

Utilização do Ensaio Erichsen para a Avaliação do Desempenho de Juntas Soldadas

(Using Erichsen Testing to Evaluate the Performance of Welded Joints)

Rodrigo Pereira Madeira¹, Paulo J. Modenesi¹

¹Univesidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Rua Espírito Santo 35, 30160-030, Belo Horizonte, MG, modenesi@demet.ufmg.br

Resumo:

Para aprovação de uma junta soldada é comum a realização de testes mecânicos para avaliar seu desempenho em comparação com o metal base ou outra junta soldada. Entre os diversos ensaios que podem ser usados, o ensaio Erichsen tem sido utilizado para avaliar juntas em chapas de pequena espessura. A utilização deste ensaio nesta aplicação específica não está ainda bem estabelecida e a interpretação dos resultados obtidos muitas vezes gera controvérsia. Neste contexto, o presente trabalho compara os resultados de três tipos de ensaio mecânico (tração, dobramento e Erichsen) na avaliação de cordões de solda depositados em chapas de aço inoxidável ferrítico de 1,5 mm de espessura. Na primeira etapa deste trabalho, usando soldas obtidas com o processo de soldagem GTAW, foram selecionadas as condições para a realização do ensaio Erichsen. Para isto, foram comparados os resultados deste ensaio em diferentes condições e a distribuição de deformações na região de ensaio foi avaliada quantitativamente com um programa de computador específico. Na segunda etapa, juntas soldadas pelo processo GMAW foram avaliadas pelos ensaios de tração, dobramento e Erichsen e seus resultados comparados. Mostrou-se que o ensaio Erichsen foi mais efetivo para detectar uma menor ductilidade em juntas soldadas em condições para as quais se esperava um pior comportamento mecânico.

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

Abstract: Mechanical tests are frequently used to assess welded joint performance and to approve the joint for certain applications. Among others, Erichsen test has been used to evaluate low thickness joint ductility. However, for this kind of application, the use of Erichsen test is not well established. This paper aims to contribute to the understanding of this application by comparing results from Erichsen, tensile and bending tests of 1.5-mm thick ferritic stainless steel welded specimens. Joints that were welded by the GTAW process were used to optimize Erichsen test conditions. Strain distribution around these welds after testing was quantitatively evaluated by specialized software. Tensile, bending and Erichsen test results were compared in GMAW weld beads. It was shown that Erichsen test can detected more effectively ductility variations in the weld bead caused by changes in the welding variables.

Keywords: Ductility, Erichsen Testing, GTAW, GMAW, deformation analysis.

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 [1], 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 [2-3] 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.

(Recebido em 25/10/2009; Texto Final em 07/12/2010).

Publicado com permissão da ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – Artigo originalmente apresentado no 5º COBEF, Belo Horizonte, MG, Abril de 2009

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-chapa, até que a mesma sofra estrição e/ou ruptura. Os resultados deste ensaio são deslocamento do punção (valor Erichsen) e carga no momento em que o material tem uma perda mais acentuada de espessura (estrição ou ruptura). Este ensaio tem sido utilizado na avaliação de juntas soldadas para aços de menor espessura (até 2mm). Yasuda et al. [1] 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.

O ensaio Erichsen já foi usado em diversos trabalhos para avaliar a ductilidade de soldas em juntas de pequena espessura. Por exemplo, Chung [2] utilizou este ensaio 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 [3] utilizaram valores do ensaio de estiramento “Olsen Cup” (similar ao Erichsen) levando em consideração somente o tipo de fratura encontrada. Jae-Do Kim [5] estudou a ductilidade de soldas feitas com processo Laser em chapas galvanizadas de 0,8 a 1,2 mm de espessura. Uma melhoria da ductilidade foi observada com a redução da energia de soldagem, mas as condições de ensaio não são claramente apresentadas. Mais recentemente, Bayraktar e colaboradores [6] avaliaram, com o ensaio Erichsen, a estampabilidade de em chapas finas de aços livres de intersticiais e inoxidáveis ferríticos soldadas com os processos a Laser e GTAW. Os autores não especificam as condições de ensaio, inclusive a lubrificação

usada. Apesar disso, eles observam uma menor estampabilidade para as chapas soldadas com o processo GTAW e para aqueles de maior espessura.

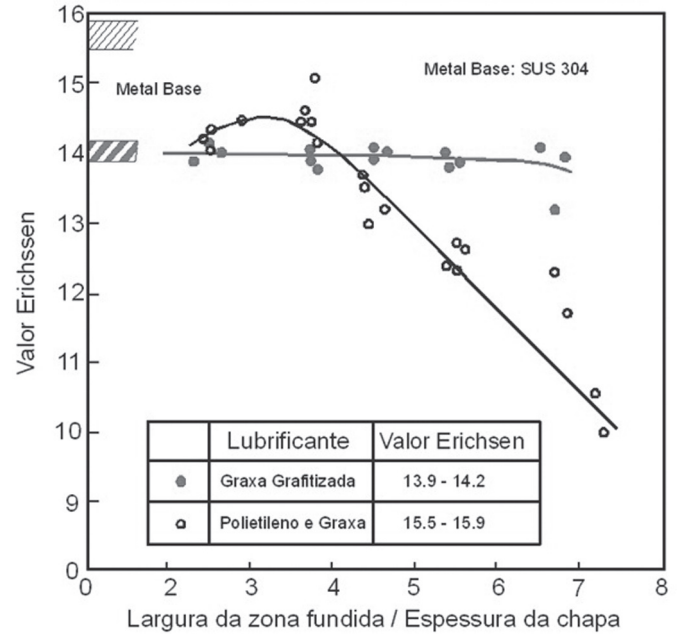


Figura 1. Valores Erichsen para o aço austenítico SUS 304 com lubrificação com polietileno e graxa de grafite [1].

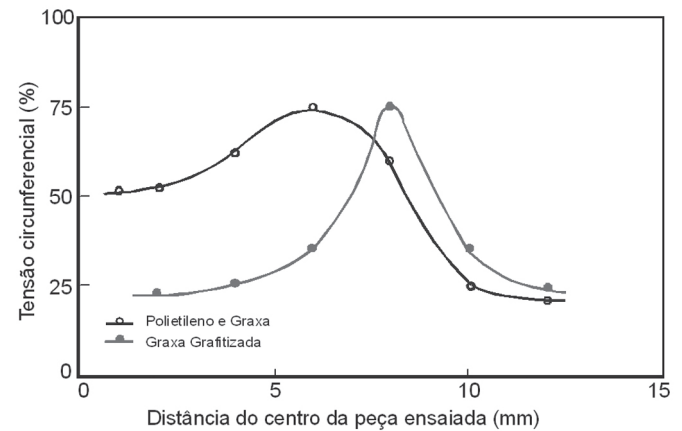


Figura 2. Variação da deformação no ensaio Erichsen para lubrificação com polietileno e graxa grafitizada [1].

O presente trabalho busca avaliar o efeito das condições de aplicação do ensaio Erichsen nos seus resultados quando o mesmo é usado para estudar a ductilidade de juntas soldadas de pequena espessura (1,5 mm). O estudo foi realizado em duas etapas. Na primeira, procurou-se levantar as condições mais adequadas de ensaio. Nesta etapa foi usado o processo GTAW

Tabela 1. Composição química (% em peso) do metal base.

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

Tabela 2. Composição química (%peso) do metal base e metais de adição (diâmetro de 1 mm).

	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	0,210	0,162	0,409	0,001

por se considerar que este permite obter soldas com geometria mais uniforme. Na segunda etapa, o ensaio foi utilizado para avaliar o efeito de variações de algumas condições de soldagem do processo GMAW na ductilidade da junta. Nas duas etapas, os resultados foram comparados com os de outros dois ensaios mecânicos usuais (tração e dobramento). Os testes foram realizados em soldas de aço inoxidável ferrítico como parte de um programa que procura desenvolver métodos para a avaliação da soldabilidade deste aço para a fabricação de componentes para a indústria automotiva.

2. Materiais e Métodos

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.

A soldagem dos corpos de prova foi realizada pelo processo GTAW utilizando uma máquina de soldagem com controle eletrônico com proteção de Ar puro e o eletrodo de tungstênio WTh2 de 2,4 mm de diâmetro. Os cordões foram depositados sobre a chapa sem junta. Foram usadas duas condições de soldagem com corrente média de 105 A, comprimento de arco de 1,5 mm (com uma tensão de soldagem de aproximadamente 9,1 V) e velocidades de soldagem de 50 e 40 cm/min que resultaram em energias de 1150 (Condição 1) e 1430 J/cm (Condição 2), respectivamente.

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 preparados 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 (resultado em cinco ensaios por condição). Os corpos de prova foram analisados visualmente após o ensaio e as deformações resultantes foram analisadas com o uso de um programa capaz de quantificar as deformações em peças estampadas (ASAME – *Automated Strain Analysis and Measurement Environment*). Para o seu uso, é preciso que, antes do ensaio, o corpo de prova seja marcado com uma malha e, após o ensaio, este seja fotografado juntamente com uma malha padrão. A fotografia é analisada pelo programa que quantifica as deformações na superfície do corpo de prova.

Para a realização de ensaios de tração e dobramento, foram feitos 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 tração tiveram comprimento útil de 57 mm e largura de 12,5 mm e os de dobramento tinham 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

Nesta 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 (Ar-2%O₂ e Ar-2%N₂-3%CO₂). A Tabela 2 mostra a composição química do metal base e dos metais de adição.

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. 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 3 mostra as seis condições de soldagem utilizadas.

Tabela 3. Combinações de metal de adição e gás de proteção usadas.

Condição	Gás de proteção	Metal de adição
1	Ar-2%O ₂	430Ti
2	Ar-2%O ₂	430LNb
3	Ar-2%O ₂	308LSi
4	Ar-2%N ₂ -3%CO ₂	430Ti
5	Ar-2%N ₂ -3%CO ₂	430LNb
6	Ar-2%N ₂ -3%CO ₂	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

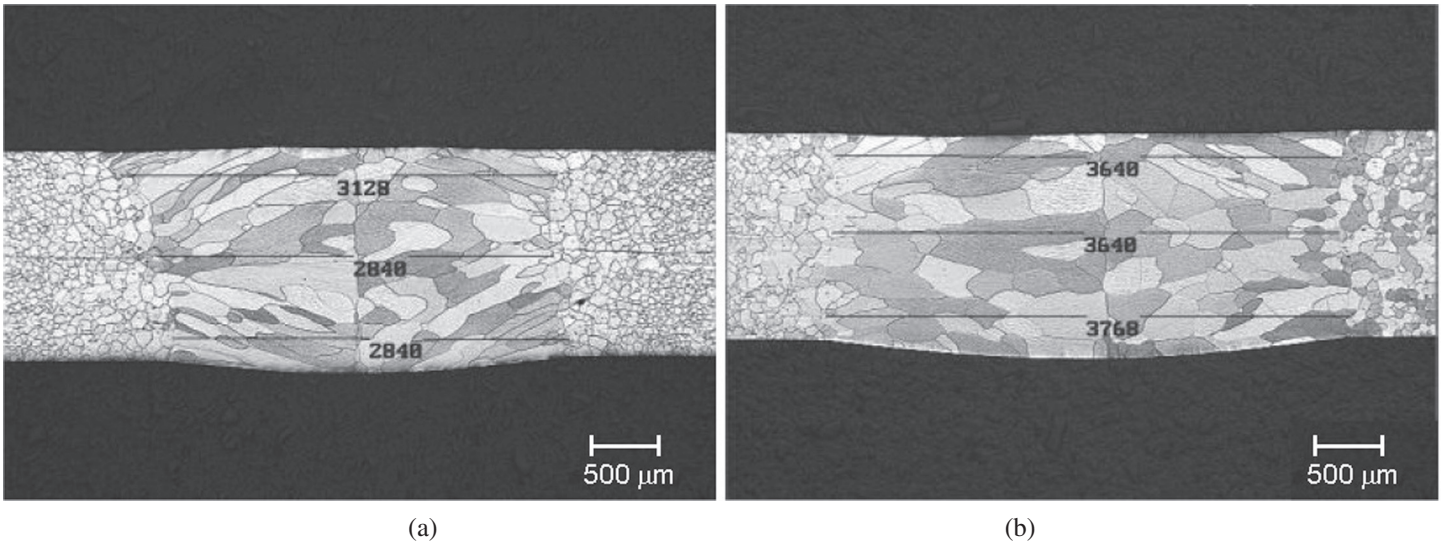


Figura 3. Seções transversais dos cordões de solda GTAW com (a) baixa e (b) alta energia. As linhas horizontais com números mostram medidas da largura dos cordões em diferentes profundidades destes.

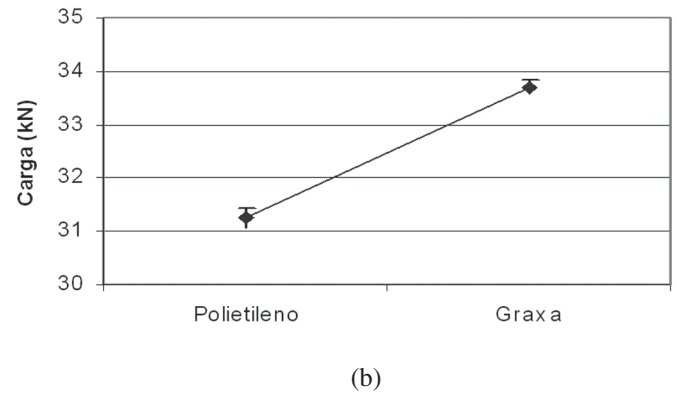
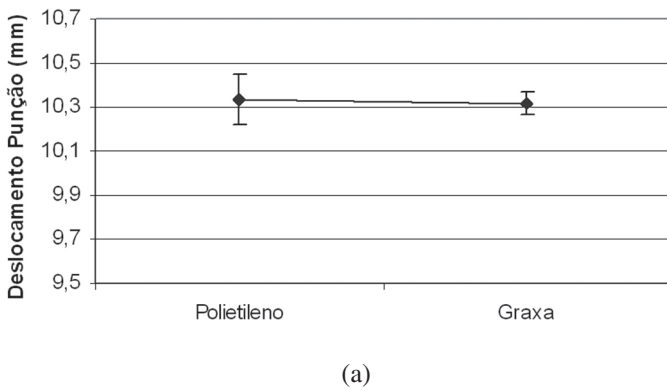


Figura 4. Resultados Erichsen do metal base: (a) deslocamento do punção e (b) carga.

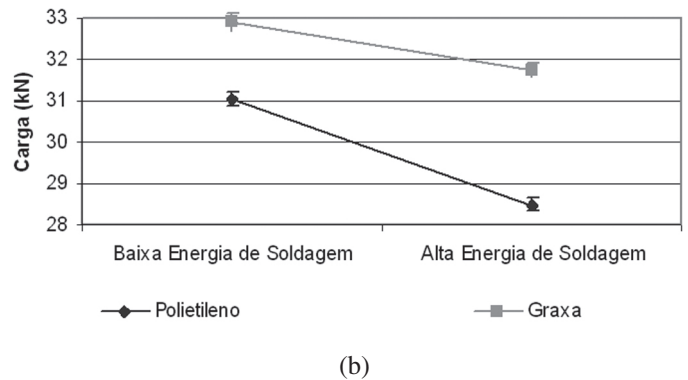
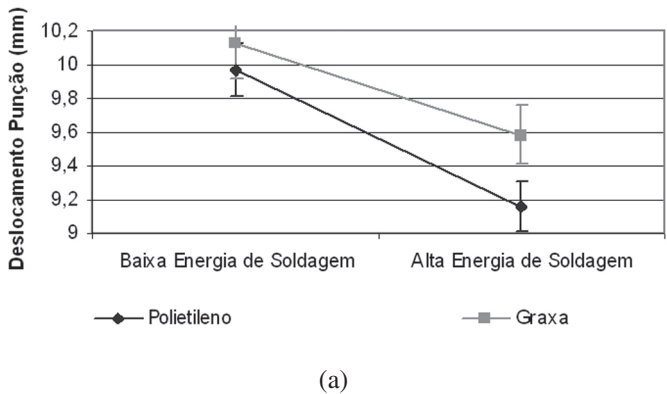


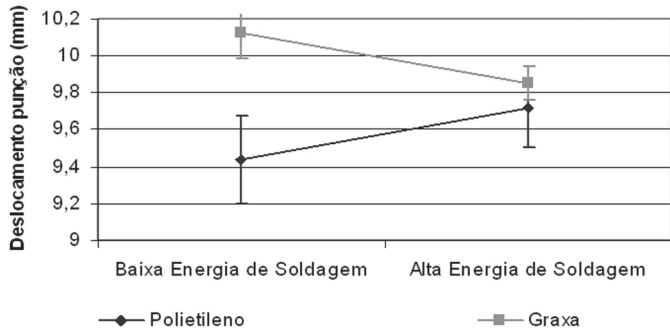
Figura 5. Resultados Erichsen para a condição punção contra raiz (a) deslocamento do punção e (b) carga.

na primeira etapa. Para o teste de tração, corpos de prova com comprimento útil de 40 mm e largura de 5 mm foram retirados do mesmo cordão ensaiado em Erichsen. Os corpos de prova para dobramento, com dimensões de 22x100 mm, foram ensaiados de modo a gerar esforços de tração na face da solda.

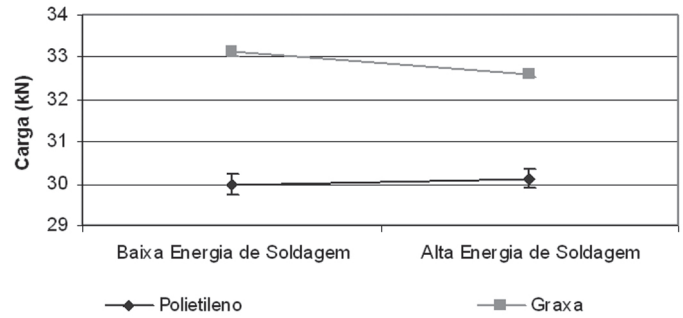
3. Resultados e Discussão

3.1. Primeira Etapa

Seções transversais dos cordões obtidos com o processo GTAW podem ser vistas na Figura 3. Como esperado, podem-se observar a maior largura e o maior tamanho de grão da solda feita com maior energia.



(a)



(b)

Figura 6. Resultados Erichsen para a condição punção contra face (a) deslocamento do punção e (b) carga.

A Figura 4 mostra os resultados de deslocamento do punção e carga para o metal base. Não há uma diferença significativa 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. Em corpos de prova soldados, os resultados dos ensaios Erichsen mostrados na Figura 5 para o punção contra a raiz indicam resultados mais favoráveis para os testes 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. Além disto, o maior tamanho de grão destas soldas pode ter sido um fator adicional por tender a aumentar a fragilização deste material. Ainda na Figura 5, comparando-se o tipo de lubrificação, observam-se maiores valores Erichsen para os ensaios com lubrificação por graxa. A Figura 6 confirma estes resultados. Estes resultados devem estar ligados à deformação mais localizada na região da solda nos ensaios com lubrificação com polietileno. As Figuras 5 e 6 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

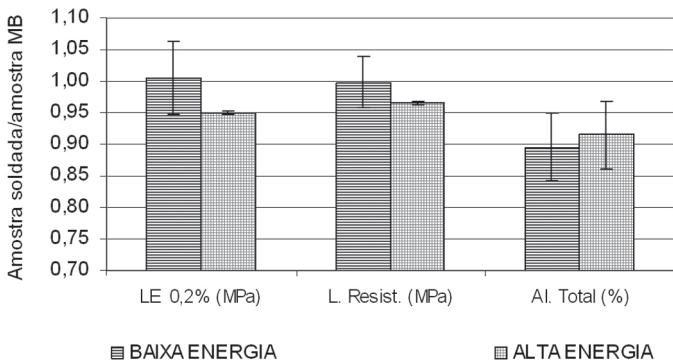


Figura 7. Razão entre propriedades mecânicas dos corpos de prova soldados sobre o metal base.

dobramento foi realizado na raiz e na face da solda. A Figura 7 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 8 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 8a). Neste caso, a ruptura ocorre no que se denomina anel crítico. O mesmo não pode ser notado na Figura 8b 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 9). 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.

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 10 e 11 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,

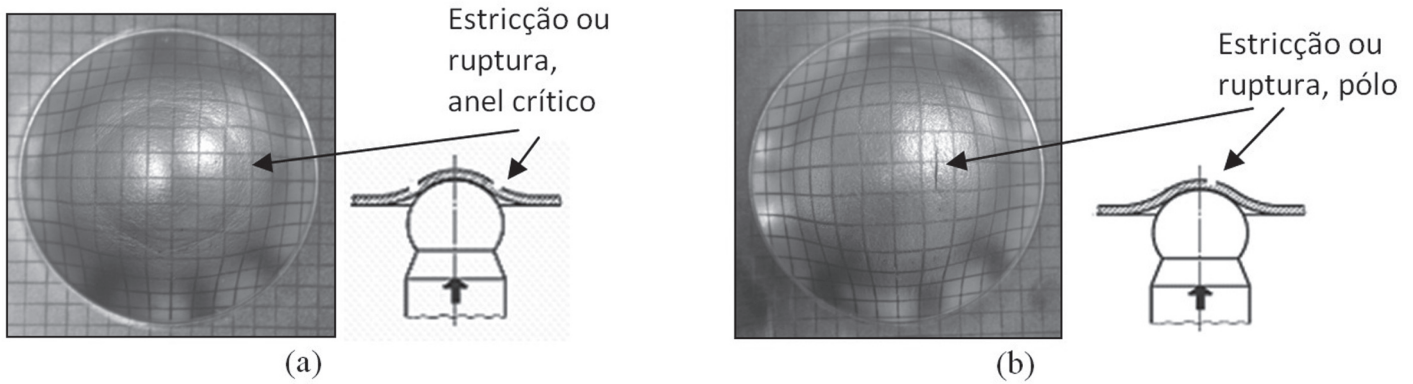


Figura 8. Localização e característica da fratura para corpos de prova não soldados ensaiados com lubrificação (a) graxa e (b) polietileno.

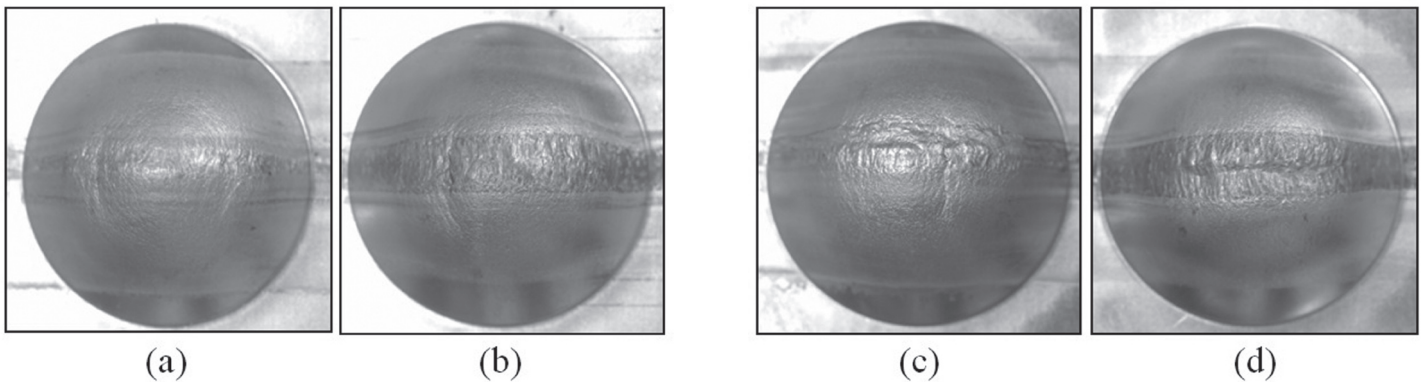


Figura 9. Localização e característica da fratura para corpos de prova soldados ensaiados com lubrificação (a) e (b) graxa e, (c) e (d) polietileno. (Classificação semelhante pode ser observada em Chung et al 1999).

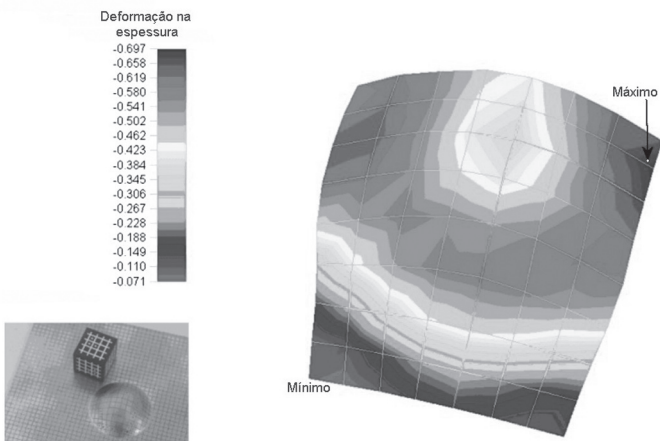


Figura 10. Superfície de deformações gerada no software ASAME. Condição de ensaio: lubrificação com graxa, corpo de prova sem solda.

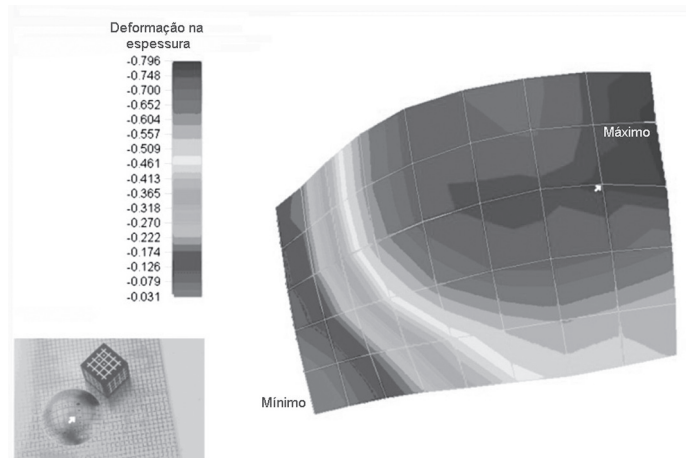


Figura 11. Superfície de deformações gerada no software ASAME. Condição de ensaio: lubrificação com polietileno, corpo de prova sem solda.

enquanto a graxa concentra estas deformações no anel crítico. Os valores das deformações máximas e médias mostrados na Tabela 4 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.

Resultados similares em termos da influência do tipo de lubrificação na distribuição e localização das áreas mais deformadas foram observados para os corpos de prova soldados. Nestes corpos de prova, 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 (Figura 5). A Tabela 5 mostra os valores percentuais de deformações obtidas com o programa.

Tabela 4. 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

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.

Tabela 5. Valores percentuais aproximados das deformações nos corpos de prova soldados. Condição de ensaio: punção contra raiz, alta energia de soldagem.

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

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

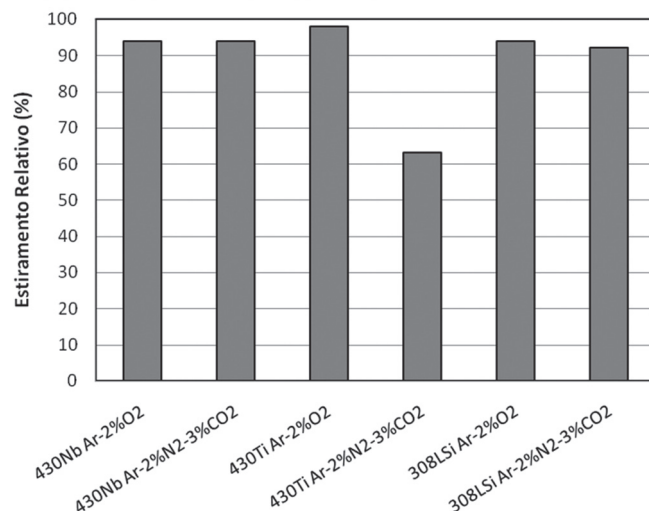


Figura 12. Deslocamento do punção no ensaio Erichsen dos corpos de prova soldados com diferentes combinações de arame e gás de proteção. Os resultados de deslocamento estão mostrados como porcentagem dos resultados do metal base.

lubrificação de polietileno e atuação do punção contra a raiz da solda.

A Figura 12 mostra o desempenho das soldas relativamente ao do metal base. Com exceção dos corpos de prova soldados com o arame 430Ti e Ar2%N2,3%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%N2,3%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.

A Figura 13 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%N2,3%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.

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

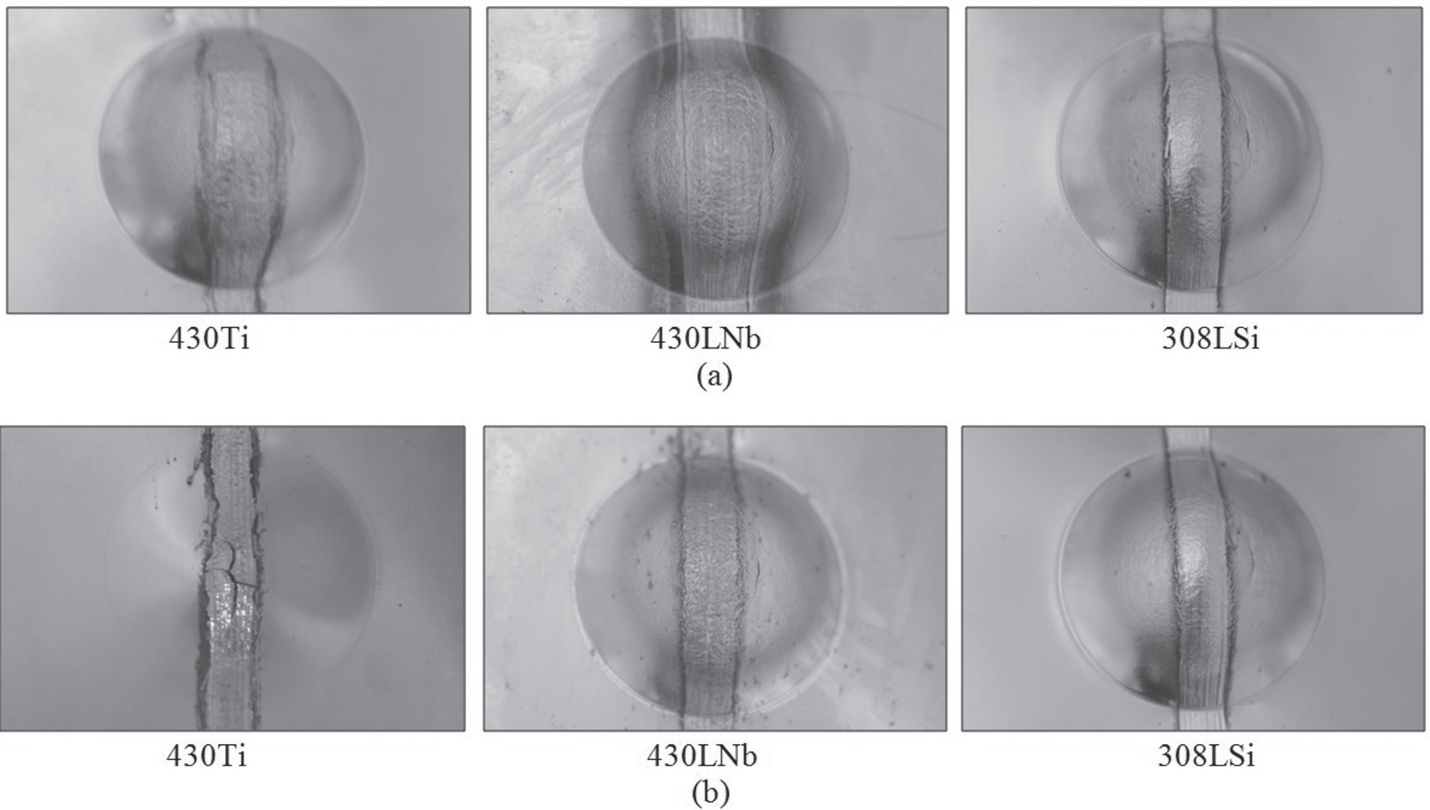


Figura 13. Corpos de prova após ensaio Erichsen (a) gás de proteção $Ar2\%O_2$ e (b) gás de proteção $Ar2\%N_2,3\%CO_2$.

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 $Ar2\%N_2,3\%CO_2$, 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 $Ar2\%N_2,3\%CO_2$, um corpo de prova sofreu fratura aparentemente frágil na ZF.

4. Conclusões

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

- O ensaio Erichsen foi capaz de indicar uma maior fragilidade das soldas realizadas com o arame 430Ti e o gás de proteção $Ar2\%N_2,3\%CO_2$, 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.
- 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.

5. Referências Bibliográficas

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Jae-Do Kim, Ii Na, Chan-Cheol Park, CO₂ Laser Welding of Zinc-Coated Steel Sheets. *KSME International Journal*, Vol. 12 No. 4, pp. 606~ 614, 1998
- [6] 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 (2006) 20–26.