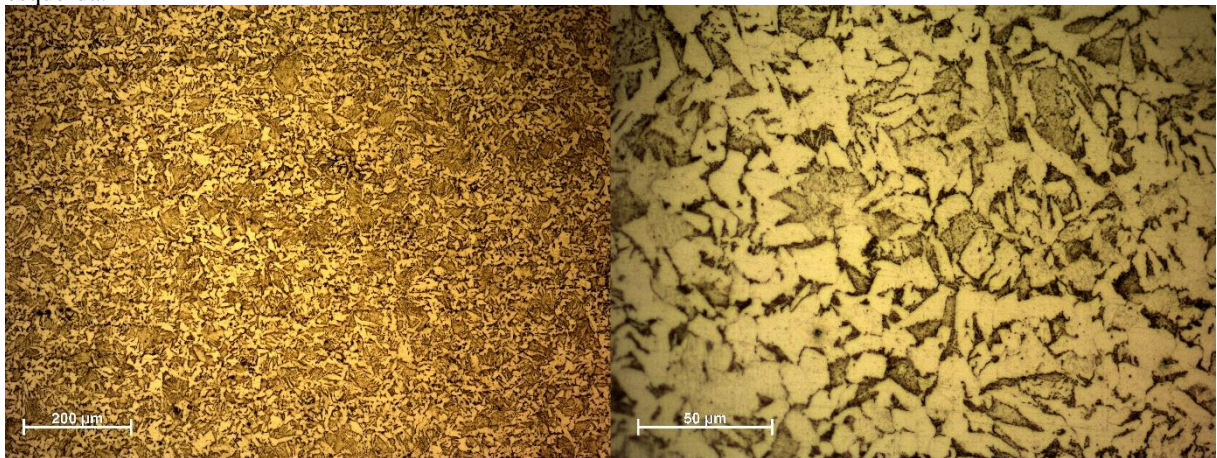
O ensaio de imersão foi realizado no laboratório B005 do DAEMA – UTFPR – Londrina.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Caracterização Microestrutural

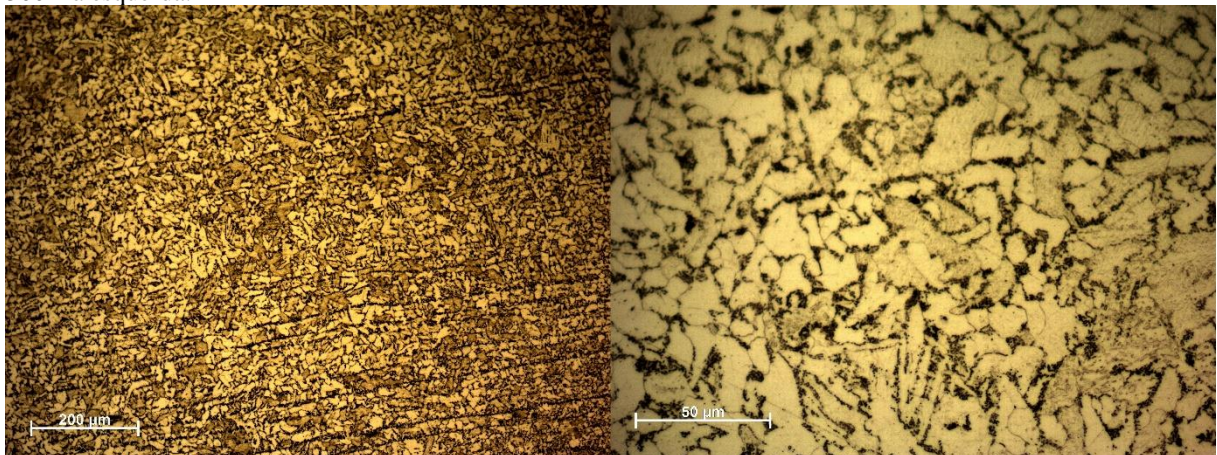
A seguir são mostradas as microestruturas das diferentes regiões de cada uma das amostras da junta soldada. As Figuras 17, 18 e 19 são referentes ao MB das amostras como recebida, recozidas a 600 e 700°C, respectivamente.

Figura 17 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda.



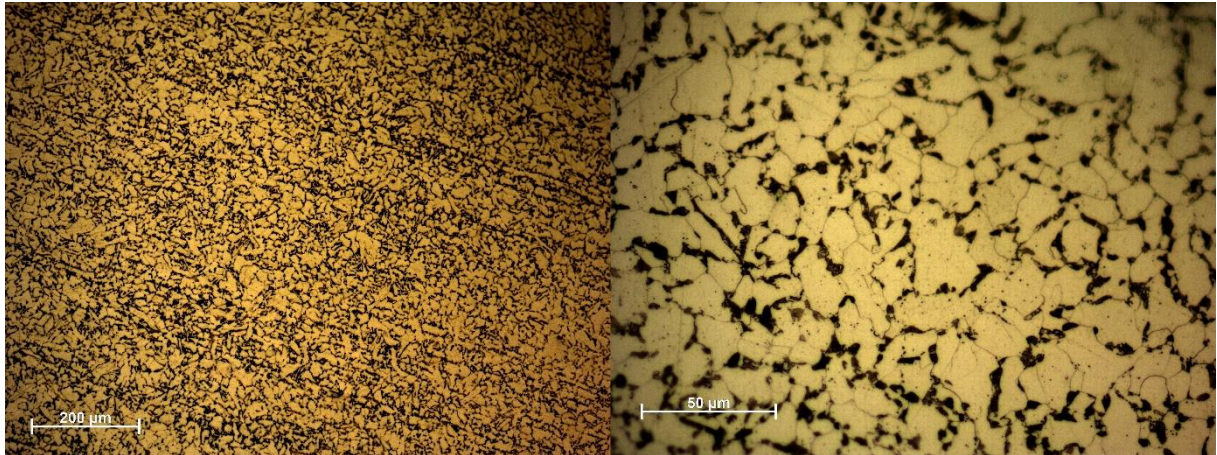
Fonte: Autoria própria.

Figura 18 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à direita e 500X à esquerda.



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - MB após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita.



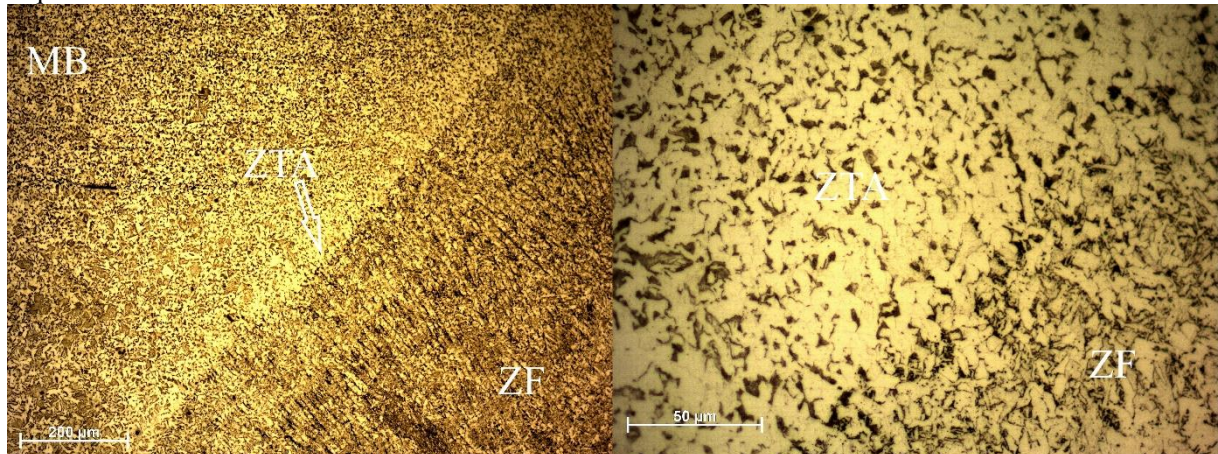
Fonte: Autoria própria.

Com as imagens obtidas do MB nas 3 condições foi possível observar a presença de duas fases, ferrita e perlita, fases essas características da microestrutura de um aço SAE 1020. Observa-se também que não ocorre a mudança de fase no material, comprovando assim o objetivo do tratamento térmico de recozimento subcrítico, por ser um tratamento para alívio de tensões residuais sem que ocorra a mudança de fase no material.

Na amostra com tratamento térmico à 700°C é possível observar um crescimento de grão em relação às outras duas amostras, fato esse evidenciado no momento do ataque químico das amostras. Durante o ataque químico foi possível observar um aumento significativo na susceptibilidade ao ataque da amostra de 700°C em relação a amostra de 600°C e sem tratamento, as amostras sem tratamento e com tratamento à 600°C tiveram um ataque com Nital 2% por 15s enquanto a amostra a 700°C teve o mesmo ataque por um período de 1s. Isso se deve ao fato do interior do grão apresentar comportamento catódico, enquanto o contorno do grão apresenta comportamento anódico, com isso, quando ocorre o crescimento de grão na microestrutura do material há um aumento da área catódica e uma redução da anódica, causando um aumento da corrosão eletroquímica no interior do material.

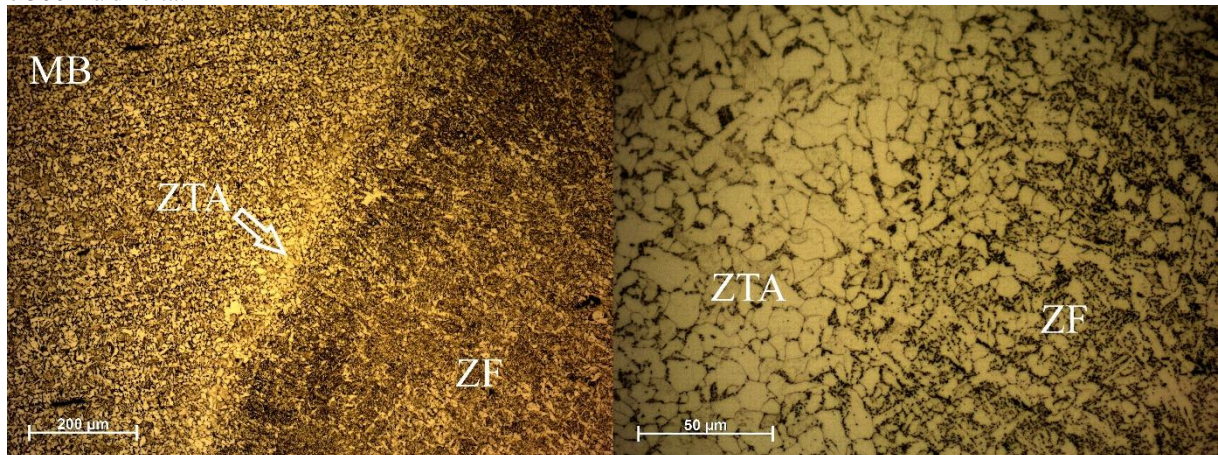
As Figuras 20, 21 e 22 são referentes às microestruturas da ZTA das amostras como recebida, recozidas a 600 e 700°C, respectivamente.

Figura 20 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda.



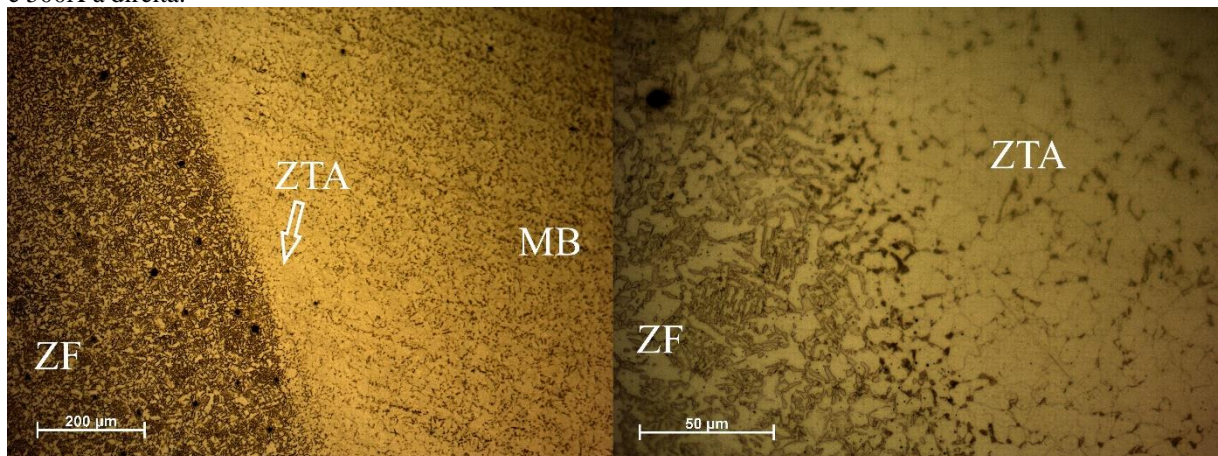
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à esquerda e 500X à direita.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22 - ZTA após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita.



Fonte: Autoria própria.

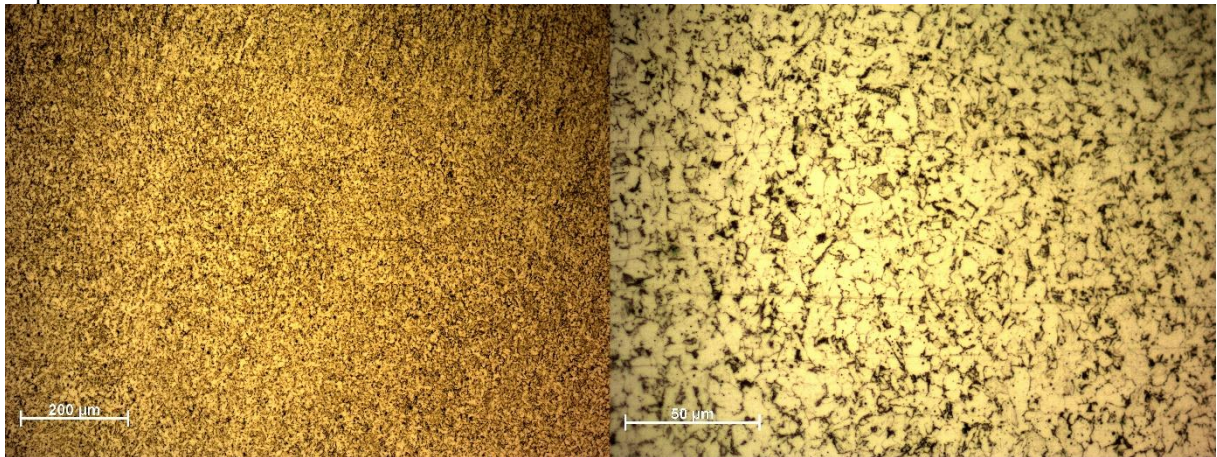
A partir das imagens é possível observar a linha de fusão que separa a zona fundida e a ZTA, regiões essas que apresentam características microestruturais bem distintas, como por exemplo, um refinamento de grão decorrente do rápido resfriamento na zona fundida quando comparada à ZTA, que apresenta granulometria mais grosseira devido ao elevado calor que essa região, no estado sólido, é submetida durante o processo de soldagem.

Nas amostras como recebida e com tratamento a 600°C é possível constatar uma diminuição do tamanho dos grãos quando se caminha em direção ao metal base, diferentemente da amostra com tratamento à 700°C onde se observa uma constância no crescimento dos grãos mesmo quando se caminha para a região do metal base. Fato esse causado pelo tratamento térmico em que a amostra foi submetida.

Comparando-se as microestruturas do MB e da ZTA é possível verificar a presença de perlita mais grossa na região da ZTA devido ao resfriamento mais lento em que a região mais próxima da solda foi submetida.

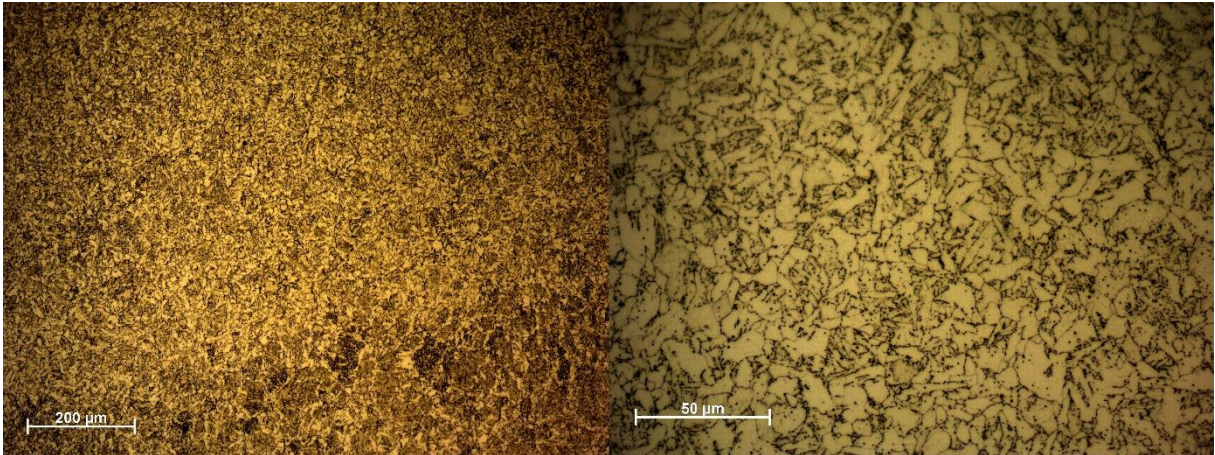
As Figuras 23, 24 e 25 são referentes às microestruturas das zonas fundidas das amostras como recebida, recozidas a 600 e 700°C, respectivamente.

Figura 23 - ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra sem tratamento térmico, 100X à direita e 500X à esquerda.



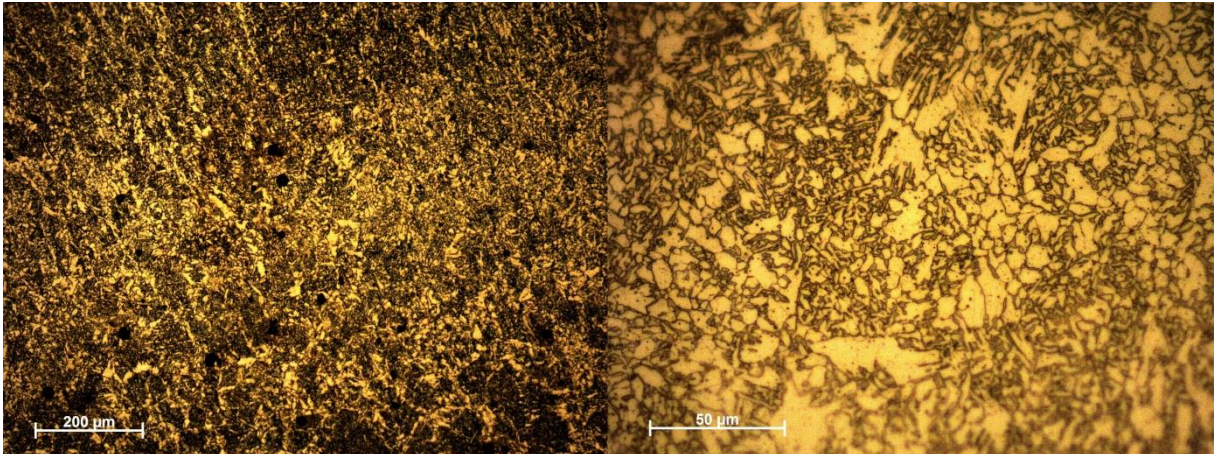
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 600°C, 100X à esquerda e 500X à direita.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – ZF após ataque químico com Nital 2%, amostra com tratamento térmico a 700°C, 100X à esquerda e 500X à direita.



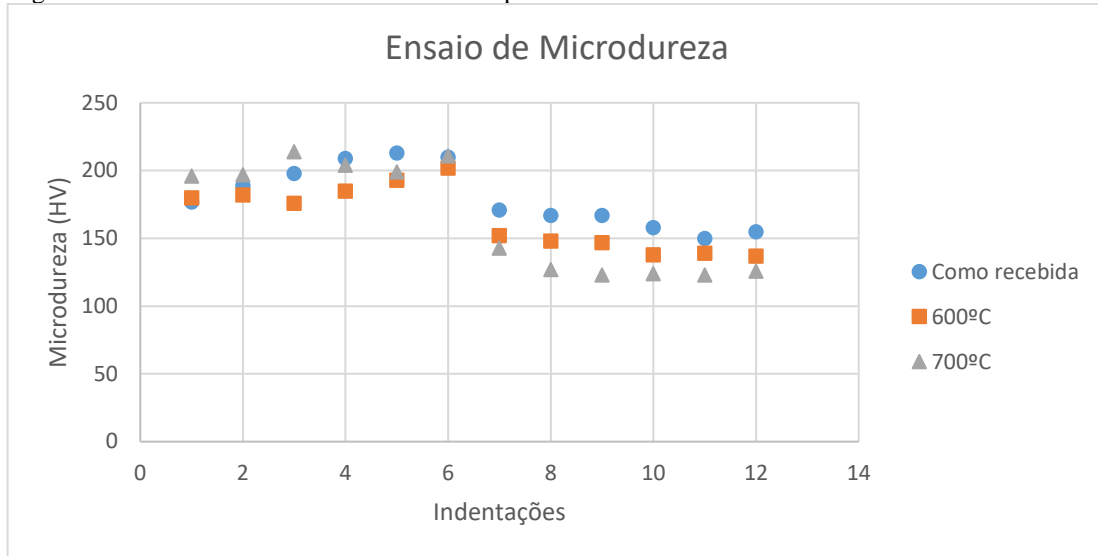
Fonte: Autoria própria.

Na microestrutura da ZF é possível observar a presença das fases de grão de ferrita primária de contorno de grão e de ferrita acicular. A ferrita acicular nucleia-se de forma heterogênea com aparência pontiaguda, garantindo ao material uma combinação de elevada resistência com boa tenacidade. Essas propriedades são advindas de suas características microestruturais, que apresentam carbonitretos precipitados dispersos e alta densidade de finas lâminas emaranhadas e desorganizadas no interior dos grãos de ferrita (HASHIMOTO, 2010).

## 6.2 Propriedades mecânicas

Os valores de microdureza Vickers encontrados nos perfis das três amostras são observados na Figura 26. As indentações 1 até 6 foram feitas na ZF, a indentação 7 foi feita na ZTA e as indentações 8 até 12 foram feitas no MB.

Figura 26 - Valores do ensaio de microdureza para as três amostras.



Fonte: Autoria própria.

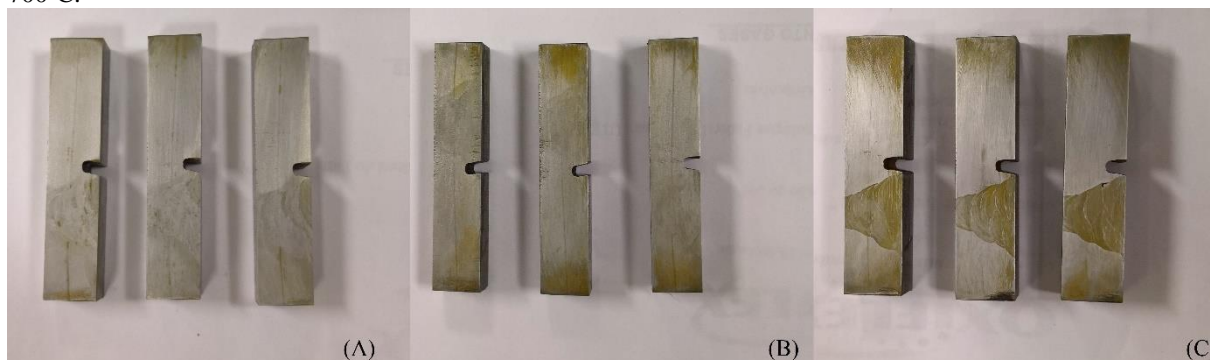
Com os valores encontrados de microdureza é possível observar a efetividade do tratamento térmico de alívio de tensões realizado nas amostras, notando-se uma diminuição na região da ZTA e do MB para as duas amostras submetidas aos tratamentos. Isso se deve a redução das tensões residuais originadas da diferença de temperatura brusca advinda do processo de soldagem.

Outro fator possível de observar é a diferença de dureza entre a ZF e o MB. Com a diferença na composição química dos materiais, e devido ao fato do metal do consumível apresentar maior quantidade de carbono que o MB, a ZF apresenta uma maior dureza que o MB. Constatase também que o maior valor de dureza do MB é o mais próximo a ZF, e isso se deve ao fato do resfriamento ser mais rápido nessa região, aumentando consequentemente a formação de perlita em relação a ferrita.

Os corpos de prova utilizados para o ensaio de impacto estão apresentados na Figura 27 e os valores de energia absorvida, em Joule, encontrados no ensaio impacto são observados na Tabela 6.



Figura 27 - Corpos de prova para o ensaio de impacto: (A) como recebida, (B) recozida à 600°C e (C) recozida à 700°C.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6 - Valores de energia absorvida no ensaio de impacto para as 3 amostras.

<b>Amostras</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Média</b>
Como recebida	161	160	168	163±4
Recozida à 600°C	222	248	249	240±15
Recozida à 700°C	245	242	248	245±3

Fonte: Autoria própria.

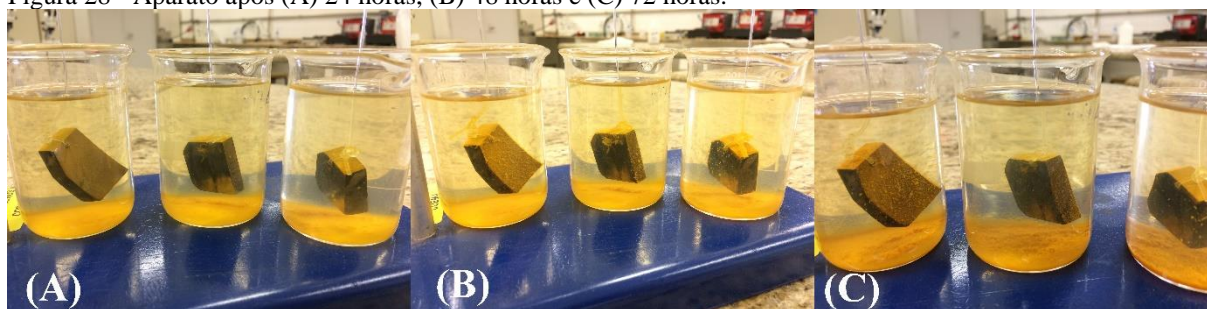
Nota-se também o efeito do tratamento térmico realizado com os valores de energia absorvida obtidos. Com a redução das tensões residuais na ZTA, o material apresenta uma maior ductilidade na região, com isso, os valores médios de energia absorvida para as amostras submetidas ao tratamento térmico foram maiores que o valor da amostra sem tratamento.

A redução das tensões residuais está ligada com o estágio de recuperação apresentado em temperaturas mais baixas no tratamento de recozimento. Nele, ocorre o rearranjo de discordâncias de modo a atingir as configurações mais estáveis, com isso as tensões advindas do encruamento do material são reduzidas.

### 6.3 Ensaio de imersão

Durante o ensaio foram fotografadas imagens do aparato a cada 24 horas para observação do efeito da corrosão no material. A Figura 28 apresenta as fotografias retiradas.

Figura 28 - Aparato após (A) 24 horas, (B) 48 horas e (C) 72 horas.



Fonte: Autoria própria.

Após o ensaio de imersão foram calculadas as taxas de corrosão para as 3 amostras e os resultados encontrados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Taxa de corrosão em mm/ano para as 3 amostras.

Amostras	Taxa de corrosão (mm/ano)
Sem TT	0,08
TT 600°C	0,10
TT 700°C	0,14

Fonte: Autoria própria.

Após a obtenção dos valores da taxa de corrosão para cada amostra, fez-se a classificação conforme a norma NACE RP 0775 exibida na Tabela 8.

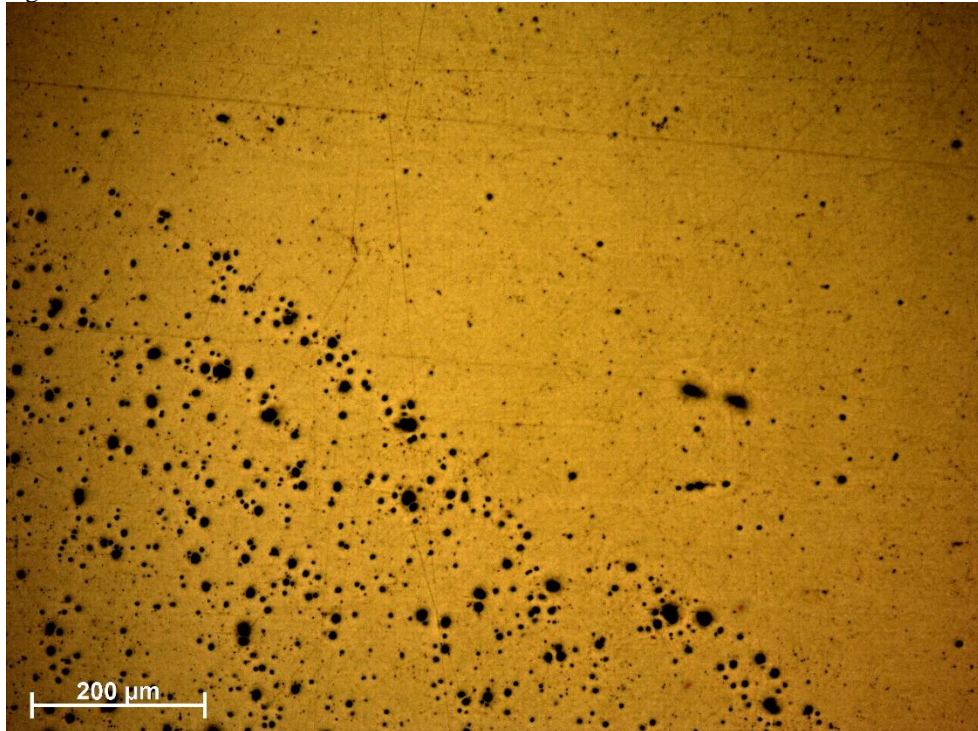
Tabela 8 - Classificação da taxa de corrosão.

Classificação	Taxa de corrosão (mm/ano)
Baixa	< 0,025
Moderada	0,025 – 0,12
Severa	0,12 – 0,25
Muito severa	> 0,25

Fonte: (NACE RP 0775).

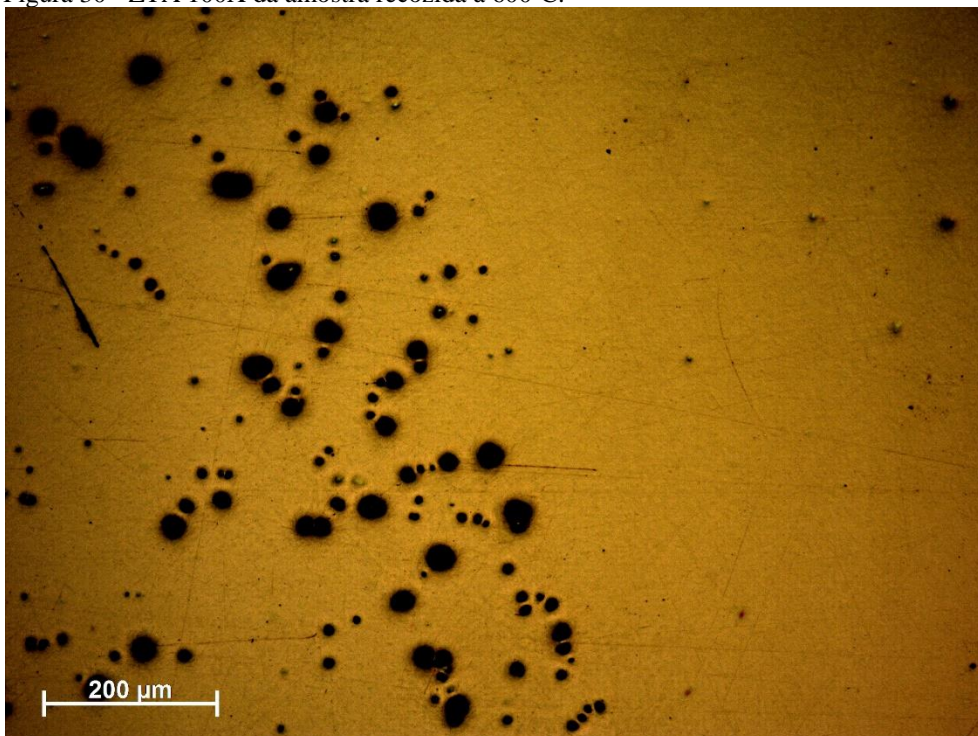
Com isso as amostras sem tratamento térmico e recozida à 600°C apresentaram classificação moderada, enquanto a amostra recozida a 700°C apresentou classificação severa. Isso se deve ao crescimento de grão propiciado pelo tratamento térmico. Após a fase de recristalização, em temperaturas mais elevadas, ocorre o crescimento dos grãos recristalizados, gerando assim uma maior sensibilidade à corrosão nos valores mais acentuados de temperatura. O fenômeno de corrosão eletroquímica também é observado entre a região catódica do material, região essa onde ocorreu o crescimento de grão, e a região anódica, região com grãos mais finos.

Figura 29 - ZTA 100X da amostra como recebida.



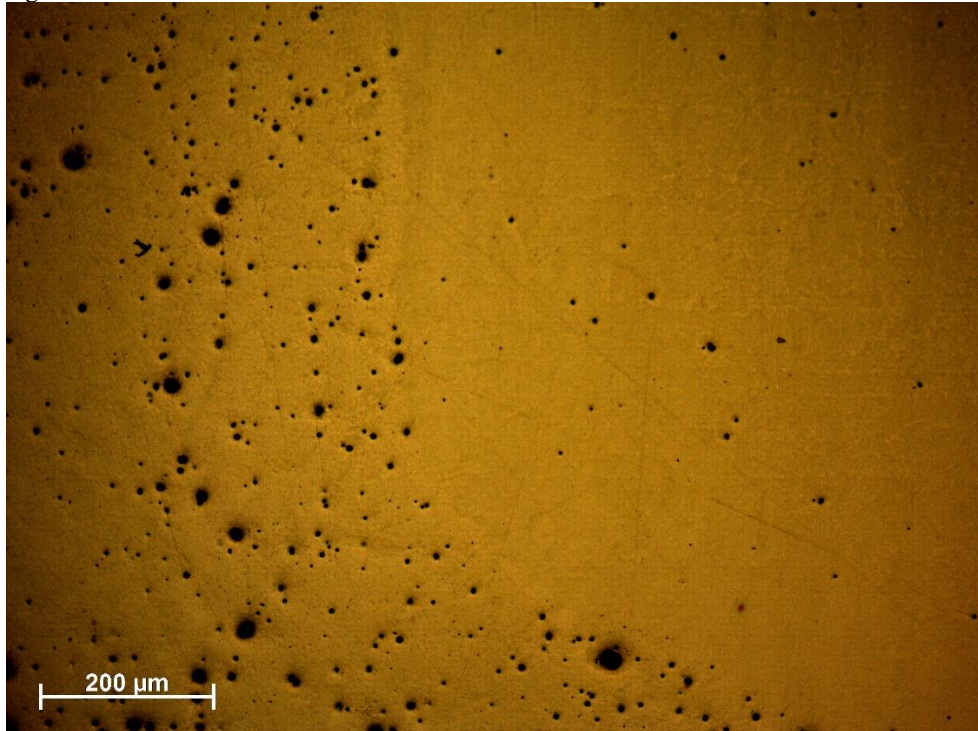
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 - ZTA 100X da amostra recozida à 600°C.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31 - ZTA 100X da amostra recozida à 700°C.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se nas Figuras 29, 30 e 31 a região da ZTA nas três amostras, onde é possível caracterizar o fenômeno de corrosão eletroquímica que ocorre entre a região com grãos de maior tamanho, ZTA, e a região com grãos de menor tamanho, ZF. Bem como é possível uma diminuição no número de pites na região do MB e um aumento na região da ZF das amostras recozidas, caracterizando assim o aumento de grão na região do MB, promovido pelo tratamento térmico.

## 7 CONCLUSÃO

Por meio da análise dos dados obtidos experimentalmente e das discussões abordadas foi possível concluir:

- Com a caracterização microestrutural, foi possível identificar cada região da junta soldada, MB, ZTA e ZF, observando-se a microestrutura característica de cada região e os respectivos efeitos dos tratamentos térmicos;
- Com a realização do perfil de microdureza, identificou-se a diminuição nos valores de dureza após as amostras serem recozidas e as diferenças nos valores entre as diferentes regiões da junta, sendo os maiores valores encontrados na ZF e os menores valores no MB;
- Por meio do ensaio de impacto, observou-se um aumento na energia absorvida na ZTA após as amostras serem submetidas ao tratamento térmico, comprovando a eficácia do tratamento para aumentar a ductilidade do material;
- Após o ensaio de imersão, as amostras que foram recozidas termicamente sofreram maior corrosão do que a amostra como recebida, e a amostra recozida à 700°C sofreu maior sensibilização do que a recozida a 600°C.

Com os resultados obtidos dos ensaios foi possível cumprir todos os objetivos propostos para esse trabalho.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para uma visão mais abrangente nos estudos de uma junta soldada com tratamento térmico pós soldagem, apresento as seguintes sugestões:

- Verificar as alterações ocasionadas em juntas soldadas de mesmo MB com diferentes tipos de consumíveis;
- Verificar a alteração das propriedades em diferentes tipos de MB para um mesmo consumível;
- Realizar os mesmos ensaios em uma junta soldada com somente um passe, e verificar as diferenças nas alterações das propriedades em relação a uma solda multipasses.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G31**: Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. West Conshohocken: Astm International, 2015. 10 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E384 – 16**: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: Astm International, 2016. 28 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6157**: Materiais metálicos - Determinação da resistência ao impacto em corpos-de-prova entalhados simplesmente apoiados. 1 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980. 8 p.

BARBEDO, Nancy del Ducca. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

BARRIOS, Daniel Benítez et al. **A influência das técnicas de jateamento e martelamento no comportamento mecânico de juntas soldadas**. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, São Paulo, v. 12, n. 1, p.59-76, 2012. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2012/19107.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2016

CALLISTER, Willian D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2007. 705 p. Traduzido por José Roberto Moraes d' Almeida.

CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento térmico das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p. Revisão técnica André Luiz V. da Costa.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 1996. 345 p.

GERDAU. **Manual de Aços**. Disponível em: <[http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf)>. Acesso em: 22 out. 2016.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 1022 p.

HASHIMOTO, Maurício Maia Braga. **CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE UM AÇO BAIXO CARBONO E BAIXOS TEORES DE ELEMENTOS DE LIGAS COM ESTRUTURA CONTENDO FERRITA ACICULAR**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94408/hashimoto\\_mmb\\_me\\_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94408/hashimoto_mmb_me_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 27 nov. 2018.

LEONELLO FILHO, Antenor. **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS NA ESTABILIDADE DO ARCO E CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORDÃO**. 2005. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

**LINCOLN LN 78®**: AWS E7018 • AWS A5.1 / A5.1M: 2012 E7018 / E4918 • ASME SFA - A5.1: E7018 • FBTS: E7018. AWS E7018 • AWS A5.1 / A5.1M: 2012 E7018 / E4918 • ASME SFA - A5.1: E7018 • FBTS: E7018. 2016. Disponível em: <[http://www.lincolnelectric.com.br/upload/Lincoln LN 78\\_Digital.pdf](http://www.lincolnelectric.com.br/upload/Lincoln_LN_78_Digital.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2017.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009. 362 p.

MOZETIC, Halston. **MICRO ESTAMPAGEM E RECOZIMENTO CONJUGADO COM CAMPO INDUZIDO: EFEITOS NO DESEMPENHO ELETROMAGNÉTICO PARA CHAPAS ELÉTRICAS DE GRÃO NÃO ORIENTADO**. 2014. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/109171/000948208.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

NACE INTERNACIONAL. **SP0775: Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations**. Houston: Nace International, 2013. 19 p.

RODRIGUES, Luciano Monteiro et al. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos Unifoa**, Volta Redonda, v. 1, n. 1, p.39-44, dez. 2014.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e Ligas especiais**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 2006. 646 p.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992. 494 p.