



**MATEUS CARPENEDO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO  
HARDOX 500 PELO PROCESSO MAG**

Horizontalina - RS  
2017

**MATEUS CARPENEDO**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE JUNTAS SOLDADAS DO AÇO  
HARDOX 500 PELO PROCESSO MAG**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Jonathan Felipe Camargo, Mestre em Engenharia Mecânica.

**Horizontina - RS  
2017**

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso.**

**“Caracterização Mecânica de Juntas Soldadas do Aço HARDOX 500 Pelo  
Processo MAG”**

**Elaborada por:**

**MATEUS CARPENEDO**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 27/11/2017  
Pela Comissão Examinadora

---

Prof. Jonathan Felipe Camargo, Me. Eng.  
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

---

Prof. Eloir Fernandes, Me. Eng.  
FAHOR – Faculdade Horizontalina

---

Prof. Geovane Webler, Me.  
FAHOR – Faculdade Horizontalina

**Horizontalina - RS  
2017**

## Dedicatória

Dedico este trabalho especialmente a minha querida e amada família, em especialmente aos meus pais Valdir, Janete a meu irmão Marcelo, os quais sempre estiveram ao meu lado apoiando, pois sem eles não teria chegado até aqui.

## AGRADECIMENTO

Pela conclusão deste trabalho agradeço primeiramente a Deus, e nossa Senhora Aparecida pelo caminho iluminado que tive ao longo da vida.

Agradecimento especial aos meus pais por todo apoio amor e atenção, mesmo nos momentos de dificuldade estiveram ao meu lado, sempre me incentivando.

Agradeço a meu irmão o qual me serviu de inspiração ao longo destes anos, me ensinando que por mais difíceis que sejam os obstáculos da vida, nunca devemos parar no caminho, as coisas não acontecem por acaso.

Agradeço também a todo o corpo docente que fez parte de minha caminhada, em especial a meu orientador Jonathan Felipe Camargo, Me, pela dedicação e conhecimento.

“Para nós os grandes homens não são aqueles que resolveram os problemas, mas aqueles que os descobriram”.

*Albert Schweitzer*

## RESUMO

A demanda de materiais com características de alta resistência mecânica vem crescendo consideravelmente na indústria metalmecânica, tornando-se de fundamental importância o conhecimento de suas propriedades mecânico/metalúrgicas para assegurar a correta seleção do material em relação à sua aplicação. Este estudo teve como objetivo avaliar a soldabilidade do aço Hardox 500 através do processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*), alterando os parâmetros de amperagem e tipo de arame de solda, mantendo os demais parâmetros constantes. As amostras foram submetidas a ensaios mecânicos para verificar as características de taxa de penetração de solda, avaliação da zona afetada pelo calor e verificar a existência de defeitos na zona fundida. Com os resultados obtidos constatou-se a inviabilidade técnica do uso do aço Hardox 500 para os parâmetros de soldagem utilizados neste trabalho, atingindo propriedades mecânicas desfavoráveis para o emprego deste material na construção mecânica. Os resultados mostram sua suscetibilidade e flexibilidade para uso em uniões soldadas, especialmente na indústria de máquinas pesadas e implementos agrícolas, onde há uma tendência crescente para a melhora da performance e aumento da vida útil dos produtos.

**Palavras-chave:** Soldagem, processo MAG, Aço Hardox 500

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Processo básico de soldagem MAG .....	18
Figura 2-Illustração da ZAC de uma junta soldada .....	20
Figura 3-Ensaio de dobramento .....	26
Figura 4-Análise Macrográfica.....	27
Figura 5-Visão geral dos ensaios deste trabalho .....	29
Figura 6-Dimensões do corpo de prova o ensaio de dobramento.....	31
Figura 7-Máquina de solda MIG/MAG .....	32
Figura 8-Posicionamento das placas de aço Hardox para soldagem.....	33
Figura 9-Dimensões da matriz e punção de dobra.....	33
Figura 10-Sequência de dobramento. a) Punção já posicionado na face oposta a da solda do corpo de prova; b) Aplicação da força e dobramento; c) Corpo de prova dobrado no ângulo definido pela matriz. ....	34
Figura 11-Sequência dos perfis de microdureza realizados.....	34
Figura 12-Durômetro utilizado nos ensaios.....	35
Figura 13-Representação do local das indentações .....	35
Figura 14-Ensaio de dobramento com aço Hardox 450 .....	39
Figura 15-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova A.....	39
Figura 16-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova B.....	40
Figura 17-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova C.....	40
Figura 18-Resultado da microdureza do Corpo de Prova D.....	41
Figura 19-Resultado da microdureza do Corpo de Prova E .....	42
Figura 20-Resultado da microdureza do Corpo de Prova F .....	42
Figura 21-Macrografia dos corpos de prova.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Composição química do consumível ER70S-6 .....	19
Tabela 2-Propriedades mecânicas do consumível ER70S-6 .....	19
Tabela 3-Composição química do consumível ER110S-G .....	19
Tabela 4-Propriedades mecânicas do consumível ER110S-G.....	19
Tabela 5 Temperatura de pré-aquecimento recomendado por % de carbono equivalente obtido .....	24
Tabela 6-Composição química do aço Hardox 500.....	29
Tabela 7-Propriedades Mecânicas e Classificação do aço Hardox 500.....	30
Tabela 8-Parâmetros variados no processo de solda MAG .....	31
Tabela 9-Ensaio de dobramento .....	37
Tabela 10-Ensaio de dobramento .....	38

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 TEMA.....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.4 JUSTIFICATIVA .....	14
1.5 OBJETIVOS .....	14
1.5.1 Objetivo Geral .....	14
1.5.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 SOLDAGEM .....	16
2.2 SOLDAGEM MAG.....	17
2.3 INFLUÊNCIA DOS CONSUMÍVEIS SOBRE A RESISTÊNCIA DA JUNTA SOLDADA.....	18
2.4 ZONA AFETADA PELO CALOR .....	20
2.5 ENERGIA DE SOLDAGEM.....	21
2.6 GASES DE PROTEÇÃO .....	22
2.7 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AÇO HARDOX 500.....	22
2.8 SOLDABILIDADE DO AÇO HARDOX 500.....	22
2.8.1 Carbono Equivalente (Hardox 500).....	23
2.9 ENSAIOS MECÂNICOS.....	24
2.9.1 Ensaios não destrutivos .....	25
2.9.2 Ensaios destrutivos.....	25
3 METODOLOGIA .....	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO .....	29
3.2 CORPOS DE PROVA E PARÂMETROS VARIADOS.....	30

<b>3.3 TIPO DE OPERAÇÃO DE SOLDAGEM .....</b>	<b>32</b>
<b>3.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO .....</b>	<b>33</b>
<b>3.5 ENSAIO DE DUREZA .....</b>	<b>34</b>
<b>3.6 ANÁLISE MACROGRÁFICA .....</b>	<b>35</b>
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 ENSAIO DE DUREZA .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA .....</b>	<b>43</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria metal mecânica está em constante evolução, conduzindo à procura por soluções focadas na utilização de materiais modernos, de alta qualidade e de propriedades mecânicas melhoradas, buscando ganho sem desempenho e comportamento mecânico.

Neste cenário estão inseridos os aços de média e alta resistência mecânica, que segundo SSAB (2014), foram desenvolvidos para garantir e aumentar a vida útil de componentes e conjuntos soldados que são submetidos a condições severas de uso e necessitam de elevada performance.

São materiais reconhecidos mundialmente por possuir características a fim de melhorar a produtividade e aumentar o ciclo de vida útil dos produtos fabricados, além do mais, sua resistência superior ao desgaste e a deformação permitem maior durabilidade e capacidade em suportar esforços e impactos.

Em meio a todos os desafios que as empresas estão enfrentando, a busca por competitividade leva à utilização de materiais avançados que possuam elevada resistência mecânica e boa manufacturabilidade, permitindo que componentes tradicionalmente fabricados a partir de aços de baixo carbono e baixa resistência mecânica possam ser projetados e otimizados, utilizando materiais que permitam redução de peso, manutenção ou aumento da resistência mecânica e até mesmo redução de custos.

Quando se trata do processo de soldagem de chapas de média e alta dureza pelo processo MAG (*Metal Active Gas*) vale ressaltar que é de suma importância avaliar parâmetros como o material a ser soldado, a seleção do arame, gás, bem como todos os parâmetros relacionados à sua soldabilidade, assegurando a boa fusão do metal de adição com o metal base e a obtenção de um metal fundido com boas propriedades mecânicas.

Com a utilização de aços de elevada resistência mecânica obtém-se o aumento da vida útil dos componentes fabricados, comportamento que se deve à elevada dureza e conseqüentemente maior resistência ao desgaste, onde o conseqüente aumento da resistência mecânica permite a otimização de peças e conjuntos, levando até a eliminação de reforços e nervuras sem comprometer a

função estrutural do componente.

O cenário apresentado conduz a elaboração deste trabalho, que tem por objetivo avaliar o comportamento mecânico de juntas soldadas fabricadas a partir do aço Hardox500, avaliando características mecânicas e macrográficas da união de topo deste material com o uso de solda MAG.

## 1.1 TEMA

Este trabalho destina-se a avaliar o comportamento mecânico de juntas soldadas de aço Hardox 500, variando parâmetros relacionados à bitola dos arames de solda e a amperagem utilizada na fabricação da junta.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O comportamento mecânico das juntas soldadas deste estudo será avaliado através de análises de microdureza, de dobramento e macrografias, obtendo assim as características mecânicas da ZAC.

Todos os parâmetros de solda serão mantidos constantes, exceto o tipo de metal de adição e a amperagem, a qual será variada para identificar possíveis tendências à formação de zonas fundidas com propriedades mecânicas de baixa qualidade.

## 1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

O aço Hardox 500 é um material com resistência mecânica superior à boa parte dos aços comumente utilizados na indústria metalmeccânica, como por exemplo, o aço Strenx 700 e o LNE380 que possuem elevada resistência mecânica e são aplicados em situações de elevado esforço mecânico. Esta característica está intrinsecamente ligada à sua composição química e suas características de processamento. Como ele é suscetível ao processo de solda com atmosfera protetora, sua composição química e propriedades mecânicas diferenciadas podem acarretar o surgimento de produtos indesejados na zona fundida, resultando em riscos à sua aplicabilidade em situações que não exigem um controle minucioso dos parâmetros e processo da soldagem.

A avaliação das propriedades mecânicas de juntas soldadas com dois tipos diferentes de metal de adição e diferentes amperagens visam identificar sua

propensão à solda em diversas situações, principalmente onde a viabilidade econômica não pode ser afetada pelo controle detalhado do processo.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

O presente estudo, destina-se a esclarecer dúvidas sobre a suscetibilidade do aço Hardox 500 a ser soldado sob o uso de parâmetros já empregados na indústria metal mecânica, verificando tecnicamente o efeito destes elementos nas propriedades mecânicas do produto final, que neste caso é uma junta soldada a qual será submetida a um ambiente com elevada incidência de material abrasivo em conjunto com solicitações mecânicas.

A aplicação destas características em situações práticas, embora já presentes no mercado, não provam cientificamente que o metal fundido resultante deste processo de solda seja suscetível às características ambientais para o qual foi destinado.

A escassez de informações específicas do aço Hardox 500, motiva a busca por informações relacionadas a diferentes formas de utilização desse material, demonstrando características do processo de solda que possam ser consideradas pelas áreas de projeto e manufatura no momento da seleção dos parâmetros do processo, facilitando o entendimento sobre as limitações tanto do material quanto do produto final soldado.

#### 1.5 OBJETIVOS

##### 1.5.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento mecânico de juntas soldadas de aço Hardox 500, obtendo dados técnicos que comprovem sua aptidão à solda pelo processo MAG sob as condições e parâmetros de controle, sendo essas características pré-definidas para aplicação em um conjunto soldado destinado ao uso em máquinas agrícolas.

##### 1.5.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos este trabalho visa:

- Identificar o efeito do uso de diferentes metais de adição e variação da

amperagem nas propriedades mecânicas da junta soldada;

- Avaliar o comportamento mecânico ao dobramento da junta;
- Verificar a dureza da zona fundida, obtendo informações a respeito da formação de microestruturas indesejáveis à aplicação da junta.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O objetivo deste capítulo é abordar assuntos referentes a soldagem do aço Hardox 500 pelo processo MAG, ademais, será abordado um embasamento teórico sobre soldagem (soldagem MAG, soldabilidade do aço Hardox 500), influência dos consumíveis (gás de proteção, metais de adição) sobre a resistência da junta soldada, energia de soldagem, zona afetada pelo calor, ensaios mecânicos.

### 2.1 SOLDAGEM

O processo de soldagem é amplamente utilizado na indústria metal mecânica, especialmente na fabricação de máquinas e equipamentos agrícolas. Sua versatilidade e baixo custo são os principais aspectos que moldaram o sucesso deste processo em seu uso neste setor tão importante para a economia, tanto brasileira quanto mundial.

A complexidade das máquinas, tamanho e robustez, aliadas ao volume de produção relativamente baixo em comparação com outros setores, como o automotivo, fazem com que a soldagem seja primordial para a execução de qualquer projeto que seja direcionado ao mercado agrícola (CARPENEDO, 2014).

Segundo a AWS - *American Welding Society* (1994) a soldagem é definida como uma coalescência localizada de metais ou não metais, produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de fusão, com ou sem a aplicação de pressão, ou com aplicação de pressão com ou sem o uso de metal de adição.

Para que o produto final da solda tenha características adequadas em relação às propriedades mecânicas e metalúrgicas, há aspectos que devem ser obedecidos, ou pelo menos avaliados, durante sua execução (HOULDCROFT, 1979).

Os aspectos importantes são:

- Remover possíveis contaminações sobre as superfícies as quais serão unidas pela soldagem.
- Gerar uma quantidade de energia ideal capaz de unir dois materiais, com características iguais ou similares.
- Realizar um controle de soldagem, para que assim as propriedades

requeridas sejam alcançadas, tais como: físicas, químicas e mecânicas.

A aplicação prática destes requisitos torna o processo mais eficiente, evitando problemas e ao mesmo tempo retrabalhos que acabam encarecendo e, muitas vezes, inviabilizando o processo.

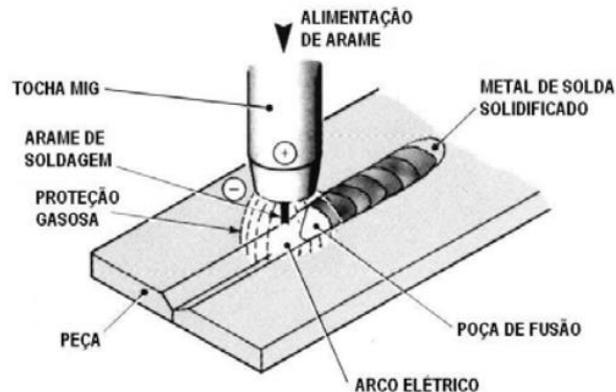
Para Machado (1996), a união de metais por soldagem é um dos processos mais utilizados na fabricação mecânica, devido principalmente à sua facilidade de operação, boa resistência mecânica conferida ao eletrodo soldado, com custos relativamente baixos e possibilitando a soldagem de geometrias com formas e tamanhos variados em relação a outros processos.

O processo de solda possui diversas divisões, as quais se caracterizam pelos equipamentos utilizados, tipo de atmosfera de proteção e metais de adição. Dentre esses processos um deles se destaca em função de seu custo e versatilidade. Este processo é denominado na nomenclatura internacional por *Metal Active Gas* – MAG (ESAB 2005).

## 2.2 SOLDAGEM MAG

O processo de soldagem MAG (*Metal Active Gas*), é conhecido por ser um dos processos mais versáteis de soldagem por deposição de material para aços de baixo carbono e baixa liga. Este processo se baseia na formação de um arco elétrico entre a peça e o eletrodo maciço, onde o arco funde continuamente o arame à medida que este é alimentado a poça de fusão. O metal de solda é protegido da atmosfera pelo fluxo de um gás ativo. A principal vantagem deste processo é a elevada velocidade de soldagem, não há formações de escórias, e possibilita a soldagem em todas as posições, porém, existem algumas desvantagens, como dificuldade de soldagem em locais com alto fluxo de ar, devido à atmosfera protetora ser gasosa, custo relativamente maior em relação a outros processos (WAINER, 2004). Uma visão simplificada deste processo de soldagem pode ser visto na Figura 1.

Figura 1-Processo básico de soldagem MAG



**Fonte:** ESAB, 2005

### 2.3 INFLUÊNCIA DOS CONSUMÍVEIS SOBRE A RESISTÊNCIA DA JUNTA SOLDADA

Segundo (ESAB, 2004) um dos principais fatores que se deve levar em consideração no momento da soldagem, é a correta escolha do metal de adição, pois quando misturado com o gás de proteção e ao metal de base iniciará o processo de formação de um depósito químico, o qual determinará as propriedades mecânicas e físicas da junta soldada. Existem alguns fatores que afetam na escolha do metal de adição para soldagem pelo processo MAG, dentre os quais podem ser citados:

- Composição química.
- Gás de proteção que pode ser utilizado.
- Aplicação.
- Tipo de junta a ser soldada.

De acordo com ESAB (2013) há uma série de consumíveis aptos à soldagem de aços carbono, dentre os quais encontram-se o AWS ER70S-6 e o AWS ER110S-G, definidos como parâmetros de estudo deste trabalho em função de disponibilidade e aplicação na indústria.

AWS ER70S-6 é um consumível em forma de arame sólido cobreado, indicado para soldagem de aços carbono com baixos níveis de impurezas. Sua fabricação diferenciada lhe confere desempenho, maior estabilidade de arco e menores níveis de respingos, até mesmo quando utilizado com elevadas correntes de soldagem. A

presença da camada de cobre em seu revestimento evita problemas de alimentação, o que o torna indicado especialmente para soldagens robotizadas e/ou mecanizadas, resultando em cordões com bom acabamento, ótimas propriedades mecânicas, baixo nível de respingos (GERDAU, 2014). A Tabela 1 e 2 mostra a composição química deste consumível bem como sua faixa de propriedades mecânicas.

Tabela 1-Composição química do consumível ER70S-6

Composição química do arame ER70S-6						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,2	1,2	1,9	0,15	0,15	0,15	0,03

**Fonte:** GERDAU, 2014

Tabela 2-Propriedades mecânicas do consumível ER70S-6

Resistência à tração	Limite de escoamento	Alongamento
480 MPa	400 MPa.	22 %

**Fonte:** GERDAU, 2014

AWS ER110S-G é um consumível em forma de arame sólido, não cobreado, indicado para soldagem de aços de alta resistência. Devido à adição de elementos de micro liga ele possui excelente ductilidade e resistência a fissuras (BOHLER, 2014). A Tabela 3 e 4 mostram a composição química deste consumível bem como a faixa de propriedades mecânicas.

Tabela 3-Composição química do consumível ER110S-G

Composição química do arame ER110S-G						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,1	0,6	1,6	0,3	1,3	0,3	0,1

**Fonte:** BOHLER, 2014.

Tabela 4-Propriedades mecânicas do consumível ER110S-G

Resistência à tração	Limite de escoamento	Alongamento
760 MPa	700 MPa	18 %

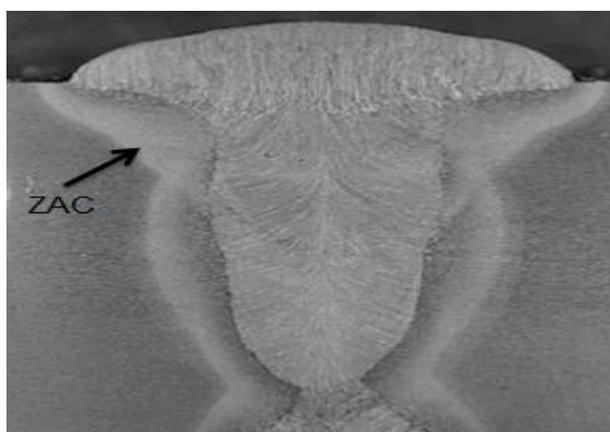
**Fonte:** BOHLER, 2014.

## 2.4 ZONA AFETADA PELO CALOR

Segundo Kou (2003) a ZAC (zona afetada pelo calor) compreende toda a região do metal base que foi afetada, de algum modo, pelo calor gerado na soldagem, compreendendo desde a interface com o metal de solda, conhecida por linha de fusão, até regiões aquecidas a temperaturas entre 500°C e 600°C.

Kou (2003) também explica que se pode visualizar com facilidade a ZAC por meio da análise macrográfica, onde fica de fácil compreensão a região afetada pelo calor. A Figura 2 representa a ZAC de uma junta soldada.

Figura 2-Ilustração da ZAC de uma junta soldada



**Fonte:** Kou, 2003

Qualquer processo de soldagem resulta na existência de um gradiente térmico no metal de base. A difusão de calor para o metal base é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldagem (ESAB, 2015).

Para Carpenedo (2014), a ZAC tem início na borda da poça de fusão, onde a temperatura aumenta rapidamente e diminui rapidamente produzindo um efeito como o de têmpera.

A ZAC é considerada como a região que mais sofre com o aquecimento acima da temperatura crítica de austenitização, ou seja, alterando as propriedades mecânicas e estruturais existentes nos aços. Estas alterações dependem muito da característica de cada material, principalmente em função de sua composição química.

## 2.5 ENERGIA DE SOLDAGEM

Durante o processo de soldagem, onde ocorre à fusão do metal base com metal de adição, a energia necessária para ativar a movimentação atômica entre os metais é definida como sendo a energia liberada da fonte de calor por unidade de comprimento da solda (MARQUES, 2009). É uma informação útil na avaliação dos efeitos metalúrgicos da operação de soldagem sobre o material que está sendo soldado.

A Equação 1 define esta grandeza.

$$At = \frac{V \times I}{v_s} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

*At*: Energia de soldagem, em kJ/mm;

*V*: Tensão, em Volts;

*I*: Corrente elétrica, em Ampère;

*V<sub>s</sub>*: Velocidade de soldagem, em mm/min.

Wainer (2004), salienta que “uma grande parte da energia disponível é dissipada para a atmosfera e outra pequena fração perde-se por convecção no meio gasoso que protege a poça de fusão”. Essas perdas explicam a necessidade da aplicação de uma grande quantidade de energia para a fusão dos materiais, fato que resulta em uma ZAC com dimensões relativamente grandes, afetando consideravelmente as propriedades mecânicas do componente soldado. A energia de soldagem está diretamente relacionada com a taxa de deposição do metal de adição, o que acaba afetando a profundidade de fusão e velocidade de resfriamento da junta.

Segundo Marques (2009), a energia além de ser concentrada “gera pequenas regiões de temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperaturas e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material”.

Entende-se, portanto, que a soldagem é um processo que envolve a inerente aplicação de elevada energia térmica para sua execução, permitindo que os metais ultrapassem suas temperaturas de fusão e coalesçam, tendo como produto final um componente em corpo teoricamente único, porém com propriedades mecânicas

diferenciadas em relação ao metal de base.

## 2.6 GASES DE PROTEÇÃO

O uso correto do gás de proteção na soldagem MAG tem grande influência nas características do cordão de solda, tais como penetração, largura, formação de trincas e/ou mordeduras (ESAB 2005).

Para Allgayer (1990) o CO<sub>2</sub> é uma das principais atmosferas protetoras utilizadas no processo de solda, podendo aparecer simplesmente puro ou misturado ao argônio, hélio e oxigênio. Em seu estado puro o CO<sub>2</sub> é amplamente utilizado na soldagem de aços carbono, garantindo excelente penetração, ausência de porosidade e aceitáveis propriedades mecânicas.

Stenbacka e Persson (1989) destacam as vantagens em utilizar misturas de Ar (argônio) e CO<sub>2</sub>:

- Maior fluidez em direção ao metal base e maiores velocidades de soldagem.
- Melhor aparência dos cordões e baixa formação de escórias.
- Melhor estabilidade do arco e redução apreciável dos salpicos.

## 2.7 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AÇO HARDOX 500.

O aço Hardox 500 possui características que lhe conferem boa soldabilidade e facilidade de trabalho mecânico, como o dobramento, permitindo que ele seja facilmente empregado em situações onde se buscam aumentos na resistência mecânica e redução de peso. Sua comercialização é feita na forma de chapas em espessuras que vão de 0,4 mm até 103 mm (SSAB, 2015). É um material com excelentes propriedades relacionadas à resistência ao desgaste, devido à sua alta dureza quando comparada aos demais aços. A elevada resistência mecânica deste material é obtida através do seu processo de fabricação altamente controlado, o qual submete o aço a um tratamento térmico após sua laminação, alterando sua microestrutura e conferindo-o elevadas dureza e resistência mecânica (SSAB, 2015).

## 2.8 SOLDABILIDADE DO AÇO HARDOX 500

Como os demais aços comerciais, a soldabilidade do aço Hardox 500 requer

alguns cuidados que, se corretamente obedecidos, facilitarão seu processo SSAB (2015), tais como:

- Limpeza da área a ser soldada.
- Utilizar a amperagem correta.
- Qualificar o operador.

Um fator comum e extremamente crucial que denomina o aço Hardox 500 a ser um aço de boa soldabilidade é a sua composição química, a qual possui um baixo carbono equivalente, diminuindo as chances de a zona fundida apresentar microestruturas martensíticas, melhorando assim sua soldabilidade. Esta característica pré-dispõe este material ao seu uso em componentes soldados sem a necessidade de processos pré e pós-soldagem SSAB (2015).

A SSAB explica que para soldar o aço Hardox 500 pelo processo MAG é recomendado à utilização do gás de proteção CO<sub>2</sub> misturado com Ar. Eventualmente, por questões de melhora na estabilidade do arco elétrico, o O<sub>2</sub> é misturado com Ar e CO<sub>2</sub> (SSAB, 2016).

Na soldagem pelo processo manual a mistura de CO<sub>2</sub> e Ar devem ser controladas entre os valores de 18% a 20% de CO<sub>2</sub> misturado em Ar, resultando em uma boa penetração do metal de adição com metal base e conseqüentemente a redução de respingos de solda. Já pelo processo robotizado, é recomendada a dosagem de 8% a 10% de CO<sub>2</sub> em Ar, melhorando a penetração e reduzindo os respingos de solda (SSAB, 2016).

### **2.8.1 Carbono Equivalente (Hardox 500)**

O carbono equivalente fornece um valor numérico da contribuição da composição química para a suscetibilidade de formação de trincas induzidas por hidrogênio em aço. A soldabilidade de um aço é determinada pelo seu carbono equivalente, ou seja, quanto maior for o carbono equivalente, maior será a temperatura de pré-aquecimento (ESAB, 2004).

A AWS D1.1 (2001), recomenda para o cálculo do carbono equivalente a Equação 2:

$$CE = C + \frac{(Mn+Si)}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

CE: Carbono Equivalente

C: Carbono

Mn: Manganês

Si: Silício

Cr: Cromo

Mo: Molibdênio

V: Vanádio

Ni: Níquel

Cu: Cobre

Em função do resultado obtido de carbono equivalente, é possível verificar a necessidade de pré-aquecimento. As temperaturas de pré-aquecimento variam de acordo com o percentual de carbono equivalente obtido no material, as temperaturas recomendadas, estão representadas na Tabela 5 (ESAB, 2004).

Tabela 5 Temperatura de pré-aquecimento recomendado por % de carbono equivalente obtido

Carbono equivalente (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	Não
0,31 - 0,45	100 °C - 200 °C
0,45 - 0,60	200 °C - 250 °C
> 0,60	250 °C - 300 °C

Fonte: Adaptado de (SSAB) 2004.

Para o aço Hardox 500 o carbono equivalente obtido foi de 0,3%, se observada pela Tabela 5, não é necessário realizar pré-aquecimento da junta.

## 2.9 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos realizados em materiais metálicos estão presentes em praticamente todas as classes de produtos no setor metal mecânico, visando obter informações a respeito das propriedades e comportamento mecânicos de

um produto.

Para Garcia (2012) os ensaios mecânicos podem ser classificados em ensaios destrutivos e não destrutivos.

### **2.9.1 Ensaios não destrutivos**

Entende-se sobre ensaios não destrutivos métodos de avaliação física ou mecânica que não causam danos ao material avaliado, evitando que ele seja descartado após o ensaio. Ensaios não destrutivos permitem que o componente avaliado seja aproveitado em aplicações práticas (SOUZA, 2000).

São exemplos de ensaios não destrutivos a difração de raios-X e o ultrassom.

### **2.9.2 Ensaios destrutivos**

Os ensaios destrutivos são métodos mais populares, que avaliam o componente através de procedimentos que causam danos mecânicos, inutilizando-o para utilizações práticas. Fornecem as principais informações utilizadas em projetos mecânicos, bem como caracterizam os materiais para verificação de suas propriedades mecânicas (SOUZA, 1982).

São exemplos de ensaios destrutivos os ensaios de tração, dobramento e análise metalográfica.

Carpenedo (2014), utilizou na elaboração de seu trabalho os ensaios de dobramento, microdureza e tração, explica de maneira geral que estes ensaios são realizados aplicando-se carregamentos mecânicos, obtendo assim dados sobre o comportamento do material a cada tipo de esforço.

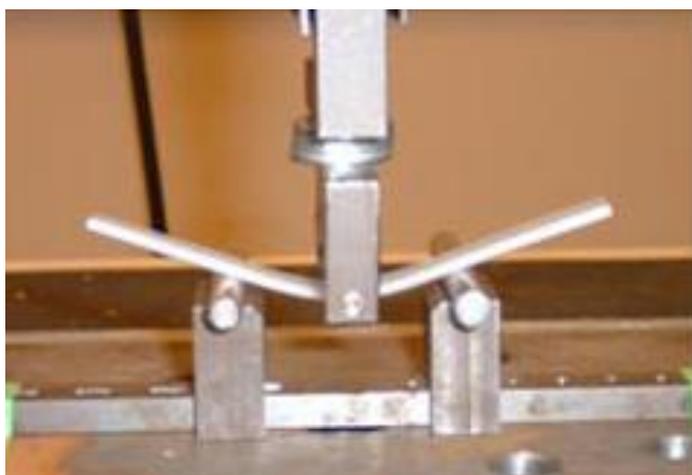
#### **2.9.2.1 Ensaio de dobramento**

Os ensaios de dobramento em componentes soldados são realizados com o intuito de estudar o comportamento da solda por intermédio de uma deformação existente na zona fundida, “fornecendo uma indicação qualitativa da ductilidade do material”. Este tipo de ensaio não permite obter informações numéricas para resultados precisos, mas sim identificar a suscetibilidade do material quando exposto ao processo de dobramento, podendo verificar se há formação de defeitos sobre a superfície deformada (SOUZA, 1982).

Sendo assim, a carga aplicada sobre o corpo de prova não tem influência sobre os resultados. Entretanto as geometrias utilizadas para o ensaio como ferramenta de dobra, base de apoio e ângulos de dobramento definem a severidade do experimento, afetando significativamente os resultados, fornecendo informações quanto à qualidade do material.

O ensaio de dobramento é utilizado para análises de segmentos retos, quadrada, tubular etc. Para o dobramento de chapas, é de suma importância analisar o encruamento do material e o raio mínimo o qual será dobrado, sem ocorrência de ruptura (DALCIN, 2007). A Figura 3 representa o ensaio de dobramento de chapas soldadas, onde o corpo de prova a ser dobrado, deve ser assentado em dois apoios com afastamento especificado, com a ação de uma força sobre um cutelo, o mesmo é direcionado sobre o material conformando-o no ângulo desejado.

Figura 3-Ensaio de dobramento



**Fonte:** Garcia; Spim; Santos, 2012

O ensaio de dobramento, em resumo, fornece informações sobre a capacidade do metal de solda de absorver deformações mecânicas.

#### 2.9.2.2 Análise metalográfica

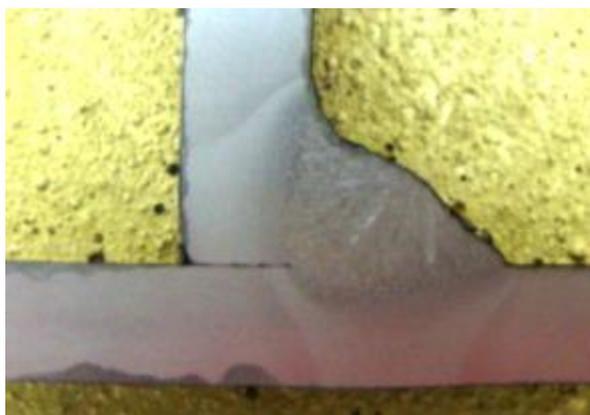
A análise metalográfica consiste em avaliar as características microestruturais e visuais da ZAC, a fim de identificar a formação de estruturas indesejadas ou ainda verificar características como diluição, geometria da poça de fusão e dimensões da ZAC. É um ensaio que pode avaliar o material tanto em nível microscópico quanto macroscópico, dependendo apenas das informações alvo da análise.

Para Rohde (2010), este ensaio procura relacionar a estrutura interna do material com as suas propriedades físicas obtidas através do processo de fabricação, correlacionando-as com o desempenho de suas funções, permitindo observar possíveis defeitos gerados pela soldagem.

#### 2.9.2.3 Ensaio macrográfico

A análise macrográfica permite que seja observado a olho nu, ou com pouca ampliação (50X), o aspecto de uma superfície após ser devidamente atacada e polida por um reagente (ROHDE, 2010). Com isso é possível observar as características do material referentes à sua homogeneidade, distribuição e natureza de possíveis falhas. Em relação ao processo de fabricação pode-se avaliar a solda, penetração, dimensões da ZAC, diluição e geometria da ZF (zona fundida). Na Figura 4 é mostrada penetração bem como a ZAC, tamanho do reforço de solda para uma junta em ângulo.

Figura 4-Análise Macrográfica



**Fonte:** Carpenedo, 2014

#### 2.9.2.4 Ensaio de microdureza

Para Garcia (2012) dureza é a propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente.

O ensaio de microdureza permite a obtenção da dureza utilizando escalas menores de cargas e punções, causando danos microscópicos no componente (Souza, 1982), permitindo a medição da dureza em peças de pequenas espessuras

ou com finas camadas onde as propriedades devem ser mensuradas.

Damasceno (2010) exemplifica que a dureza de um material é a resistência que ele oferece à penetração de um corpo duro. Os ensaios de dureza são efetuados com objetivos de:

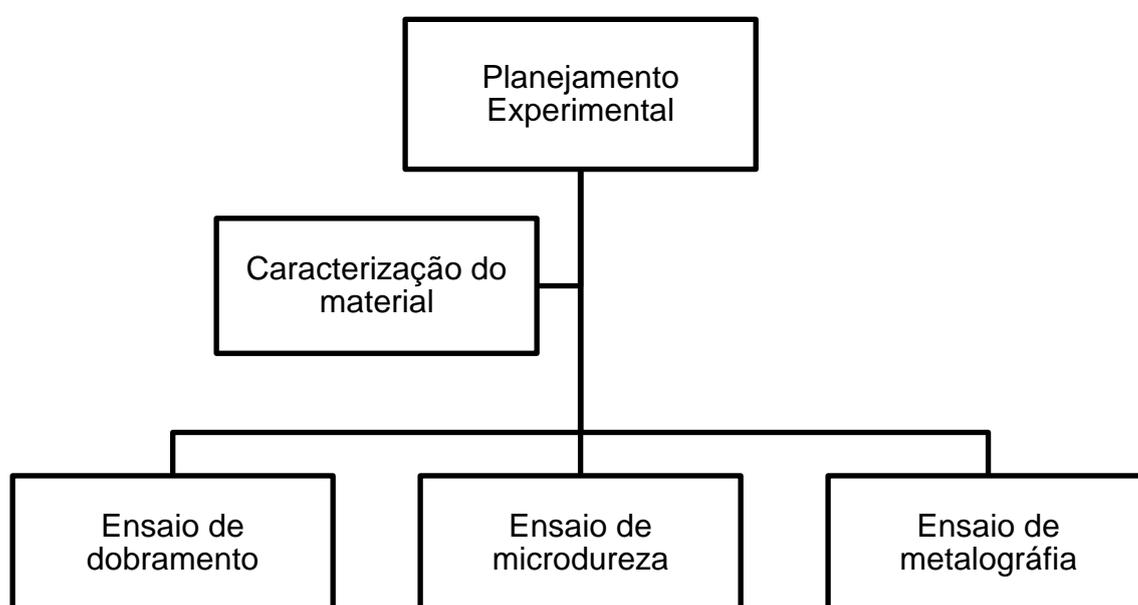
- Conhecer a resistência do material quanto ao desgaste e à penetração;
- Comparar sua resistência e avaliar o tratamento térmico realizado;
- Verificar as possibilidades de usinagem do material.

Através do ensaio de dureza é possível fazer uma correlação com a resistência mecânica do material, permitindo a conversão da dureza Brinell na resistência à tração do material (GARCIA, 2012).

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho irá avaliar as propriedades mecânicas e metalográficas de uma junta soldada utilizando o aço Hardox 500, analisando suas características em relação ao dobramento mecânico e microdureza, características metalográficas como a diluição e geometria da zona fundida. A Figura 5 mostra uma visão geral do procedimento dos experimentos.

Figura 5-Visão geral dos ensaios deste trabalho



**Fonte:** Do autor, 2017.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO

De acordo com SSAB (2017), a composição química do aço Hardox 500 é definida em termos de porcentagem máxima para cada elemento químico, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6-Composição química do aço Hardox 500

Composição Química do aço HARDOX 500							
C %	Si %	Mn %	P %	Cr %	Ni %	Mo %	B %
0,3	0,7	1,6	0,02	0,01	1,5	0,6	0,01

**Fonte:** Adaptado de (SSAB), 2017.

O aço Hardox é classificado e nomeado com base nas suas propriedades mecânicas, principalmente na sua dureza média especificada, conforme Tabela 7.

Tabela 7-Propriedades Mecânicas e Classificação do aço Hardox 500

<b>Classe Hardox</b>	<b>Dureza (HRc) Min-Máx</b>	<b>Resistência à tração (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>	<b>Resistência ao Impacto</b>
Hardox 500	45-51	1250	-	35J-40°C

**Fonte:** Adaptado de (SSAB), 2016.

### 3.2 CORPOS DE PROVA E PARÂMETROS VARIADOS

A fabricação dos corpos de prova foi realizada em ambiente fabril, utilizando métodos e equipamentos industriais e mão-de-obra qualificada, seguindo as especificações da norma AWS D1.1-2004.

O material base para os corpos de prova foi cortado em chapas com dimensões de 300 x 150 x 6,35 mm, totalizando 12 chapas de metal base, através do processo de corte laser, sendo posteriormente unidas por solda topo.

Após a fabricação dos corpos de prova, foi realizada a soldagem dos corpos de prova, onde foram mantidos constantes alguns parâmetros, tais como:

- Arame sólido de 1,0 mm de diâmetro;
- Metal de base aço Hardox 500;
- Mistura de Ar + 25% de CO<sub>2</sub> como gás de proteção;
- Corpo de prova com dimensões de 150,0 x 20,0 x 6,35 mm;
- Soldagem na posição de topo;
- Soldagem manual;
- Soldagem com ângulo de deslocamento positivo.

Para a soldagem dos corpos de prova foram variados os parâmetros tais como, consumível, corrente (A) e a tensão (V), conforme Tabela 8.

Tabela 8-Parâmetros variados no processo de solda MAG

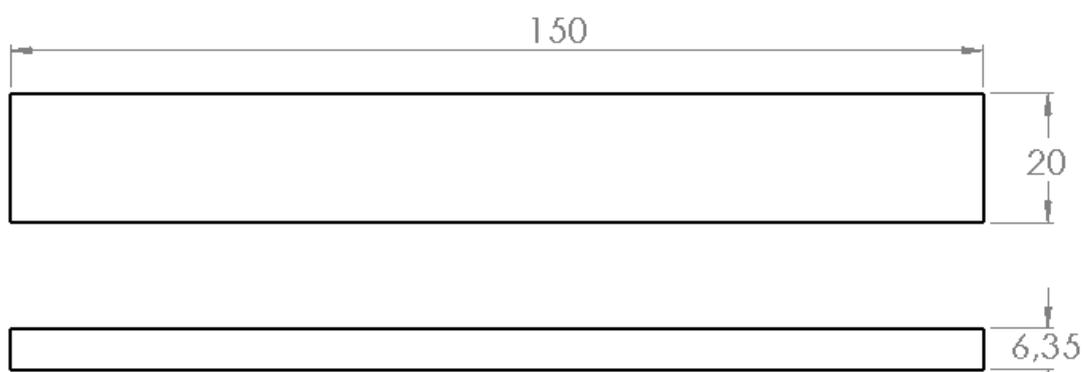
Parâmetros	Corpo de Prova					
	A	B	C	D	E	F
Especificação do eletrodo	ER70S-6			ER110S-G		
Corrente de soldagem (A)	320	250	220	320	250	220
Tensão de arco elétrico (V)	25	22	20	25	22	20
Velocidade de soldagem (mm/s)	5,4	5,6	4,2	6,4	5,6	5,4
Energia de soldagem (kj/mm)	68,6	63,1	45,8	81,7	63,1	58,9

Fonte: do autor, 2017.

Posteriormente os corpos de prova foram cortados e usinados, de acordo com as recomendações da norma AWS D1.1 – 2004, para realização dos ensaios.

Para cada conjunto de chapas soldadas, foram retirados quatro corpos de prova. O corte bruto de cada corpo de prova foi realizado com corte plasma, necessitando de um sobremetal de 30mm para resultar em um corpo com largura final, após usinagem, de 20mm. A Figura 6, ilustra as dimensões do corpo de prova.

Figura 6-Dimensões do corpo de prova o ensaio de dobramento



Fonte: Do autor, 2017.

A velocidade de soldagem foi determinada através da cronometragem do tempo de soldagem, em segundos, realizada com o auxílio de um cronometro digital. A energia de soldagem foi determinada através da Equação 1.

Foram obtidos quatro corpos de prova para cada conjunto soldado, resultando em 24 corpos de prova no total. Para os ensaios de dureza, dobramento e metalografia foram utilizados um corpo de prova para cada ensaio. As demais amostras foram mantidas em reserva para eventuais necessidades ou imprevistos durante os ensaios.

Em função de limitações de recursos, tanto materiais quanto financeiros, a

quantidade de amostras ficou limitada em uma por ensaio, considerando os diferentes parâmetros de solda e ensaios realizados.

### 3.3 TIPO DE OPERAÇÃO DE SOLDAGEM

Para a realização da soldagem dos corpos de prova, foi utilizada uma máquina soldadora MIG/MAG da marca Lincoln, modelo CV-510, com fonte de alimentação trifásica o qual disponibiliza 250 amperes de corrente elétrica. A Figura 7 ilustra a máquina de solda utilizada nos ensaios.

Figura 7-Máquina de solda MIG/MAG



**Fonte:** Lincoln Eletric (2017)

A máquina soldadora utilizada no trabalho é empregada para soldagem de diversos materiais bem como espessuras e durezas. A solda foi realizada em um único passe, sem a utilização de cobre junta e com abertura do nariz da junta de 1,2mm. A Figura 8, ilustra o posicionamento das placas de aço Hardox 500 para realização da solda.

O metal base bem como os processos de corte e solda, foram gentilmente cedidos pela Indústria Metalúrgica Marks, sediada na cidade de Santa Rosa – RS.

Figura 8-Posicionamento das placas de aço Hardox para soldagem



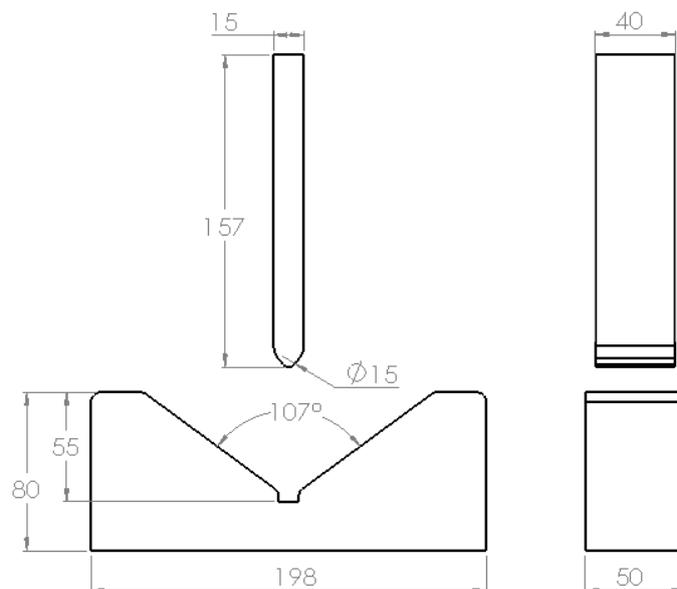
Fonte: Do autor, 2017.

### 3.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Os ensaios de dobramento foram realizados seguindo a norma AWS D1.1 – 2004 onde todos os reforços da solda foram removidos através de usinagem, mantendo os corpos de prova com dimensões uniformes, sem a presença de características que pudessem resultar em pontos para concentração de tensões ou facilitar a ocorrência de falhas.

O ensaio de dobramento foi realizado utilizando uma matriz, em forma de V, e um punção, com as dimensões mostradas na Figura 9.

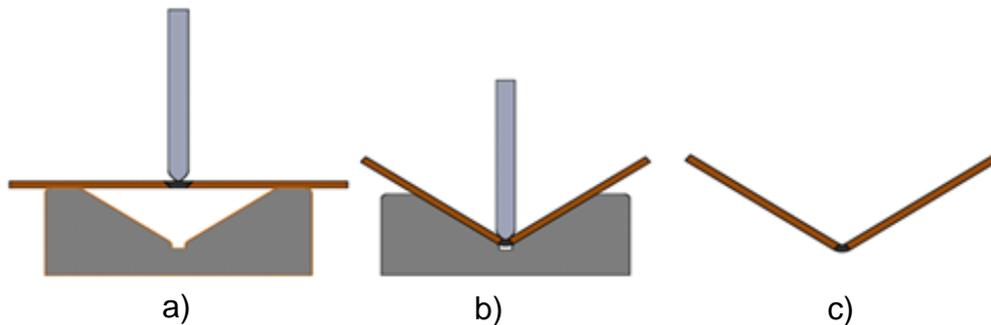
Figura 9-Dimensões da matriz e punção de dobra



Fonte: Do autor, 2017.

Foi realizado o dobramento de face, onde o punção toca a superfície oposta à da realização da solda conforme mostrado na sequência a. O ângulo de dobramento foi de 107 graus, definido pela geometria da matriz de dobra utilizada conforme a sequência b e por fim a sequência c ilustra o corpo de prova dobrado. A Figura 10 mostra a seqüência de dobramento seguida.

Figura 10-Sequência de dobramento. a) Punção já posicionado na face oposta a da solda do corpo de prova; b) Aplicação da força e dobramento; c) Corpo de prova dobrado no ângulo definido pela matriz.



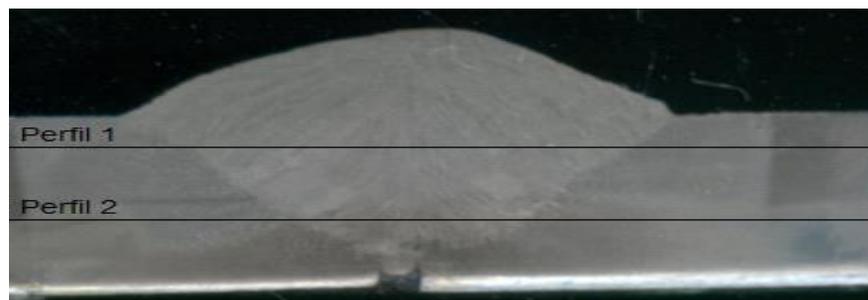
**Fonte:** Do autor, 2017.

A usinagem dos corpos de prova foi efetuada nas dependências do laboratório da FAHOR, em uma máquina fresadora de topo, utilizando uma ferramenta com insertos multicortantes.

### 3.5 ENSAIO DE DUREZA

Em relação ao ensaio para caracterização do perfil de microdureza, foi definido efetuar a sequência de ensaios em dois perfis, iniciando da esquerda para direita, ambos cruzando no centro do cordão de solda, conforme a Figura 11.

Figura 11-Sequência dos perfis de microdureza realizados



**Fonte:** Do autor, 2017.

Para este ensaio, foi utilizado um durômetro da marca Mitutoyo modelo HR-300 digital, utilizando um indentador com ponta de diamante esferocônica, com carga aplicada de 15N sobre a superfície do corpo de prova. A Figura 12, mostra o equipamento utilizado para o ensaio de dureza.

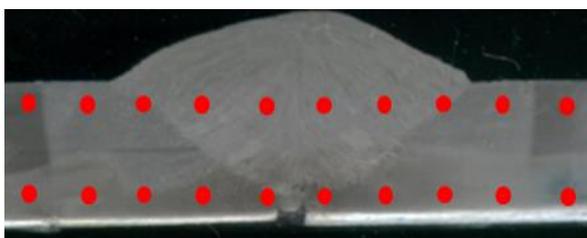
Figura 12-Durômetro utilizado nos ensaios



Fonte: Mitutoyo (2016)

Antes de iniciar a indentação dos corpos de prova, foi verificado a escala do equipamento e ajustado para unidade de dureza HRC. Para realização deste ensaio, foi tomado como referência a Norma ABNT NBR 6508-1. A Figura 13, ilustra o local onde foram realizadas as indentações nos corpos de prova.

Figura 13-Representação do local das indentações



Fonte: Do autor, 2017.

### 3.6 ANÁLISE MACROGRÁFICA

Nesta etapa foi realizado o lixamento da amostra seguindo uma seqüência lógica de lixas com granulações 220, 320, 400 e 600 e 1200. Feito esta etapa a amostra foi submetida ao processo de polimento e limpeza usando algodão embebido em álcool e aplicado ar quente para secar. Logo após, o corpo de prova foi imerso

junto ao Nital durante 5 segundos, foi limpo com álcool e secado com ar quente novamente. Este ataque tem por finalidade revelar a macro estrutura da zona fundida de solda, ZAC e penetração.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

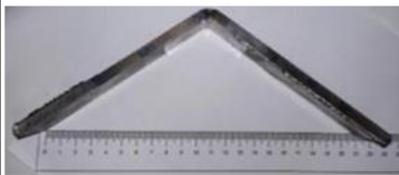
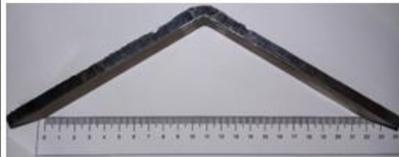
No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de dobramento, ensaio de microdureza e análise macrográfica, possibilitando assim a verificação da presença de trincas e baixa penetração.

### 4.1 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento mostrou uma grande suscetibilidade do material a falhas, quando submetido a grandes deformações, em regiões que sofreram alterações microestruturais devido à ação de calor localizado, que neste caso é a presença da ZF da solda.

Todas as amostras apresentaram falhas na região da solda. As falhas ocorreram na forma de trincas no sentido longitudinal da solda, ocorrendo principalmente no lado oposto à superfície tocada pela ferramenta de dobra, que para os corpos de prova avaliados, representa a superfície do passe de solda. A Tabela 9 mostra os resultados dos ensaios de dobramento para os três corpos de prova soldados com arame ER70S-6.

Tabela 9-Ensaio de dobramento

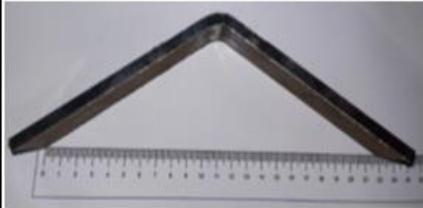
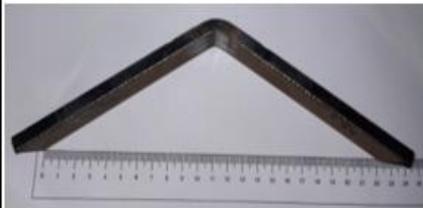
Ensaio	Vista superior	Raiz da solda
A		
B		
C		

Fonte: Do autor, 2017.

Para os testes de dobramento com arame ER70S-G pode-se verificar que o corpo de prova não foi totalmente afetado pelas características do consumível.

A Tabela 10, mostra os resultados dos ensaios de dobramento para os três corpos de prova soldados com arame ER110S-G.

Tabela 10-Ensaio de dobramento

Ensaio	Vista superior	Raiz da solda
D		
E		
F		

Fonte: Do autor, 2017.

Os resultados dos ensaios de dobramento mostram que o aço Hardox 500, quando submetido ao processo de solda, possui baixa ductilidade, tornando-o inadequado para aplicações onde há incidência de esforços mecânicos que possam resultar em deformações na região da solda.

Quando comparado aos testes realizados por Milanez (2016) com aço Hardox 450 similar, verificou-se que todos os ensaios de dobramento realizados foram reprovados, comprovando outra vez que o aço Hardox é altamente influenciado pelo aporte térmico quando submetido ao processo de soldagem. A Figura 14, representa

o resultado do ensaio de dobramento com aço Hardox 450.

Figura 14-Ensaio de dobramento com aço Hardox 450



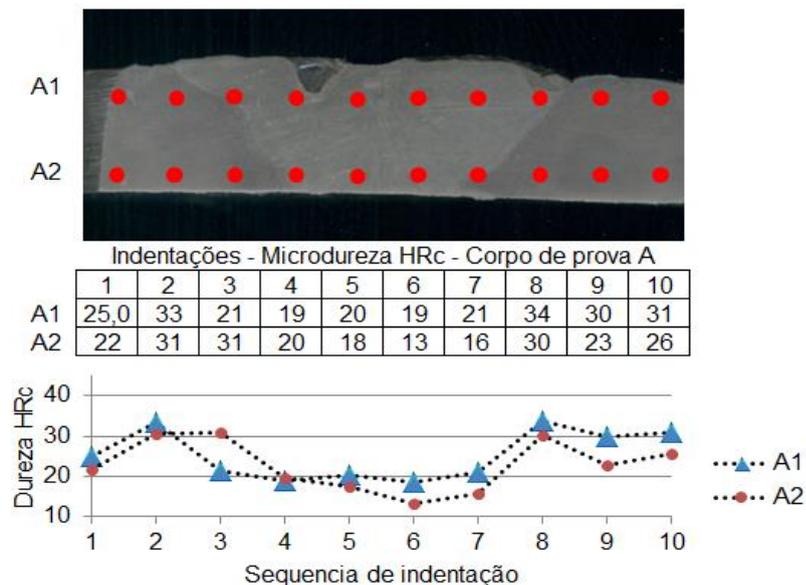
Fonte: Milanez (2016)

#### 4.2 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de microdureza mostrou uma variação relativamente constante entre as seis amostras, onde as regiões do metal de base, ZAC e ZF mostraram durezas relativamente semelhantes.

As Figuras 15, 16 e 17 mostram os resultados das análises de microdureza para todos os corpos de prova avaliados, utilizando arame ER70S-6 como metal de adição.

Figura 15-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova A

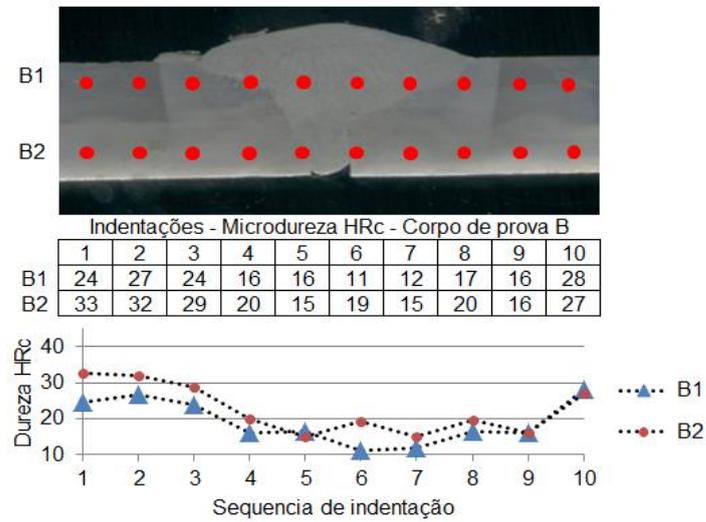


Fonte: Do autor, 2017.

Para o corpo de prova A soldado com 320A e com consumível ER70S-

G, podemos perceber como o material é afetado pelo aporte térmico de energia. A dureza não é somente afetada na diluição da solda, mas também nas extremidades do metal base, aonde a dureza chega a cair pela metade.

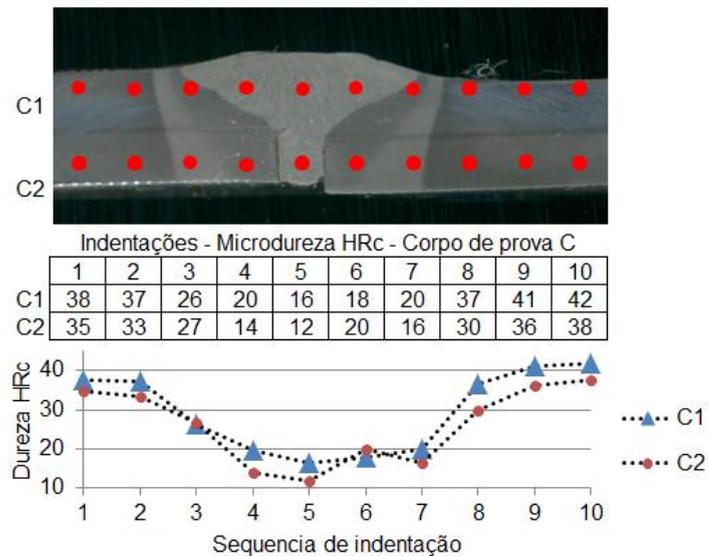
Figura 16-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova B



Fonte: Do autor, 2017.

Para o corpo de prova B soldado com 250A e com consumível ER70S-G, podemos perceber que o aporte térmico de energia afeta de forma considerável a junta soldada. A dureza é afetada na diluição da solda, mas também nas extremidades do metal base, chega a cair pela metade.

Figura 17-Resultado da Microdureza do Corpo de Prova C

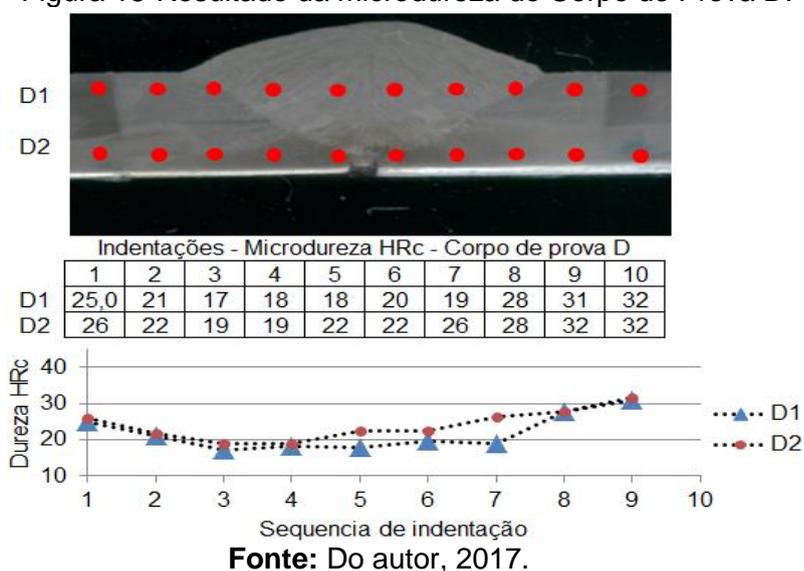


Fonte: Do autor, 2017.

Para o corpo de prova C soldado com 220A e com consumível ER70S-G, podemos perceber que o aporte térmico de energia é bem inferior quando comparado aos demais corpos de prova. A zona afetada pelo calor é inferior fazendo com que a dureza do metal base e no local da diluição da solda, não sejam consideravelmente afetados.

As Figuras 18, 19 e 20 mostram os resultados das análises de microdureza para todos os corpos de prova avaliados utilizando arame ER110S-G como metal de adição.

Figura 18-Resultado da microdureza do Corpo de Prova D.



Para o corpo de prova D (Figura 18) soldado com 320A e com consumível ER110S-G, podemos perceber como o material é afetado pelo aporte térmico de energia. A dureza se manteve de forma constante em todas as indentações.

Para o corpo de prova E (Figura 19) soldado com 250 e com consumível ER110S-G, podemos perceber como a dureza é variada nas diversas indentações. Pelo fato de se usar uma amperagem menor, o aporte térmico é menor afetando de forma reduzida as características do metal base.

Para o corpo de prova F (Figura 20) soldado com 220A e com consumível ER110S-G, podemos perceber que o aporte térmico de energia é bem inferior quando comparado aos demais corpos de prova. A zona afetada pelo calor é inferior fazendo com que a dureza do metal base e no local da diluição da solda, não sejam consideravelmente afetados. A penetração quando comparado ao corpo de prova com consumível ER70S-G é bem inferior.

Figura 19-Resultado da microdureza do Corpo de Prova E

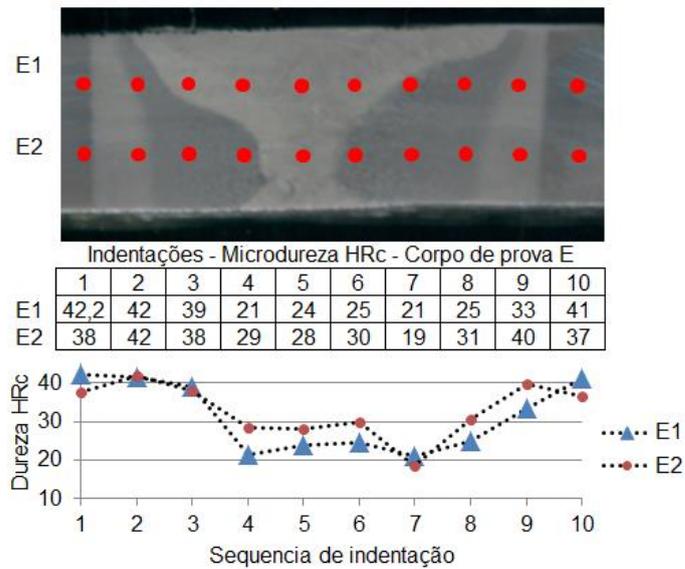
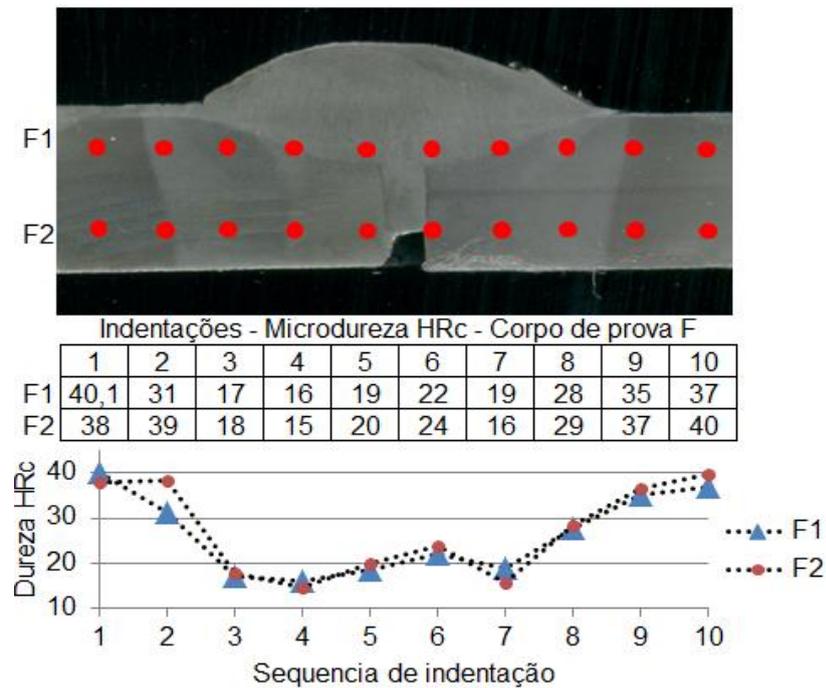


Figura 20-Resultado da microdureza do Corpo de Prova F



Quando a dureza é avaliada entre as diferentes regiões da junta soldada, os resultados novamente mostram que este aço é consideravelmente afetado pelo processo de solda, o qual submete o material a elevados gradientes de temperatura, resultando em uma grande alteração microestrutural.

Essa alteração nas suas propriedades mecânicas faz com que este material, projetado e desenvolvido para absorver e resistir a grandes quantidades de energia mecânica perca suas principais características, fazendo com que o produto final de um processo de solda possua propriedades que não atendam, impossibilitando sua aplicação em determinadas situações.

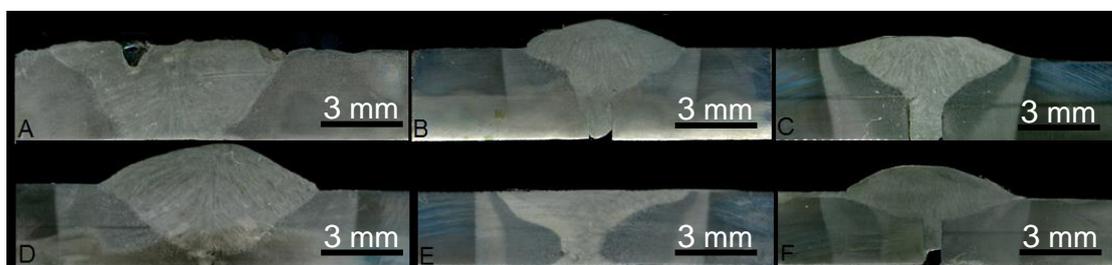
Assim como nos resultados dos ensaios de dobramento, este material, após soldado, não é adequado para aplicações com ocorrência de esforços mecânicos sobre a região soldada.

#### 4.3 ANÁLISE MACROGRÁFICA

As análises macrográficas consistiram em avaliar a geometria da zona ZF, bem como a penetração da solda, obtendo informações sobre o efeito das variações no tipo de arame e amperagem na seção transversal da ZAC.

A Figura 21 mostra as macrografias dos seis corpos de prova avaliados, os quais foram fabricados seguindo os parâmetros de solda mostrados na Tabela 7.

Figura 21-Macrografia dos corpos de prova.



Fonte: Do autor, 2017.

Analisando o efeito da amperagem na geometria da ZF, pode-se observar que as amostras C e F, fabricadas com a menor energia de soldagem, apresentaram a menor penetração da solda, independentemente do metal de adição utilizado. Já para os casos A e D, os quais tiveram maior energia de soldagem, apresentaram maior penetração, atingindo toda a espessura do metal de base.

Os casos B e E, apesar da solda ter transpassado toda a espessura da peça, ocorreu baixa fusão do metal de adição com o metal de base na metade oposta ao passe de solda.

O emprego de dois metais de adição diferentes, o AWS ER70S-6 e o AWS

ER110S-G, resultaram em zonas fundidas com geometrias diferenciadas. Ficou evidente que o arame AWS ER70S-6 proporciona uma penetração superior ao arame ER110S-G, formando uma zona fundida com formato cônico, enquanto o ER110S-G proporciona uma penetração dispersa sobre a superfície do passe da solda.

O ER110S-G necessita de uma maior energia de soldagem para atingir a mesma penetração do metal de adição ER70S-G. Por esta característica e pelo fato da zona fundida ser mais superficial e distribuída horizontalmente, a junta apresenta uma conseqüente ZAC com maiores dimensões quando comparada com o uso do arame ER70S-G.

Comparando as dimensões da ZF com o seu comportamento no ensaio de dobramento pode ser observado que quanto maiores às dimensões da ZF maiores foram os danos a ela causados.

Esta característica pode ser explicada pela velocidade e tempo de resfriamento da solda. Nas amostras com o maior aporte de energia o tempo de resfriamento é maior, assim como a velocidade de resfriamento é menor, resultando em uma ZF com maiores dimensões. Estes fatores resultam em um metal fundido com maior tamanho de grão, aumentando assim sua fragilidade.

## CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos pelas avaliações mecânicas e metalográficas conclui-se que o aço Hardox 500, desenvolvido para aplicações onde há grande ação de esforços mecânicos e meios abrasivos, possui excelentes características que aumentam sua vida útil, porém é fortemente afetado quando submetido a processos de fabricação que resultam em aporte de energia térmica, como a soldagem.

Quando submetido a altas temperaturas, especialmente acima de sua temperatura de fusão, a microestrutura obtida durante a fabricação do aço Hardox é modificada, fazendo com que todas as características de alta dureza e resistência mecânica sejam perdidas. Como o resfriamento da solda não foi controlado, o tamanho de grão aumenta e, conseqüentemente, sua ductilidade diminui.

A utilização deste material fica limitada em situações de peças que serão obtidas pelo processo de soldagem e em sua aplicação serão submetidos a elevados esforços mecânicos, pois nestas situações ele é altamente suscetível a falhas.

## REFERÊNCIAS

ALLGAYER, Manoel Augusto. **Influência dos gases de proteção utilizados no processo MIG/MAG sobre as propriedades mecânicas do metal de solda**, Dissertação de Mestrado. UFRGS: Porto Alegre, 1990.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2004**: Structural Welding Code-Steel. Miami. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6508-1**. Materiais metálicos - Ensaio de dureza. Rio de Janeiro. 2008.

\_\_\_\_\_. NBR 6023 (NB 66): **Informação edocumentação**: referências de elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BOHLER. **SolidWire**. 2014. Disponível em: <[http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/B\\_Boehler%20X%2070-IG\\_de\\_en\\_5.pdf?cache=1479374087](http://www.vabw-service.com/documents/boehler/datenblaetter/en/B_Boehler%20X%2070-IG_de_en_5.pdf?cache=1479374087)> Acesso em: 22 ago. 2017.

CARPENEDO, Marcelo. **Utilização de aços de alta resistência e baixa liga na redução de peso de máquinas agrícolas colhedoras de grãos**, Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: UFRGS, 2014.

DALCIN, G. B. **Ensaio dos Materiais**. Santo Ângelo: URI, 2007

DAMASCENO, Deoclécio. **Tecnologia dos Materiais Mecânicos II**. São Paulo: [s.n.], 2010.

ESAB. **Catálogo de Consumíveis**. 2013. Disponível em: <<http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2017.

\_\_\_\_\_. **Metalurgia da Soldagem**. 2004. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0\\_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901102rev0_ApostilaMetalurgiaSoldagem.pdf)>. Acesso em: 18 de jun. 2017.

\_\_\_\_\_. **Soldagem MIG/MAG**. 2005. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0\\_apostilasoldagemmigmag\\_low.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf)>. Acesso em: 17 de junho de 2017

GARCIA. A.; SPIN. J. A.; SANTOS. C. D. S. **Ensaio dos materiais**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GERDAU, **Arames para solda**. 2014. Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

HOULDCROFT, P.T. **Welding Process Technology**. London: Cambridge University Press, 1979.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2.ed. John Willey and Sons, 2003.

LINCOLNELECTRIC, **Máquina de soldagem CV-510**. 2013. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com.br/>>. Acesso em: 22 set. 2017.

MACHADO, Ivan G. **Soldagem e Técnicas Conexas**. Porto Alegre, Edição do Autor, 1996.

MARQUES, Paulo V; Modonesi, Paulo J; Bracarense, Alexandre Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MILANEZ, Alexandre. Análise dos parâmetros de soldagem em aços de alta resistência HARDOX®. **Revista Vinci**, Faculdade SATC, v. 38, n. 23, p. 58-74, jan./jul., 2016.

MITUTOYO. **Durômetro**. 2016. Disponível em: <<http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/02folhetos/06%20Dureza/FP201-963.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ROHDE, Regis. Almir. **Metalografia: preparação de amostras**. Santo Ângelo : URI, 2010.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000.

\_\_\_\_\_. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

SSAB. **Hardox 500: General Product Description**. 2015. Disponível em: <[http://www.mtladv.com/wpcontent/uploads/2016/01/152\\_HARDOX\\_500\\_UK\\_Data-Sheet.pdf](http://www.mtladv.com/wpcontent/uploads/2016/01/152_HARDOX_500_UK_Data-Sheet.pdf)>. Acesso em: 29 ago. 2017.

\_\_\_\_\_. **Welding of Hardox: Wear Plate**. 2016. Disponível em: <[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:twd\\_o\\_ESGT0J:https://sabwebsitecdn.azureedge.net/-media/files/en/hardox/ssab-welding-hardox-wear-plate-103\\_en.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br.](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:twd_o_ESGT0J:https://sabwebsitecdn.azureedge.net/-media/files/en/hardox/ssab-welding-hardox-wear-plate-103_en.pdf+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br.)>. Acesso em: 30 mar. 2017.

\_\_\_\_\_. **Welding of Hardox**. 2014. Disponível em: <<https://www.ssab.com>>. Acesso em: 30 mar. 2017.

SSAB-OXELÖSUND **Steel Mill: Welding Handbook Hardox and Weldox**. 2017. Disponível em: <<http://www.ssab.com/>>. Acesso em: 28 jun. 2017.

STENBACKA, N.; PERSSON, K.A. Shielding gases for gas metal arc welding. **Welding Journal**, Nov. 1989.

WAINER, Emílio; Brandi; Sérgio d. Mello, Fabio D. H de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.