

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

ENSAIOS DE DUCTILIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO SAE 1008

por

Rubem Artur Milani

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 2016

ENSAIOS DE DUCTILIDADE EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO SAE 1008

por

Rubem Artur Milani

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. Dr. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr<sup>a</sup>. Cintia C. Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 18 de Novembro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, principalmente aos meus pais, Gilberto e Carmen, por todo apoio, incentivo e amor incondicional, devo a vocês o meu generoso agradecimento por tudo.

À professora Cintia Petry Mazzaferro, pela orientação e compartilhamento de seus conhecimentos, e principalmente pela disponibilidade de discutir e desenvolver o trabalho. O meu muito obrigado por me ajudar a concluir esta etapa.

Ao mestrando Everton Polinski pelo apoio e disponibilidade de tempo, pelo compartilhamento de experiências e conhecimentos que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Rafael Becker da Açocorte Beneficiadora de Metais LTDA pelo fornecimento do material de aço utilizado nos experimentos.

Ao amigo Rosalino Guedes da RZ Usinagem pelos ensinamentos e auxílio na preparação do material para o trabalho.

A todos os meus amigos, que de alguma forma se fizeram presentes durante o período em que desenvolvi minha graduação, e principalmente ao amigo Alexandre Baumgartner, que, além de grande amigo, auxiliou na produção das imagens para o trabalho. O meu muito obrigado a todos vocês pelo apoio, incentivo e ajuda nos momentos difíceis.

MILANI, R. A. **Ensaio de Ductilidade em Juntas Soldadas de Aço SAE 1008**. 2016. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

Em busca de componentes cada vez mais leves e seguros, a indústria automotiva tem utilizado como processo de fabricação de seus componentes estruturais o processo de estampagem de juntas soldadas. O trabalho desenvolvido avalia a ductilidade de juntas soldadas obtidas pelo processo de soldagem MAG em chapas de aço SAE 1008, analisando a metodologia empregada para os ensaios e considerando fatores de influência em seu comportamento. Os corpos de prova foram soldados com duas energias de soldagem diferentes, e submetidos a ensaios mecânicos de dobramento e ensaios de embutimento Erichsen. A análise do ensaio Erichsen foi subdividida em ensaios com e sem a utilização de lubrificante, a fim de considerar a sua influência nos resultados. Os resultados dos testes Erichsen indicaram que a energia de soldagem afeta a estampabilidade das chapas, e que o lubrificante se torna influência em amostras com maior energia de soldagem. Quando comparadas ao metal base, as chapas soldadas resultaram em valores menores para o índice Erichsen e para o valor máximo de carga aplicada. O ensaio de dobramento aprovou todas as juntas testadas, não expondo defeitos nas juntas obtidas, e não indicando diferença de comportamento entre as energias de soldagem testadas. Dentro de seu escopo, ambos os métodos foram avaliados como capazes para se avaliar a ductilidade de chapas de aço soldadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ductilidade, Dobramento, Ensaio Erichsen, MAG.

MILANI, R. M. **Ductility Testing on SAE 1008 Steel Welded Joints**. 2016. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## ABSTRACT

In search of increasingly lighter and safer components, the automotive industry has been using as manufacturing process of its structural components the process of stamping welded joints. The developed work evaluates the ductility of welded joints obtained by the MAG welding process in SAE 1008 steel sheets, analyzing the methodology used for the tests and considering influence factors in its behavior. The specimens were welded with two different welding energies, and subjected to mechanical bending tests and Erichsen mounting tests. The analysis of the Erichsen test was subdivided into tests with and without the use of lubricant, in order to consider its influence on the results. The Erichsen testing results indicated that the welding energy affects the stampability of the sheets, and that the lubricant becomes influence in samples with higher welding energy. When compared to the base metal, the welded sheets resulted in lower values for the Erichsen index and for the maximum value of applied load. The bending test approved all the joints tested, not exposing defects in the obtained joints, and indicating no difference in the behavior between the tested welding energies. Within its scope, both methods were assessed as capable of evaluating the ductility of welded steel sheets.

KEYWORDS: Ductility, Bending, Erichsen Testing, MAG.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO .....	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
3.1. Soldagem MIG/MAG.....	1
3.2. Zonas de uma Junta Soldada .....	2
3.3. Energia de Soldagem .....	3
3.4. Estampagem .....	3
3.5. Ensaio Erichsen.....	4
3.6. Ensaio de Dobramento .....	4
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	5
4.1. Preparação dos Corpos de Prova.....	5
4.2. Realização do Ensaio Erichsen .....	7
4.3. Realização do Ensaio de Dobramento.....	7
4.4. Caracterização das Soldas .....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	8
5.1. Avaliação dos Parâmetros de Soldagem .....	8
5.2. Avaliação dos Corpos de Prova.....	9
5.3. Avaliação do Ensaio Erichsen.....	10
5.4. Avaliação do Ensaio de Dobramento.....	13
5.5. Considerações Finais: Comparação dos Ensaios.....	14
6. CONCLUSÕES .....	14
7. BIBLIOGRAFIA .....	14
APÊNDICES .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de estampagem de chapas de aço está fortemente presente na indústria automotiva. Caracterizadas pela ductilidade e facilidade de conformação, as chapas formam grande parte da carroceria dos automóveis, e a sua produção acompanha o crescente avanço tecnológico da área.

Chapas metálicas que apresentam alta resistência são cada vez mais utilizadas e, por possibilitarem o uso de menores espessuras, representam uma economia no processo, porém a complexidade na produção de certas geometrias exige a obtenção de novos processos de fabricação. Dentre as tecnologias desenvolvidas, o uso de chapas soldadas de pequena espessura em portas e em componentes estruturais têm trazido benefícios, como a diminuição do peso dos veículos, e conseqüentemente uma redução na emissão de poluentes. O desempenho desse tipo de componente é avaliado através de ensaios mecânicos, como o ensaio Erichsen e de dobramento, que permitem comparar o comportamento da região soldada com o metal base.

O ensaio Erichsen consiste no estiramento de uma chapa por um punção hemisférico até o instante que ocorra a sua fratura, tendo seu resultado analisado pela profundidade em que o punção penetra na chapa. Yasuda et al., 1984, realizou estudo comparando os valores Erichsen obtidos com diferentes tipos de lubrificantes, usando aços SUS 304 soldados a laser, e concluiu que é possível obter materiais soldados com resultados semelhantes ao do metal base. Madeira et al., 2010, além de comparar o desempenho com dois tipos de lubrificantes (graxa líquida e polietileno), ainda avaliou diferentes condições do ensaio e a distribuição das deformações em juntas soldadas de aço inoxidável ferrítico. Nenhum dos trabalhos, porém, comparou os resultados sem o uso de lubrificante durante os testes.

Bastante difundido e eficaz para detecção de defeitos em juntas soldadas, o ensaio de dobramento é realizado flexionando-se o corpo de prova por um êmbolo em uma matriz. Por sua relativa simplicidade, é amplamente utilizado na indústria e em laboratórios.

Sendo assim, este trabalho será desenvolvido para comparar os resultados entre os dois métodos de avaliação citados, além de testar a influência da energia de soldagem no desempenho das juntas. Busca-se também fornecer mais informações sobre o resultado do ensaio Erichsen quando aplicado a juntas soldadas de chapas de pequena espessura, pois, segundo Madeira et al., 2010, a utilização deste método para a caracterização de juntas soldadas não está bem estabelecida, de modo que a interpretação dos resultados obtidos muitas vezes gera controvérsias.

## 2. OBJETIVO

Analisar a ductilidade de juntas soldadas de aço SAE 1008 obtidas pelo processo de soldagem MAG em ensaios de estampabilidade (Erichsen) e de dobramento, avaliando a influência da energia de soldagem e o uso de lubrificante durante os ensaios no comportamento das juntas.

## 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1. Soldagem MIG/MAG

MIG/MAG é um processo da soldagem que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um arame nu consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (comercialmente, Ar e He) ou ativo (usualmente CO<sub>2</sub>) ou misturas deles (no caso, incluindo como gás ativo o O<sub>2</sub> e o N<sub>2</sub>) [Scotti et al., 2008]. O termo MIG significa *Metal Inert*

Gas (proteção por um gás, ou mistura, inerte) e MAG, *Metal Active Gas* (mistura de um ou mais gases ativos com gases inertes ou o CO<sub>2</sub> puro). Ainda segundo Scotti et al.,2008, o gás de proteção utilizado tem como função evitar contaminação do arame, das gotas de metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera. Além disso, este gás funciona como meio ionizante, proporcionando estabilidade ao arco, controlando a transferência metálica, consumo do eletrodo e fusão do metal base. A sigla adotada pela *American Welding Society* para este processo é GMAW, que significa *Gas Metal Arc Welding*.

O equipamento necessário para soldagem MIG/MAG envolve uma fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção com regulador de pressão e fluxômetro. A Figura 3.1 esquematiza o princípio de funcionamento e os equipamentos do processo.

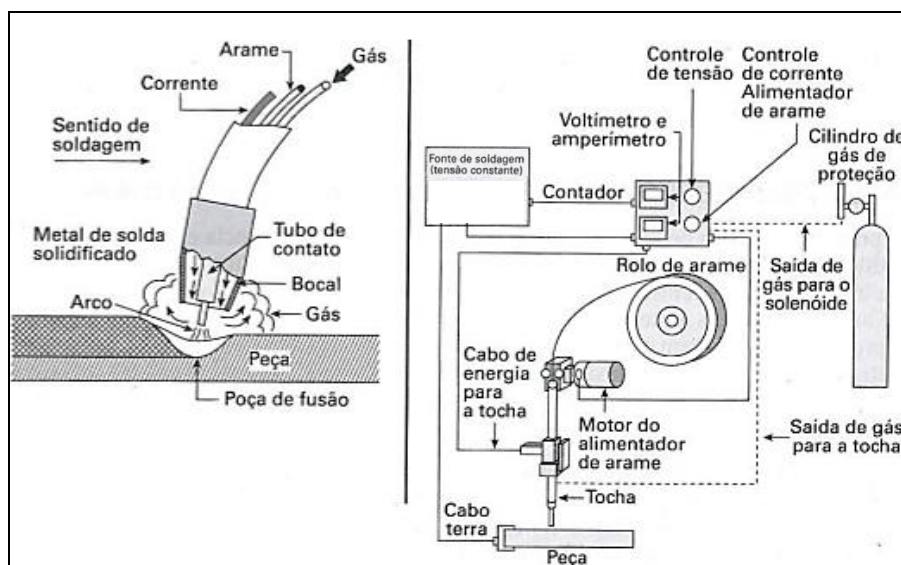


Figura 3.1 - Equipamentos utilizados no processo MIG/MAG e seu princípio de funcionamento [adaptada de Romano, 2002].

Entre as principais razões de se creditar ao processo MIG/MAG uma alta capacidade de produção, destacam-se: uma relativa elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade da variação de modos com que a transferência metálica se dá, o que permite a soldagem em diversas posições, e a relativa portabilidade da tocha, auxiliando na versatilidade. Além do fato de a alimentação ser contínua, possibilitando aumentar o ciclo de trabalho, este processo gera poucos fumos e pouca escória quando comparado aos processos que usam a escória como meio de proteção [Scotti et al.,2008].

As restrições mais significativas seriam a alta emissão de calor e luz durante o processo, a relativa dificuldade de manuseio do equipamento como um todo (fonte, cabeçote e cilindros) e a necessidade de se conhecer como se regulam os parâmetros para trabalhar com estabilidade [Scotti et al.,2008].

### 3.2. Zonas de uma Junta Soldada

De acordo com Machado, 1996, na maioria dos processos de soldagem e especialmente naqueles por fusão, as juntas soldadas apresentam várias zonas distintas, e cada uma possui uma série de particularidades. Estas zonas estão esquematizadas na Figura 3.2 e são as seguintes:

- Zona do metal de solda: formada pela mistura homogênea (sob o ponto de vista macroscópico) do metal base fundido com, em geral, o metal de adição e normalmente empregada no estado bruto de fusão.



- Zona não misturada fundida: de espessura muito fina e composta unicamente pelo metal base fundido, o qual solidifica antes de ocorrer qualquer mistura com o metal de adição.
- Interface da solda: esta superfície indica a fronteira entre o metal fundido na solda e o metal base, podendo ser de difícil identificação em metais puros.
- Zona parcialmente fundida: produzida pela liquação de inclusões, impurezas ou segregações nos contornos dos grãos com baixo ponto de fusão. Ocorre no metal base e imediatamente após a Interface da solda.
- Zona afetada pelo calor (ZAC): como consequência da máxima temperatura alcançada, do tempo de permanência do metal base na mesma, e das taxas de aquecimento e resfriamento, há toda uma zona onde não ocorre nenhum tipo de fusão, mas são produzidas alterações alotrópicas no estado sólido relevantes, incluindo crescimento de grão e transformações de fase.

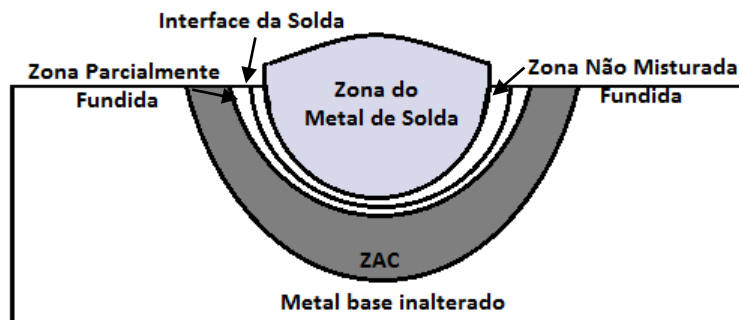


Figura 3.2 - Ilustração das zonas de uma junta soldada [adaptada de Machado, 1996].

### 3.3. Energia de Soldagem

O termo Energia de Soldagem ( $E_n$ ) refere-se à relação entre a potência elétrica gasta para manter um arco e a velocidade de soldagem do processo. Machado, 1996, expõe que para cada processo e condição de soldagem há um dado rendimento térmico ( $r$ ), resultante da razão entre as quantidades de calor realmente transferida para peça e o total gerado pelo arco, ou chama. A Energia de Soldagem de um determinado processo pode ser calculada conforme a Equação (1).

$$E_n = \frac{UI}{V_s} r \quad (1)$$

onde a tensão do arco ( $U$ ) é expressa em [V]; a corrente de soldagem ( $I$ ) em [A] e a velocidade de soldagem ( $V_s$ ) em [mm/s].

### 3.4. Estampagem

Segundo a definição de Blass, 1985, o processo de estampagem compreende todas as operações executadas em prensas sobre chapas, incluindo operações de corte e de conformação. O método de estampagem em si basicamente consiste em forçar um punção sobre as chapas e contra uma matriz através de uma prensa, dando a elas o formato desejado. Schaeffer, 2004, diz que a grande vantagem da fabricação de componentes a partir de chapas metálicas é o reduzido custo originado pela minimização do uso da matéria-prima, aliado a baixa necessidade de usinagem.

Segundo a classificação da norma DIN 8580, os processos de estampagem pertencem a dois grupos principais [Schaeffer, 1999]:

- Grupo principal dos processos de conformação: processos que alteram a forma geométrica da peça sem separar ou adicionar material, como, por exemplo, a estampagem profunda (embutimento profundo) e o dobramento.

- Grupo principal dos processos de separação: processos de corte, como, por exemplo, o cisalhamento e o corte fino.

### 3.5. Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen é utilizado como um teste para conferir as propriedades mecânicas de chapas metálicas. Regido pela norma E643 de 2015 da ASTM International, caracteriza-se pelo estiramento de uma chapa por um punção hemisférico até o instante que ocorra a sua fratura. Os corpos de prova utilizados podem ser circulares ou quadrados, de 90 a 100 mm de largura, e com espessura variando de 0,2 a 2 mm.

O resultado do ensaio, o índice Erichsen (IE), é expresso pela profundidade em milímetros que o punção penetra na chapa. A velocidade de penetração deve ser entre 5 mm/min e 20 mm/min, evitando-se choques e vibrações durante o procedimento. A Figura 3.3 apresenta um modelo de arranjo para a realização do ensaio, demonstrando o posicionamento correto do punção e do corpo de prova para o estudo.

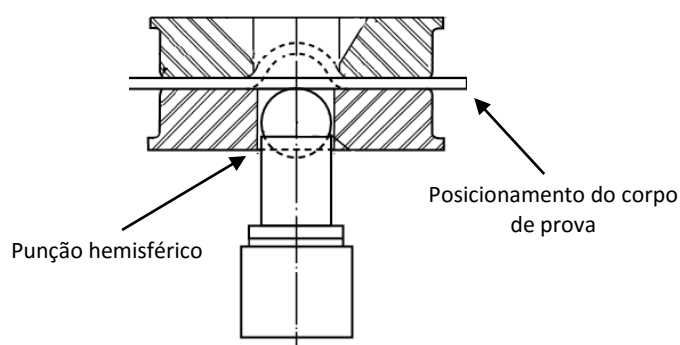


Figura 3.3 – Representação de matriz e punção utilizados no ensaio Erichsen [adaptada de ASTM International E643, 2015].

### 3.6. Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento para juntas soldadas consiste em um método de flexão orientada para avaliação da ductilidade de soldas em materiais ferrosos e não ferrosos. Regido pela norma E190 de 2014 da ASTM International, permite detectar possíveis defeitos, como falta de penetração, quando estes não são visivelmente observados.

Os corpos de prova são posicionados de forma que o êmbolo fique no meio da junta, e estes são então dobrados em uma matriz com formato de U, cujas dimensões dependem da espessura do material avaliado. A Figura 3.4 indica a disposição destes componentes através de um modelo padrão para os testes. Os resultados do ensaio não estão associados a valores, mas sim a uma análise qualitativa, permitindo aprovar ou reprovar o corpo de prova conforme o tipo e tamanho de falha encontrado.

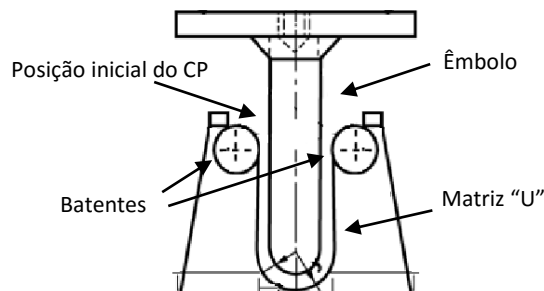


Figura 3.4 - Representação de equipamento utilizado para ensaios de dobramento [adaptada de ASTM International E190, 2014].

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Preparação dos Corpos de Prova

As chapas utilizadas para a confecção dos corpos de prova são de aço SAE 1008 com 2 mm de espessura, sua composição química foi retirada do Catálogo de Aços Planos e suas Aplicações da empresa Gerdau S.A e encontra-se na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Composição química aproximada do aço SAE 1008 (em % de massa).  
[Adaptada de Comercial Gerdau, 2003].

Especificação	C	Mn	Si	P	S
SAE 1008	0,10	0,50	0,35	0,04	0,05

As soldagens das chapas foram realizadas no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando o robô Yaskawa Motoman, modelo MA1400 equipado com tocha para soldagem em MIG/MAG. A fonte de potência com curva característica de tensão constante utilizada foi a fonte Fronius Trans Puls Synergic 4000. Ambos equipamentos estão representados na Figura 4.1. O gás de proteção utilizado foi uma mistura de Ar + 10% CO<sub>2</sub> com uma vazão de 13 L/min, e um consumível de arame maciço AWS ER70S-6, com 0,8mm de diâmetro, foi empregado.

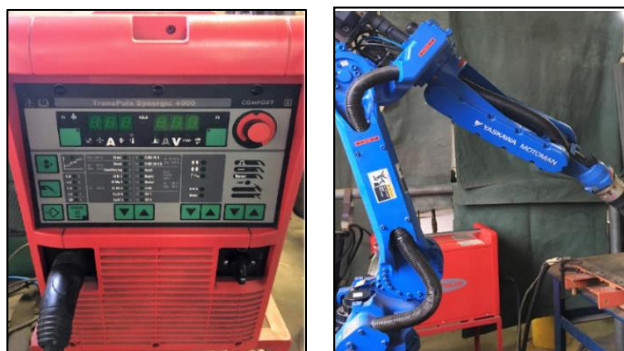


Figura 4.1 - Fonte de alimentação Fronius TPS4000 e Robô Motoman MA1400 utilizados no procedimento de soldagem.

A fim de garantir fusão e penetração completa nos corpos de prova para os ensaios, foram realizados testes de parâmetros de soldagem em chapas com dimensões de 45x80 mm. As chapas foram restringidas (Figura 4.2) com a intenção de evitar sua deformação devido à alta emissão de calor do processo, e uma distância de 15 mm entre o bico de contato e a chapa foi utilizada como valor inicial.



Figura 4.2 - Ilustração de restrição em juntas para o processo de soldagem.

Nesta etapa, os principais parâmetros avaliados foram tensão e corrente de soldagem, velocidade de alimentação do arame e a velocidade de soldagem. Os valores para utilização na confecção de corpos de prova para os ensaios posteriores foram escolhidos analisando-se a aparência visual do cordão, a estabilidade do arco elétrico durante o processo e as discontinuidades superficiais da junta. Dessa maneira, foram determinadas as condições para se produzir corpos de prova com duas diferentes energias de soldagem. Por conveniência, estas passarão a ser chamadas por alta e baixa energia de soldagem. Os parâmetros estabelecidos e a energia de soldagem resultante encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem (valores médios) utilizados para confecção de corpos de prova, e energia de soldagem resultante: (a) baixa energia de soldagem; (b) alta energia de soldagem.

ID	Tensão U (V)	Velocidade de alimentação W (m/min)	Corrente I (A)	Velocidade de soldagem Vs (mm/s)	Rendimento térmico r	Energia de soldagem E (kJ/mm)
(a)	21,0	7,5	122,8	11,0	0,8	0,19
(b)	23,5	7,5	123,1	10,0	0,8	0,23

Com os parâmetros de soldagem definidos, os corpos de prova para o ensaio Erichsen foram então confeccionados posicionando-se lado a lado duas chapas de aço com 45x180 mm. Além disso, acima e abaixo das duas chapas, foram soldadas chapas auxiliares de 45x80 mm através de pontos para que a abertura e fechamento do arco elétrico da tocha MAG não ocorresse nos corpos de prova a serem testados, garantindo que a deposição do metal de solda nas juntas a serem testadas fosse estável. A Figura 4.3 ilustra a disposição inicial das chapas na confecção dos corpos de prova, indicando também a localização das soldas realizadas no processo.

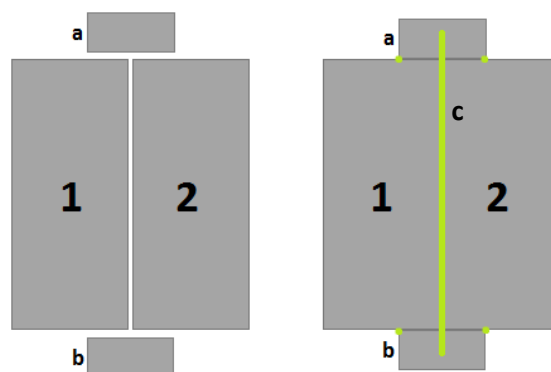


Figura 4.3 - Disposição das chapas para confecção dos corpos de prova: (1) (2) chapas 45x180 mm; (a) (b) chapas 45x80 mm; (c) cordão de solda.

A confecção dos corpos de prova para os ensaios de dobramento foi realizada de maneira idêntica à do ensaio Erichsen, com exceção de que foram utilizadas chapas com dimensões de 80x180 mm. Com todas as soldas realizadas, os corpos de prova tiveram então seu reforço removido com o auxílio de uma lixadeira, e em seguida cortados em uma guilhotina, respeitando as dimensões requisitadas por cada norma de ensaio e removendo as chapas auxiliares. No total, foram confeccionados 20 corpos de prova com 90x90mm para o ensaio Erichsen e 6 corpos de prova para o ensaio de dobramento.

#### 4.2. Realização do Ensaio Erichsen

O ensaio Erichsen foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando o equipamento universal de ensaios Emic DL60000 (Figura 4.4). Os corpos de prova foram posicionados de maneira que o punção estivesse centralizado com o cordão de solda e faceando a sua raiz. Na primeira sessão foram realizados os testes sem o uso de lubrificante, alternando-se um corpo de prova com alta energia de soldagem e outro com baixa energia de soldagem. A velocidade de avanço do punção nos testes foi de 5 mm/min, e com o uso de um sistema de aquisição de dados foi possível realizar a aquisição instantânea da força e do deslocamento do mesmo durante o ensaio. Os ensaios eram interrompidos quando o sistema detectava que a força aplicada sofria uma queda de 20% em relação ao seu valor máximo atingido.

Posteriormente, foram realizados os ensaios com lubrificante, onde os corpos de prova foram previamente lubrificadas utilizando uma graxa líquida Wurth HHS 2000. Os procedimentos foram idênticos a primeira sessão. No total dos ensaios, foram utilizados 12 corpos de prova, sendo 3 para cada condição testada. Por final, foram realizados os testes Erichsen com corpos de prova do metal base, com e sem lubrificante, também com o objetivo de comparação de desempenho.



Figura 4.4 – Equipamento Emic DL60000 utilizado para o ensaio Erichsen.

#### 4.3. Realização do Ensaio de Dobramento

O ensaio de dobramento das chapas foi realizado no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando um equipamento próprio para este tipo de teste (Figura 4.5). A distância entre os batentes foi ajustada conforme a exigência da norma para esta espessura de chapa, 15,2 mm, e um êmbolo com raio de 4 mm foi utilizado. Os corpos de prova foram posicionados de forma que o êmbolo flexionasse o cordão de solda expondo a sua face, centralizado na chapa e faceando o seu comprimento inteiro. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada condição. A força foi aplicada através de uma alavanca manual, até que as chapas atingissem o formato de U.

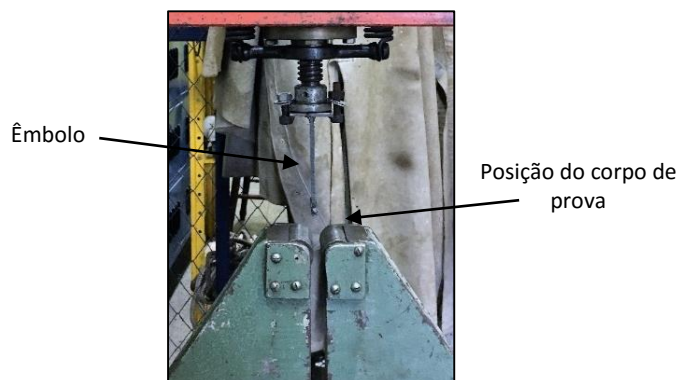


Figura 4.5 – Equipamento utilizado para o ensaio de dobramento.

#### 4.4. Caracterização das Soldas

Após a confecção dos corpos de prova, foram retiradas amostras das juntas de baixa e alta energia de soldagem para o exame macrográfico da seção transversal do cordão de solda. Essas amostras foram colhidas antes da retirada do reforço da solda, e embutidas em resina para a caracterização.

As amostras foram lixadas com lixas de granulometria número 80, 220, 320, 400, 600 e 1200, e posteriormente, para um acabamento superficial isento de marcas, foram polidas com um abrasivo em alumina. Com a sua superfície limpa e polida, foi realizado o ataque químico utilizando Nital a 10% (mistura de álcool etílico com ácido nítrico concentrado) a fim de evidenciar a estrutura do material em estudo. A macrografia das amostras foi então realizada com auxílio de uma lupa Leica EZ 4HD, e as imagens obtidas foram analisadas utilizando o software ImageJ.

Por fim, as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza, a fim de avaliar a dureza nas diferentes regiões da junta soldada. O ensaio foi realizado através do microdurômetro Insize utilizando uma carga de 300 g, com as indentações aplicadas a 1 mm da superfície da peça e espaçadas em uma linha com 0,5 mm de distância entre si.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1. Avaliação dos Parâmetros de Soldagem

Em razão da grande influência que o cordão de solda exerce no desempenho de uma peça estampada, se faz necessário avaliar os parâmetros de soldagem adotados e a sua influência nas características das peças obtidas. Para tal fim, o processo de confecção dos corpos de prova foi acompanhado com o auxílio de um sistema de aquisição de dados de soldagem, que permitiu a coleta e monitoramento das informações em tempo real. A Figura 5.1 ilustra a leitura instantânea dos valores de corrente e tensão durante a confecção de dois corpos de prova diferentes.

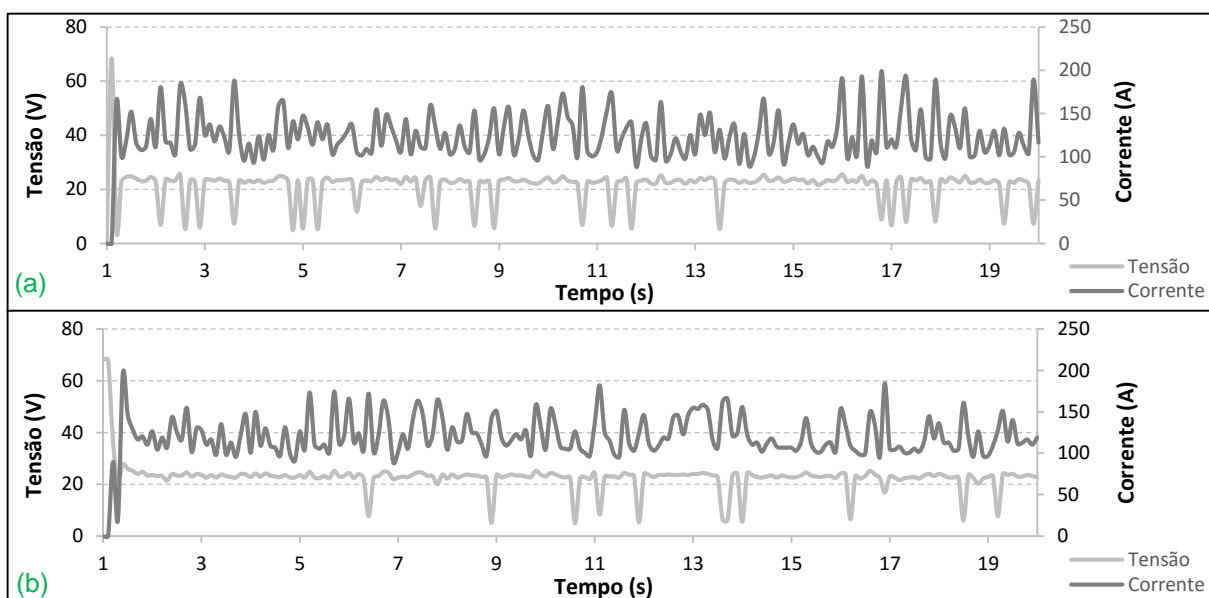


Figura 5.1 – Aquisição de dados instantâneos de soldagem durante confecção dos corpos de prova: (a) baixa energia de soldagem; (b) alta energia de soldagem.

Devido a sua pequena espessura, as chapas se mostraram altamente sensíveis a pequenas alterações nos parâmetros, limitando as faixas de valores onde era possível obter deposição suficiente, com penetração completa e sem causar furos nas peças.

O modo de transferência metálica do processo foi do tipo curto-circuito, sendo caracterizado pela constante extinção e reabertura do arco elétrico. É válido também ressaltar que para essa espessura empregada, o acabamento do corte das chapas a serem unidas foi de grande influência para a estabilidade da solda, devendo-se evitar, principalmente nas arestas, entalhes e espaços entre as superfícies.

## 5.2. Avaliação dos Corpos de Prova

As características geométricas decorrentes do processo e a presença de defeitos de soldagem foram avaliadas através da análise macrográfica na seção transversal da área do cordão de solda. A Figura 5.2 ilustra a macrografia de juntas obtidas com baixa e alta energia de soldagem. Pode-se notar que os cordões de solda obtidos não apresentam trincas e nem descontinuidades.

Também é possível identificar na imagem da Figura 5.2 as diferentes zonas da junta soldada. Pode-se visualizar a ZAC e a sua extensão no metal base, indicando que houve distribuição de calor uniforme ao longo do processo de soldagem. A diluição, parcela de metal base na composição da zona fundida, progrediu com o aumento na energia de soldagem. A amostra de baixa energia de soldagem apresentou diluição de 47%, enquanto que a amostra de alta energia de soldagem teve 57% (ver Apêndices I e II).

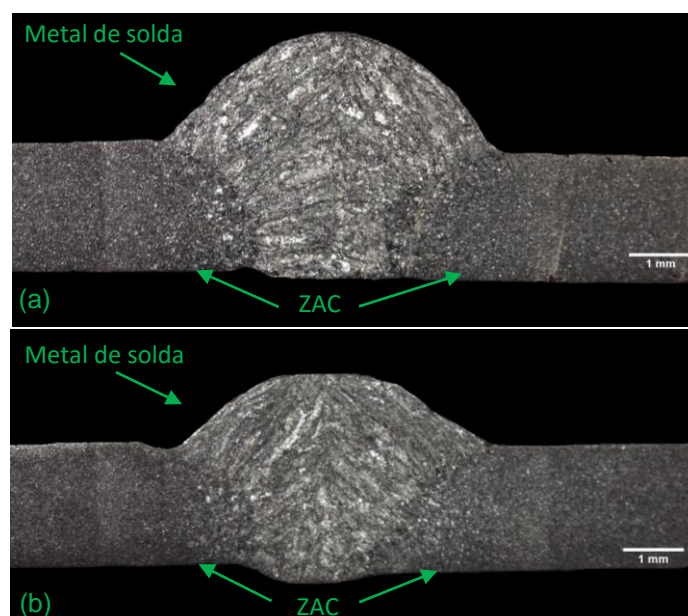


Figura 5.2 – Macrografias indicando as zonas do cordão de solda: (a) baixa energia de soldagem; (b) alta energia de soldagem.

O ensaio de microdureza foi realizado para se avaliar as variações de propriedades mecânicas da junta em relação ao metal base. As indentações foram realizadas partindo-se do metal base e atravessando a zona onde se encontra o metal de solda. A Figura 5.3 ilustra a distribuição dos pontos medidos ao longo da seção transversal de amostras obtidas com cada energia de soldagem empregada.

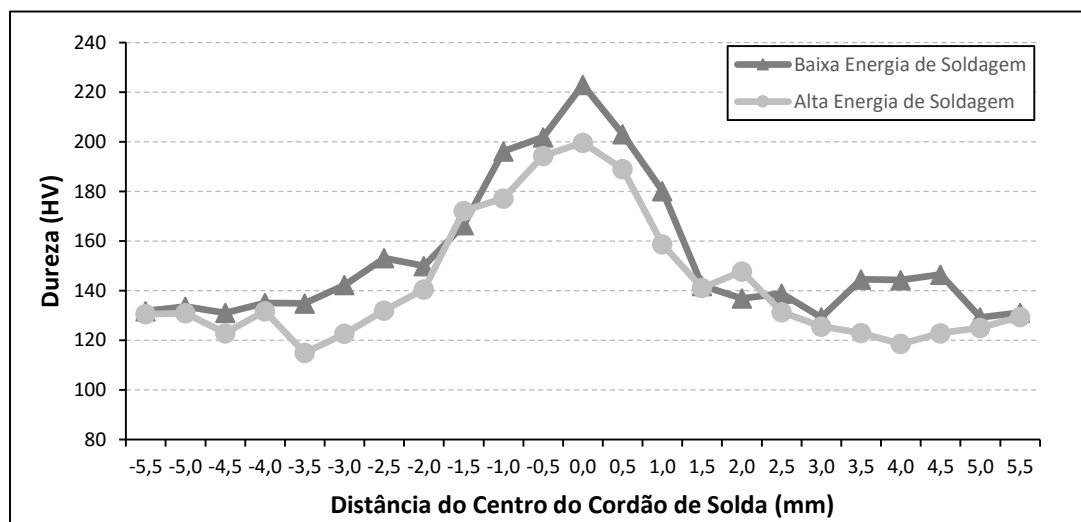


Figura 5.3 – Gráfico de distribuição da dureza ao longo da seção transversal das amostras de baixa energia de soldagem e alta energia de soldagem.

Os valores médios de dureza para cada região das juntas podem ser observados na Tabela 5.1. Percebe-se pela Figura 5.3 e pela Tabela 5.1 que a zona do metal de solda e a ZAC possuem valores de dureza maiores quando comparados ao metal base. Essa característica é causada pelas mudanças microestruturais que ocorreram nas chapas devido aos ciclos térmicos impostos pelo processo de soldagem.

Tabela 5.1 – Distribuição média da dureza em Vickers nas regiões das juntas soldadas: (a) baixa energia de soldagem; (b) alta energia de soldagem.

ID	Metal base	ZAC	Metal de solda
(a)	130,0	144,9	200,9
(b)		136,2	186,5

A distribuição dos valores de dureza ao longo da seção demonstra que há uma diminuição nos valores à medida que se aumenta a energia de soldagem. Esse comportamento é esperado devido à diminuição na velocidade de soldagem da junta soldada, o que diminui a taxa de resfriamento e leva à formação de microestruturas de menor dureza.

### 5.3. Avaliação do Ensaio Erichsen

A avaliação da ductilidade das chapas soldadas sob o ensaio de embutimento Erichsen foi realizada analisando-se a altura final do copo formado, a carga máxima aplicada e o modo de fratura de cada condição. A Figura 5.4 ilustra um corpo de prova do metal base após o ensaio Erichsen.



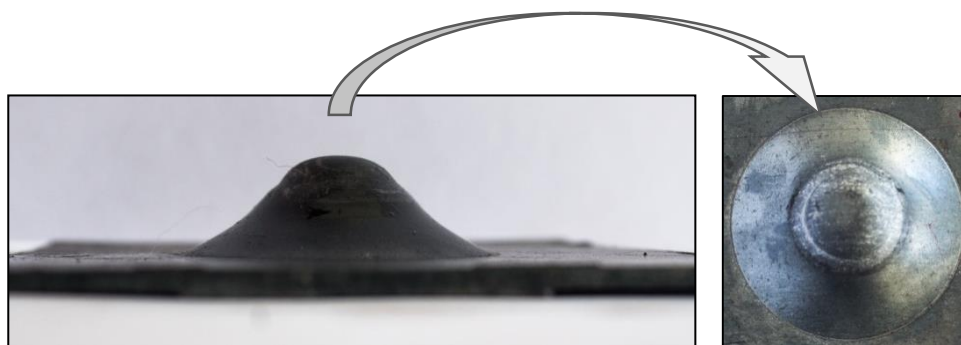


Figura 5.4 - Vista principal e vista superior de chapa de aço SAE 1008 submetida a ensaio Erichsen.

Os resultados de carga e de deslocamento do punção (Índice Erichsen) para o metal base foram obtidos através de dois ensaios para cada condição, e são mostrados na Figura 5.5. Constata-se que não houve uma diferença considerável no deslocamento do punção entre as condições de ensaio com e sem o uso de lubrificante. Houve, entretanto, valores de carga superiores nos ensaios com a utilização de lubrificante. Os resultados de cada corpo de prova do metal base e suas condições finais encontram-se nos Apêndices IV e V.

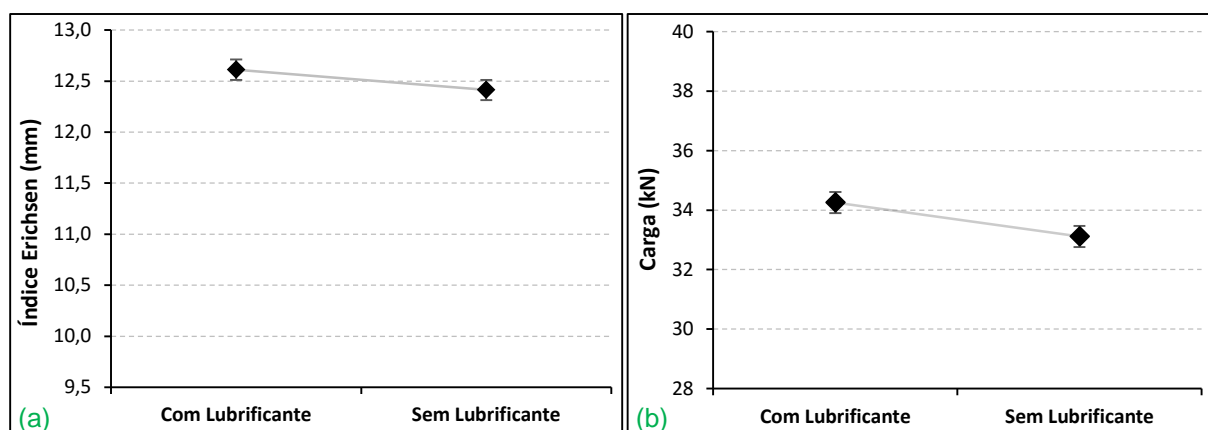


Figura 5.5 – Resultados do ensaio Erichsen para o aço SAE 1008 (metal base): (a) Índice Erichsen; (b) carga.

A análise dos corpos de prova soldados indicou diferenças mais significativas quando comparadas ao comportamento do metal base, além de evidenciar mais a influência do lubrificante em certas condições de soldagem. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada condição. A Figura 5.6 apresenta os resultados do ensaio das juntas soldadas, comparando o desempenho entre as duas energias de soldagem utilizadas, além de ilustrar os resultados da aplicação do lubrificante. Após a soldagem, os valores de deslocamento sempre foram menores quando comparados ao do metal base.

Entre os resultados das juntas com menor energia de soldagem, não foi verificada diferença nos valores de carga, e nem de deslocamento, quando comparados o uso ou não de lubrificante. Percebe-se, porém, que houve uma maior dispersão dos valores ao se utilizar o lubrificante. Já nos ensaios com alta energia de soldagem houveram sim diferenças no desempenho com o uso do lubrificante. Tanto o valor do deslocamento do punção quanto o valor da carga máxima aplicada aumentaram em aproximadamente 9% ao se utilizar o lubrificante, indicando que ele pode influenciar nas tensões e na energia requerida para o processo de deformação.

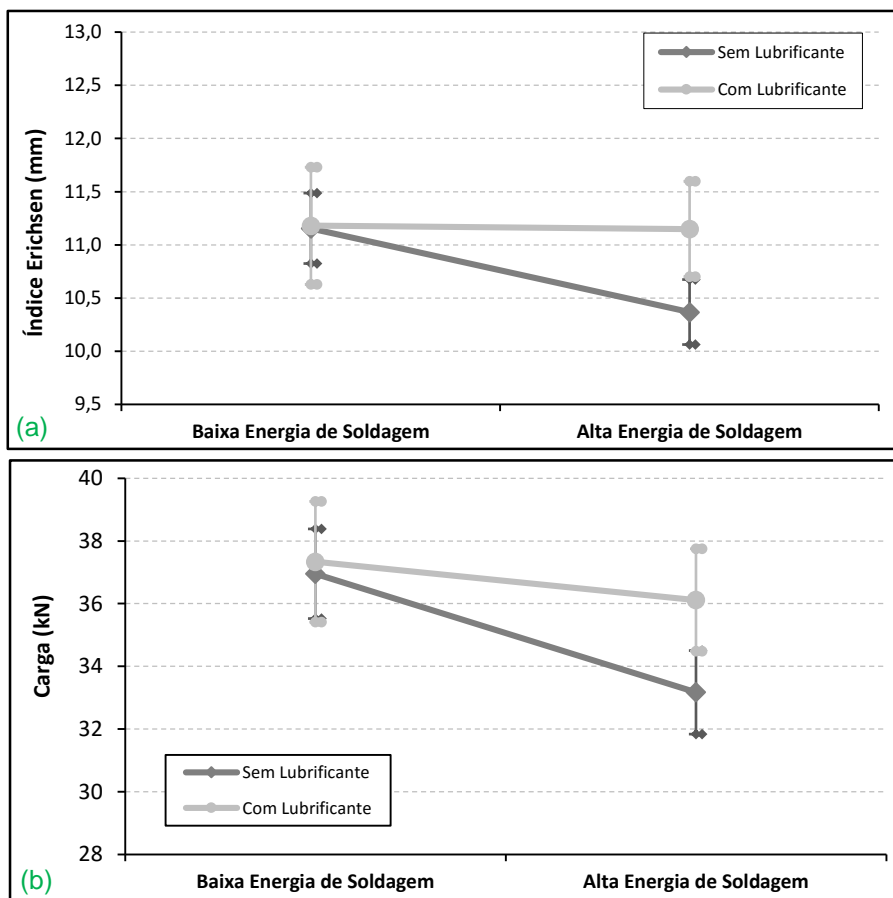


Figura 5.6 – Resultados Erichsen para as juntas soldadas: (a) Índice Erichsen; (b) carga.

Comparando-se a influência da energia de soldagem nos ensaios, os resultados foram mais favoráveis aos testes com menor energia de soldagem, tanto para o deslocamento do punção quanto para a carga. Estes resultados também foram encontrados em estudos anteriores realizados por Bayraktar et al., 2006, que avaliou a estampabilidade de chapas soldadas com processo a Laser e GTAW, e Madeira et al., 2010. De acordo com Madeira et al., 2010, como para a alta energia de soldagem a largura do cordão de solda é maior, este terá uma maior contribuição para o resultado final do ensaio. Os menores valores de ductilidade no ensaio devem-se então à maior participação do metal de solda, que tende a ter o seu alongamento inferior ao metal base, pois possui maior dureza. Os autores citam ainda que um maior tamanho de grão resultante do ciclo térmico pode ser um fator adicional na fragilização do material, contribuindo para a diminuição do deslocamento do punção.

A Figura 5.7 ilustra a localização e a característica da fratura dos corpos de prova soldados mais críticos de cada condição ensaiada. Em todos os casos a ruptura das juntas ocorreu transversalmente à solda, com as falhas aparentes localizadas perto do topo do anel circunferencial formado. Os resultados e o modo de fratura de todos os corpos de prova soldados estão disponíveis nos Apêndices VI, VII, VIII e IX.

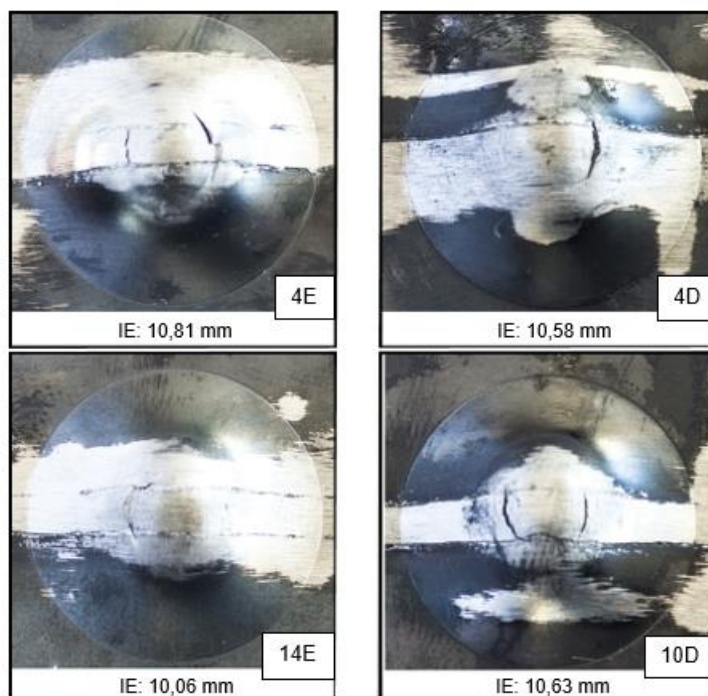


Figura 5.7 - Ruptura dos corpos de prova soldados e índice Erichsen (IE) para cada condição: (4E) baixa energia de soldagem sem lubrificante; (4D) baixa energia de soldagem com lubrificante; (14E) alta energia de soldagem sem lubrificante; (10D) alta energia de soldagem com lubrificante.

#### 5.4. Avaliação do Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento realizados nas duas condições de soldagem apresentaram bom desempenho, com todas as soldas aprovadas. A Figura 5.8 apresenta os corpos de prova em suas condições pós ensaio, mostrando em detalhe o resultado no cordão de solda de cada condição testada.

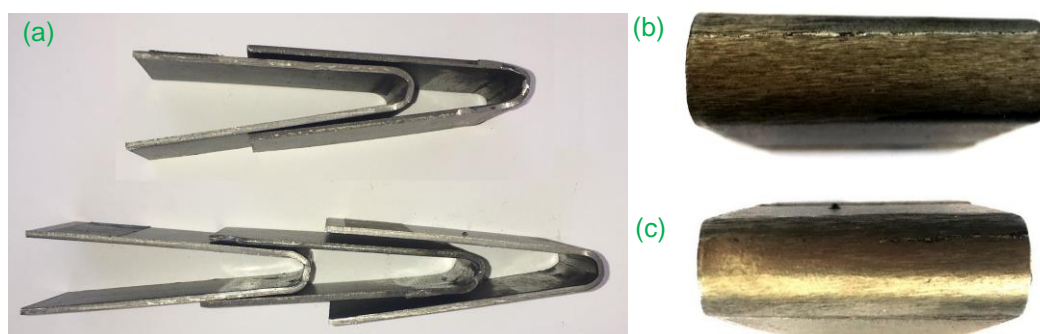


Figura 5.8 – Ensaio de dobramento das chapas soldadas: (a) posição final de dobramento das chapas; (b) corpo de prova de baixa energia de soldagem; (c) corpo de prova de alta energia de soldagem.

Todos os corpos de prova foram dobrados até o ângulo final sem ruptura, com exceção de um ensaio que precisou ser interrompido em virtude do desalinhamento do êmbolo com o cordão de solda durante a aplicação de carga (ver Apêndice III). Em nenhum dos corpos de

prova ensaiados foi constatado aparecimento de trincas na região da solda, e nenhum defeito foi percebido no metal base que possa ter comprometido o seu desempenho. Houve, porém, dificuldade na repetitividade das condições deste ensaio, principalmente para se garantir que os testes fossem realizados com deformação centralizada na zona do metal de solda

#### 5.5. Considerações Finais: Comparação dos Ensaios

Apesar de submeterem as chapas a modos de estiramento diferentes, ambos ensaios foram capazes de avaliar o comportamento das juntas soldadas de maneira satisfatória. Tanto o ensaio Erichsen como o ensaio de dobramento foram testes de fácil execução e avaliação. O ensaio Erichsen se mostrou mais abrangente em termos de resultados, permitindo avaliar e comparar as juntas de forma quantitativa e com maior detalhamento. O ensaio de dobramento, além de analisar a ductilidade dos corpos de prova, e ainda que menos sensível a variações do processo de soldagem, promoveu resultados qualitativos, de maneira a se avaliar possíveis defeitos que comprometessem a junta soldada.

### 6. CONCLUSÕES

A pequena espessura das chapas mostrou-se um fator limitador na definição dos parâmetros de soldagem MAG, porém foi possível obter-se corpos de prova com as características desejáveis para os ensaios, isentos de defeitos e com penetração completa do metal de solda. A partir da análise macrográfica, pode-se concluir que o processo robotizado de soldagem utilizado foi apropriado para o número de peças a serem produzidas, devido a sua repetitividade e grau de controle do processo. O perfil de durezas obtido foi coerente com o comportamento esperado para cada energia de soldagem e a macrografia permitiu visualização das diferentes regiões da solda.

Os resultados do ensaio Erichsen mostraram que a energia de soldagem afeta a estampabilidade das chapas de aço, e que, ainda, o uso de lubrificante se torna influência nos ensaios em amostras soldadas com maior energia. A variação dos resultados demonstra a importância do controle das condições de ensaio, sendo de grande influência para caracterizar o comportamento das juntas. Após a soldagem, independente da energia de soldagem aplicada, sempre houve uma diminuição do valor do índice Erichsen comparado ao do metal base. Os resultados foram mais favoráveis aos testes com menor energia de soldagem, tanto para o índice Erichsen quanto para a carga.

O ensaio de dobramento, para efeitos de qualificação, mostrou-se eficaz. A análise aprovou todas as juntas e não revelou diferenças nas soldas de características diferentes. A dificuldade na manutenção das condições de ensaio exigiu maior atenção em sua repetitividade, porém não comprometeu os resultados finais.

No que se refere à análise da ductilidade das juntas soldadas, destaca-se a capacidade de ambos os métodos de se avaliar o comportamento das juntas. Os resultados obtidos em cada ensaio indicam a possibilidade de estampagem do material fabricado, seja para critérios quantitativos no ensaio Erichsen, como para a análise qualitativa do ensaio de dobramento.

### 7. BIBLIOGRAFIA

ASTM International, “**Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material – E643**”, 2015.

ASTM International, “**Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds – E190**”, 2014.

Bayraktar, E., Moiron, J., Kaplan, D.; “ **Effect of Welding Conditions on the Formability Characteristics of Thin Sheet Steels: Mechanical and Metallurgical Effects**”, Journal of Materials Processing Technology 175, p.20-26, 2006.

Blass, A.; “**Estampagem**”, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Apostila. 1985.

Comercial Gerdau, “**Aços Planos e suas Aplicações**”, 2003. Disponível em: <[www.comercialgerdau.com.br](http://www.comercialgerdau.com.br)>. Acesso em: 05 Outubro 2016.

Machado, I. G.; “**Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**”, editado pelo autor, 1ª edição, 1996.

Madeira, R.P.; Modenesi, P.J.; “**Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas**”, Soldagem Insp. São Paulo, Belo Horizonte, v. 15, n. 1, p.022-030, jan. 2010.

Romano, V. F.; “**Robótica Industrial – Aplicação na indústria de manufatura e processos**”, Edgard Blücher, 1ª ed., 2002.

Schaeffer, L. “**Conformação de chapas metálicas**”. Porto Alegre: Imprensa Livre, 200p., 2004

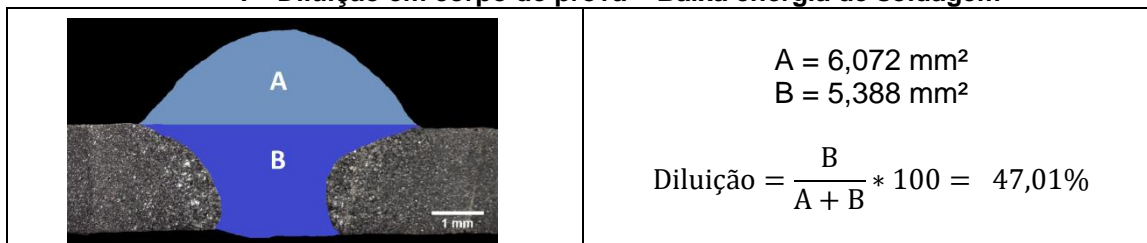
Schaeffer, L. “**Conformação mecânica**”. Porto Alegre: Imprensa Livre, 267p. Bibliografia: p 122., 1999.

Scotti, A., Ponomarev, V.; “**Soldagem MIG/MAG melhor Entendimento, melhor Desempenho**”, Artliber Editora, São Paulo, 2008.

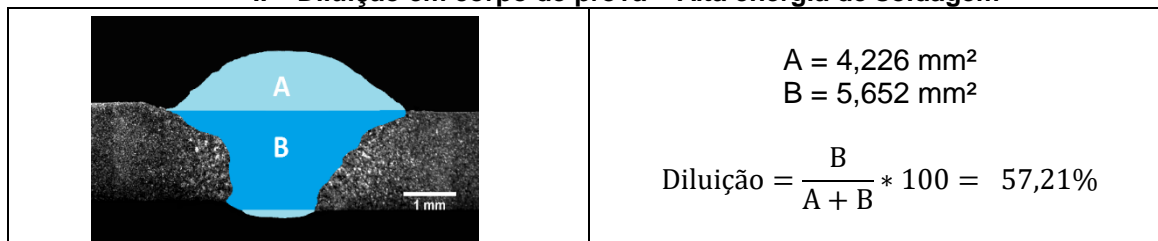
Yasuda, K., Jimma, T., Onzawa, T.; “**Formability of butt welded Stainless Steel Thin Sheet**”, Quartely Journal of the Japan Welding Society, v.2, n.3, p.161-166, 1984.

## APÊNDICES

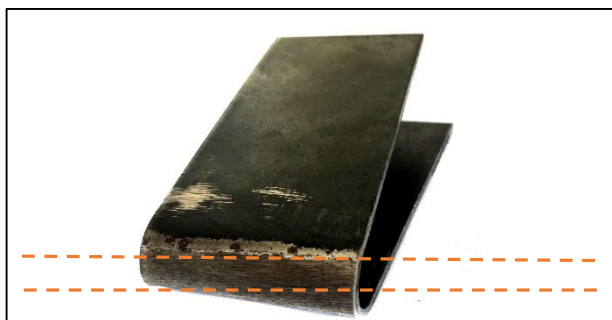
## I – Diluição em corpo de prova – Baixa energia de soldagem



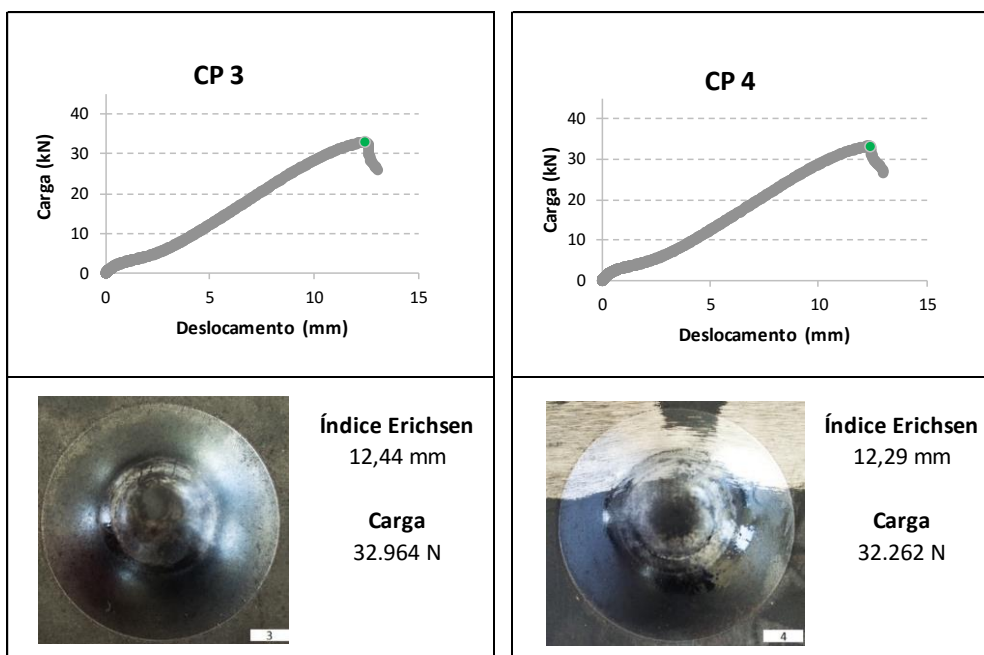
## II – Diluição em corpo de prova – Alta energia de soldagem



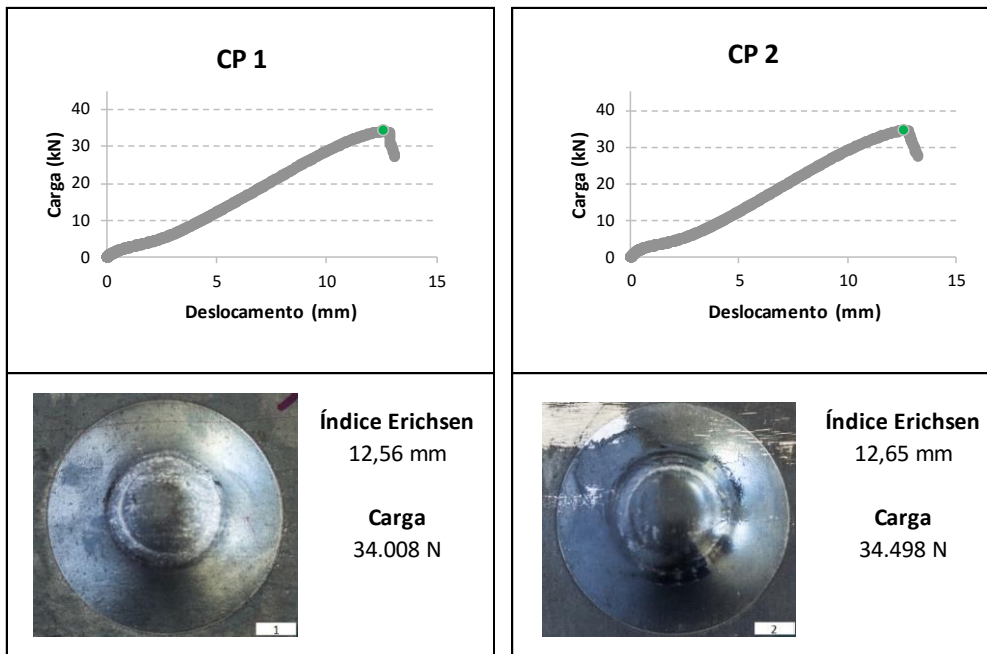
## III – Ensaio de Dobramento – Corpo de prova descartado



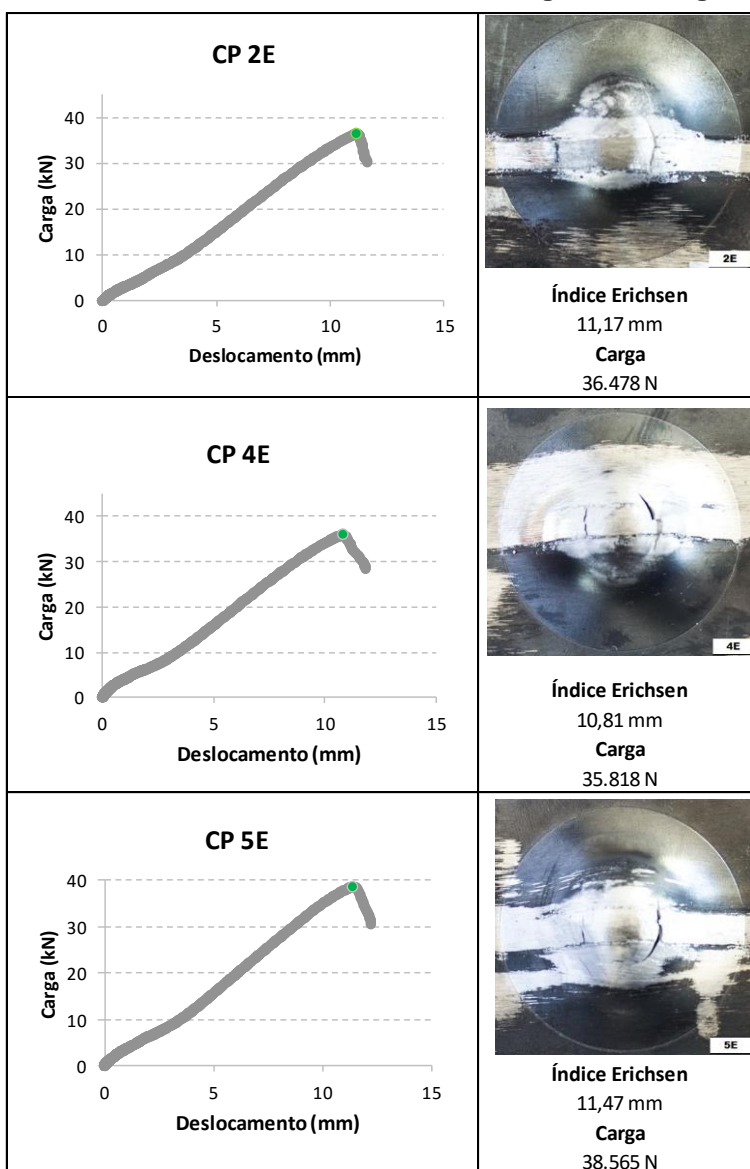
## IV – Resultados Erichsen - Metal base SAE 1008 – Sem lubrificante

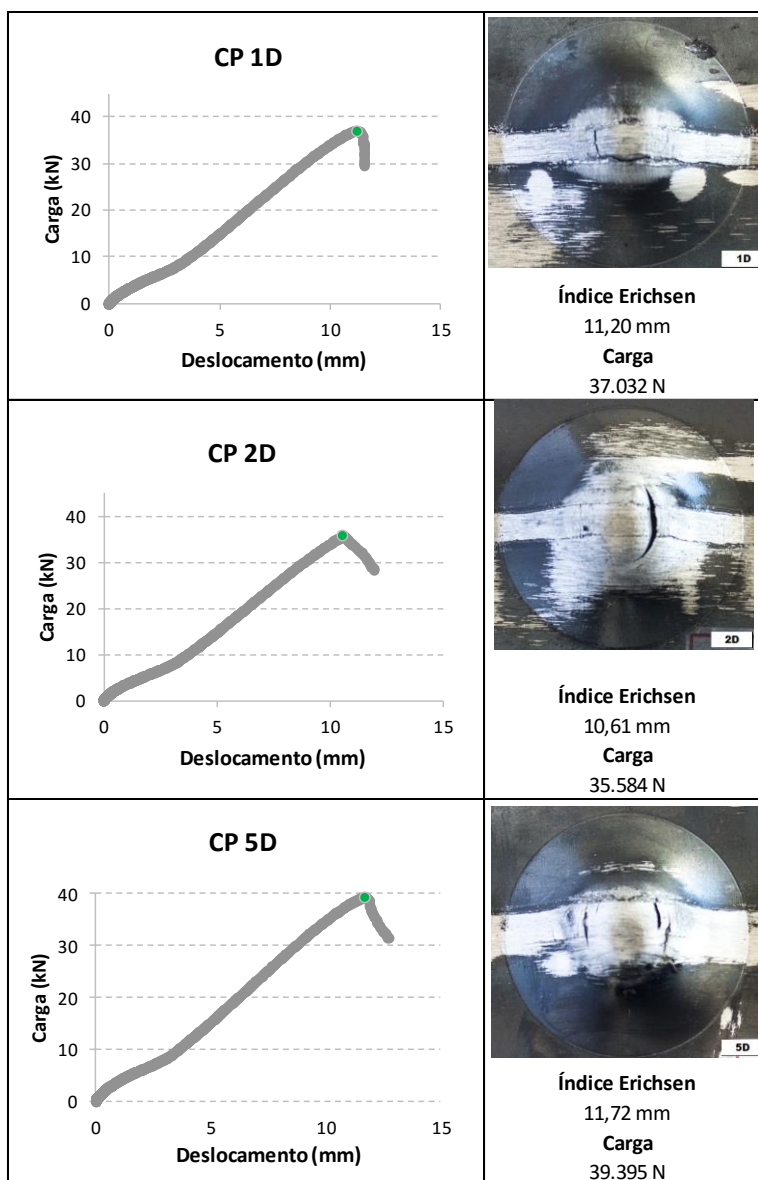


**V – Resultados Erichsen - Metal base SAE 1008 - Com lubrificante**

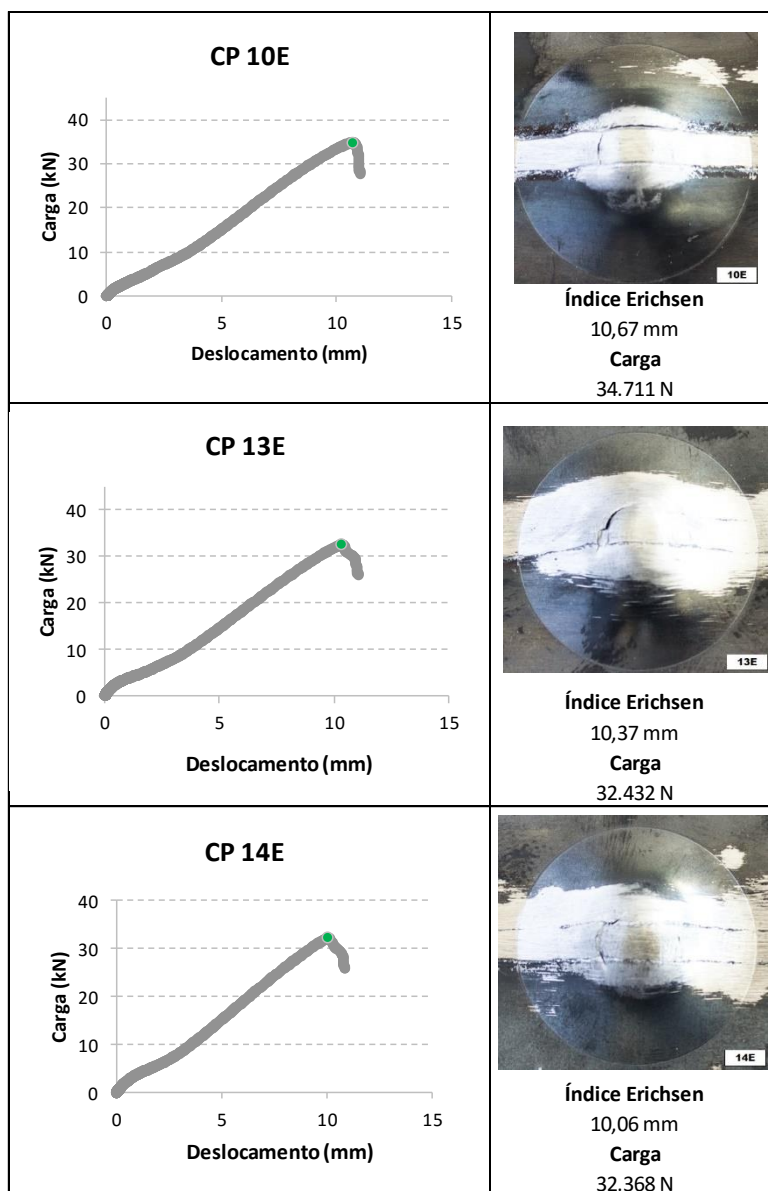


**VI – Resultados Erichsen - Juntas soldadas com baixa energia de soldagem - Sem lubrificante**



**VII – Resultados Erichsen - Juntas soldadas com baixa energia de soldagem -  
Com lubrificante**



**VIII – Resultados Erichsen - Juntas soldadas com alta energia de soldagem - Sem lubrificante**

**IX – Resultados Erichsen - juntas soldadas com alta energia de soldagem –  
Com lubrificante**