

UTILIZAÇÃO DO ENSAIO ERICHSEN PARA A AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE JUNTAS SOLDADAS

Rodrigo Pereira Madeira, rodrigo.madeira@arcelormittal.com.br¹
Paulo J. Modenesi, modenesi@demet.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG

Resumo: Para aprovação de uma junta soldada é comum que se realize testes mecânicos para avaliar seu desempenho comparativamente ao metal base ou outra junta soldada. Os testes geralmente utilizados são os testes de tração, dobramento e, para materiais de menor espessura, usa-se também o ensaio Erichsen. A utilização destes últimos para a caracterização de juntas soldadas não está bem estabelecida de modo que a interpretação dos resultados obtidos muitas vezes gera controvérsias. Por isso, decidiu-se avaliar juntas soldadas pelo processo GTAW e GMAW, comparando-se a performance destas juntas nos três testes (tração, dobramento e Erichsen) com o objetivo de confirmar que o ensaio Erichsen tem maior sensibilidade na detecção da fragilidade de juntas soldadas de baixa espessura (1,5mm) e, ainda que os testes de tração e dobramento são do tipo passa ou não passa, não sendo capazes de diferenciar a ductilidade de duas juntas de boa qualidade ou mesmo têm uma sensibilidade menor quando comparados com o ensaio Erichsen. Para isso, realizaram-se soldas (bead on plate) em aço inoxidável ferrítico e submeteram-se estas juntas soldadas aos três testes em questão. Em seguida foi realizada uma avaliação visual da deformação destas juntas assim como uma detalhada análise quantitativa utilizando-se o software ASAME. Os resultados obtidos confirmaram a suspeita e corroboram com os resultados encontrados por YASUDA et al (1984).

Palavras-chave: Ensaios Mecânicos, Ensaio Erichsen, GTAW, GMAW, análise de deformação.

1. INTRODUÇÃO

Para aprovação de uma junta soldada é comum que se realize testes mecânicos para avaliar seu desempenho em comparação com o metal base ou outra junta soldada. Os testes geralmente utilizados são os testes de tração, dobramento e, para materiais de menor espessura, usa-se também o ensaio Erichsen. A utilização deste último para a caracterização de juntas soldadas não está bem estabelecida de modo que a interpretação dos resultados obtidos muitas vezes gera controvérsias.

No teste de tração de juntas de pequena espessura o corpo de prova é normalmente confeccionado de modo que o cordão de solda fique perpendicular à direção de ensaio. Deste modo, segundo Yasuda et al (1984) a deformação do corpo de prova depende das propriedades das diferentes regiões da solda. No caso de aços ferríticos que têm baixo coeficiente de encruamento a ruptura tende a ocorrer no metal base, a não ser que a fragilidade da zona fundida seja muito grande. Quando a ruptura ocorre no metal base, a junta soldada não foi efetivamente testada e os valores das propriedades mecânicas não devem ser comparados. Caso a ruptura ocorra na junta soldada os valores das propriedades mecânicas estarão relacionados com as propriedades da junta, mas, ainda assim, tende a haver uma grande influência da deformação do metal base nos resultados. Apesar destes fatos, alguns autores (Chung et al, 1999 e Washko & Grubb, 1991) utilizam os resultados de testes de tração transversal sem, no entanto, explicitar estas questões.

O ensaio de dobramento, menos explorado do ponto de vista científico, é um ensaio mais severo e que garante, desde que realizado adequadamente, que a deformação se concentrará na região da solda. Neste ensaio o corpo de prova é preparado de modo que o cordão de solda seja posicionado faceando o cutelo. O dobramento pode ser realizado visando testar a face ou a raiz da solda. Este ensaio é do tipo passa ou não passa, não sendo capaz de quantificar a qualidade das juntas testadas.

O ensaio Erichsen é um ensaio de estiramento no qual um punção de ponta esférica força a chapa que é presa por um prensa chapas até que a mesma sofra estricção e/ou ruptura. Os resultados deste ensaio são deslocamento do punção (valor Erichsen) e carga no momento em que o material tem uma perda acentuada de espessura (esticção ou ruptura). Este ensaio tem sido utilizado na avaliação de juntas soldadas para aços de menor espessura (até 2mm). Yasuda et al (1984) comparou o efeito do tipo de lubrificação nos valores Erichsen e mostrou que com o uso de graxa grafitizada os valores Erichsen obtidos para o material soldado (SUS 304 soldado a laser) estavam no mesmo patamar dos valores obtidos para o metal base, independentemente, da relação entre largura do cordão e espessura da chapa. Já com lubrificação de polietileno os valores Erichsen da junta soldada foram menores que os do metal base na mesma

condição. Além disso, para razões largura da solda sobre espessura da chapa menores que quatro, os resultados foram superiores aos valores dos corpos de prova ensaiados com graxa. Para valores desta razão maiores que quatro houve uma forte queda dos valores Erichsen ensaiados com polietileno (Figura 1). Yasuda afirma que o polietileno reduz o atrito e faz com que a parte central do corpo de prova também se deforme. Assim, a queda nos valores Erichsen para juntas soldadas mais largas deve-se a maior participação da zona fundida na área que recebe deformação. A Figura 2 mostra as tensões circunferenciais nos corpos de prova à medida que a distância ao pólo (centro) aumenta. Nota-se que as tensões circunferenciais ocorrem mais próximas ao centro para os corpos de prova lubrificados com polietileno, ao mesmo tempo em que a distribuição destas deformações é mais homogênea.

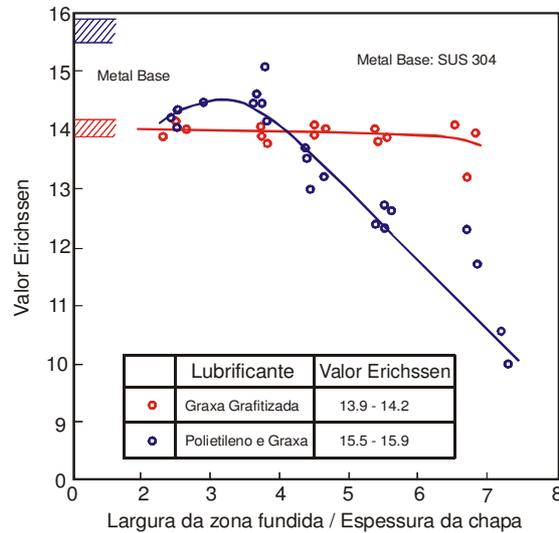


Figura 1– Valores Erichsen para o aço austenítico SUS 304 com lubrificação com polietileno e graxa de grafite. (Yasuda et al, 1984).

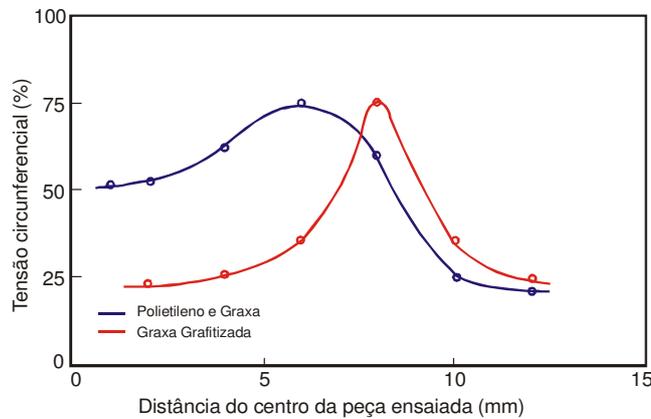


Figura 2 - Variação da deformação no ensaio Erichsen para lubrificação com polietileno e graxa grafitizada. (Yasuda et al, 1984).

Chung (1999) utilizou o ensaio Erichsen para a avaliação de juntas soldadas, no entanto, não explicitou o tipo de lubrificação utilizada e classificou as juntas sem levar em consideração a participação relativa do metal base e da zona fundida na área de deformação. Já Washko & Grubb (1991) utilizaram valores do ensaio de estiramento “Olsen Cup” (similar ao Erichsen) levando em consideração somente o tipo de fratura encontrada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira etapa teve o objetivo de estudar a viabilidade do uso do ensaio Erichsen para avaliar a ductilidade de juntas soldadas pelo processo GTAW e entender melhor as condições para a sua realização. Na segunda etapa, o ensaio Erichsen foi usado para avaliar juntas soldadas com o processo GMAW com diferentes arames (308LSi, 430LNb e 430Ti) e gases de proteção (Ar2%O2 e Ar2%N23%CO2). Os resultados deste ensaio foram comparados com os resultados de tração e dobramento.

2.1. PRIMEIRA ETAPA

A Tabela 1 mostra a composição química do metal de base. Note que se trata de um aço inoxidável de baixo teor de carbono com 17% de cromo e estabilizado ao Ti e Nb. A sua espessura é de 1,5 mm.

Tabela 1 - Composição química (principais elementos) do metal base.

Elemento	C	N	Ti	Nb	V	Ni	Cr	Mn	Si	P	S
(%)	0,0095	0,0075	0,1984	0,2009	0,0507	0,1777	17,1284	0,1434	0,4032	0,0234	0,0027

A soldagem dos corpos de prova foi realizada pelo processo GTAW utilizando uma máquina de soldagem do modelo Digitec 600. O gás de proteção foi o Ar puro e o eletrodo de tungstênio WTh2 com 2,4 mm de diâmetro. Foi realizada soldagem autógena sem junta. A Tabela 2 mostra as condições de soldagem.

Tabela 2 - Parâmetros do processo de soldagem. I – Corrente, U – Tensão, la – Comprimento do arco, Vs – Velocidade de Soldagem e ES – Energia de soldagem.

	I(A)	U(V)	la(mm)	Vs(cm/min)	ES(J/cm)
1	105	9,1	1,5	50	1150
2	105	9,1	1,5	40	1430

*Vazão de gás igual a 6,5 litros por minuto

Para o ensaio Erichsen os cordões de solda foram realizados em chapas de 150x300mm e dois corpos de prova foram retirados de cada cordão. Foram confeccionados 20 corpos de prova, com dimensões de 100x100mm, para cada uma das duas energias de soldagem. O ensaio foi feito com duas condições de lubrificação (graxa e polietileno), dois lados de ensaio (punção contra face e punção contra raiz) e dois valores de energia de soldagem. Foram realizados cinco ensaios por condição. Foi realizada uma análise visual das deformações que ocorreram nos corpos de prova. Estas deformações foram também analisadas com o uso do ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment). Este sistema quantifica as deformações numa área da superfície de uma peça estampada. Para isto é preciso que, antes do ensaio, o corpo de prova seja marcado com uma malha. Após o ensaio, o corpo de prova é fotografado juntamente com uma malha padrão. A fotografia é analisada pelo programa que quantifica as deformações na superfície do corpo de prova.

Para os testes de tração e dobramento foram gerados 2 cordões de solda para cada energia de soldagem dos quais foram retirados 3 corpos de prova de tração transversal para cada energia e 6 corpos de prova de dobramento para cada energia. Os corpos de prova para o ensaio de dobramento têm dimensões de 22x100 mm. O ensaio de dobramento foi, também, perpendicular ao cordão de solda e foi realizado em duas posições: tracionando a face e a raiz da solda.

2.2. SEGUNDA ETAPA

A Tabela 3 traz as composições químicas do metal base e dos metais de adição.

Tabela 3 – Composições químicas do metal base e metais de adição (diâmetro de 1 mm).

Composição Química	C	N	Ti	Nb	Ni	Cr	Mn	Si	S
430Ti	0,108	0,014	0,350	0,000	0,400	17,450	0,650	1,040	0,002
430LNb	0,027	0,014	0,004	0,440	0,215	17,660	0,425	0,430	0,004
308LSi	0,018	0,056	0,012	0,000	10,290	19,620	1,930	0,750	0,012
METAL BASE	0,009	0,010	0,178	0,188	0,210	17,253	0,162	0,409	0,000

A soldagem dos corpos de prova foi feita pelo processo GMAW com a mesma condição operacional, mas foram variados o metal de adição (308LSi, 430Ti e 430Nb) e o gás de proteção (Ar2%O2 e Ar2%N23%CO2). Na soldagem usou-se uma velocidade de alimentação de 4,5 m/mim; tensão de 17 V e velocidade de soldagem de 43 cm/min, obtendo-se uma corrente média em torno de 100 A. A Tabela 4 mostra as seis condições de soldagem utilizadas.

Tabela 4 – Combinações de metal de adição e gás de proteção usadas.

Condição	Gás de proteção	Metal de adição
1	Ar2%O2	430Ti
2	Ar2%O2	430LNb
3	Ar2%O2	308LSi
4	Ar2%N23%CO2	430Ti
5	Ar2%N23%CO2	430LNb
6	Ar2%N23%CO2	308LSi

Os cordões de solda foram depositados em “blanks” com dimensões de 150x300 mm. De cada “blank” foram retirados dois corpos de prova para o ensaio Erichsen. Após a realização do ensaio Erichsen, corpos de prova para tração e dobramento foram retirados das regiões não deformadas. Cada condição de soldagem teve seis corpos de prova Erichsen, dos quais três deram origem a corpos de prova para tração e três para dobramento. Para o ensaio Erichsen foram confeccionados 36 corpos de prova, com dimensões de 100x100mm. Foram ensaiados seis corpos de prova para cada condição de soldagem utilizando punção contra raiz e lubrificação com polietileno. As deformações dos corpos de prova foram avaliadas visualmente para entender se estas haviam ocorrido do mesmo modo que na primeira etapa. Para o teste de tração, corpos de prova com comprimento útil de 100mm e largura de 5mm foram retirados do mesmo cordão ensaiado em Erichsen. Os corpos de prova para dobramento, com dimensões de 22x100mm, foram ensaiados de modo a gerar esforços de tração na face da solda.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. PRIMEIRA ETAPA

A Figura 3 mostra os resultados de deslocamento do punção e carga para o metal base. Não há diferença entre os valores de deslocamento do punção entre as condições de lubrificação, no entanto, os valores de carga foram superiores com a lubrificação com graxa. Os resultados dos ensaios Erichsen mostrados na Figura 4 para o punção contra a raiz indicam resultados mais favoráveis para os corpos de prova de menor energia de soldagem. Para alta energia de soldagem a largura do cordão de solda é maior, assim, a contribuição deste no resultado final é também maior. Como o alongamento da solda tende a ser inferior ao do metal base, a maior participação da solda leva a menores valores Erichsen e de carga. Ainda na Figura 4, comparando-se o tipo de lubrificação, observam-se maiores valores Erichsen para os ensaios com lubrificação por graxa. A Figura 5 confirma estes resultados. Estes resultados estão ligados à deformação mais localizada na região da solda nos ensaios com lubrificação com polietileno. As Figuras 4 e 5 também mostram que os resultados de deslocamento de punção e carga têm uma mesma tendência, no entanto, nota-se uma menor dispersão para os resultados de carga. Percebe-se ainda que os resultados para punção contra face mostram maior dispersão quando comparados com os resultados de punção contra raiz.

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados para 3 corpos de prova para cada condição de soldagem, sendo que o dobramento foi realizado na raiz e na face da solda. A Figura 6 mostra a razão entre as propriedades mecânicas da junta soldada e as do metal base. Todos os corpos de prova romperam fora da ZF e ZTA e, portanto, a solda tem resistência mecânica, no mínimo, um pouco superior à resistência do metal base. Nota-se que os valores dos limites de escoamento, resistência e alongamento podem ser considerados iguais entre as soldas de baixa e alta energia quando se leva em consideração o erro. Este resultado era esperado uma vez que todos os corpos de prova romperam no metal base e, portanto, os valores das propriedades mecânicas devem ser controlados pelos do metal base. Observando-se o gráfico pode-se ter a impressão de que há diferença nos resultados, no entanto, acredita-se que estas diferenças são devidas a dispersões do ensaio de tração e/ou efeitos geométricos. No ensaio de dobramento todos os corpos de prova foram aprovados, o que mostra o bom desempenho da solda em ambas as condições de soldagem. Foram ensaiados três corpos de prova em cada condição.

A Figura 7 mostra os modos de fratura mais comuns para corpos de prova não soldados ensaiados com diferentes tipos de lubrificação. Note o anel circunferencial que ocorre em função do atrito mais elevado entre punção e corpo de prova na lubrificação com graxa (Figura 7a). Neste caso, a ruptura ocorre no que se denomina anel crítico. O mesmo não pode ser notado na Figura 7b em função do menor atrito e melhor distribuição de deformações. Neste caso, a ruptura ocorre em uma região mais próxima ao pólo (extremidade) do punção. Para os corpos de prova soldados, a ruptura dos corpos de prova ensaiados com graxa foi no anel crítico e transversalmente à solda (Figura 8). Nos corpos de prova ensaiados com polietileno a ruptura ocorre mais próxima do topo do corpo de prova e, muitas vezes, longitudinalmente à solda. Segundo Yasuda et al (1984), isto ocorre em função do maior atrito quando da lubrificação com graxa que desloca o ponto de ruptura para fora do pólo do corpo de prova.

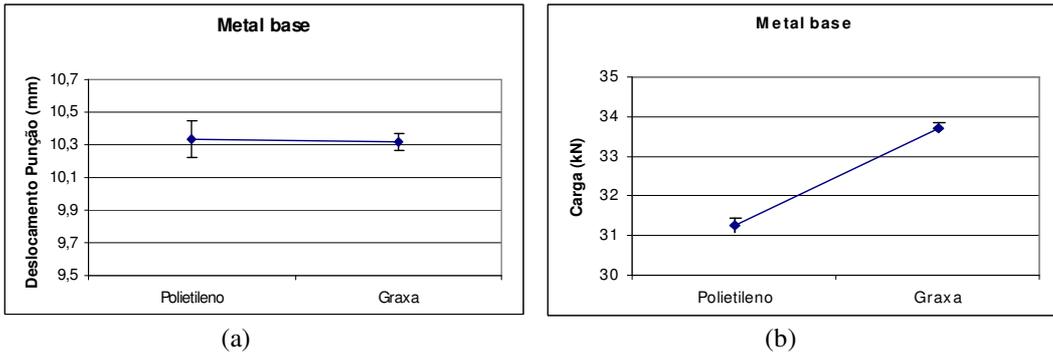


Figura 3 – Resultados Erichsen metal base: (a) deslocamento do punção e (b) carga.

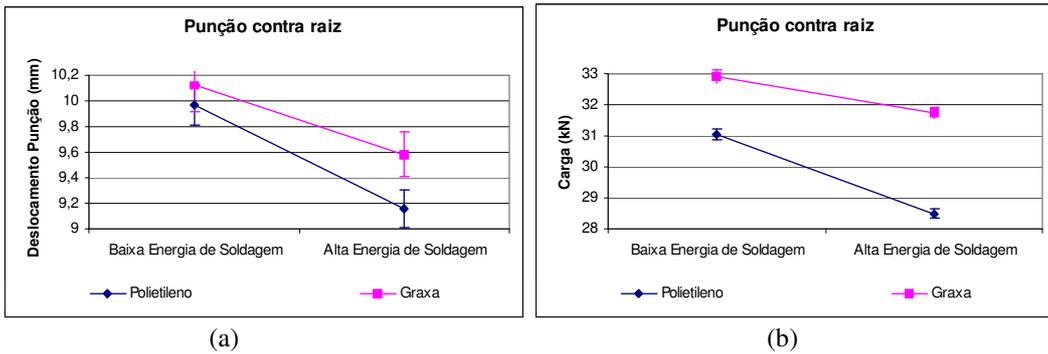


Figura 4 – Resultados Erichsen para a condição punção contra raiz (a) deslocamento do punção e (b) carga.

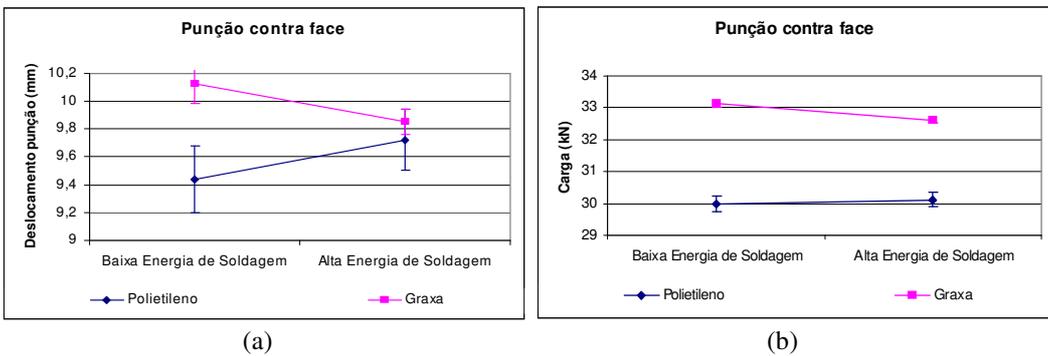


Figura 5 – Resultados Erichsen para a condição punção contra face (a) deslocamento do punção e (b) carga.

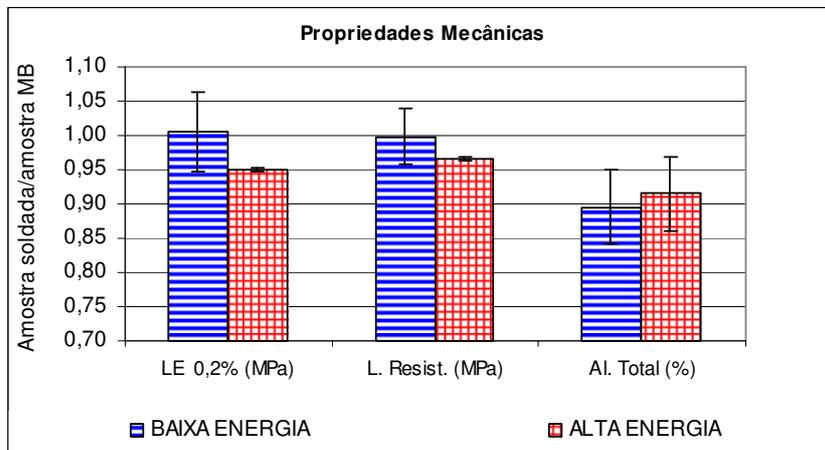


Figura 6 – Razão entre propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados sobre o metal base.

A análise das deformações dos corpos de prova com o programa ASAME buscou contemplar a região da solda de modo a avaliar a deformação da mesma em relação ao metal base. As Figuras 9 e 10 comparam as deformações no metal base lubrificado com graxa e polietileno. Nota-se que o polietileno promove a distribuição das deformações mais homogênea no topo do corpo de prova, acima da região do anel crítico, enquanto a graxa concentra estas deformações no anel crítico. Os valores das deformações máximas e médias mostrados na Tabela 5 indicam que estas deformações tendem a ser maiores com o uso do polietileno embora a diferença possa não ser significativa na maioria dos casos. Este fato deve-se, provavelmente, à distribuição mais homogênea das deformações quando há uma melhor lubrificação. Quando o material deforma de maneira mais homogênea, este distribui as perdas de espessuras o que deveria levar a maiores valores Erichsen. No entanto, isto não foi constatado nos ensaios, ficando os valores Erichsen para a lubrificação com polietileno nos mesmos patamares da lubrificação com graxa.

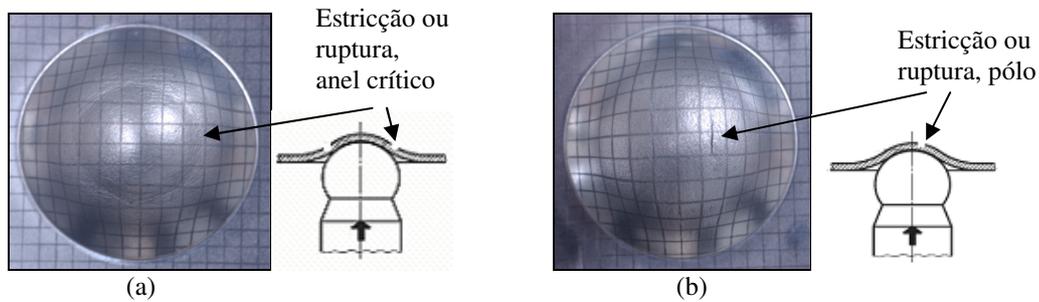


Figura 7 – Localização e característica da fratura para corpos de prova não soldados ensaiados com lubrificação (a) graxa e (b) polietileno.

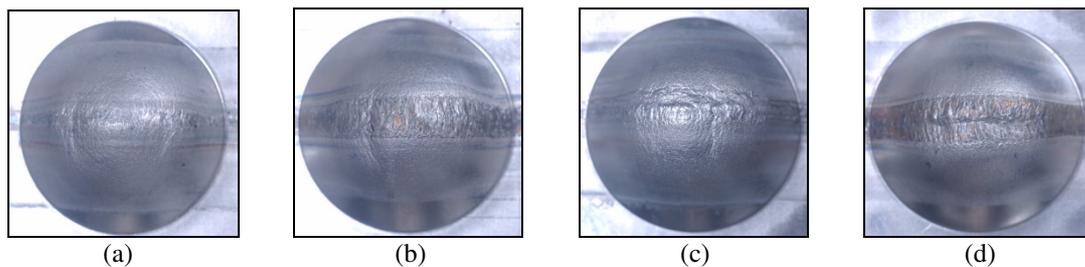


Figura 8 – Localização e característica da fratura para corpos de prova soldados ensaiados com lubrificação (a) e (b) graxa e, (c) e (d) polietileno. (Classificação semelhante pode ser observada em Chung et al 1999).

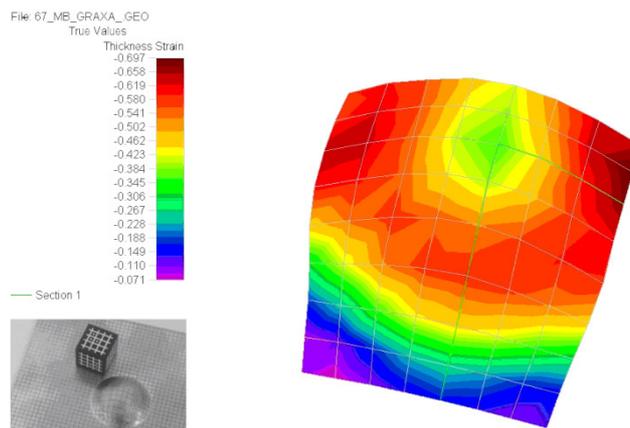


Figura 9 – Superfície de deformações gerada no software ASAME. Condição de ensaio: lubrificação com graxa, corpo de prova sem solda.

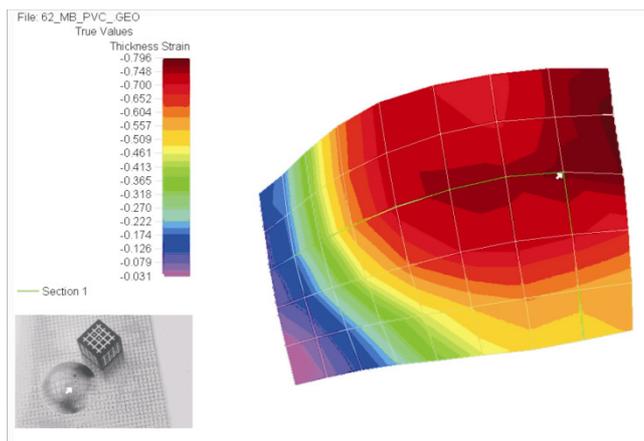


Figura 10 – Superfície de deformações gerada no software ASAME. Condição de ensaio: lubrificação com polietileno, corpo de prova sem solda.

Tabela 5 - Valores percentuais aproximados das deformações nos corpos de prova não soldados.

		Lubrificação	
		Graxa	PVC
Deformação Máxima(%)	Transversal	45	42
	Longitudinal	22	35
	Espessura	68	79
Deformação Média (%)	Transversal	26	27
	Longitudinal	21	25
	Espessura	46	52

Resultados similares foram observados para os corpos de prova soldados. As deformações máximas com o uso do polietileno foram superiores às deformações máximas com o uso da graxa. Contudo, a deformação média dos corpos de prova ensaiados com polietileno tendeu a ser inferior à deformação média dos corpos de prova ensaiados com graxa, o que explica os melhores resultados de valores Erichsen observados para os corpos de prova ensaiados com graxa. A Tabela 6 mostra os valores percentuais de deformações obtidas com o programa.

Tabela 6 – Valores percentuais aproximados das deformações nos corpos de prova soldados. Condição de ensaio: punção contra raiz, alta energia de soldagem.

		Lubrificação	
		Graxa	Polietileno
Deformação Máxima(%)	Transversal	35	40
	Longitudinal	25	28
	Espessura	60	65
Deformação Média (%)	Transversal	22	18
	Longitudinal	20	17
	Espessura	42	36

Não foi possível observar diferenças significativas nas análises de deformações dos corpos de prova ensaiados com punção contra face e contra raiz. No entanto, é importante que, para compararem-se as duas soldas, o lado do ensaio seja estabelecido para se minimizar os possíveis efeitos geométricos que podem interferir no resultado do ensaio. A geometria do cordão de solda é uma variável importante no resultado do ensaio e, na maioria dos casos, de difícil controle e avaliação.

A julgar pelos resultados dos testes Erichsen para as condições de soldagem GTAW, as melhores condições de ensaio seriam: lubrificação com polietileno, por concentrar as maiores deformações acima do anel crítico, o que promove maiores deformações no cordão de solda; punção contra raiz, em função da maior planicidade desta região.

3.2. SEGUNDA ETAPA

Nesta etapa os testes Erichsen foram realizados com lubrificação de polietileno e atuação do punção contra a raiz da solda.

A Figura 11 mostra o desempenho das soldas relativamente ao do metal base. Com exceção dos corpos de prova soldados com o arame 430Ti e Ar2%N₂3%CO₂, que obteve resultados de deslocamento do punção de 63%, todas as demais tiveram desempenho superior a 90% em estiramento. Os resultados foram similares para a carga. Isto sugere que o ensaio Erichsen foi capaz de detectar a menor ductilidade das soldas produzidas com o arame 430Ti e o gás de proteção Ar2%N₂3%CO₂. Esta redução de ductilidade foi analisada em outro trabalho (Madeira, 2007) e atribuída a um maior volume de precipitação na solda e à formação de carbonetos e nitretos de cromo nos contornos de grão.

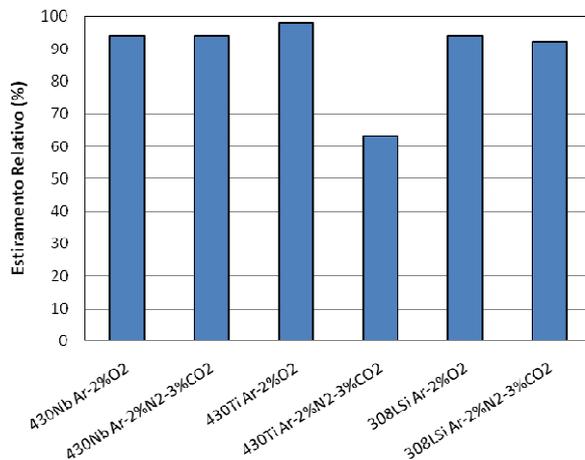


Figura 11 – Resultados do ensaio Erichsen (estiramento) das soldas representados em relação aos resultados do metal base.

A Figura 12 mostra os corpos de prova após o ensaio Erichsen. Observando-se as fotografias nota-se que as deformações nos corpos de prova estão bem próximas do pólo. No caso da solda com arame 430Ti e proteção de Ar2%N₂3%CO₂, a ruptura ocorreu no centro do cordão de solda, na zona fundida. Esta ruptura é aparentemente frágil, o que reduziu drasticamente os valores de deslocamento e carga do ensaio Erichsen. Todas as demais condições apresentaram fraturas típicas de materiais dúcteis e foram, em geral, fora da zona fundida e paralelas ao cordão de solda. Em alguns casos a trinca prolongou-se para dentro do cordão de solda, o que também foi observado em soldas autógenas realizadas por processo GTAW. Os corpos de prova soldados com arame 430LNb apresentaram, após a deformação, uma linha bem definida no centro do cordão, provavelmente, devido à sua microestrutura apresentar grãos colunares que se encontram na linha de centro do cordão.

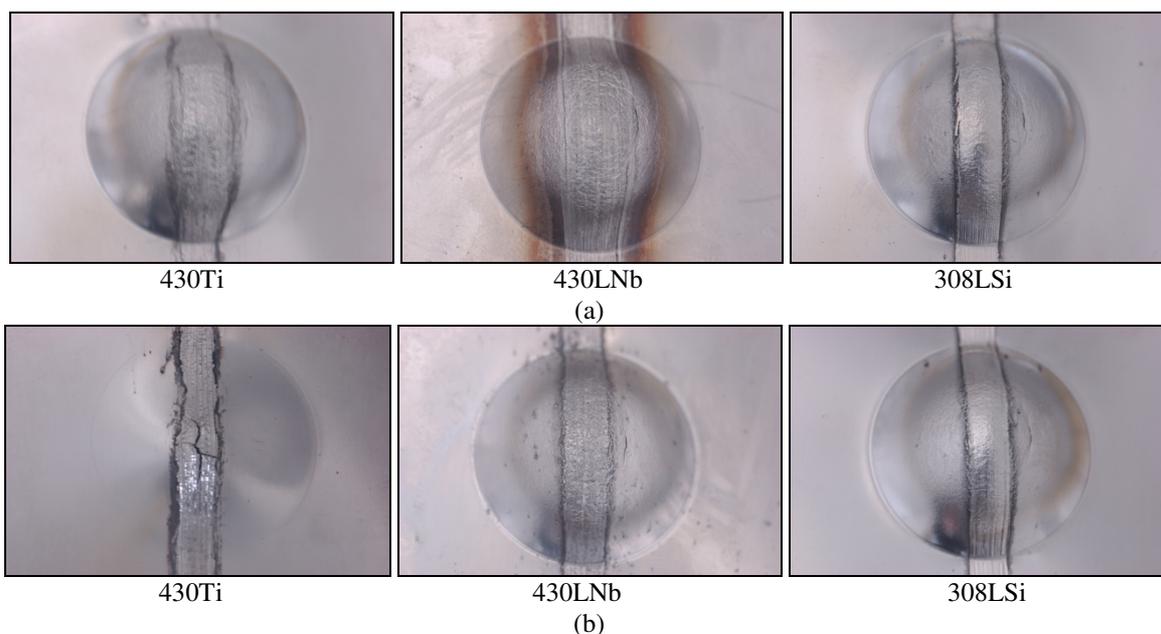


Figura 12 – Corpos de prova após ensaio Erichsen (a) gás de proteção Ar2%O₂ e (b) gás de proteção Ar2%N₂3%CO₂.

O ensaio de tração foi realizado em corpos de prova do tipo “sub-size”, que é uma condição mais severa em função das menores dimensões do corpo de prova e conseqüente maior participação da região da solda na parte do

corpo de prova submetida ao ensaio. Apesar disto, todos os corpos de prova se romperam no metal base. Desta forma, para as condições usadas, o ensaio de tração não foi capaz de detectar uma menor ductilidade ou maior fragilidade dos cordões de solda realizados com o arame 430Ti e gás de proteção Ar2%N₂3%CO₂, o que o ensaio Erichsen mostrou.

O ensaio de dobramento foi realizado em 3 corpos de prova para cada condição. Foi realizado promovendo tração à face dos cordões de solda, assim como o ensaio Erichsen. Este ensaio mostrou-se mais rigoroso que o ensaio de tração, uma vez que três corpos de prova sofreram ruptura. Duas delas ocorreram na ZTA provavelmente devido a um concentrador de tensões gerado pelo reforço de solda que não foi completamente removido quando do aplainamento dos corpos de prova. Este foi o único ensaio que sofreu influência significativa desta variável. Para a condição de soldagem com o arame 430Ti e proteção de Ar2%N₂3%CO₂, um corpo de prova sofreu fratura aparentemente frágil na ZF.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados deste trabalho pode-se concluir que:

- O ensaio de tração não foi capaz de detectar diferenças significativas entre as soldas realizadas tanto com o processo GTAW como com o GMAW.
- O ensaio de dobramento não detectou diferenças nas soldas GTAW, não revelando descontinuidades em todas as soldas testadas. Já para corpos de prova soldados com o processo GMAW, este ensaio indicou uma maior fragilidade em alguns corpos de prova. Estes resultados foram associados com fatores geométricos e metalúrgicos das soldas. A dificuldade de se garantir que a deformação ocorra na ZF durante este ensaio foi evidenciada pela falha de dois corpos de prova na zona termicamente afetada.
- O ensaio Erichsen foi capaz de indicar uma maior fragilidade das soldas realizadas com o arame 430Ti e o gás de proteção Ar2%N₂3%CO₂, com alguns corpos de prova soldados nesta condição rompendo de forma frágil durante o ensaio. Para as demais condições de soldagem, o ensaio Erichsen não indicou diferenças significativas de ductilidade.
- Outro fator relevante é que, como a soldagem GMAW tende a formar cordões de solda com uma geometria mais variável do que os obtidos com o processo GTAW, estas variações aumentaram a dificuldade de se caracterizar o comportamento mecânico das juntas com o ensaio Erichsen. Assim, este ensaio apresentou uma maior capacidade de detectar o efeito de variações no processo nos testes envolvendo soldas obtidas com o processo GTAW. Assim, a capacidade do ensaio Erichsen detectar variações de ductilidade em juntas soldadas, com uma menor influência de fatores geométricos, depende das características, particularmente o grau de controle, do processo de soldagem. A comparação deste aspecto entre processos diferentes deve também ser dificultada pelos mesmos motivos.
- Os resultados semelhantes quanto às deformações dos cordões de solda mostram que o ensaio Erichsen promove deformações na região da solda, independentemente da sua geometria. Em resumo, o ensaio Erichsen utilizado com lubrificação adequada força a ocorrência de deformações na região da solda, tornando menos significativo o efeito da geometria.

5. REFERÊNCIAS

- Chung, B.G.; Rhee, S.; Lee, C.H.; 1999, "The effect of shielding gas types on CO₂ laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel". *Materials Science and Engineering*, No A272, pp.357-362.
- Madeira, R.P.; 2007, "Influência do Uso de Arames Inoxidáveis Ferríticos nas Características da Zona Fundida de um Aço Inoxidável Ferrítico com 17% de Cromo Bi-estabilizado". Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, pp. 45-136.
- Washko, S. D.; Grubb, J. F.; 1991, "The Effect of Niobium and Titanium Dual Stabilization on the Weldability of 11% Chromium Ferritic Stainless Steels". *Proceedings of International Conference on Stainless Steels*, Chiba, ISIJ, pp.1061-1068.
- Yasuda, K.; Jimma, T.; Onzawa, T.; 1984, "Formability of butt welded Stainless Steel Thin Sheet". *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, Vol.2, No.3, pp. 161-166.

USING ERICHSEN TESTING TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF WELDED JOINTS

Rodrigo Pereira Madeira, rodrigo.madeira@arcelormittal.com.br¹
Paulo J. Modenesi, modenesi@demet.ufmg.br¹

¹Univesidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG

Abstract: *The performance of welded joints and base metals are frequently evaluated by mechanical testing. Tensile and bending tests are among the most commonly used, but, for low thickness joints, Erichsen testing can be also used. However, the use of those tests to characterize welded joints is not well established yet and interpreting their results is still controversial for this application. In the present work, GTAW and GMAW welded joints performed in thin sheet of ferritic stainless steel are evaluated by tensile, bending, and Erichsen tests and the results are compared. The main goal of this study was to confirm that Erichsen testing sensibility is higher for thin sheets (1,5 mm) and that tensile and bending tests are not able to differentiate the ductility of welded joints in cases that the Erichsen testing is. For this reason, bead on plate welds were done in ferritic stainless steel and those were submitted to the tests in question. Moreover, a visual analysis of the welds after Erichsen testing was carried out as well as detailed quantitative analyses of the pieces deformations using the software ASAME. The obtained results confirmed the expectations and are aligned to the results found by YASUDA et al (1984).*

Keywords: Mechanical tests, Erichsen Testing, GTAW, GMAW, deformation analysis.