

## OTIMIZAÇÃO DE SOLDAGEM FCAW EM AÇOS RESISTENTE A ABRASÃO DA CLASSE 450HB\*

Jarinson Ribeiro Rodrigues<sup>1</sup>  
Vagner Machado Costa<sup>1</sup>  
Carla Ten Cater<sup>2</sup>  
Telmo Roberto Strohaecker<sup>3</sup>

### Resumo

Os aços resistentes à abrasão da classe 450 HB foram desenvolvidos para operações em ambientes onde ocorre desgaste excessivo, sendo estes aços martensíticos de elevada dureza e uma difícil soldabilidade. Este trabalho propõe-se a otimizar os parâmetros de soldagem do processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) através da análise do projeto de experimentos (*Design of Experiments - DOE*) utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*). Após a determinação dos parâmetros de soldagem ideais, foi realizado a caracterização mecânica e metalúrgica de uma junta soldada com estes parâmetros a fim de certificar-se das propriedades da junta com parâmetros de soldagem otimizados.

**Palavras-chave:** Otimização de soldagem; FCAW; Metodologia de superfície de resposta.

### FCAW WELDING OPTIMIZATION ABRASION RESISTANT STEELS CLASS 450 HB

### Abstract

The abrasion resistant steels of 450HB series are designed for operation in environments where there is excessive wear, which are martensitic steels of high hardness and difficult weldability. This work aimed to optimize the welding process parameters of FCAW (Flux Cored Arc Welding) through the design of experiments (DOE) using the Response Surface Methodology (RSM). After determination of the optimal welding parameters, it was carried out the mechanical and metallurgical characterization of a welded joint with these parameters in order to ensure the properties of the joint with optimized welding parameters.

**Keywords:** Optimization welding; FCAW; Response surface methodology.

<sup>1</sup> Mestre, Bolsista de Doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Dra., Professora Titular do Departamento de Engenharia Produção, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas classes de aços de alta resistência nas últimas décadas conseguiu-se um aprimoramento das propriedades mecânicas desses materiais, com isso, pode-se reduzir o peso dos veículos devido à redução da espessura das chapas utilizadas no projeto destes produtos, sem redução da resistência mecânica necessária. Este novo designe, possibilitou o aumento da capacidade de transporte de carga, proporcionando uma redução de custos de transporte quando comparado a um veículo manufaturado com aço estrutural convencional. No entanto, o entendimento dos fatores que possam interferir na produção e na qualidade do produto final é importante para o seu correto desenvolvimento, sendo o processo de soldagem um dos pontos cruciais[1].

Inúmeros aspectos associados ao desenvolvimento do processo de soldagem com arame tubular (*Flux Cored Arc Welding - FCAW*) têm sido publicados na literatura e muitos destes abordam o processo de soldagem em diferentes posições, aumento de produtividade, diferentes parâmetros de soldagem e modos de transferências metálicas na soldagem de aços de alta resistência.

Em virtude de algumas limitações dos trabalhos anteriores, o presente trabalho tem como objetivo a otimização do processo de soldagem *FCAW* através da análise do projeto de experimentos (*Design of Experiments - DOE*) utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do projeto de experimentos (*Design of Experiments - DOE*) foi utilizada a Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology – RSM*).

O sequenciamento dos experimentos foi então definido com base no arranjo composto central (*Central Composite Design – CCD*), contendo quatro parâmetros ( $k$ ) em dois níveis ( $2k=2*4=16$ ), oito pontos axiais ( $2k=8$ ) e sete pontos centrais resultando em 31 experimentos e também utilizado por Gomes [2], Nilo [3] e Palani [4]. Sendo o valor (distância codificada entre os pontos centrais e os pontos axiais) referente a quatro parâmetros de entrada de 2,0.

Foi utilizado o software estatístico MINITAB® que utiliza o método dos mínimos quadrados para a obtenção dos coeficientes do modelo.

Os parâmetros de soldagem analisados compreendem a corrente ( $I$ ), tensão ( $V$ ), distância entre o bico de contato e peça (DBCP) e ângulo da tocha (AT). A definição destes parâmetros foi feita através da análise existente na literatura. A Tabela 1 apresenta os parâmetros com os níveis de trabalho.

**Tabela 1** – Parâmetros e seus níveis.

Parâmetros do processo	Unidade	Notação	Níveis dos parâmetros				
			-2	-1	0	+1	+2
CORRENTE	I	I	280	300	320	340	360
TENSÃO	V	V	26	28	30	32	34
ÂNGULO TOCHA	°	AT	-20	-10	0	10	20
DISTÂNCIA BICO CONTATO	mm	DBPC	15	16	17	18	19

As escolhas das respostas de interesse compreendem a largura do cordão (L), penetração (P), reforço (R), diluição (D), taxa de deposição (TD), índice de convexidade (IC), zona afetada pelo calor (ZAC) e a largura da zona afetada pelo calor (LZAC).

Quanto às outras variáveis do processo de soldagem, estas foram tratadas como parâmetros constantes, conforme indica a Tabela 2.

**Tabela 2** – Parâmetros fixos.

Parâmetros	Valores
Metal Base	Classe 450HB
Material de Adição	E 110MC
Espessura do metal base	10 mm
Diâmetro do eletrodo	1,2 mm
Tipo do eletrodo	Arame Tubular
Tipo do gás de proteção	Ar +15% CO <sub>2</sub>
Vazão do gás de proteção	15 L/min
Velocidade de Soldagem	7 mm/min

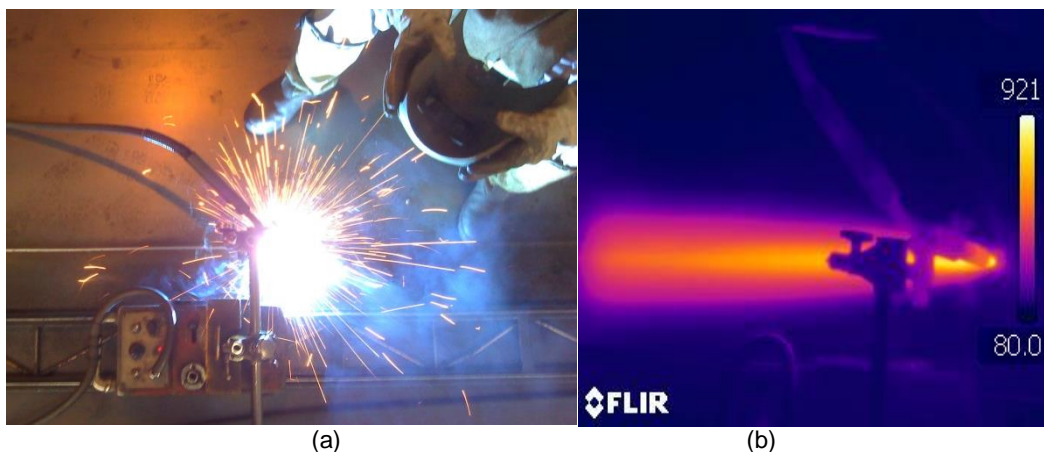
O material utilizado neste trabalho foi um aço resistente a abrasão da série 450 HB com dimensões de 150 x 75 x 10 mm. Esse material possui a característica de ser laminado a quente e posteriormente receber o tratamento térmico de têmpera e revenimento, para assim, atingir as propriedades mecânicas necessárias à sua aplicação, como alta dureza e boa tenacidade.

Para realização da deposição dos cordões de solda, optou-se pelo método de soldagem deposição simples, também chamado de *Bead on plate*, realizado através processo de soldagem com arame tubular (*Flux Cored Arc Welding - FCAW*) conforme Figura 1.



**Figura 1** – Processo soldagem deposição simples ou “Bead on plate”

Utilizou-se para a realização do experimento a máquina de solda SUMIG Falcon 510 com alimentação 380 Volts, frequência 50 – 60 Hz e ciclo de trabalho: 500A - 60%, uma máquina semiautomática de soldagem modelo “Tartaruga CG1-30”, conforme Figura 2. (a) e também contou com auxílio de uma termográfica utilizando uma câmera ThermoCam T360 da FLIR® para observar a distribuição do gradiente térmico do calor durante o processo, conforme Figura 2. (b).



**Figura 2.** – (a) Processo Soldagem – FCAW e (b) Câmera Termográfica FLIR®

A Figura 3 descreve o procedimento utilizado para a medição da geometria do cordão onde os corpos de prova foram cortados e suas seções transversais foram devidamente lixadas com lixas grão 200, 400,600 e 1000 em seguida polidos com alumina para posterior ataque com Nital 3%.

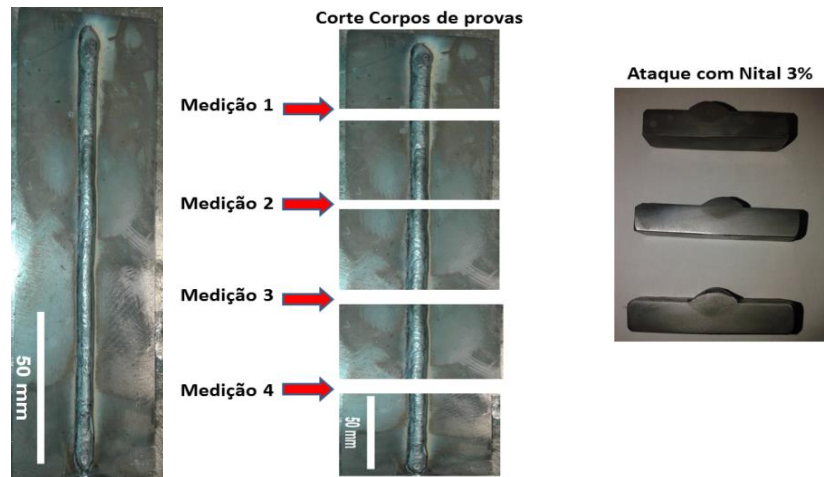


Figura 3. Procedimento para medição da geometria do cordão.

## 2.1 Registro da Diluição (D)

O percentual de diluição foi então calculado dividindo-se a área de penetração pela área total, conforme Equação (1).

$$\text{Diluição} = \frac{\text{Área de penetração}}{\text{Área de reforço} + \text{Área de penetração}} \quad \text{Equação (1)}$$

## 2.2 Registro da Taxa de Deposição (TD)

As amostras foram pesadas antes e após a deposição ou processo *Bead on plate*. Foi realizada uma cronometragem do tempo do processo de soldagem ao longo do comprimento da chapa. Com isso, a taxa de deposição do processo foi calculada através das seguintes expressões:

$$\text{Taxa de deposição: } TD = \frac{(m_f - m_i) \cdot 3,6}{t_s} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}] \quad \text{Equação (2)}$$

Com:

$m_i$  – Massa da chapa antes da soldagem [g]

$m_f$  – Massa da chapa depois da soldagem [g]

$t_s$  – Tempo de soldagem [s]

## 2.3 Registro do Índice de Convexidade (IC)

A medida do índice de convexidade, que é uma relação entre reforço e largura do cordão de solda, provê informações importantes a respeito da qualidade da soldagem, pelo fato de ser através desta medida que se tem o conhecimento se a solda apresenta reforço excessivo ou não.

O índice de convexidade foi obtido através da formula:

$$IC = \frac{\text{Reforço}}{\text{Largura}} [\%] \quad \text{Equação (3)}$$

## 2.4 Registro da Zona Afetada pelo Calor (ZAC)

Depois de realizar a preparação metalográfica, os corpos de prova foram analisados no microscópio óptico, após isso, as imagens foram inseridas no programa ImageJ® para binarizar, segmentar e realizar a extensão da área zona afetada pelo calor (ZAC) em mm<sup>2</sup>, como mostrado esquematicamente na Figura 4.

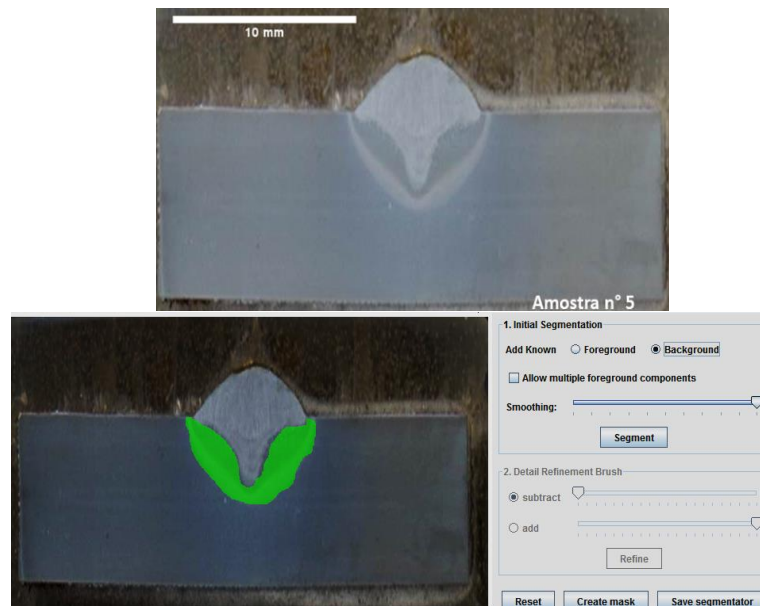


Figura 4. Medidas da ZAC utilizando ImageJ®.

## 2.5 Registro da Largura da Zona Afetada pelo Calor (LZAC)

Sendo a zona afeta pelo calor a região mais crítica de uma junta soldada, pois nela ocorrem inúmeras variações microestruturais devido aos diferentes ciclos térmicos, foi realizado um procedimento para medir a Largura da Zona Afetada pelo Calor (LZAC) em milímetro (mm) utilizando o software Inspetor de Solda®. A Figura 5 descreve o procedimento.

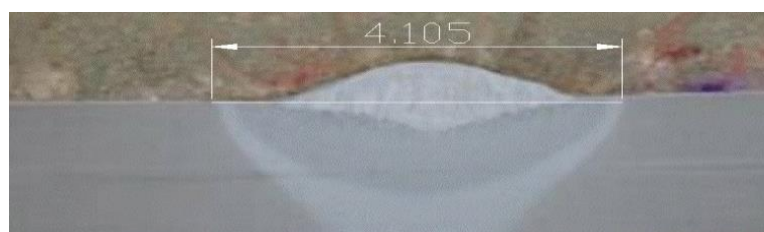


Figura 5. Medidas da LZAC utilizando software Inspetor de Solda®.

## 2.6 Caracterização Mecânica e Metalúrgica da Junta Soldada

Após a otimização do processo de soldagem com arame tubular, foi realizado a soldagem de uma junta (Figura 6) utilizando os parâmetros ótimos e posteriormente foi realizado ensaios para caracterização da junta soldada.

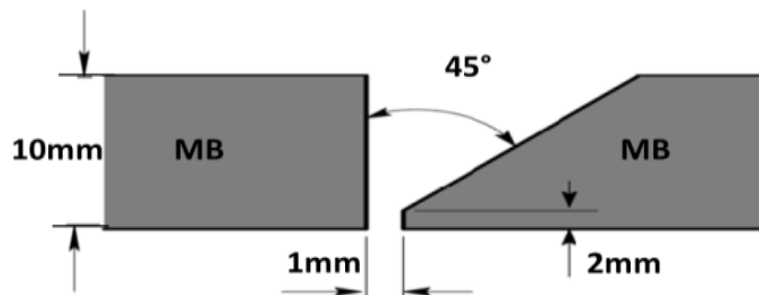


Figura 6. Desenho da configuração da junta utilizada.

Para verificar o perfil de microdureza Vickers da junta otimizada foi utilizado o um perfilômetro automático modelo Tukon 2100 B da fabricante Instron com uma carga de 5,0kgf, aplicada sobre a superfície durante 10 segundos e com distância de 1mm da base da junta soldada e distância entre os pontos de 0,5 mm, conforme Figura 7.

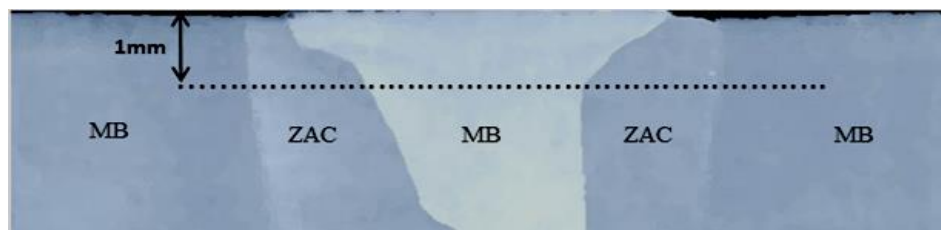


Figura 7. Microdureza da Junta Soldada.

Os ensaios de tração foram conduzidos em um ambiente com temperatura de 25°C, utilizando uma máquina eletromecânica da marca Instron, com uma taxa de carregamento de 0,45mm/min com corpos de prova do metal base e da junta soldada seguindo a norma ASME IX 150/160.

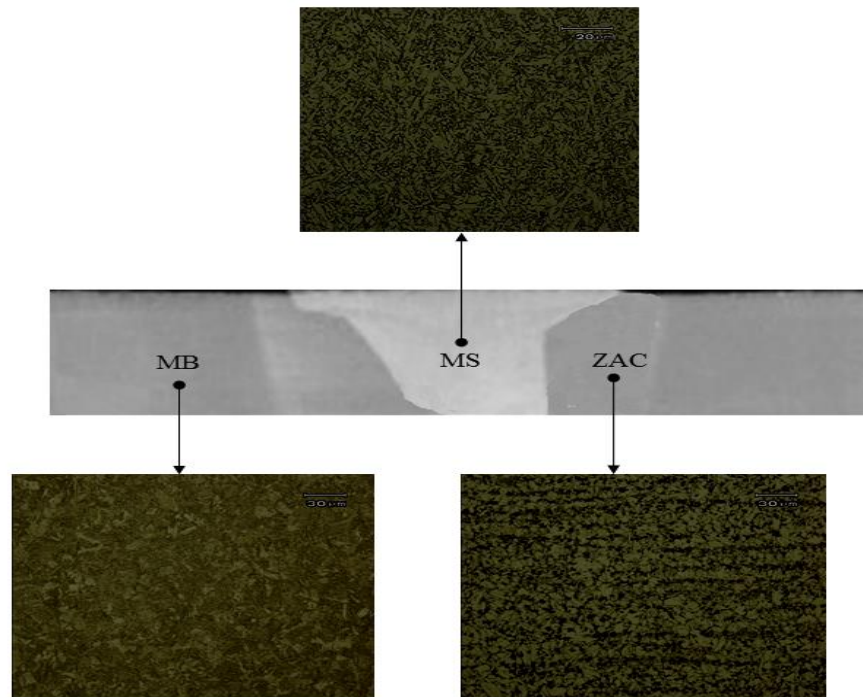
Foram retiradas amostras para realização do ensaio de Charpy-V no metal base (MB) e na ZAC. Os ensaios foram realizados no equipamento Instron Impact modelo SI-102 seguindo a norma ASTM E23 na temperatura na 25°C.

## 2.7 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada

A amostra foi lixada obedecendo à seguinte ordem granulométrica das lixas: 120, 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Logo após, realizou-se o polimento em feltro com pasta de diamante de 4,0 microns e 1,0 micron de granulometria. A superfície, então, foi atacada com Nital 2%, com tempo de imersão de 5 segundos.

As análises das micrografias foram realizadas em um microscópio óptico OLYMPUS modelo BX51M para caracterizar os microconstituintes conforme a classificação do *International Institute of Welding – IIW*.

A Figura 8 mostra as regiões da junta soldada que foram realizadas as micrografias para verificar a ocorrência de microconstituintes frágeis que podem prejudicar a sanidade da solda otimizada.



**Figura 8.** Microestruturas da Junta Solda.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores das respostas medidas estão apresentadas na matriz de experimento com os valores de resposta na Tabela 3, a qual é constituída de 31 testes para o processo de soldagem com arame Tubular.



Tabela 3. Matriz Experimental com os Valores Resposta.

Teste	Parâmetros Codificados				Variáveis de Respostas							
	I	V	AT	DBCP	L	P	R	D	TD	IC	ZAC	LZAC
1	-1	-1	-1	-1	14,96	5,11	2,54	29,40	2,62	17,01	15,74	17,42
2	1	-1	-1	-1	11,83	5,56	3,57	46,12	3,76	30,17	23,22	13,78
3	-1	1	-1	-1	15,39	5,38	2,64	30,98	2,34	17,17	15,54	17,92
4	1	1	-1	-1	12,26	5,53	3,67	47,71	3,68	29,89	24,03	14,28
5	-1	-1	1	-1	11,83	5,96	1,84	46,12	3,76	15,58	23,22	13,78
6	1	-1	1	-1	9,99	8,09	2,87	62,85	5,10	28,71	31,71	10,14
7	-1	1	1	-1	12,26	6,83	1,94	47,71	3,68	15,83	24,03	14,28
8	1	1	1	-1	10,14	7,95	2,97	64,43	5,02	29,25	32,51	11,64
9	-1	-1	-1	1	15,20	5,56	2,60	28,43	2,77	17,10	14,42	17,70
10	1	-1	-1	1	12,07	5,89	3,62	45,15	4,11	30,01	22,91	14,06
11	-1	1	-1	1	15,63	5,20	2,70	30,01	2,69	17,25	15,23	18,20
12	1	1	-1	1	12,50	5,75	3,72	46,74	4,03	29,75	23,71	14,56
13	-1	-1	1	1	12,07	5,89	1,90	45,15	4,11	15,72	22,91	14,06
14	1	-1	1	1	10,95	8,01	2,92	61,88	5,45	26,70	31,39	11,42
15	-1	1	1	1	12,50	5,75	1,99	46,74	4,03	15,95	23,71	14,56
16	1	1	1	1	10,38	6,87	3,02	63,46	5,37	29,09	32,20	11,92
17	-2	0	0	0	15,03	5,72	1,86	30,39	2,99	12,38	15,42	17,51
18	2	0	0	0	10,78	7,79	3,91	63,84	5,10	36,26	32,39	11,23
19	0	-2	0	0	12,10	5,97	2,69	43,94	3,99	22,24	22,29	13,98
20	0	2	0	0	12,87	5,60	2,89	47,11	3,93	22,42	23,90	14,99
21	0	0	-2	0	15,03	5,09	3,37	30,39	2,43	22,42	15,42	17,51
22	0	0	2	0	10,78	8,10	1,97	63,84	5,11	18,26	32,39	13,23
23	0	0	0	-2	12,17	5,99	2,75	45,88	3,67	22,59	23,28	14,18
24	0	0	0	2	12,65	5,97	2,84	44,65	3,57	22,42	22,65	14,74
25	0	0	0	0	12,39	6,60	2,80	45,39	4,29	22,60	23,05	14,43
26	0	0	0	0	12,41	6,62	2,78	45,41	4,27	22,40	23,09	14,49
27	0	0	0	0	12,39	6,58	2,81	45,38	4,29	22,69	23,11	14,47
28	0	0	0	0	12,44	6,59	2,78	45,35	4,26	22,33	23,15	14,43
29	0	0	0	0	12,39	6,57	2,79	45,37	4,25	22,52	23,01	14,46
30	0	0	0	0	12,41	6,59	2,78	45,35	4,28	22,38	23,09	14,47
31	0	0	0	0	12,43	6,60	2,83	45,40	4,29	22,77	23,04	14,45

### 3.1 Modelagem Matemática das Respostas

A Tabela 4 apresenta os coeficientes calculados no modelo para gerar os efeitos principais quadráticos e de interação sobre as variáveis de resposta.

Sendo que os números em **negrito**, na tabela, tiveram efeito significativo com nível de  $\alpha = 5\%$ .

**Tabela 4** – Coeficientes estimados para os modelos quadráticos completos

Coeficiente	Variáveis de Respostas							
	L	P	R	D	TD	IC	ZAC	LZAC
<b>Constante</b>	<b>12,4085</b>	<b>6,5931</b>	<b>2,79524</b>	<b>45,3791</b>	<b>4,2757</b>	<b>22,527</b>	<b>23,0770</b>	<b>14,457</b>
<b>Corrente</b>	<b>-1,1757</b>	<b>0,5045</b>	<b>0,51217</b>	<b>8,3618</b>	<b>0,6135</b>	<b>6,238</b>	<b>4,2007</b>	<b>-1,6117</b>
<b>Tensão</b>	<b>0,1549</b>	<b>-0,0638</b>	<b>0,04852</b>	<b>0,7922</b>	<b>-0,0414</b>	<b>0,147</b>	<b>0,3602</b>	<b>0,2937</b>
<b>Ângulo</b>	<b>-1,1761</b>	<b>0,7245</b>	<b>-0,35043</b>	<b>8,3618</b>	<b>0,6610</b>	<b>-0,826</b>	<b>4,2007</b>	<b>-1,4450</b>
<b>DBCP</b>	<b>0,1500</b>	<b>-0,0647</b>	<b>0,02527</b>	<b>-0,4254</b>	<b>0,1003</b>	<b>-0,099</b>	<b>-0,1980</b>	<b>0,1817</b>
<b>Corrente*Corrente</b>	<b>0,0943</b>	0,0289	<b>0,02218</b>	<b>0,4626</b>	<b>-0,0477</b>	<b>0,5238</b>	<b>0,2168</b>	-0,0745
<b>Tensão*Tensão</b>	-0,0109	<b>-0,2143</b>	-0,00208	<b>0,0665</b>	<b>-0,0690</b>	0,0261	0,0158	-0,0455
<b>Ângulo*Ângulo</b>	<b>0,0949</b>	-0,0111	<b>-0,03173</b>	<b>0,4626</b>	<b>-0,1165</b>	<b>-0,4716</b>	<b>0,2168</b>	0,1755
<b>DBCP*DBCP</b>	-0,0288	<b>-0,1651</b>	-0,00090	0,0005	<b>-0,1535</b>	<b>0,0690</b>	-0,0177	-0,0525
<b>Corrente*Tensão</b>	-0,0804	<b>-0,1298</b>	0,0000	0,0000	0,0125	0,102	0,0625	0,063
<b>Corrente*Ângulo</b>	<b>0,3304</b>	<b>0,3130</b>	0,0000	0,0000	0,0125	-0,040	0,0625	0,188
<b>Corrente*DBCP</b>	0,0446	0,0170	0,0000	0,0000	0,0125	-0,181	0,0625	0,063
<b>Tensão*Ângulo</b>	-0,0804	-0,0173	0,0000	0,0000	0,0125	0,228	0,0625	0,063
<b>Tensão*DBCP</b>	-0,0446	<b>-0,1705</b>	0,0000	0,0000	0,0125	0,116	0,0625	-0,062
<b>Ângulo*DBCP</b>	0,0446	<b>-0,1955</b>	0,0000	0,0000	0,0125	-0,111	0,0625	0,063

A condição otimizada do cordão de solda foi definida utilizando-se a rotina “*Response Optimizer*” do software MINITAB® para maximizar a Taxa de Deposição (TD) e minimizar as demais variáveis de resposta.

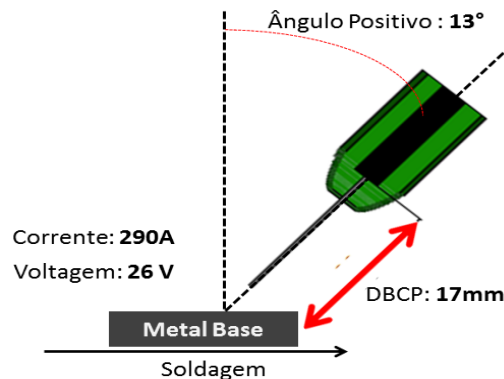
A Tabela 5 utilizando o software MINITAB® apresenta os valores ótimos do projeto experimental realizado, onde se obteve um *Desirability Global* satisfatório de 0,6687.

**Tabela 5** – Resultados Ótimos do Processo de Soldagem

Respostas	Parâmetros de Soldagem				Características Geométricas							
	Corrente	Tensão	Ângulo	DBCP	L	R	P	D	TD	IC	ZAC	LZAC
Valores ótimos	290,5	26,00	13,13	17,14	12,01	1,47	5,09	44,45	3,75	12,62	22,49	14,55
Unidades	A	V	°	mm	mm	mm	mm	%	%	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>

A utilização da técnica de análise de projeto de experimentos utilizando a metodologia de superfície de respostas (MSR) mostrou-se muito eficiente no modelamento das respostas do processo FCAW e todos os modelos apresentado ajustes de  $R^2$  superiores a 90%, o que indica que o estudo inicial de escolha dos fatores de entrada, bem como as faixas de trabalho foram adequados.

A partir dos parâmetros otimizados (Figura 9) realizou a soldagem de uma junta (Figura 6) para caracterização mecânica e metalúrgica e posterior análise dos resultados.

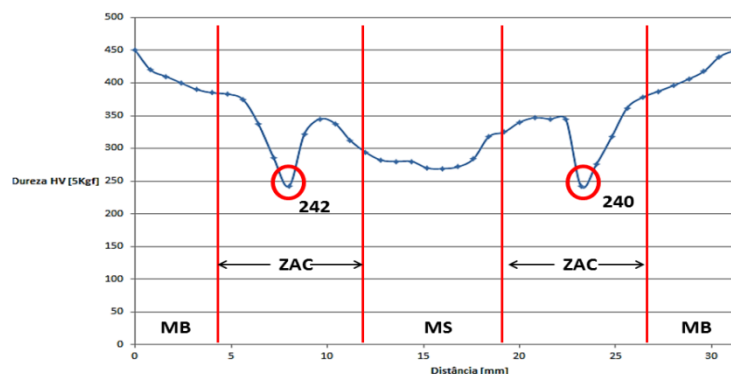


**Figura 9.** Junta com Parâmetros Otimizados.

### 3.2 Caracterização Mecânica

A Figura 10 mostra o perfil de microdureza Vickers obtido sobre o cordão de solda, onde se observa que o metal base apresenta uma dureza média de 450HV, após ocorre uma queda acentuada na zona afetada pelo calor (ZAC) de aproximadamente de 210HV, essa diminuição segundo Mohandas et al. [5] nesta região causa redução da resistência mecânica o que torna essa parte um elo fraco durante qualquer ensaio mecânico.

Do ponto de menor dureza na zona afetada 242HV em direção ao metal de solda (MS) apresentou um pico de dureza na região devido aos grãos grosseiros, já no metal de solda (MS) manteve-se em aproximadamente a média de 280HV.



**Figura 10.** Perfil de Microdureza Vickers.

A Tabela 6 apresenta os valores médios de 5 amostras utilizadas para ensaio de tração, tanto do metal base quanto para a junta soldada.

**Tabela 6.** Resultados Ensaio de Tração

Material	Limite Escoamento (MPa)	Limite Resistência (MPa)
Metal Base	1140	1423
Junta Soldada	535	709

Na Tabela 7 e 8 apresenta-se os resultados obtidos no ensaio de Charpy-V para o MB e ZAC, respectivamente.

**Tabela 7.** Resultado ensaio de Charpy do MB.

Nº da amostra	Energia Absorvida (J)
1	110
2	110
3	112
4	118
5	110
MÉDIA	<b>112</b>

**Tabela 8.** Resultado ensaio de Charpy da ZAC.

Nº da amostra	Energia Absorvida (J)
1	80
2	90
3	80
4	70
5	70
MÉDIA	<b>90</b>

Tomando como referência o valor médio da energia absorvida de 112 J para o metal de base, se verifica que a região da ZAC apresentou uma redução média na energia absorvida de 26% em relação ao metal base, mesmos assim, esses valores estão dentro da faixa recomendada pelo International Institute of Welding-IIW e também condizem com os valores encontrados no trabalho de Costa, 2014 [7]. Foi verificado que todos os corpos-de-prova rompidos nos ensaios apresentavam fratura dúctil.

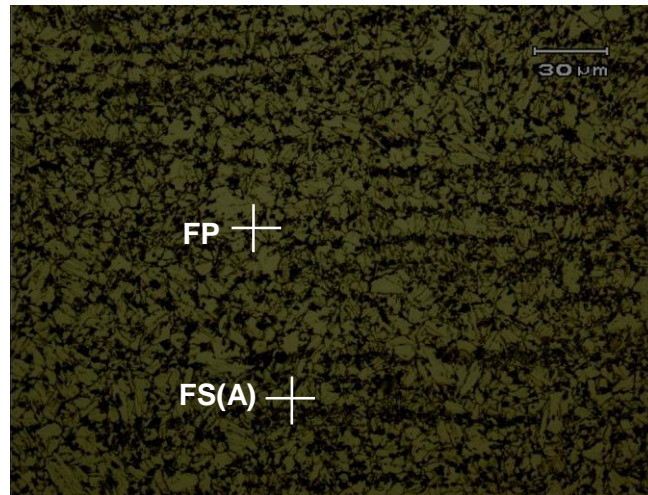
### 3.3 Caracterização Metalográfica da Junta Soldada

A Figura 10 apresenta a microestrutura do metal base (MB). A microestrutura caracteriza-se por apresentar grãos refinados composta por martensita revenida, sendo que o revenido da martensita aumenta sensivelmente a tenacidade e ductilidade [8].



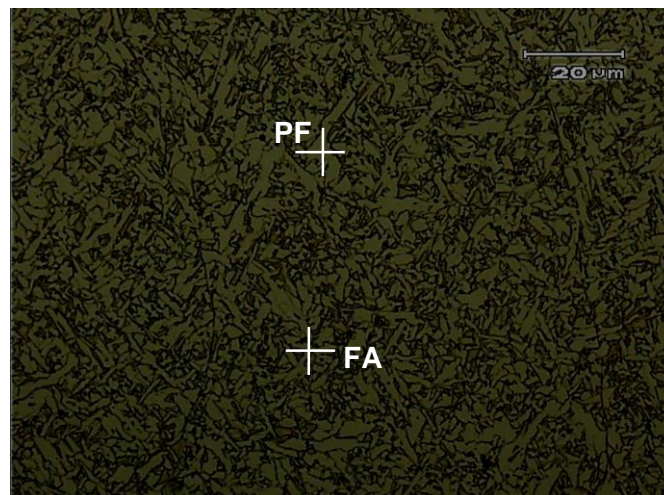
**Figura 11.** Microestrutura do Metal Base MB (500X).

A Figura 12 apresenta a microestrutura da zona afetada pelo calor (ZAC) mostrando uma microestrutura de grão grosseiro, formada possivelmente pelo pico de temperatura decorrido do ciclo térmico do processo de soldagem. Também é identificado ferrita de segunda fase alinhada FS (A) que proporciona uma baixa tenacidade e ferrita poligonal (FP).



**Figura 12 .** Microestrutura na ZAC (500X).

Na Figura 13 observa-se ferrita acicular (FA) como sendo o microconstituente mais apropriado que possibilita ótimos níveis de tenacidade sem que ocorra significativa perda de resistência mecânica [7]. Também pode-se identificar ferrita poligonal (FP).



**Figura 13.** Microestrutura do MS (1000X).

#### 4 CONCLUSÃO

Em função dos resultados e das análises realizadas da otimização do processo de soldagem com arame tubular neste trabalho permitiu concluir que:

De forma geral o conhecimento da influência dos parâmetros permitiu um melhor controle das características geométricas do cordão de solda, obtendo assim, uma otimização do processo de soldagem em aços de alta resistência.

Em relação aos ensaios de resistência à tração ocorreu uma perda acentuada de resistência mecânica da junta soldada mesmo assim, a junta apresentou níveis adequados exigidos por norma para posterior aplicação em campo.

Já no ensaio de Charpy-V obteve-se uma redução média de 26% na ZAC em relação ao metal base nos valores da energia absorvida.

A zona afetada pelo calor não teve uma grande extensão, mas ocorreram grandes variações microestruturais devido ao aporte térmico na junta soldada, ocasionando mudanças nas suas propriedades mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- 1 Costa, V. M. Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Juntas Dissimilares de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga. Trabalho de diplomação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2011.
- 2 Gomes, J.H.F. Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI MG – Brasil,2010.
- 3 Nilo Jr., L. P. N. Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá,2003.
- 4 Palani, P. K.,Murugan, N. Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW.Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p.291-299, 2007.
- 5 Mohandas T, Reddy G. M and Kumar B. S. Heat-affected zone softening in high-strength low-alloy steels [Journal]. - [s.l.]: Journal of Materials Processing Technology, 1999. - Vol. 88. - pp. 284-294.
- 6 Costa, V. M. Análise da tenacidade de uma junta soldada de um aço resistente à abrasão da série 450 HB. Dissertação de Mestrado. PPGE3M - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2014.
- 7 Byun, J. et al. Inoculated acicular ferrite microstructure and mechanical properties. Materials Science and Engineering A, Lausanne, v.319/321, p. 326-331, 2001.