

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE BOBINAS LAMINADAS A FRIO NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS UNIÕES PRODUZIDAS¹

Antonio Marlon Silva²

Andrés Litz³

Rubén Solé⁴

Ricardo Domingues⁵

Resumo

Este trabalho, realizado na empresa Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina, objetivou o estudo da influência da corrente, da pressão, do tempo de aplicação da corrente e da velocidade de soldagem na carga máxima de ruptura da solda feita em chapas laminadas a frio que seguirão para o processo de limpeza eletrolítica. Para o cálculo da importância de cada variável e das interações entre elas, analisaram-se os resultados dos ensaios de tração das soldas com o projeto de experimento, 2^k, o que possibilitou escolher as combinações que fornecessem os resultados mais relevantes. Ensaios de tração realizados em três amostras retiradas dos cordões de solda permitiram medir a carga de ruptura. Foram observadas a microestrutura e a ocorrência de trincas na zona de fusão da solda. Para as chapas de 0,20mm, a velocidade, corrente e a interação corrente-pressão são as variáveis de maior peso. Para a espessura de 0,45mm o maior peso recai na velocidade, no tempo e nas interações velocidade-tempo e pressão-tempo. Este estudo permitirá reduzir o atraso no processo de limpeza eletrolítica e evitará a exposição de operários ao risco de acidentes durante o reposicionamento da chapa dentro do tanque.

Palavras-chave: Soldagem por costura a ponto; análise estatística; laminação a frio.

STATISTICAL ANALYSIS OF WELDING PROCESS VARIABLES' INFLUENCE ON MECHANICAL PERFORMANCE OF UNIONS AMONG COLD ROLLED STRIP STEEL COILS

Abstract

This work, performed at Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina, has aimed the study of the influence of current, pressure, current application interval and welding speed on the maximum rupture load of welded cold rolled sheets to be sent to electrolytic cleaning process. For the calculation of the importance of each variable and the interactions between them, results of tension tests made on the welds had been analyzed with the experimental design technique, 2^k, that made possible choosing the combinations that supplied the most relevant results. Tension tests made on three samples of weld seam had allowed measuring the rupture load. The microstructure and cracking occurrence in the weld fusion zone had been observed. For 0,20mm thick sheets, speed, current and interaction current-pressure are the most significant variables. For 0,45mm thick sheets, the greatest significance is on speed, time and interactions speed-time and pressure-time. This study will allow reducing the delay in electrolytic cleaning process and will prevent the exposition of workers to the risk of accidents during the repositioning of sheets inside the tank.

Keywords: Seam-spot welding; statistical analysis; cold rolling.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP

² Membro da ABM, Graduando em Eng. Metalúrgica na Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG.

³ Engenheiro Eletricista, Setor de Laminação a Frio, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina

⁴ Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Transferência de Tecnologia, Fundação Gorceix / DEPEC, Ouro Preto, MG.

⁵ Membro da ABM, Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto IV na Escola de Minas da UFOP - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, MG. rpdemet@em.ufop.br

1 INTRODUÇÃO

O processo de soldagem é comumente utilizado para a união de metais. Essa união é conseguida aproximando os átomos das partes a serem unidas até distâncias suficientemente pequenas para que haja a formação da ligação metálica e de Van der Waals.⁽¹⁾ Esse processo geralmente ocorre com o elevado aporte térmico devido às altas temperaturas desenvolvidas, o que propicia a deformação local, o que permite a aproximação dos átomos a uma distância onde se tem um mínimo de energia.

A forma de geração de calor costuma nomear os processos de soldagem. No caso da soldagem por resistência (*Resistance Welding*) a geração de calor é devida ao efeito joule que é oposição à passagem da corrente pelas peças a serem soldadas. Esse aquecimento da junta diminui a resistência mecânica do metal, facilitando a deformação local mediante a aplicação de uma pressão.⁽¹⁾

No processo de laminação a frio é utilizada uma emulsão de água e óleo, com o intuito de lubrificação, aumentando a vida útil dos cilindros de laminação, e também para resfriar, uma vez que mais de 90% da energia empregada para a deformação plástica é gasta aumentando a temperatura da chapa. Após a laminação a frio as chapas ficam sujas com óleo, sendo necessário um processo posterior de limpeza, conhecido como limpeza eletrolítica.

A limpeza eletrolítica consiste na passagem de uma chapa em um tanque contendo uma solução aquecida (em torno de 95°C) de hidróxido de sódio, retirando o óleo através da reação de saponificação. A reação é favorecida pela aplicação de corrente na chapa, produzindo assim bolhas de hidrogênio ou oxigênio (a depender da polaridade) na superfície da chapa. Para que esse processo seja contínuo é necessário que o início da bobina que ingressará no tanque de limpeza eletrolítica seja soldada no final da bobina que está sendo processada.

A união dessas bobinas é feita por meio do processo de soldagem por resistência, no qual as chapas sobrepostas são submetidas a uma alta corrente elétrica aplicada por eletrodos.

As principais variáveis do processo são: corrente aplicada, velocidade de soldagem, tempo em que a corrente é aplicada e pressão dos eletrodos sobre a chapa. A corrente deve ser tal que a região da solda produzida atinja a temperatura de fusão. Entretanto valores muito altos de corrente podem danificar os eletrodos uma vez que essa corrente alta gera calor excessivo na superfície de contato eletrodo/chapa.⁽²⁾ Além de danificar os eletrodos, o excesso de corrente também costuma provocar a expulsão de metal da zona fundida, abaixando a resistência mecânica da solda produzida, pois essa expulsão gera vazios no interior da solda.

Para um determinado valor de pressão do eletrodo há um limite superior de corrente para o qual ocorre a expulsão de material, gerando soldas de baixa qualidade, sendo que a máxima resistência é obtida utilizando uma corrente logo abaixo do qual ocorre expulsão de metal fundido. A pressão aplicada, além de posicionar as partes a serem soldadas, deve reter o metal líquido na região da solda, garantindo assim, a união da junta durante a solidificação.⁽³⁾

Mesmo superfícies polidas apresentam irregularidades na superfície, com a ocorrência de picos e vales. Uma baixa pressão aplicada pelos eletrodos faz com que o contato se dê apenas nos picos, aumentando a resistência elétrica devido ao mau contato entre eletrodo e chapa. Mesmo com uma baixa pressão e considerando que as resistências de contato estão em série, a geração de calor é maior na região de contato entre as chapas. Isso porque em geral o eletrodo tem menor dureza do que o metal de base, fazendo com que o contato entre eletrodo e chapa seja melhor

do que o contato chapa/chapa, gerando maior resistência elétrica no contato entre as chapas.⁽¹⁾

O tempo de aplicação da corrente deve ser suficiente para que ocorra a formação da zona de fusão. Esse calor gerado pode ser dado pela equação 1.

Tempos longos de aplicação da corrente dificultam o resfriamento do eletrodo, o que os danifica, reduzindo, assim, sua vida útil.

No caso em que se tem um eletrodo circular em movimento constante é comum o tempo ter relação com a velocidade de deslocamento do eletrodo. Por exemplo, para tempos longos de aplicação da corrente e baixa velocidade tem se cordões largos e compridos, do contrário, tempo pequeno e alta velocidade, tem se cordões pequenos e estreitos, nesse caso as soldas são de baixa resistência mecânica.

$$Q = R \times I^2 \times T \quad (1)$$

em que:

R é a resistência;

I é a corrente aplicada;

T é o tempo no qual a corrente é aplicada.

No processo de soldagem por costura a ponto a velocidade em que o eletrodo circular se move é de grande importância. O aporte térmico é inversamente proporcional a essa grandeza, ou seja, à medida que se aumenta a velocidade de soldagem o calor transferido para a solda é menor. Isso tem implicações, como variações das dimensões dos cordões de solda e, por conseguinte, nas dimensões zona de fusão (largura e espessura). Como a velocidade influencia na zona de fusão, que determina a resistência da solda, a velocidade acaba sendo uma variável determinante no processo de soldagem.

Em linhas gerais, um experimento tem por objetivo responder questionamentos previamente estabelecidos, sendo que uma dada metodologia estatística visa avaliar um experimento de forma mais eficiente.⁽⁴⁾

O planejamento experimental é alcançado fazendo-se todas as combinações possíveis entre os fatores (variáveis) em cada nível desses fatores, sendo que cada combinação é denominada combinação de tratamento. Diferentemente de escolher “uma-variável-de-cada-vez” o planejamento fatorial permite identificar e quantificar as possíveis interações entre as variáveis, no caso de elas não influenciarem separadamente uma determinada resposta.⁽⁵⁾ O planejamento fatorial é uma ferramenta amplamente utilizada para detectar e estimar essas interações, quando elas existem.⁽⁴⁾

O número de experimentos a serem realizados é determinado pelo número de fatores e o número de níveis em que eles estão variando. Se houver n_1 níveis para a primeira variável, n_2 níveis para a segunda variável, ..., e n_k níveis para a variável K ter-se-á que o número de combinações e, portanto, o número de experimentos, é igual a $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k$.⁽⁶⁾ Industrialmente o experimento que tem ampla aplicação é o experimento com três fatores variando cada um em dois níveis (2^3) porque isso permite avaliar separadamente os efeitos individuais e os efeitos de interação dos fatores com poucos tratamentos para cada fator em questão (2).⁽⁷⁾

Neste trabalho foi adotado o planejamento fatorial completo 2^4 , ou seja, quatro fatores variando em dois níveis, sendo necessários 16 testes para cada espessura de chapa, nesse caso dois valores de espessura, totalizando 32 testes.

2 METODOLOGIA

Na determinação da carga máxima de ruptura do cordão de solda foi utilizada uma máquina de tração de 10T de capacidade.

As chapas retiradas para os testes de soldagem são chapas de aço baixo carbono e com condições de limpeza similares.

Os ensaios foram realizados soldando-se chapas sobrepostas. As condições de soldagem para cada variável seguiu a matriz de experimentos, prevista pelo projeto experimental.

Foram retiradas três amostras de cada cordão de solda para ensaios de tração, sendo que o valor usado no cálculo do projeto experimental foi uma média:

$$\frac{\text{(Carga máxima)}}{\text{(comprimento da solda tracionada)}} \times \text{(comprimento total do cordão de solda)}$$

A metalografia foi feita com soldas cortadas ao meio, no sentido da largura da chapa. Para o ataque metalográfico usou-se nital 2%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado, as chapas foram sobrepostas e soldadas, formando, entre elas, um cordão de solda. Cada cordão de solda tem um determinado número de pontos, com determinado comprimento. A carga total é obtida pela equação 2.

$$[P] = \left(\frac{(P/X)_M + (P/X)_C + (P/X)_O}{3} \right) \times \left(\frac{X_M + X_C + X_O}{3} \right) \times N \quad (2)$$

em que: [P] é a carga máxima do cordão de solda inteiro;
 X é o comprimento do ponto de solda tracionado;
 N é número de pontos;

Os índices M, C e O são respectivamente lado motor, centro e lado operador.

As variáveis e seus níveis estão apresentados pela Tabela 1.

Tabela 1- Variáveis e seus respectivos níveis

		A Corrente (em % de potência)	B Pressão (bar)	C Velocidade (mm/s)	D Tempo (s)
Chapa 0,22mm	Nível baixo (1)	54	1	42	0,5
	Nível alto (2)	56	2	46	1
Chapa 0,45mm	Nível baixo (1)	58	1	25	0,3
	Nível alto (2)	62	2	33	0,5

Os resultados dos 16 ensaios de tração realizados para duas chapas de 0,20mm, assim como os resultados dos 16 ensaios com as chapas de 0,45mm estão na Tabela 2. Nessa tabela, as letras em par, trio ou todas as quatro juntas indicam interação entre as variáveis indicadas pelas respectivas letras, conforme notação estabelecida na Tabela 1.

Tabela 2. Resultados dos testes de tração (Notação de Taguchi duplicada)

Ensaio	A	B	C	D	A B	A C	A D	B C	B D	C D	AB C	AB D	AC D	BC D	ABCD	Carga máxima (kgf) Chapa 0,20mm	Carga máxima (kgf) Chapa 0,45mm
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9412,62	19352,43
2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	2	2	2	8471,52	20550,80
3	1	1	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	2	8093,75	19087,26
4	1	1	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1	8416,24	18111,55
5	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	2	2	1	2	2	9092,565	17228,46
6	1	2	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	2	1	1	9807,2	24853,74
7	1	2	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	8618,22	16567,63
8	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	9394	16302,59
9	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	2	9814,32	21201,99
10	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	2	1	8658	22492,46
11	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	8272,8	19084,78
12	2	1	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	2	1	2	8105,4	17558,74
13	2	2	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	1	8492,4	20345,59
14	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	8737,92	25477,96
15	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	7440	16217,47
16	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	7113,6	17870,92

Com esses resultados de tração é possível obter a Tabela 3, a qual fornece os valores dos efeitos das variáveis. O efeito de uma determinada variável é calculado pela diferença entre a média dos resultados de tração com essa variável no nível (2) e a média dos resultados com ela no nível (1).

Essa tabela mostra que todas as quatro variáveis têm influência negativa na carga máxima de ruptura das soldas para o primeiro experimento (chapas de 0,20mm). Já para o segundo experimento somente a pressão e a velocidade tiveram efeito negativo. Entretanto caso exista interação de variáveis é necessária uma análise gráfica. Para tanto se faz necessário o cálculo do peso de cada variável. Os resultados desses cálculos para as variáveis assim como para as interações estão na Tabela 4.

Como se pode perceber, as variáveis de maior importância para o primeiro experimento foram a corrente, a velocidade de soldagem e a interação entre as variáveis corrente e pressão. Nesse trabalho consideraram-se apenas como variáveis e interações de relevância as que obtiveram peso maior que 10%.

Tabela 3- Efeito das variáveis na carga máxima de ruptura das soldas

FATOR NÍVEL	TOTAL	MÉDIA	EFEITO	FATOR NÍVEL	TOTAL	MÉDIA	EFEITO
Experimento com chapas de 0,20mm (1º Experimento)				Experimento com chapas de 0,45mm (2º Experimento)			
A1	71306,115	8913,26	-583,96	A1	152054,47	19006,81	1024,43
A2	66634,44	8329,31		A2	160249,91	20031,24	
B1	69244,65	8655,58	-68,59	B1	157440,02	19680,00	-321,96
B2	68695,905	8586,99		B2	154864,36	19358,04	
C1	72486,545	9060,82	-879,07	C1	171503,43	21437,93	-3837,81
C2	65454,01	8181,75		C2	140800,94	17600,12	
D1	69236,675	8654,58	-66,60	D1	149085,61	18635,70	1766,64
D2	68703,88	8587,99		D2	163218,76	20402,35	
(AB)1	66178,05	8272,26	698,06	(AB)1	157013,99	19626,75	-215,45
(AB)2	71762,505	8970,31		(AB)2	155290,39	19411,30	
(AC)1	67715,705	8464,46	313,64	(AC)1	152717,34	19089,67	858,71
(AC)2	70224,85	8778,11		(AC)2	159587,03	19948,38	
(BC)1	68922,28	8615,29	12,00	(BC)1	150556,29	18819,54	1398,98
(BC)2	69018,275	8627,28		(BC)2	161748,09	20218,51	
(AD)1	67832,075	8479,01	284,55	(AD)1	155635,85	19454,48	129,08
(AD)2	70108,48	8763,56		(AD)2	156668,52	19583,57	
(BD)1	70646,21	8830,78	-418,98	(BD)1	163231,68	20403,96	-1769,87
(BD)2	67294,345	8411,79		(BD)2	149072,69	18634,09	
(CD)1	69841,145	8730,14	-217,72	(CD)1	147972,27	18496,53	2044,98
(CD)2	68099,41	8512,43		(CD)2	164332,1	20541,51	
(ABC)1	69504,88	8688,11	-133,65	(ABC)1	155240,53	19405,07	227,91
(ABC)2	68435,675	8554,46		(ABC)2	157063,84	19632,98	
(ABD)1	69403,37	8675,42	-108,27	(ABD)1	156210,29	19526,29	-14,53
(ABD)2	68537,185	8567,15		(ABD)2	156094,09	19511,76	
(ACD)1	69424,145	8678,02	-113,47	(ACD)1	154267,7	19283,46	471,12
(ACD)2	68516,41	8564,55		(ACD)2	158036,68	19754,58	
(BCD)1	70351,92	8793,99	-345,41	(BCD)1	159341,51	19917,69	-797,33
(BCD)2	67588,635	8448,58		(BCD)2	152962,87	19120,36	
(ABCD)1	68791,08	8598,89	44,80	(ABCD)1	158679,11	19834,89	-631,73
(ABCD)2	69149,475	8643,68		(ABCD)2	153625,27	19203,16	

Tabela 4. Tabela de análise do peso e da variância

Experimento com chapas de 0,20mm						Experimento com chapas de 0,45mm					
FONTE	SC	GL	CM	EFEITOS	PESO (%)	FONTE	SC	GL	CM	EFEITOS	PESO (%)
A	1364034,21	1	1364034,20	583,96	15,7	A	4197824,15	1	4197824,15	1024,43	3,5
B	18820,07	1	18820,07	68,59	0,2	B	414626,68	1	414626,68	321,96	0,3
C	3091034,28	1	3091034,20	879,07	35,5	C	58915184,72	1	58915184,72	3837,81	48,5
D	17741,91	1	17741,91	66,60	0,2	D	12484119,62	1	12484119,62	1766,64	10,3
AB	1949133,60	1	1949133,6	698,06	22,4	AB	185673,87	1	185673,87	215,45	0,2
AC	393488,04	1	393488,04	313,64	4,5	AC	2949536,82	1	2949536,82	858,71	2,4
AD	323876,23	1	323876,23	284,55	3,7	AD	66650,23	1	66650,23	129,08	0,1
BC	575,94	1	575,94	12,00	0,0	BC	7828529,22	1	7828529,22	1398,98	6,4
BD	702187,44	1	702187,44	418,98	8,1	BD	12529807,74	1	12529807,74	1769,87	10,3
CD	189602,55	1	189602,55	217,72	2,2	CD	16727753,48	1	16727753,48	2044,98	13,8
ABC	71449,96	1	71449,96	133,65	0,8	ABC	207778,27	1	207778,27	227,91	0,2
ABD	46892,28	1	46892,28	108,27	0,5	ABD	843,98	1	843,98	14,53	0,0
ACD	51498,93	1	51498,93	113,47	0,6	ACD	887826,22	1	887826,22	471,12	0,7
BCD	477234,00	1	477234,00	345,41	5,5	BCD	2542944,78	1	2542944,78	797,33	2,1
ABCD	8027,94	1	8027,94	44,80	0,1	ABCD	1596334,68	1	1596334,68	631,73	1,3
TOTAL	8705597,36	15	580373,16		100,0	TOTAL	121535434,40	15	8102362,30		100,0

A variável de maior importância foi a velocidade de soldagem, sendo que ela não teve interação com outra variável. Isso nos permite analisar o efeito dela separadamente das outras. Voltando à Tabela 3 vemos que a velocidade de soldagem tem efeito negativo, ou seja, a mudança dessa variável do nível 1 para o nível 2 provoca uma diminuição na média da resposta da solda ao ensaio de tração. Isso se deve ao fato de que o aumento da velocidade de soldagem diminui o aporte térmico, produzindo pontos de solda finos e de pouca consistência. Como a corrente apresenta interação com a pressão, será feita uma análise gráfica dessas duas variáveis. Esta análise é apresentada na Figura 1.

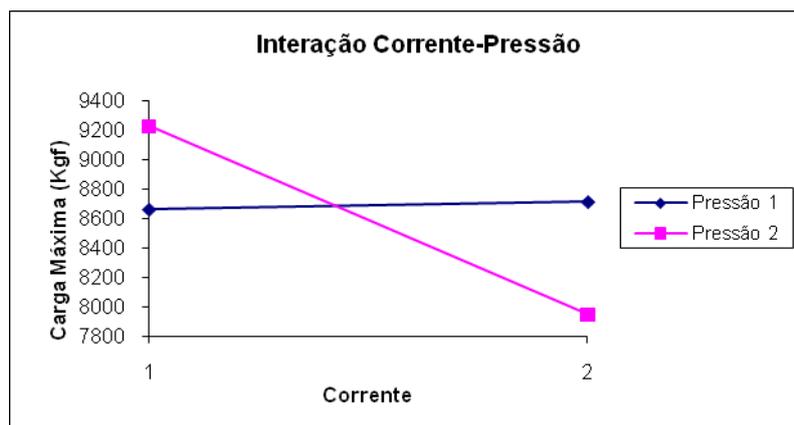


Figura 1- Interação entre corrente e pressão.

Com a pressão em nível baixo, a corrente pouco influencia na carga máxima de ruptura e isso faz com que essa combinação seja vantajosa, pois a corrente é uma variável muito instável no processo. Já para a pressão em nível 2 a corrente tem um efeito negativo visto que o aumento na corrente provoca decréscimo na resposta à tração da solda. Isso pode ser explicado pela expulsão de material da zona fundida, porque uma corrente em nível alto produz mais material líquido na zona fundida, sendo que uma pressão elevada projetaria facilmente esse material para fora. Essa expulsão acarreta uma menor resistência da solda.

Uma forma de averiguar realmente se essas variáveis e a respectiva interação têm grande importância no processo é variar os níveis e alterar, por exemplo, a espessura das chapas soldadas. Com algumas mudanças nas condições foram obtidos os resultados do segundo experimento, para o qual foram soldadas chapas de 0,45 mm. Os níveis das variáveis estão na Tabela 1.

É importante destacar que a diferença na ordem de grandeza na carga máxima de ruptura do segundo experimento para o primeiro não se deve às mudanças nos níveis das variáveis de soldagem. O aumento na carga máxima das soldas se deve principalmente ao aumento na espessura.

Os valores do efeito e a análise da interação permitem concluir que a combinação que fornece a maior carga máxima é pressão alta, corrente baixa e velocidade baixa. Observando a tabela 2 vemos que com essa combinação obtemos o segundo maior valor para a carga máxima, sendo que o maior difere desse por cerca de 10Kgf, não invalidando a suposição. Por outro lado poderíamos escolher uma combinação tal que a corrente (variável muito instável durante a soldagem) não tivesse tanta influência no processo. Por exemplo, poder-se-ia escolher trabalhar com pressão baixa. Além disso, a pressão baixa permite obter um valor de carga máxima para o qual não exista risco de ruptura.

Pela Tabela 4, as variáveis de maior importância são a variável C (velocidade de soldagem) com 48,5%, a interação CD (Velocidade-Tempo) com 13,8% e a

interação BD (Pressão-Tempo) com 10,3%, além da própria variável tempo (D), isoladamente, também com 10,3%. Como essas variáveis de maior peso têm relação de paralelismo entre elas, mais uma vez a análise gráfica se faz necessária. A Figura 2 mostra a interação entre a velocidade e o tempo.

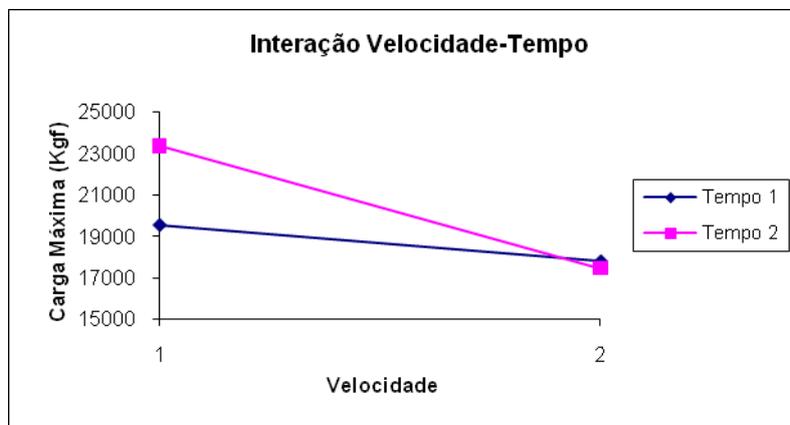


Figura 2- Interação entre as variáveis velocidade e tempo.

Pelo gráfico da Figura 2 veremos que a velocidade, no nível baixo de tempo (1), tem pouca influência na carga máxima. A maior influência da velocidade é quando o tempo se encontra no nível alto (2). No nível 2 de tempo, a velocidade tem efeito negativo, ou seja, neste nível de tempo ao se aumentar a velocidade do nível 1 para o nível 2 há uma diminuição de aproximadamente 6000kgf na carga máxima que o cordão de solda suporta. Um tempo longo de aplicação de corrente poderia contribuir para um aumento da resistência à tração da solda, caso o processo de soldagem fosse o de solda-ponto, com pontos produzidos individualmente. Porém, no processo de solda-costura, aqui empregado com a utilização de um disco, um aumento na velocidade de soldagem obviamente produz uma redução do tempo de aplicação de corrente em cada ponto produzido. Assim é necessário o estudo combinado dos dois efeitos.

Com um tempo maior há mais calor transferido por efeito joule. O tempo num nível alto, aliado a uma velocidade baixa, forma pontos de solda relativamente grandes sem produzir pontos com zona de fusão estreita. Já para a combinação de tempo alto com velocidade alta há uma diminuição de carga máxima do cordão de solda formado. Isso pode ter explicação no comprimento e na largura dos pontos. Essa combinação produz pontos de solda de maior comprimento, porém estreitos, afetando negativamente a resistência à tração. Outra decorrência diz respeito ao resfriamento da zona de fusão. Diferentes tempos de contato do eletrodo de cobre com a zona de fusão produzem distintas velocidades de resfriamento, alterando a microestrutura e, portanto, afetando a carga máxima.

A interação da pressão e do tempo é mostrada na Figura 3. Essa interação mostra que a influência da pressão na resistência do cordão de solda muda drasticamente com a mudança do nível do tempo de aplicação da corrente. Para o tempo em nível baixo, ao passar a pressão do nível 1 para o 2 a carga máxima diminui. Já para o tempo em nível alto a pressão tem efeito positivo sendo que a o aumento da pressão aumenta a carga máxima de ruptura visto que o aumento da pressão, para esse nível de tempo alto, melhora o contato dos eletrodos com a chapa, e também se retém o material fundido na zona de fusão.

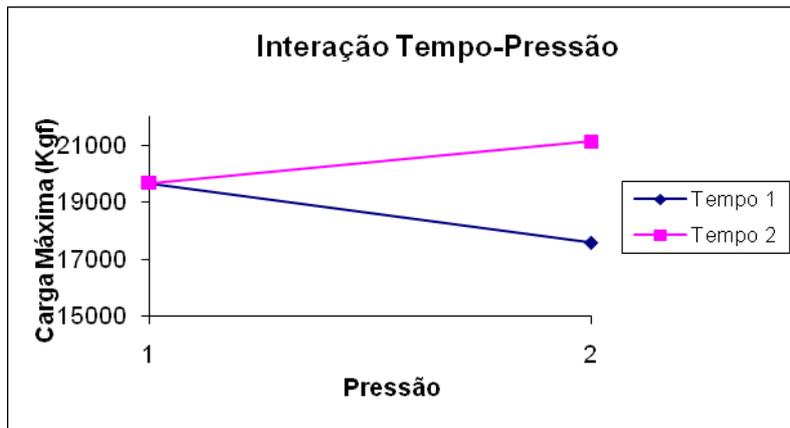


Figura 3- Interação entre as variáveis pressão e tempo.

Pelo exposto, a melhor combinação seria tempo longo de aplicação da corrente, pressão alta e velocidade de soldagem baixa. Ao analisar a Tabela 2 comprova-se isso, ou seja, os dois maiores valores de carga máxima referem-se a essa combinação.

A análise metalográfica permite observar zonas com má união assim como diferenciar o tamanho de grão para diferentes condições de soldagem. As Figuras 4 e 5 mostram duas metalografias, uma de um ponto de solda com corrente alta (Figura 4) que apresenta grãos menores na zona de fusão e a outra (Figura 5) com grãos maiores, que ocorreu em uma corrente elevada. No ensaio de tração o desempenho mecânico da solda de grãos menores foi melhor em relação à amostra com granulação grosseira, como prevê a relação de Hall-Petch.

Essas metalografias foram preparadas a partir de amostras com chapas de 0,20mm soldadas. A amostra com corrente baixa foi retirada do ensaio n.º 5 da matriz de experimentos (Tabela 2) e a amostra com corrente alta foi retirada do ensaio n.º 16.

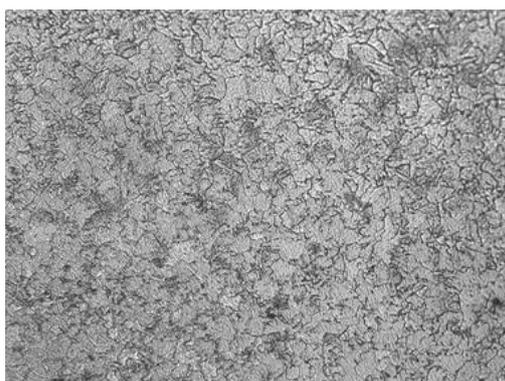


Figura 4 - Ensaio 5 - Grãos menores.
 Ataque nital 2%. 640X.



Figura 5 - Ensaio 16 - Grãos maiores.
 Ataque nital 2%. 640X.

4 CONCLUSÕES

Foram obtidas as melhores combinações entre os diferentes níveis das variáveis do processo de soldagem de chapas laminadas a frio (corrente, pressão, tempo e velocidade).

Para o primeiro experimento, as variáveis de maior importância foram a corrente, a velocidade e a interação corrente-pressão, sendo que a melhor combinação prevista pelo projeto experimental (pressão alta, corrente baixa e velocidade baixa) corresponde a uma das maiores cargas máximas obtidas no ensaio de tração, e com essas variáveis em seus níveis opostos forneceu valores baixos de carga máxima de ruptura. A diferença de carga máxima obtida foi evidenciada, pela metalografia, como sendo uma das causas das diferentes microestruturas presentes na zona de fusão. Na amostra 5, que apresentou alto valor de carga máxima, os grãos mostraram-se de menor tamanho, enquanto na amostra 16 (baixo valor de carga de ruptura) observaram-se grãos grosseiros. Esse crescimento de grão é devido ao aumento de corrente, ou seja, não é conveniente proceder desta maneira, pois um aumento de corrente, além de produzir grãos grosseiros, que produz menor valor de carga máxima, desgasta mais o eletrodo.

No segundo experimento, espessura 0,45mm, as variáveis de maior importância foram a velocidade, o tempo e as interações CD (velocidade-tempo) e BD (pressão-tempo). Pelo projeto de experimento a melhor combinação é pressão alta, tempo alto e velocidade baixa, pois com essas combinações é que se obtiveram os maiores valores de carga máxima.

Além das combinações que fornecem as variáveis e interações de maior significância, é possível saber também em quais níveis uma determinada variável que é instável (altamente dependente das condições da chapa, como é o caso da corrente) não mostre ter grande influência na resistência mecânica das soldas produzidas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Ternium Siderar, unidade de San Nicolás, Argentina, na pessoa do seu Gerente Geral da Laminação, Sr. Jorge Von Bergen, pela disponibilização de suas instalações e equipamentos e pela concessão e tutoria do estágio ao Graduando Antonio Marlon Silva, encarregado da coleta de dados que deu origem a esta contribuição. Esta tutoria foi conduzida pelo Eng. Daniel Oldani, com a participação, do Eng. Leandro Alberto Iannelli. Agradecem, também, ao Departamento de Pesquisa e Educação Continuada da Fundação Gorceix, Ouro Preto, MG, Brasil, por possibilitar a efetiva orientação do Graduando, realizada pelos demais autores deste trabalho. Agradecem, ainda, ao IAS – Instituto Argentino de Siderurgia, nas pessoas do Eng. Wadi Chiapparoli e da Eng. Daniela Cavaleri, pelo apoio na realização dos ensaios de tração.

REFERÊNCIAS

- 1 MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. Apostila de Soldagem I “Introdução aos Processos de Soldagem”, Universidade Federal de Minas Gerais-DEMET, 2000.
- 2 WELDING HANDBOOK, Vol. 2: Welding Process, 8ª Ed. International Standard Book. American Welding Society, 1998.

- 3 WOLFF, M. A.; Dissertação de Mestrado: “Soldabilidade Dos Aços DUAL-PHASE 600 e 800 Via Processo de Soldagem a Pontos Média Freqüência Corrente Contínua (MFDC) e Corrente Alternada”. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- 4 FONSECA, V. O. Dissertação de Mestrado: “Envelhecimento de Pelotas de Minério de Ferro com Diferentes Basicidades e Teores de MgO”, Ouro Preto, REDEMAT, 2003.
- 5 BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters. New York, John Wiley & Sons, 1978, P. 306-324.
- 6 JURAN, J. M. Juran’s Quality Control Handbook. 4th ed. New York, McGraw-Hill, 1988, P. AII.20-25.
- 7 OTAVIANO, M. M. Dissertação de Mestrado: “Estudo Fenomenológico da Deposição de Carbono no Ferro Esponja Produzido a Partir de Pelotas de Minério de Ferro”, Ouro Preto, REDEMAT, 2003.