

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS FINAS DE AÇO  
HARDOX 450 SOLDADAS ATRAVÉS DOS PROCESSOS MAG E TIG

por

Nilo Yusuke Okido

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS FINAS DE AÇO  
HARDOX 450 SOLDADAS ATRAVÉS DOS PROCESSOS MAG E TIG

por

Nilo Yusuke Okido

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 14 de novembro de 2018

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente aos meus pais pelo apoio incondicional durante todas as etapas da minha vida e principalmente pelo incentivo ao estudo.

Aos meus amigos pelas risadas e pelas horas de descontração.

Agradeço a todos os profissionais da educação, principalmente aos meus professores e professoras do departamento de engenharia mecânica da UFRGS, que passaram na minha vida pela qualidade na educação, pelos conhecimentos e pela experiência compartilhada comigo.

Agradeço aos membros do Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, em especial à professora Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro pelos conhecimentos compartilhados e pela paciência disponibilizada na orientação deste trabalho.

OKIDO, N.Y. **Análise comparativa das propriedades mecânicas de chapas finas de aço HARDOX 450 soldadas através dos processos MAG e TIG.** 2018. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **RESUMO**

Pesquisas envolvendo otimização de componentes mecânicos para atender as demandas de aplicação profissional visando reduzir os custos é sempre uma fonte de muito interesse das empresas. O Hardox 450 é um aço que possui uma boa dureza, resistência ao desgaste e tenacidade aliada à uma boa soldabilidade. É um material que pode substituir aços convencionais com maior durabilidade, por exemplo. Portanto, entender as propriedades mecânicas deste material nos processos de soldagem é fundamental, uma vez que o esse tipo processo é muito utilizado em empresas de engenharia e tecnologia para unir diversos tipos de componentes. Para isso, chapas finas de Hardox 450 com 1 mm de espessura foram soldadas pelo processo MAG e TIG. Para cada processo utilizou-se duas configurações de soldagem. Após a soldagem das chapas, foram feitas análises experimentais de macrografia, microdureza e ensaio de tração assim como para o metal base. Verificou-se em todas as amostras que as maiores reduções de dureza, aproximadamente 50%, foram na zona afetada pelo calor. Nos ensaios de tração foram verificadas que a tensão de escoamento e a resistência à tração reduziram em aproximadamente 65% e 50%, respectivamente quando comparado aos valores apresentados pelo metal base, enquanto que a redução no alongamento (ductilidade) foi de aproximadamente 60% nas amostras MAG e 85% nas amostras TIG.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hardox 450, TIG, MAG, propriedades mecânicas.

OKIDO, N.Y **Comparative analysis of the mechanical properties of HARDOX 450 steel sheets welded through MAG and TIG process**. 2018. 20 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

#### ABSTRACT

Research involving optimization of mechanical components to meet the demands of professional application in order to reduce costs is always a source of great interest for companies. The Hardox 450 is a steel that has good hardness, wear resistance and tenacity combined with good weldability. It is a material that can replace conventional steels with greater durability, for example. Therefore, understanding the mechanical properties of this material in welding processes is fundamental, since this type of process is widely used in engineering and technology companies to join various types of components. For this, Hardox 450 thin sheets of 1 mm thickness were welded by the MAG and TIG process. Two welding configurations were used for each process. After soldering the sheets, experimental analyzes of macrography, microhardness and tensile tests were performed. It was found in all samples that the greatest hardness reductions, approximately 50%, were in the heat affected zone. In the tensile tests it was found that the yield stress and the tensile strength were reduced by approximately 65% and 50%, respectively when compared to the values presented by the base metal, whereas the reduction in elongation (ductility) was approximately 60% in the MAG and 85% in the TIG samples.

**KEYWORDS:** Hardox 450, TIG, MAG, mechanical properties.

## ÍNDICE

RESUMO .....	iv
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	1
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
4.1 PROCESSO MIG/MAG .....	2
4.2 PROCESSO TIG .....	2
5 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS .....	3
5.1 Processo de soldagem .....	3
5.2 Preparação dos corpos de prova para a caracterização .....	5
5.3 Diluição .....	6
5.4 Perfil de microdureza .....	6
5.5 Ensaio de Tração .....	6
6 RESULTADO E DISCUSSÃO .....	7
6.1 Diluição .....	7
6.2 Microdureza .....	7
6.3 Ensaio de tração .....	9
6.3.1 Análise da superfície de ruptura dos corpos de prova. ....	11
7 CONCLUSÕES .....	12
8 BIBLIOGRAFIA .....	13
APÊNDICE I .....	15

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem ao arco elétrico de chapas finas de aço é uma tarefa muito desafiadora na engenharia. Devido a espessura do metal base (MB) ser fina, as possibilidades de combinação de parâmetros como tensão, corrente e velocidade de soldagem se tornam muito limitadas para resultar em uma solda com qualidade adequada, principalmente devido às distorções geométricas que ocorrem devido ao ciclo térmico de soldagem. Somando-se a isso, quando o MB um aço martensítico, o desafio se torna ainda mais complexo, principalmente pelo fato da martensita ser geralmente mais sensível a fratura pelo hidrogênio e também pela alta vulnerabilidade às transformações microestruturais, resultando em uma variação na dureza, principalmente na ZAC (Zona Afetada pelo Calor), em relação ao MB. Portanto, buscar soluções, ou seja, combinações de parâmetros que resultem em uma solda de qualidade e que atendam as demandas da aplicação profissional é de extrema importância para desenvolvimento de tecnologias futuras na área da engenharia.

As falhas de componentes mecânicos são problemas que comprometem de forma significativa as finanças de empresas. Por causa disso, estes fenômenos vem sendo uma fonte de pesquisa em diversas áreas da indústria mecânica. Custos de manutenção e reposição de peças afetam diretamente o orçamento e, portanto, a procura por soluções técnicas que visam reduzi-los sempre está em pauta [Viegas, 2016]. Segundo a SAAB, 2018, o HARDOX 450 oferece uma boa dureza, resistência ao desgaste e tenacidade aliada à uma boa soldabilidade. Devido à essas propriedades do material, este aço vem sendo utilizado em diversos setores da indústria, principalmente na agricultura e mineração, onde o efeito do fenômeno abrasivo entre o componente e terra é uma das principais causas do desgaste e conseqüentemente de falha. Portanto, é de interesse das indústrias e do meio acadêmico entender o comportamento deste material em diversas situações de configurações de soldagem.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como proposta analisar e comparar as propriedades mecânicas de chapas de HARDOX 450 com 1 mm de espessura soldadas em quatro configurações distintas, sendo duas através do processo MAG (Metal Active Gás) e as outras duas pelo processo TIG (Tungsten Inert Gas).

## 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente momento, as referências de pesquisas relacionadas a uma análise qualitativa de aços martensíticos de chapas finas envolvendo processos de soldagem, principalmente TIG e MAG, encontram-se muito escassas ainda na literatura. Entretanto alguns trabalhos já vêm seguindo essa linha de pesquisa com intuito de compreender melhor este fenômeno. Cita-se entre eles o trabalho do Sartori, 2017, onde foi analisado as distorções resultantes do processo de soldagem MAG em chapas finas de HARDOX 450. Além disso, em complemento ao trabalho citado anteriormente, Basso, 2018, fez uma análise de microdesgaste nas mesmas chapas onde foi realizado a análise de distorção, complementando e fazendo um estudo comparativo com as mesmas chapas, porém soldadas pelo processo TIG autógeno. Portanto, a fim de compreender melhor a metodologia que foi seguida neste trabalho, buscou-se referências de trabalho que usaram procedimentos similares para caracterizar qualitativamente a região da solda e também de trabalhos nas quais os resultados eram de interesse na elaboração deste trabalho.

Sun, et. al., 2016, fez um estudo comparativo de uma chapa de aço microligado de C-Mn com 5 mm de espessura soldados através do processo a laser e MAG. Foram feitas análises de microdureza e ensaio tração juntamente com a análise microestrutural das regiões do MB, ZAC

e metal de solda (MS). O experimento mostrou que a dureza no MS foi maior em relação às demais regiões na chapa soldada a laser. Por outro lado, na soldagem MAG a região de maior dureza foi na região da ZAC enquanto que o MS e MB mantiveram o mesmo nível de perfil de dureza. Em ambas as configurações, a ruptura do material no ensaio de tração aconteceu na região de elevada dureza, caracterizada como fratura frágil.

Costa, 2016, no seu estudo sobre a tenacidade de uma junta soldada de chapas de HARDOX 450 com 10 mm de espessura soldadas através do processo com arame tubular, também conhecido como FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), realizou, como complemento à sua análise, os ensaios de tração e microdureza. Chegou-se a conclusão a partir dos testes que as regiões de menor dureza foram na ZAC, tornando-se o local crítico na solda e sendo, consequentemente, o local da ruptura no ensaio de tração.

Xia, 2007, analisou os efeitos da quantidade de martensita e transferência de calor na redução de dureza na zona afetada pelo calor em soldagem a laser de aços de dupla fase. No seu estudo foi concluído que a redução da dureza na ZAC é uma função da quantidade de martensita do metal base e a quantidade de calor transferido durante a soldagem.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 PROCESSO MIG/MAG

Este processo se baseia na formação do arco elétrico entre a peça e o eletrodo maciço nu consumível, que é continuamente alimentado pelo sistema [Machado, 1996]. A poça do metal fundido formada no processo, pode ser protegida por dois tipos de gases ou mistura de gases: o gás inerte no MIG e o gás ativo (oxidante) no MAG. Além disso, Machado, 1996, ressalta que uma das principais vantagens deste tipo de soldagem é na sua facilidade de robotização, consequência da alta flexibilidade de soldagem em diversas posições com ótima estabilidade do arco e produção de pouca escória. Outra vantagem fundamental neste tipo de soldagem é o baixo conteúdo de hidrogênio depositado no metal de solda, diminuindo os riscos da trinca induzida por hidrogênio.

Em contrapartida às vantagens do processo, Marquês, 2011, diz que as principais limitações neste tipo de soldagem é a alta sensibilidade às variações dos parâmetros elétricos que podem comprometer a qualidade da solda e a dificuldade de ajuste destes parâmetros para se obter uma solda com características específicas.

### 4.2 PROCESSO TIG

Segundo Machado, 1996, a soldagem TIG é a geração de um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio puro - ou composto com outros metais ou óxidos - com a peça a ser soldada. A proteção da poça de metal fundido contra a contaminação da atmosfera é feita através de um gás inerte que na maioria das vezes é o gás argônio. Além disso, este processo permite a adição de metal (consumível) na solda e quando isso ocorre é feita diretamente na poça de fusão.

Uma das vantagens deste processo segundo Marquês, 2011, é o excelente controle da energia de soldagem. Isso torna o processo bastante adequado para soldagem de chapas finas. Além disso, este processo permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade com ótimos resultados e é aplicável à maioria dos metais e suas ligas numa ampla faixa de espessura. Apesar dos benefícios que este processo pode trazer, os custos relacionados à operação são muito altos e a produtividade ou o rendimento do processo é baixo [Marquês, 2011]. Estes fatores acabam limitando a sua aplicação para casos em que se tem como prioridade a qualidade da solda em relação ao custo de operação.



## 5 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

O material utilizado como base de pesquisa neste trabalho foi o aço HARDOX 450, que é um aço que oferece uma boa dureza, resistência ao desgaste e tenacidade aliada à uma boa soldabilidade, segundo a SSAB,2018. A sua aplicação se concentra muito na mineração e agricultura devido a essas características se mostrarem muito vantajosas para este tipo de utilização, onde se requer alta resistência mecânica e alta resistência ao desgaste, aliados a boa tenacidade. Além disso, o arame utilizado na soldagem MAG foi o AWS ER110S-G com 1 mm de diâmetro, um material que oferece alta resistência, portanto muito apropriado para este tipo de aplicação, pois as características se assemelham às do metal base. As tabelas 5.1 e 5.2 mostram a composição química do aço e do arame, respectivamente.

Tabela 5.1 - Composição química do aço HARDOX 450 (SSAB, 2018).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,18	0,25	1,30	0,015	0,004	0,10	0,04	0,003

Tabela 5.2 - Composição química do arame AWS ER110S (Xiang Welding Industrial Co Ltd, 2018).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
0,10	0,60	1,50	0,30	1,40	0,25

### 5.1 Processo de soldagem

Duas configurações de solda foram realizadas pelo processo MAG através do robô modelo MA1400/DX100 da Yaskawa Motoman Robotics com uma fonte TransPuls Synergic 4000 R da marca Fronius de acordo com as seguintes características:

- Soldagem em corrente contínua eletrodo positivo;
- Transferência do metal por curto-circuito;
- Diâmetro do eletrodo de 1,0 mm;
- Gás de proteção argônio + 10% CO<sub>2</sub> com vazão de 15 L/min;
- Tocha na posição neutra.

As chapas foram encostadas lado a lado e soldadas de modo que o cordão de solda tivesse o mesmo sentido de laminação de chapas, como pode ser observado na figura 5.1.

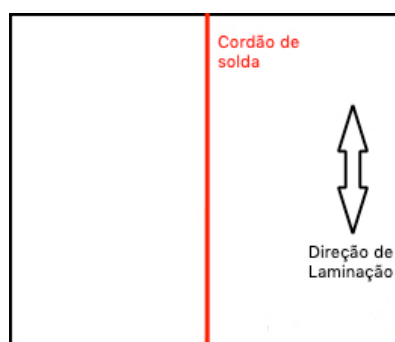


Figura 5.1 – Esquematização da soldagem MAG.

Os parâmetros de soldagem foram selecionados visando garantir a penetração completa. Para isso, foi levando em consideração a similaridade da energia de soldagem em relação ao trabalho realizado pelo Basso, 2018 que no desenvolvimento do seu trabalho soldou as mesmas chapas de HARDOX 450 pelo processo TIG. Não havia a garantia de que que no processo MAG, utilizando as energias de soldagem similares, o cordão de solda tivesse penetração completa se levado em consideração somente este fator. Portanto, após a soldagem, foi feito uma análise visual para verificar a integridade e a qualidade da solda. Observa-se na figura a seguir as chapas soldadas pelo processo MAG.

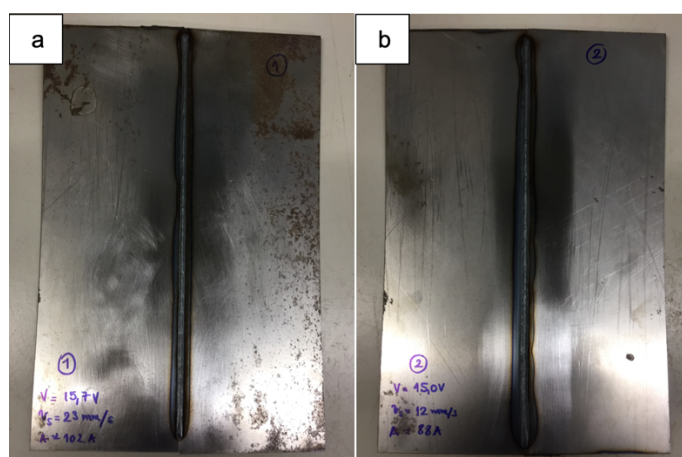


Figura 5.2 - a) Chapa de HARDOX 450 soldada pela configuração MAG23. b) Chapa de HARDOX 450 soldada pela configuração MAG12.

Além disso, foi do trabalho do Basso, 2018, que foram utilizadas as outras duas configurações de soldagem, as chapas soldadas pelo processo TIG, com as seguintes características:

- Processo autógeno, sem adição de arame;
- Soldagem em corrente contínua eletrodo negativo;
- Eletrodo de tungstênio com óxido de tório;
- Diâmetro do eletrodo de 3,2 mm;
- Ângulo da ponta de 60 graus;
- Gás de proteção argônio puro com vazão de 15 L/min;
- Tocha na posição neutra.

A tabela 5.3 mostra os parâmetros de soldagem envolvidos na produção das amostras, bem como as respectivas energias de soldagem em cada um dos processos obtidas através da equação 5.1.

$$E = \eta \times \frac{UI}{v} \quad (5.1)$$

onde, E é a energia de soldagem (J/mm), U é a tensão de soldagem em (V), I é a corrente de soldagem (A) e v a velocidade de soldagem (mm/s). O rendimento térmico do processo ( $\eta$ ) considerado na soldagem MAG foi baseado no trabalho de Hackenhaar, 2016, onde foi analisada a eficiência térmica na soldagem MAG. Nesse trabalho, foi verificado que o valor da eficiência térmica na soldagem MAG resultava em torno de 80,5% e 85%. Além disso, devido as amostras soldadas terem energia de soldagem baixas mesmo considerando as condições ideais de rendimento e também pela extração de calor ser mais rápida neste tipo de caso, foi considerado

o valor aproximado de 80%. O rendimento do processo TIG considerado foi de 70%, de acordo com Nasiri et al., 2014, onde se analisou o rendimento térmico deste tipo de soldagem para diferentes valores de corrente.

Tabela 5.3 - Parâmetro de soldagem das amostras.

AMOSTRA	MAG 23	MAG 12	TIG 12	TIG 20
Velocidade de soldagem (mm/s)	23	12	12	20
Corrente (A)	102	88	130	180
Tensão (V)	15,7	15	11	11
Rendimento ( $\eta$ )	0,8	0,8	0,7	0,7
Energia de soldagem (J/mm)	55,70	88,00	83,42	69,30

## 5.2 Preparação dos corpos de prova para a caracterização.

Foram extraídos de cada chapa soldada duas amostras: uma para analisar a superfície (perfil de microdureza) e outra para analisar a seção transversal (diluição do metal de solda) na região da solda. Os cortes foram feitos com discos abrasivo e resfriados com corrente contínua de água. Após esta etapa, as amostras foram embutidas e processadas na lixa, variando a sua granulação de 80 a 1500 e, posteriormente, polidas com alumina 0,1  $\mu\text{m}$ . Para destacar as regiões da solda, elas foram atacadas com Nital 10%.

O corte dos corpos de prova de tração foi feito por jato d'água. A escolha por este método de corte foi, principalmente, para não haver alteração da microestrutura na região da solda, muito comum em métodos convencionais de corte devido ao calor gerado. As dimensões dos corpos de prova foram baseadas na referência normativa ASTM E8 / E8M -15a como observa-se na figura 5.3. Porém, devido ao manuseio inapropriado do equipamento de corte, a dimensão da parte útil do corpo de prova indicada como 6 mm resultou em 4,8 mm. Foram usinados três corpos de prova para cada configuração (MAG23, MAG12, TIG12 e TIG20) além do metal base.

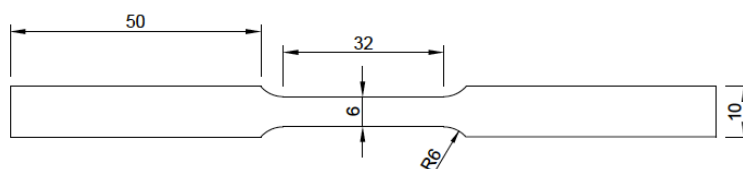


Figura 5.3 - Dimensões do corpo de prova. [Adaptado de ASTM E8 / E8M -15a].

Na retirada do reforço do cordão de solda dos corpos de prova, uma amostra teve a sua espessura reduzida, principalmente pelo fato da região ser muito pequena e não ser possível isolá-la de maneira adequado para a lixação (figura 5.4).

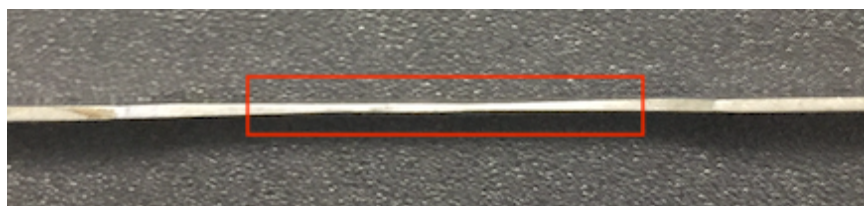


Figura 5.4 - Redução da espessura do corpo de prova MAG23 devido às limitações da lixação.

Devido a esse problema, decidiu-se não retirar por completo o reforço nos corpos de prova nas amostras restantes. Além disso, foi possível verificar nos corpos de provas das configurações MAG12, MAG23 e TIG20 que houve desalinhamento entre as chapas, resultante do desalinhamento das chapas durante o processo de soldagem e das distorções provocadas pelo aquecimento e resfriamento. Pode-se ver um exemplo disso na figura 5.5. Estes problemas serão melhor discutidos e considerados nos resultados e discussões na seção 6.

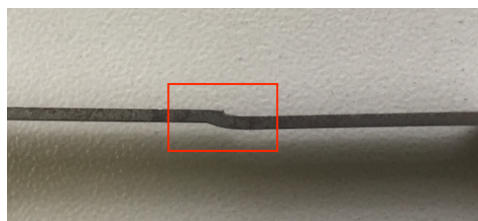


Figura 5.5 - Desalinhamento na soldagem da configuração TIG20.

### 5.3 Diluição

Através de uma câmera fotográfica acoplada ao um microscópio óptico, foram tiradas as fotos das seções transversais das amostras soldadas pelo processo MAG. Após isso, as imagens foram processadas pelo programa *ImageJ* e, definindo-se a como referência dimensional a espessura de 1 mm das chapas, foram calculadas a diluição do metal de solda de acordo com a equação 5.2, segundo Machado 1996.

$$Diluição = \frac{\text{Área da fundida do metal base}}{\text{Área total do cordão de solda}} \times 100\% \quad (5.2)$$

### 5.4 Perfil de microdureza

As medições de microdureza foram realizadas através de um microdurômetro Insize. Primeiramente, as amostras foram fixadas em um chapa plana com o intuito de deixar a superfície de medição reta. Após isso, foram aplicadas carga de 300 g com um tempo de permanência de 10 s. As medições foram feitas no sentido transversal do cordão de solda e espaçadas em 1 mm entre os pontos de medição. Tomando-se como referência o centro do cordão de solda, foram feitos 10 pontos de medição espaçadas em 1 mm em ambos os lados.

Em alguns casos a resolução de 1 mm utilizado entre as distâncias de medição não teve a precisão desejada no detalhamento do perfil de microdureza, uma vez que as regiões de menor dureza podem ter largura menor que 1 mm, principalmente em amostras cuja energia de soldagem é baixa. Portanto, para uma análise mais detalhado, foram feitas medições com menor espaçamento nessas regiões.

### 5.5 Ensaio de Tração

Os ensaios foram realizados no laboratório do Grupo de Mecânica Aplicada (GMAP) que pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. Durante a preparação do ensaio, verificou-se que o extensômetro disponível para o teste não possuía configuração favorável para medição da deformação da parte útil do corpo de prova. Portanto, houve adaptações e algumas amostras tiveram que ser descartadas para o teste na máquina e para adequar o extensômetro ao corpo de prova. Foi aplicado uma carga de 10 kN por segundo no ensaio.

## 6 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 6.1 Diluição

Os valores da diluição em ambas as configurações MAG apresentaram valores diferentes e maior para a amostra MAG12, onde foi utilizada a maior energia de soldagem, como pode observar na Tabela 6.1. Vale lembrar que na soldagem TIG realizado por Basso, 2018, na qual as configurações TIG se basearam, não houve adição de consumível no processo. Portanto, a diluição nesse caso resultou em 100%, pois o metal fundido era composto apenas de metal base.

Tabela 6.1 - Diluição das amostras MAG23 e MAG12

Amostra	MAG 23	MAG 12
Diluição (%)	46,09	50,98

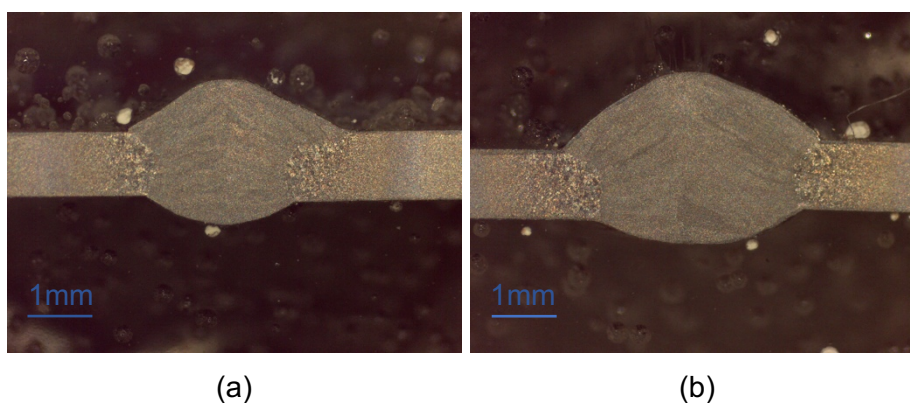


Figura 6.1 – Macrografias: (a) MAG23. (b) MAG12

Os valores de diluição estão relacionados à composição química do metal de solda, influenciando na solidificação, microestruturas resultantes e presença ou não de defeitos, como trincas, dependendo do tipo de material que está sendo soldado e do consumível utilizado. Pelo fato do consumível utilizado neste trabalho apresentar características similares ao metal base, não houve problemas relacionados à esta característica.

### 6.2 Microdureza

As figuras 6.2 e 6.3 mostram graficamente o perfil de microdureza das amostras MAG, assim como as figuras 6.4 e 6.5 mostram o perfil de microdureza das amostras TIG. Nestas, estão delimitadas as regiões, onde se encontram a ZAC, MB e metal de solda e os pontos de medição.

Foi possível verificar nas amostras soldadas pelo processo MAG que a distância entre os extremos da ZAC foi maior na configuração MAG12, como podemos observar, comparando-se as figuras 6.2 e 6.3 e também pelas macrografias da figura 6.1. Isso se deve principalmente pelo fato desta configuração apresentar maior energia de soldagem, consequentemente um cordão mais largo e maior ZAC. Por outro lado, essa analogia não pode ser considerada nas amostras TIG, uma vez que as distâncias entre as os extremos da ZAC, bem como a sua espessura, foram iguais nas duas configurações, TIG12 e TIG20, independente da energia de soldagem envolvida. Isso evidencia a influência da corrente de soldagem utilizada – 180 A no TIG20 e 130 A no TIG12.

Em todas as amostras, verificou-se que há uma variação de dureza no centro do cordão de solda (metal de solda) em relação as regiões ao redor. No processo MAG os valores de dureza

nos metais de solda ficaram em média 50 HV abaixo da dureza do metal base, enquanto que nas soldas com o processo TIG, onde não houve o emprego de metal de adição, as durezas dos metais de solda ficaram cerca de 30 HV menores do que a do metal base.

As zonas de menor dureza em todas as amostras foram na ZAC, assim como Xia, 2007, verificou na soldagem a laser de aços de dupla fase. Essas variações na dureza são decorrentes das transformações microestruturais que ocorrem nos ciclos térmicos durante o processo de soldagem. Em todas as condições, tanto MAG quanto TIG, o menor valor de dureza observado foi de 250HV, aproximadamente metade do valor de dureza do metal base, independente da energia empregada no processo.

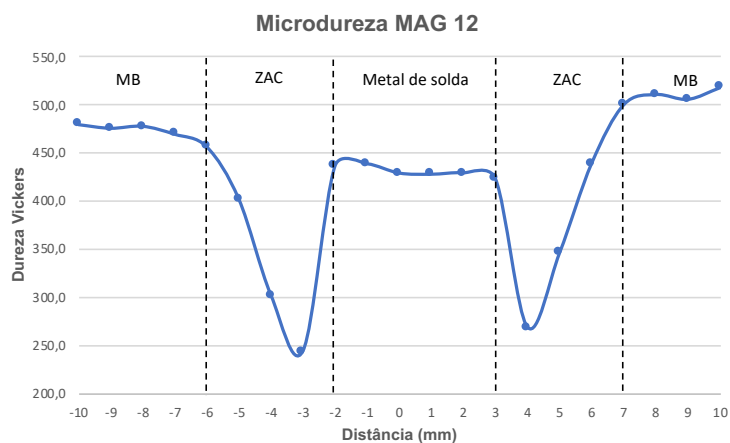


Figura 6.2 – Perfil de microdureza da amostra MAG 12

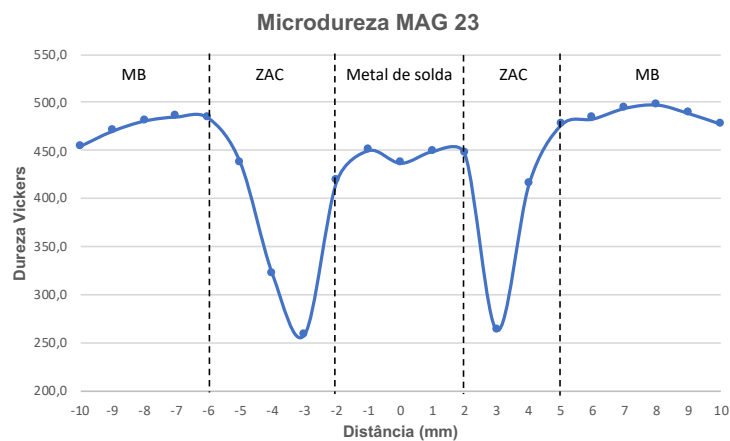


Figura 6.3 - Perfil de microdureza da amostra MAG 23

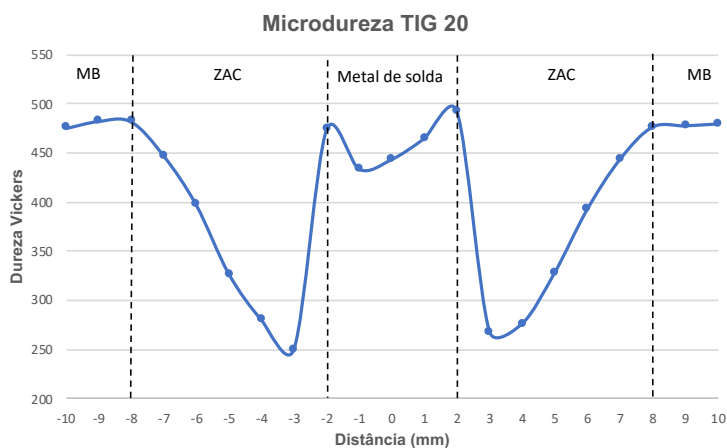


Figura 6.4 - Perfil de microdureza da amostra TIG 20

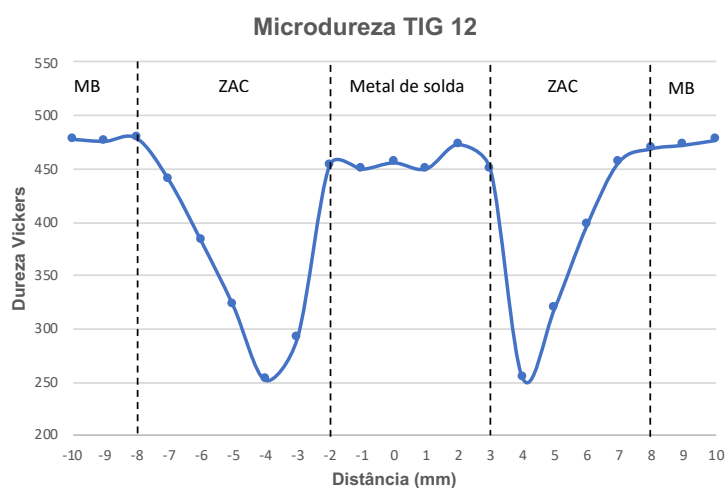


Figura 6.5 - Perfil de microdureza da amostra TIG 12

### 6.3 Ensaio de tração

Foi possível verificar que em todas as amostras de soldagem tanto MAG quanto TIG, os corpos de prova romperam na ZAC, região onde se verificou os menores valores de dureza. Podemos observar na figura 6.6 os corpos de prova ensaiados para cada uma das configurações de soldagem.

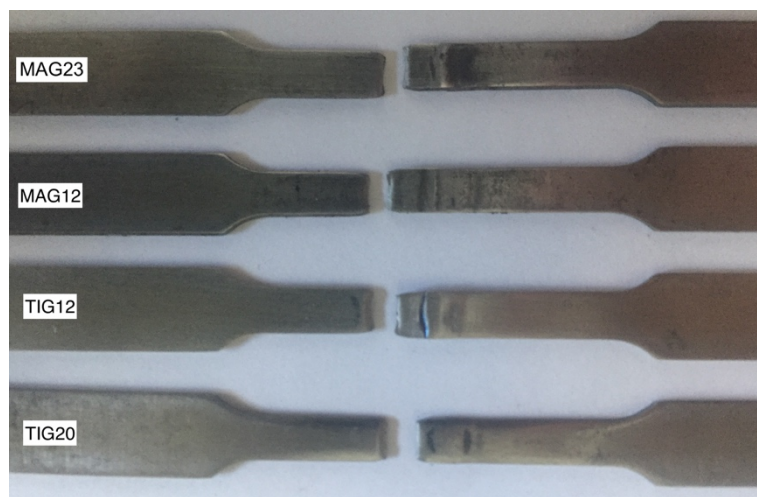


Figura 6.6 – Ruptura na ZAC dos corpos de prova das configurações MAG e TIG.

As tabelas 6.2, 6.3 e 6.4 mostram os valores médio encontrados para a tensão de ruptura, resistência à tração e alongamento do metal base, amostras MAG e amostras TIG, respectivamente. Os gráficos de tensão e deformação de todos os ensaios realizados podem ser encontrados no Apêndice I.

Tabela 6.2 - Valores médios da tensão de escoamento, resistência à tração e alongamento do metal base (Hardox 450)

Amostra	Tensão de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (Mpa)	Alongamento (%)
Metal base (HARDOX 450)	1254	1463	4,84%

Tabela 6.3 - Valores médios da tensão de escoamento, resistência à tração e alongamento das amostras soldadas por MAG

Amostra	Tensão de escoamento (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
MAG23	436	755	2,09%
MAG12	517	831	2,17%



Tabela 6.4 - Valores médios da tensão de escoamento, resistência à tração e alongamento das amostras soldadas por TIG

Amostra	Tensão de escoamento (Mpa)	Resistência à tração (MPa)	Alongamento (%)
TIG12	419	758	0,89%
TIG20	435	807	0,84%

O valor da tensão de escoamento encontrado no ensaio do metal base se assemelha com aquele que é estimado pelo fornecedor de aproximadamente 1250 MPa. Além disso, foi possível verificar que todas as propriedades mecânicas envolvidas no ensaio de tração das amostras soldadas tiveram o seu valor reduzido em comparação ao metal base. A tabela 6.5 mostra a diminuição em percentual dessas propriedades.

Tabela 6.5 – Diminuição em percentual das propriedades das amostras soldadas em relação ao metal base.

Amostra	Tensão de escoamento	Resistencia à tração	Alongamento
MAG23	65,2%	48,4%	56,8%
MAG12	58,8%	43,2%	55,2%
TIG12	66,6%	48,2%	81,6%
TIG20	65,3%	44,8%	82,6%

### 6.3.1 Análise da superfície de ruptura dos corpos de prova

Foi possível verificar em todas as amostras, através da análise da superfície de ruptura pelo MEV (microscópio eletrônico de varredura), ampliando a região em duas mil vezes que os corpos de prova tiveram fratura dúctil, inclusive no corpo de prova de somente metal base. Como podemos verificar nas imagens 6.7, 6.8 e 6.9, há presença de microcavidades resultante do micromecanismo de fratura alveolar característicos de fratura dúcteis, mesmo nas amostras soldadas que apresentaram menor alongamento do que o metal base.

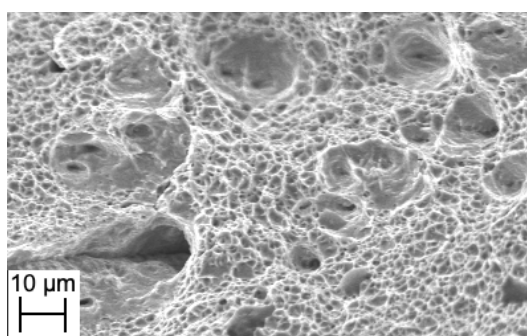


Figura 6.7 - Superfície de ruptura do corpo de prova somente de metal base (Hardox 450) e sem soldagem.

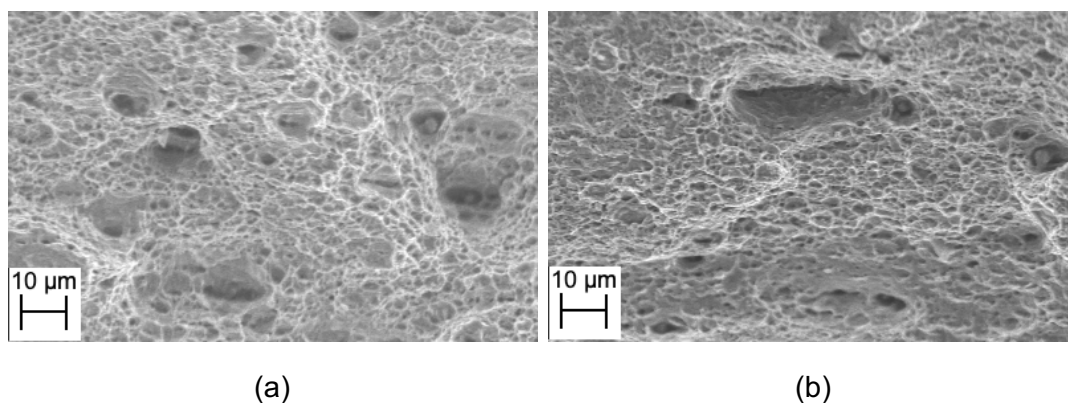


Figura 6.8 - Superfície de ruptura dos corpos de prova ampliado em 2000x. (a) MAG23 e (b) MAG12

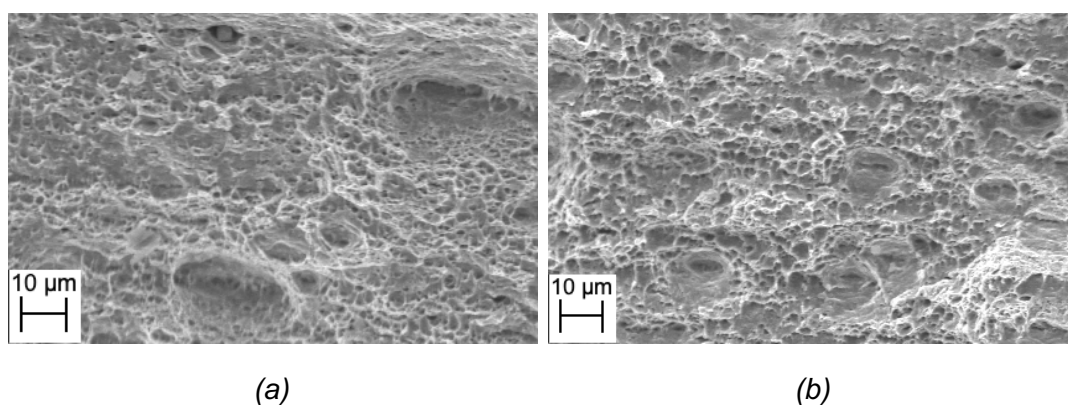


Figura 6.9 - Superfície de ruptura dos corpos de prova ampliado em 2000x. (a) TIG12 e (b) TIG20

## 7 CONCLUSÕES

- A região onde teve a maior redução de dureza nas amostras foi na zona afetada pelo calor tanto na soldagem MAG quanto na TIG.
- O perfil de microdureza nas amostras MAG se diferenciou pela distância entre os extremos da ZAC. Verificou-se que essa distância foi maior na amostra que teve a maior energia de soldagem no processo.
- O perfil de microdureza das amostras TIG foi similar independente da energia de soldagem envolvida.
- As amostras soldadas tiveram uma redução na tensão de ruptura relativamente iguais com uma diferença máxima de 8% entre eles.

- A resistência à tração das amostras soldadas teve uma redução de aproximadamente 50% em relação ao metal base
- As maiores reduções no alongamento foram nas amostras TIG. 81,6% na TIG12 e 82,6% na TIG20. Nas amostras MAG foram 56,8% e 55,2% pra MAG23 e MAG12 respectivamente.
- As regiões de ruptura nos ensaios de tração em todas as amostras, inclusive no metal base, caracterizou-se como fratura dúctil, principalmente, devido a presença de microcavidades na superfície de ruptura.

## 8 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M – 15a: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**, Philadelphia, EUA, 2015.

Basso, B.L. **Análise do desgaste em juntas soldadas de chapas finas de aço HARDOX. 2018.** 13 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

COSTA V.M. **Análise da tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB.** 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

Hackenhaar, W., **Avaliação da eficiência térmica e de fusão na soldagem em diferentes geometrias de juntas.** 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Machado, I. G.; **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processos”**, Imprensa Livre, 1ª edição, pp. 14-16, 1996.

Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q.; **“Soldagem: fundamentos e tecnologia”**, Editora UFMG, 3ª edição, 2011.

Nasiri, M. B. et al. **Investigation on the influence of various welding parameters on the arc thermal efficiency of the GTAW process by calorimetric method**, Journal of mechanical science and technology, v. 28 (8), p. 3255-3261, 2014.

Sartori, D. **Análise das distorções resultantes do processo de soldagem MAG em chapas finas de HARDOX 450.** 2017. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017

SSAB; **“Data sheet 168br Hardox® 450 2018-02-12”**, <http://www.ssab.com>. 2018.

Sun, Q., Di, H.S., Li, J.C., Wu, B.Q., Misra R.D.K., **A comparative study of the microstructure and properties of 800 MPa microalloyed C-Mn steel welded joints by laser and gas metal**, China, 2016.

Viegas, D.B., **Avaliação da resistência ao desgaste de um aço Hardox® 450 submetido a solda de revestimento duro, com arame tubular DIN 8555/MF-10-GF-60-GR utilizando o processo FCAW**, Editora CEFET-MG, Belo Horizonte, 2016

Xia, M., Biro, E., Tian, Z., Zhou, Y.N., **Effects of Heat Input and Martensite on HAZ Softening in Laser Welding of Dual Phase Steels**. ISIJ internacional, Vol.48, Canada,2008.

Xiang Welding Industrial Co Ltd, **AWS ER110S: Chemical composition**, [http://www.xiangind.com/aws\\_er110s-g.html](http://www.xiangind.com/aws_er110s-g.html). 2018

## APÊNDICE I

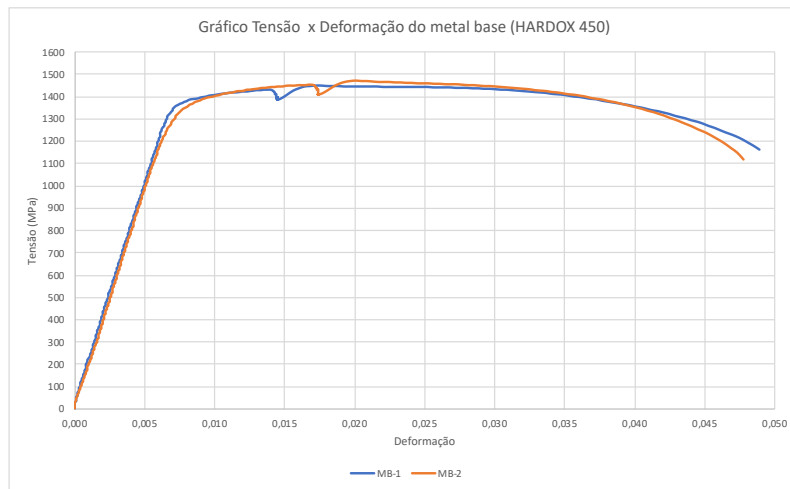


Figura A.1 – Diagrama de tensão e deformação do metal base (HARDOX450).

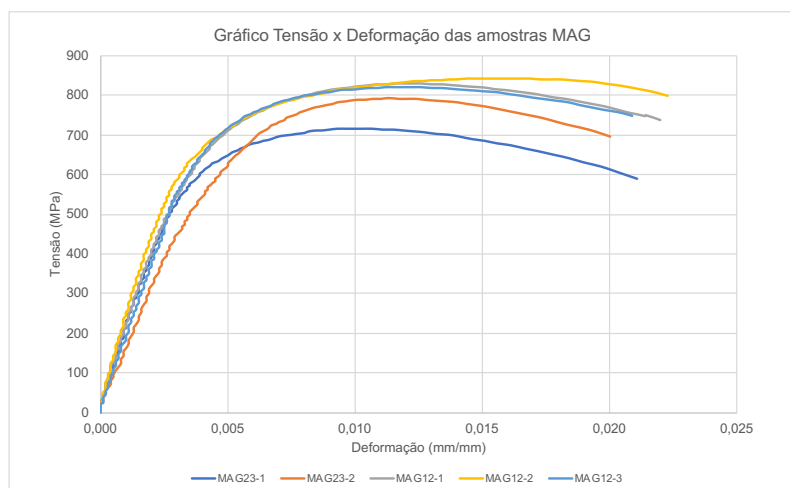


Figura A.2 - Diagrama de tensão e deformação das amostras MAG.

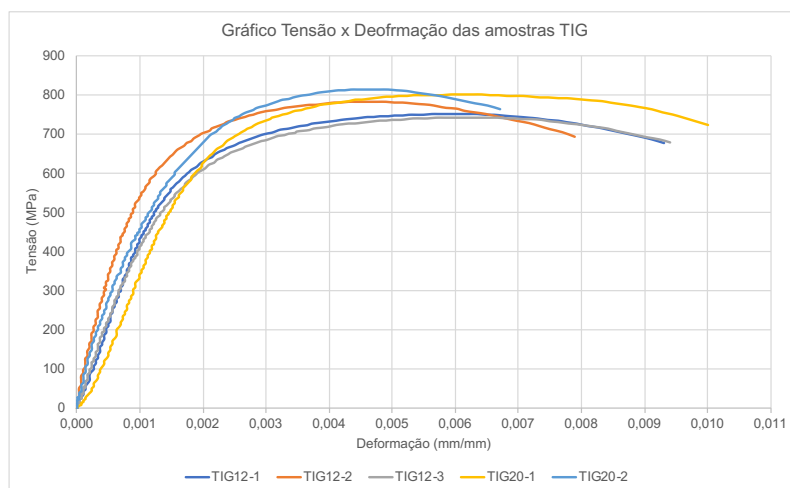


Figura A.3 - Diagrama de tensão e deformação das amostras TIG.