

ESTUDO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM MIG EM REVESTIMENTOS A BASE DE NÍQUEL DEPOSITADOS EM AÇO API 5L X70.

Gabriela Valdeci dos Santos¹

Prof. Dr. Aureliano Xavier dos Santos²

RESUMO

A aplicação de revestimentos de ligas de níquel é comumente realizada na indústria de petróleo e gás para aumento da vida útil de equipamentos em ambientes agressivos, dados que este procedimento melhora a resistência à corrosão, sem um aumento significativo do custo de produção quando comparado com equipamentos maciços fabricados com outras ligas. O presente trabalho avalia as melhores condições de processos na deposição de revestimentos a bases de ligas de níquel aplicados pelo processo de soldagem MIG em aços API 5L X70. Como metal de base utilizou-se chapas do aço API 5L X70 e como metal de adição, a liga à base de Ni, Inconel 625 na forma de arame maciço. Como ferramenta de otimização foi utilizado um planejamento experimental fatorial 2³ com 3 pontos centrais, associado à técnica de metodologia de superfície de resposta (MSR). Foram feitas medidas das características geométrica (largura, reforço, índice de convexidade, penetração e diluição), além de determinar o perfil de microdureza dos revestimentos depositados que usaram maior e menor energia de soldagem. Os resultados mais satisfatórios foram os revestimentos que apresentam 5,8% de diluição, 6,19 mm de reforço e 22mm de largura. Os valores de microdureza foram influenciados diretamente pelo aumento da energia de soldagem utilizada.

Palavras-chave: Revestimento. processo MIG. Inconel 625.

ABSTRACT

The application of nickel alloy coatings is commonly performed in the oil and gas industry to increase the life of equipment in aggressive environments, given that this procedure improves corrosion resistance without a significant increase in production cost when compared to massive equipment manufactured with other alloys. The present work evaluates the best process conditions in the deposition of coatings to nickel alloy bases applied by the MIG welding process in API 5L X70 steels. As base metal plates of the API 5L X70 steel were used as the addition metal, the Ni-based alloy Inconel 625 as the solid ring. As an optimization tool, a complete experimental design 2³ was used, associated with the technique of surface response methodology (MSR). Measurements of the geometric characteristics

¹ Bacharelanda em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho

² Orientador do trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica do cabo de Santo Agostinho.

(width, reinforcement, convexity index, penetration and dilution) were made, besides raising the microhardness profile of the deposited coatings that used higher and lower welding energy. The most satisfactory results were coatings having 5.8% dilution, 6.19 mm reinforcement and 22 mm wide. The microhardness values were influenced directly by the increase of the welding energy used.

Keywords: Coating. MIG process. Inconel 625.

1 INTRODUÇÃO

A indústria do Petróleo responde por uma boa parcela da matriz energética do país, já que dela se obtém grande parte das matérias-primas utilizadas nas indústrias química e petroquímica. O Brasil ocupa a 17^o posição no ranking mundial de países com as maiores reservas provadas de petróleo e o mesmo ocupam a 37^o colocação no ranking mundial das maiores reservas provadas de gás natural. (PETROBRAS, 2018).

Segundo Antoszczyn (apud FGV, 2012), “grande parte da nova oferta de petróleo no mundo provém de jazidas no mar, com 70% das principais descobertas de petróleo na última década”.

No transporte do petróleo são utilizados dutos de aço com grandes diâmetros (508 – 813mm), que opera sob altas pressões, permitindo, assim, um ganho de produtividade pelo aumento do volume do fluxo transportado e pela redução do peso da estrutura causada pela menor espessura das paredes. Isso só foi possível com o desenvolvimento de aços microligados da classe API, denominado aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) com elevada resistência, soldabilidade e tenacidade. (HIPPERT JÚNIOR, 2014).

Dentre os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), podemos destacar o aço API 5L X70, cuja composição é 0,19%C, 0,24%Si, 0,7%Mn, 0,018%P, 0,018%S, 0,064Cr, 0,008%Mo e 0,07%Ni. Apesar desses aços possuírem elementos em sua composição química que confere certa resistência a corrosão, os mesmos estão susceptíveis ao fenômeno da corrosão, devido a operarem na indústria do petróleo em ambientes agressivos. (SCHVARTZMAN et al, 2004).

A corrosão é definida como a deteriorização de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio operacional, sendo associada, ou não, a esforços mecânicos, prejudicando de modo parcial ou total a utilização desse material (GENTIL,

2007), considerando que a maior intensidade de corrosão em ambientes subaquáticos é a corrosão por pites. (SCHVARTZMAN et al, 2004).

A corrosão gera custos de manutenção dos dutos que transportam petróleo em torno de bilhões ao ano. Segundo a associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), essas perdas chegaram a estar ao patamar de 3,5% do PIB brasileiro, além de prejudicar a vida marinha ao redor do globo, por isso são estudadas a obtenção de ligas e novos materiais, que sejam resistentes aos danos que podem ser causados por essas reações. (RAJENDRAN e SUSAI, 2014; THELLAPUTTA et al, 2017).

Para isso está sendo estudado o emprego de materiais que possuem elevada resistência a corrosão, no qual podemos destacar as superligas de níquel, que geralmente, operam nas mais diversas condições (corrosivos, temperaturas elevadas, pressões, entre outras). As mais utilizadas são as ligas da família Inconel, que tem como principal elemento o níquel, e o cromo como elemento secundário. A liga a base de níquel inconel 625 (níquel-crômolibidênio) é uma liga resistente à corrosão, que é muito utilizado tanto por sua alta resistência à corrosão, como por apresenta boa resistência à fadiga e uma boa soldabilidade.

O uso dessas ligas para aumentar a vida útil dos dutos que operam no transporte de petróleo é feito na forma de revestimento depositado. Existem várias técnicas que podem ser utilizadas para deposição desses revestimentos. Dentre elas pode-se destacar os processos de soldagem utilizados para deposições de revestimentos metálicos. Um dos processos mais utilizados para deposições é o processo MIG (Metal Inert Gas) o qual possui características que o torna uma boa opção. Tendo em vista os demais processos, sendo estas: não há formação de escórias (o que levaria a sua inevitável remoção); versátil em relação ao tipo e espessura do material; penetração do metal de base é uniforme; a diluição pode ser controlada; distorções e tensões residuais são menores, em relação a outros processos de soldagem. (BALMER, 2008).

Neste processo de soldagem, espera-se que o nível de diluição seja reduzido, tanto para diminuir o teor de ferro (DNV, 2013). Na superfície de cordão, quanto para evitar que microestruturas susceptíveis à corrosão possam ser formadas. (WAINER et al, 1992). Para que se chegue a resultados como esses, os parâmetros de soldagem podem ser ajustados de acordo com o planejamento experimental, alterando, por exemplo a DBCP (distância do bico de contato à peça) há uma tendência em diminuir o nível de distorção e de penetração da solda (PARANHOS e SOUZA, 1999).

Para determinar corretamente os parâmetros de soldagem (quais dados e em quais condições devem ser coletados), na fase de experimentação, é muito utilizada a metodologia do Planejamento Experimental a fim de eliminar desperdícios de amostras e de tempo na pesquisa. Este representa um conjunto de ensaios estabelecidos com critérios científicos e estatísticos, com o objetivo de determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo (BATISTA et al, 2011).

Este trabalho tem como objetivo avaliar as melhores condições de processos na deposição de revestimentos a base de ligas de níquel aplicados pelo processo de soldagem MIG em aços API 5L X70.

2 MATERIAIS

Os materiais de consumo empregados durante este trabalho estão agrupados em duas categoriais:

1. Metal de base (substrato) e
2. Consumível: metal de adição e gás de proteção.

Substrato

A chapa de aço ARBL API 5L X70 com 19mm de espessura, foi utilizada como metal de base, cuja composição química está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço API 5L X70.

C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Ti	Cr	Ni	N	Ce
0,09	1,46	0,0016	0,003	0,24	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,006	0,35

Fonte: (USIMINAS, 2011).

Consumíveis

Como metal de adição foi utilizado a liga de níquel inconel 625 na forma de arame maciço com 1,2mm de diâmetro. A Tabela 2 apresenta a composição química.

O gás de proteção utilizado foi a mistura gasosa 75% Argônio e 25% Hélio.

Tabela 2: Composição química do metal de adição.

%	Ni	Cr	Mo	Fe	C	Mn	Si	P	S	Co	Nb+Ta	Al	Ti
Mín	58,0	20,0	8,0								3,15		
Máx		23,0	10,0	5,0	0,10	0,50	0,50	0,015	0,015	1,00	4,15	0,40	0,40

Fonte: (Bealloy).

3 METODOLOGIA

Como metodologia de pesquisa foi utilizado o Planejamento Experimental Fatorial Completo com 3 pontos centrais, fixando a tensão de soldagem e variando os valores de velocidade de alimentação (V_a), velocidade de soldagem (V_s) e a distância do bico de contato a peça (DBCP). A Tabela 4 apresenta os resultados dos experimentos realizados a partir do planejamento experimento fatorial, sendo os experimentos realizados em uma sequência aleatória. E a Tabela 3 apresenta os níveis reais e codificados dos fatores utilizados.

Tabela 3: Níveis reais e codificados dos fatores de estudo: Velocidade de soldagem (V_s), velocidade de alimentação (V_a) e DBCP.

Variáveis de Entrada	Níveis		
	-1	0	1
V_a (m/min)	6	25	9
V_s (m/min)	20	7,5	30
DBCP (mm)	20	24	28

Fonte: Autor.

Tabela 4: Matriz de planejamento Experimental 2^3 das variáveis de entrada do processo MIG mais 3 pontos centrais.

	V_a (m/min)		V_s		DBPC	
1	6	-	20	-	20	-
2	9	+	20	-	20	-
3	6	-	30	+	20	-
4	9	+	30	+	20	-
5	6	-	20	-	28	+
6	9	+	20	-	28	+

7	6	-	30	+	28	+
8	9	+	30	+	28	+
9	7,5	0	25	0	24	0
10	7,5	0	25	0	24	0
11	7,5	0	25	0	240	0

Fonte: Autor.

Soldagem

Os revestimentos foram depositados pelo processo de soldagem MIG, a partir dos parâmetros de soldagem previamente estabelecidos pela matriz de experimento. As deposições foram feitas em três camadas (cordão de solda) de revestimentos, utilizando uma sobreposição de $\frac{1}{2}$ de L em cada corpo de prova, utilizando uma temperatura de interpasse de 100°C. Sendo L a largura do primeiro cordão de solda.

Para deposições foi utilizada a fonte de soldagem modelo DIGI Plus A7 800 fabricado pela IMC soldagem, contendo os seguintes acessórios: Fonte do tipo corrente contínua e tensão constante com capacidade máxima de 800 A, sistema de aquisição de dados para o monitoramento dos parâmetros de soldagem e tartilope para deslocamento linear da tocha.

Após a deposição dos revestimentos pelo processo de soldagem MIG, foram calculadas as energias de soldagem para cada amostra utilizando os valores de corrente obtidos para cada depósito e os parâmetros da Tabela 4, como mostra a equação 1 abaixo. Para os cálculos, foi adotado um rendimento térmico de 0,87.

$$H = \eta \frac{VI}{1000 \times v_s} \times 60$$

Equação (1)

Onde:

H: Energia de soldagem;

η : rendimento térmico;

V: tensão de soldagem (V);

I: corrente de soldagem (A);

v_s : velocidade de soldagem (cm/min).

Análise das características geométricas e cálculo da diluição

As amostras obtidas, após corte transversal na cortadeira metalográfica Fortel CF III, foram avaliadas quanto às características geométricas (largura, reforço e penetração razão R/L) utilizando um paquímetro digital para as medições. Foram realizadas três medições e feita à média. Já para a medição da penetração e cálculo da diluição foi utilizado o software ImageJ. A Figura 3 mostra as regiões correspondentes à largura (L), do reforço (R) e da penetração (P).

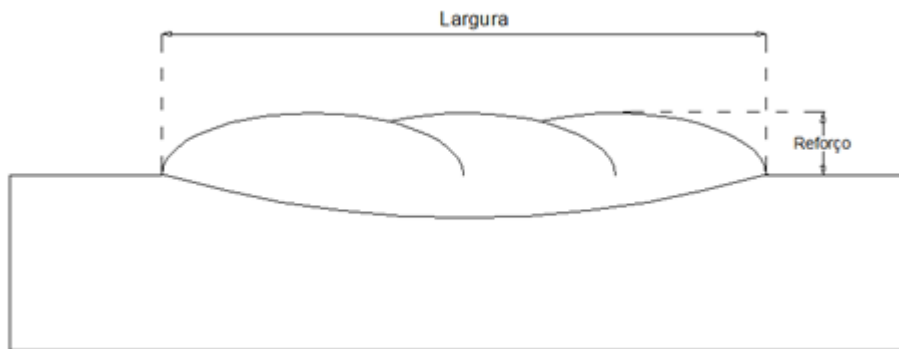


Figura 3: Medição das características geométricas e da área do cordão de solda. Fonte: Autor.

Onde:

L = largura;

R = reforço;

Utilizando-se a equação 2 pode-se quantificar a diluição do depósito.

$$D (\%) = \frac{A_f}{A_f + A_d} \times 100$$

Equação (2)

Onde:

A_f = zona fundida;

A_d = metal depositado.

Caracterização das ligas

Os revestimentos foram submetidos à caracterização quanto à microdureza.

Microdureza

As amostras foram submetidas à preparação metalográfica, as quais foram embutidas a frio utilizando tubo PVC, resina de poliéster e catalisador, como mostra a Figura 4.

Após um período de secagem, as amostras foram lixadas manualmente com lixas d'água com granulometria de 100 e 120 μm e posteriormente lixadas utilizando a lixadeira e politriz da marca Fortel e modelo PLFDV e lixas d'água com (granulação de 100, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 μm), em seguida as mesmas foram submetidas a polimento em disco de pano com alumina 4 (1 μm), 3 (0,3 μm) e 2 (0,05 μm) e, por fim, foram atacados quimicamente com Nital 2,0 % durante um período de 10 segundos para realização da análise metalográfica por microscopia ótica.

Depois de polidas, foram analisadas por ensaio de microdureza Vickers, com o objetivo de mapear a variação da dureza desde a região do depósito passando pela zona termicamente afetada até o metal de base, de modo a correlacionar os valores da microdureza com o comportamento microestrutural do metal de solda, zona termicamente afetada e metal de base.

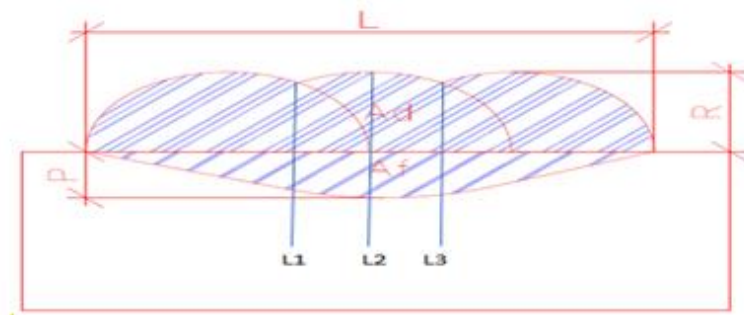
Figura 4: amostras embutidas.



Fonte: autor.

O levantamento dos perfis de microdureza Vickers, consistirá de varredura em três linhas verticais, sendo traçado uma linha na seção transversal no centro dos cordões (L2) e as demais na região da sobreposição dos mesmos L1 e L3, em pontos do Metal de Solda (MS), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e metal de base (MB), conforme esquema apresentado na Figura 5. Para realização dos ensaios de microdureza foi utilizado um microdurômetro digital HMV-G 20ST automatizado da Shimadzu, utilizando as seguintes condições para realização do ensaio de microdureza Vickers: carga de 100 g por 15 segundos com um espaçamento entre as endentações de 0,20mm.

Figura 5: Disposição das endentações de microdureza



Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na deposição de revestimentos solda estão expressos na Tabela 5 juntamente com a matriz de planejamento fatorial 2^3 adotando um nível de significância de 95% para os resultados, os valores de diluição (D%) variando entre 9,46 – 5,80 referentes às amostras 1 e 5 respectivamente, penetração (P) variou entre 2,68 - 1,60 referentes às amostras 2 e 7 respectivamente e relação reforço/largura*100 (convexidade) variando entre 20,56 – 30,23 referentes às amostras 1 e 4 respectivamente.

Tabela 5: Matriz de planejamento e resultados obtidos.

Parâmetro /Amostras	Va	Vs	DBCP	R	L	R/L(%)	P	D (%)	Im (A)	H (KJ/cm)
1	6	20	20	4,2	20,72	20,56	2,64	9,4	182,75	12,4
				6				6		
2	9	20	20	5,7	21,05	27,17	2,68	9,3	225,39	15,3
				2				3		
3	6	30	20	5,0	19,61	26,01	2,10	6,7	184,37	8,34
				5				7		
4	9	30	20	6,6	21,84	30,23	2,38	7,4	221,51	10,02
				2				9		
5	6	20	28	6,1	22,00	28,14	1,89	5,8	152,33	10,34
				9				0		
6	9	20	28	6,7	27,54	24,40	2,33	6,5	187,66	12,73
				2				3		
7	6	30	28	4,4	19,09	23,36	1,60	6,0	169,74	7,68

				6				5		
8	9	30	28	6,2	20,92	29,63	2,36	6,8	203,15	9,19
				0				7		
9	7,5	25	24	5,7	23,98	24,97	1,97	8,2	180,04	9,77
				6				5		
10	7,5	25	24	5,9	24,05	24,65	2,02	8,5	179,65	9,75
				8				3		
11	7,5	25	24	5,8	23,37	24,72	1,98	8,7	181,02	9,83
				4				6		

Fonte: Autor.

De acordo com os resultados obtidos, foram ajustados os dados para obter um modelo linear que relacione as variáveis independentes: velocidade de soldagem V_s (m/min), velocidade de alimentação V_a (m/min) e distância de contato bico-peça DBCP com variáveis dependentes: largura L (mm), reforço r (mm), penetração p (mm), índice de convexidade $r/L*100$ (%) e diluição D (%). Os valores de energia de soldagem e corrente média foram utilizados para o teste de microdureza.

De acordo com o nível de confiabilidade, a relação $P \leq 0,05$ deve ser satisfeita para que o fator seja estatisticamente significativo, visto que, a significância é dada pela expressão: $1-(\text{valor } P)$ (BATISTA et al, 2011).

As equações 3, 4, 5, 6 e 7 representam os modelos estabelecidos para as variáveis dependentes, tiradas do software Statistic.

$$r = -12,1934 + 7,94375 * \text{DBCP} + 2,716 * V_a - 0,24625 * 25 + 0,022 * 25 * V_a - 0,158 * \text{DBCP} * V_a + 10,3$$

Equação (3)

$$L = -4,7565 + 1,3615 * V_s - 8,233 * V_a - 0,0575 * 24 + 0,0302 * V_s * V_a + 1,002 * 24 + 21,2475$$

Equação (4)

$$D = 40,3343 - 9,9839 * V_s - 1,1937 * \text{DBCP} + 0,032 * V_s * \text{DBCP} + 0,0156 * 7,5 * V_s + 0,0200 * 7,5 * \text{DBCP} - 5,2$$

Equação (5)

$$r/L = -13,1493 + 7,7805 * V_s + 2,7925 * \text{DBCP} - 0,0878 * V_s * \text{DBCP} + 2,27 * 7,5 * V_s - 0,0479 * 7,5 * \text{DBCP} - 29,3375$$

Equação (6)

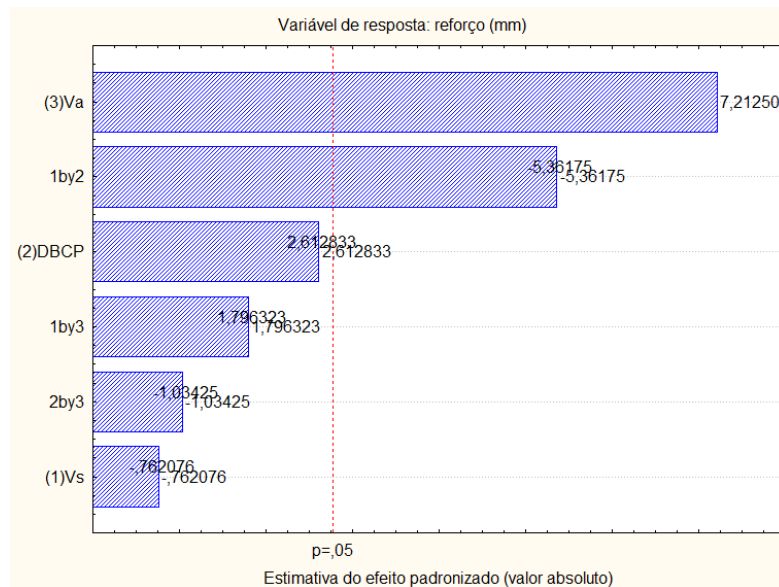
$$p = 10,3547 - 2,7875 * \text{DBCP} - 0,5466 * V_a + 0,0036 * 25 + 0,0093 * 25 * V_a + 0,0183 * \text{DBCP} * V_a - 4,6125$$

Equação (7)

4.1. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO SOBRE A VARIÁVEL DEPENDENTE REFORÇO (R)

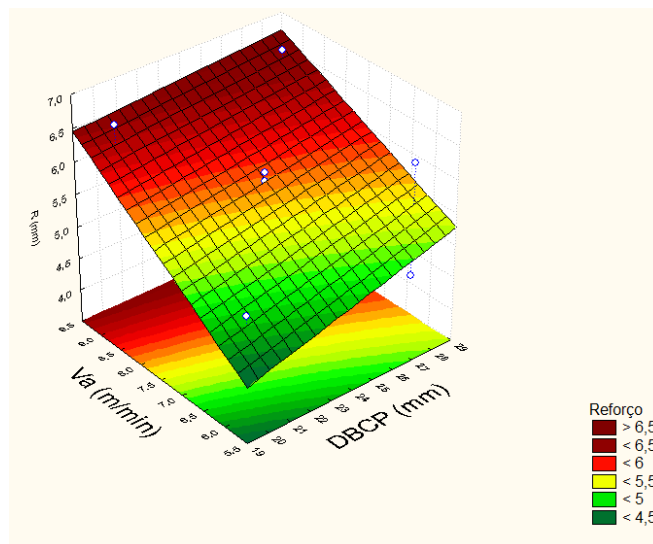
A figura 6 apresenta o gráfico de pareto para variável reforço, no qual podemos observar que a velocidade de alimentação (V_a) e a interação entre a velocidade de soldagem (V_s) e a DBCP possuem efeito estatisticamente significativo. O negativo da coluna da interação entre velocidade de soldagem (V_s) e a DBCP indica que a altura do reforço aumenta com a diminuição dessa interação.

Figura 6: Diagrama de pareto dos efeitos para variável reforço R (mm)



Fonte: Autor

Figura 7: Superfície de resposta do reforço sob a influência da velocidade de alimentação e a DBCP.



Fonte: Autor.

Observando as informações apresentadas na superfície de resposta da Figura 7, construída utilizando as variáveis de maior significância (velocidade de alimentação e DBCP), a máxima altura do reforço (6,5mm) ocorre para valores de DBCP superior a 28mm e velocidade de alimentação superior a 9 m/min. Observa-se que estes valores correspondem a amostra 6 dos experimentos.

A norma N-1707 (2011) da Petrobrás recomenda uma altura líquida do reforço de no mínimo 3mm. Como as amostras estão variando entre 4,26mm e 6,72mm apresentando valores superiores, mas bem próximos, isso indica que estas são condições adequadas para deposição de revestimentos contra corrosão e desgastes.

Segundo GUNARAJ e MURUGAN (1999), o reforço aumenta com o aumento da velocidade de alimentação do arame de solda com independência da corrente de solda e do tipo de polaridade empregada. CRUZ (2014) diz que o aumento do reforço com o aumento da velocidade de alimentação do arame ocorre principalmente pela maior quantidade de metal depositado por unidade de longitude.

4.2 . ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO SOBRE A VARIÁVEL DEPENDENTE LARGURA (L)

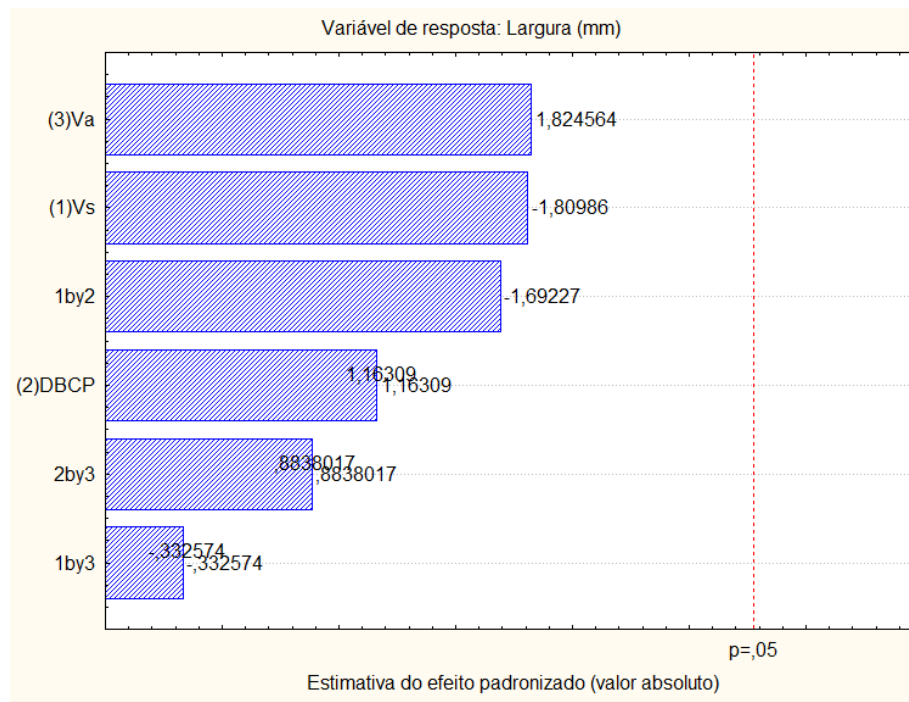
Na Tabela 5 podemos ver que os valores da largura variam entre 19,09mm e 27,5mm referentes às amostras 7 e 6 respectivamente. E pelo diagrama de pareto da Figura 8 observamos que as variáveis não tiveram influência estatisticamente significativa na largura. As que obtiveram maiores significância foram a velocidade de alimentação V_a e a velocidade de soldagem V_s .

O valor negativo apresentado no gráfico da coluna de velocidade de soldagem significa que a largura é maior para os menores valores de velocidade de soldagem, já o positivo da velocidade de alimentação diz que a largura é maior para maiores valores de velocidade de alimentação, como veremos no diagrama de superfície da Figura 8. CRUZ (2014) citando GUREV E STOUT (1993) disse que na soldagem MIG, seja com um aumento da corrente ou diminuição da velocidade de soldagem, a largura do cordão aumenta com o aumento da entrada de calor na peça de trabalho.

Resultados parecidos foram encontrados por SANTOS (2014), que obteve revestimentos mais largos aumentando a taxa de alimentação acompanhada com o aumento da

corrente de soldagem para que se consiga uma divisão do aporte de calor mais favorável à deposição.

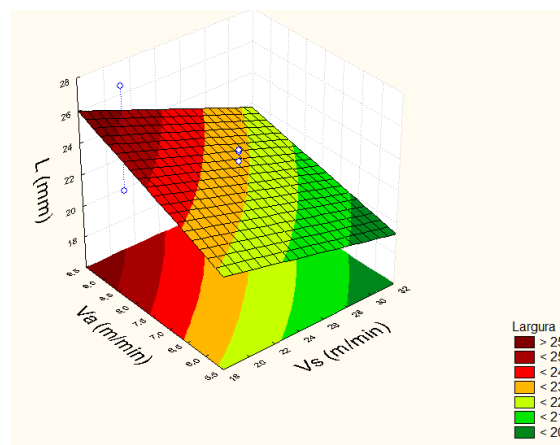
Figura 8: Diagrama de pareto dos efeitos para a variável resposta largura L (mm).



Fonte: Autor.

O gráfico com a superfície resposta da Figura 9 está relacionando as variáveis mais significativas à variável resposta largura. Nele podemos ver valores acima de 25mm para largura correspondentes à valores de aproximadamente 20m/min de velocidade de soldagem e aproximadamente 9,5 m/min de velocidade de alimentação.

Figura 9: Superfície resposta da largura sob a influência da velocidade de alimentação e velocidade de soldagem.



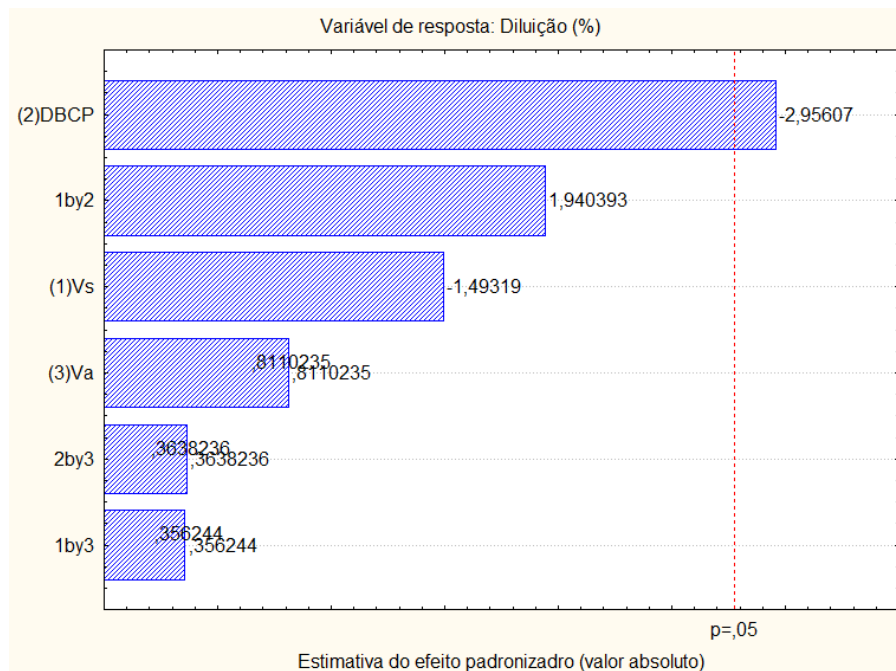
Fonte: Autor.

4.3. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO SOBRE A VARIÁVEL DEPENDENTE DILUIÇÃO (D)

Os valores de diluição mostrados na Tabela 5, variam entre 5,80% e 9,46% referentes às amostras 1 e 5 respectivamente.

Avaliando o diagrama de pareto da Figura 10, podemos ver que as variáveis que apresentaram maior efeito estatisticamente significativo foram a DBCP. O valor negativo apresentado no gráfico da coluna de DBCP indica que a diluição aumenta com os menores valores de DBCP.

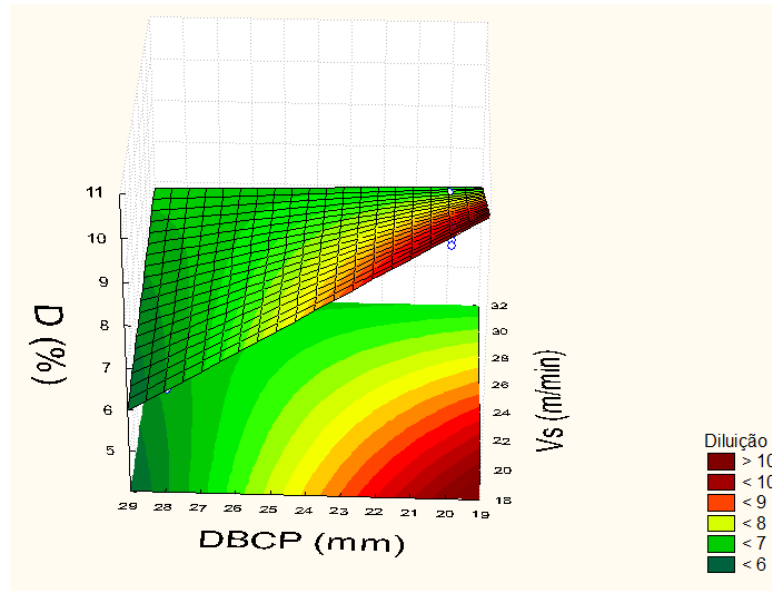
Figura 10: Diagrama de pareto dos efeitos para a variável diluição (%).



Fonte: Autor.

A Figura 11 apresenta a superfície de resposta para a diluição (%), onde podemos ver que os menores percentuais de diluição (6%) ocorre para velocidade de soldagem próximo de 30m/min e DBCP próximo de 29mm. Estes valores estão compatíveis com a amostra 5 da Tabela 5. Porém a velocidade de soldagem (Vs) tem pouca influência nos valores de corrente média, quando utilizado elevados valores de DBCP. Aumentando a DBCP consequentemente diminui os valores de corrente média convencional.

Figura 11: Superfície resposta da diluição sob a influência da DBCP e da velocidade de soldagem Va.



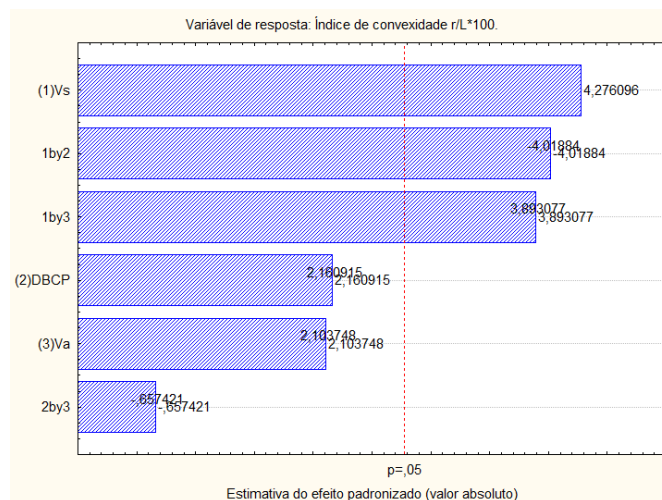
Fonte: Autor.

4.4. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO SOBRE A VARIÁVEL DEPENDENTE CONVEXIDADE (R/L*100)

Os valores de índice de convexidade $IC=R/L*100$ estão variando de 20,56% e 30,23% de acordo com a tabela 5.

O diagrama de pareto da Figura 12 apresenta as variáveis que tiveram o maior efeito estatisticamente significativo foram a velocidade de soldagem (Vs), a interação entre a velocidade de soldagem (Vs) e a velocidade de alimentação (Va) e a interação da velocidade de soldagem (Vs) a DBCP.

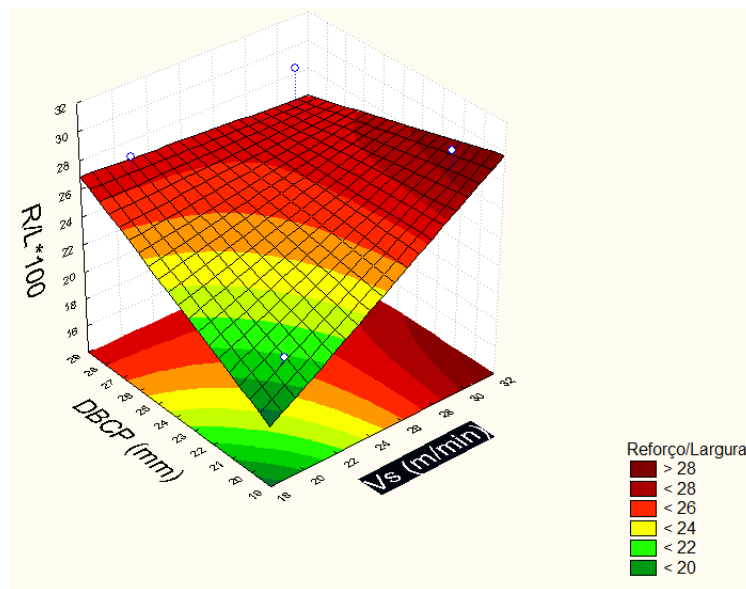
Figura 12: Diagrama de pareto dos efeitos para a variável índice de convexidade.



Fonte: Autor.

A Figura 13 apresenta a superfície de resposta da variável índice de convexidade = $r/L*100$ relacionada às variáveis de maior significância (velocidade de soldagem V_s e DBCP). Podemos observar que os maiores valores de índice de convexidade (28) está para velocidade de soldagem próximo de 30m/min e DBCP próximo de 29mm. Este valores são compatíveis com a amostra 8 da tabela 5.

Figura 13: Superfície resposta do índice de convexidade sob os efeitos das variáveis velocidade de soldagem V_s e DBCP.



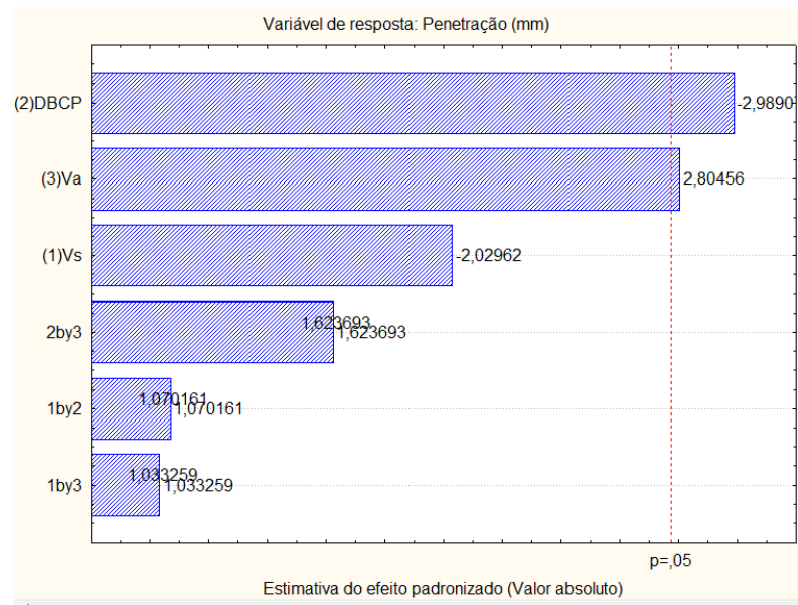
Fonte: Autor.

4.5. ANÁLISE DAS VARIÁVEIS INDEPENDENTES DO PROCESSO SOBRE A VARIÁVEL DEPENDENTE PENETRAÇÃO (P)

A Tabela 5 apresenta os valores de penetração, estando variando entre 1,60mm e 2,68mm referentes às amostras 7 e 2 respectivamente.

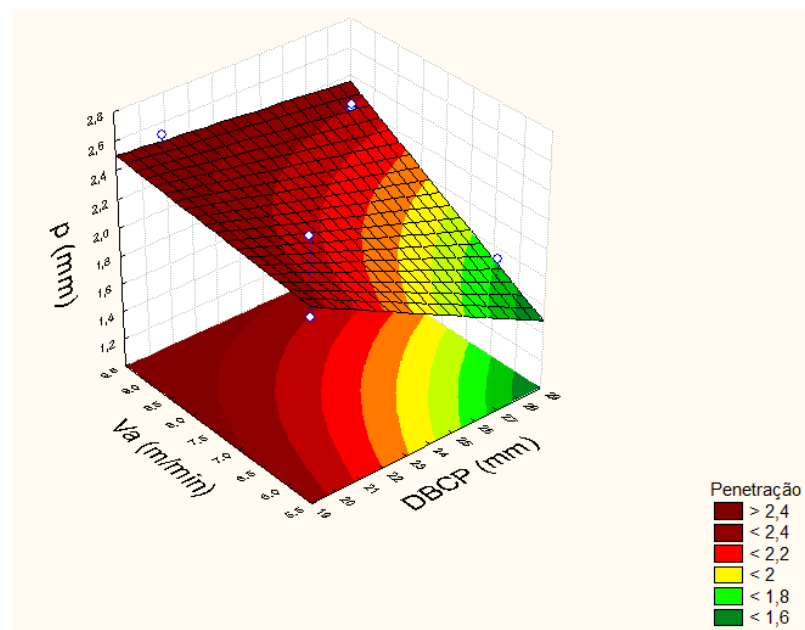
O diagrama de pareto da Figura 14 mostra que as variáveis DBCP e velocidade de alimentação são estatisticamente significativa. O valor negativo apresentado na coluna da DBCP indica que a penetração aumenta com a diminuição da DBCP e o valor positivo da coluna de velocidade de alimentação V_a indica que a penetração aumenta com o aumento da velocidade de soldagem (V_s).

Figura 14: Diagrama de pareto dos efeitos para a variável penetração P (mm).



A superfície de resposta da Figura 15 mostra que os menores valores de penetração (1,6mm) estão relacionados à DBCP de aproximadamente 29mm e velocidade de alimentação de aproximadamente 5,5m/min. Estes valores são compatíveis com a amostra 7, conforme está apresentado na Tabela 5.

Figura 15: Superfície resposta da penetração sob a influência da DBCP e velocidade de alimentação Va.

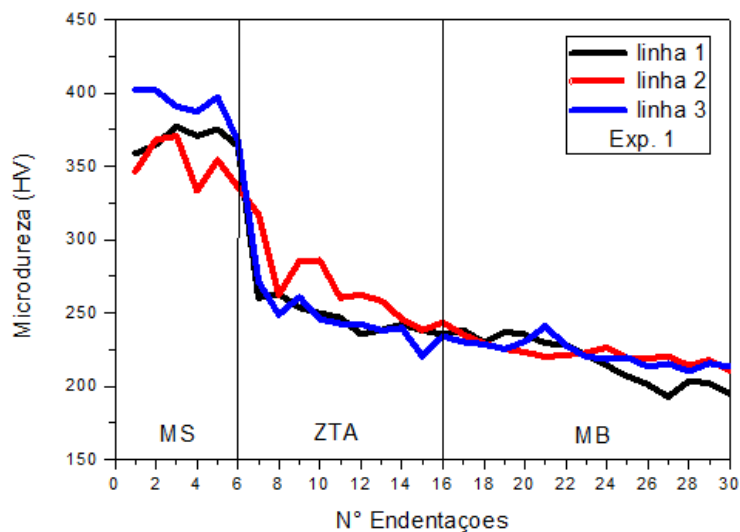


Com isso, podemos observar que a menor penetração é atingida para menores valores de velocidade de alimentação V_a e maiores valores de DBCP. Segundo (SANTOS, 2014) citando FORTES (2004), a velocidade de alimentação alta promove um cordão na forma de chapéu, mais estreito e com uma maior profundidade. Segundo SILVA et al (2016) a velocidade de alimentação tem pouca influência nos valores de corrente média, quando é utilizada elevados valores de DBCP.

4.6. MICRODUREZA

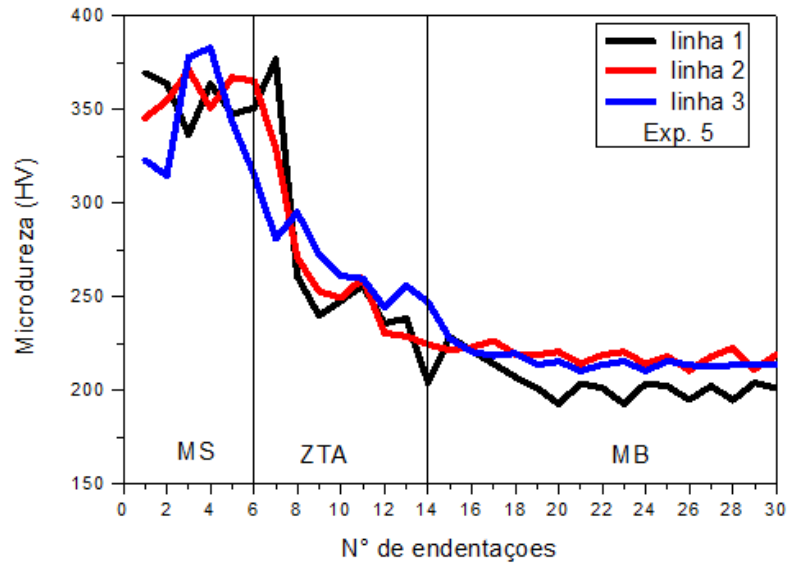
Os gráficos da Figura 16 e 17 apresentam o perfil de microdureza ao longo das regiões Ms, ZTA e MB, para os revestimentos depositados nas condições dos experimentos 1 e 5. Com base no comportamento do perfil de microdureza verificou-se semelhança nas três regiões, sendo que, na região do MS o nível de microdureza foi superior a região da ZTA em ambas as condições dos experimentos. Em termos de valores médios de microdureza, o revestimento referente à condição do experimento 1, o qual utilizou a energia de soldagem igual a 12,40 J/cm, os valores das microdurezas do MS e ZTA foram, respectivamente, 371,28 HV e 253,69 HV. Por outro lado, o revestimento referente à condição do experimento 5, o qual utilizou a energia de soldagem igual a 10,34 J/cm, os valores das microdurezas do MS e ZTA foram, 352,28 HV e 267,87 HV respectivamente.

Figura 16: Microdureza ao longo das linhas verticais para $H = 12,40$ kJ/cm. Experimento 1.



Fonte: Autor.

Figura 17: Microdureza ao longo das linhas verticais para $H = 10,34$ kJ/cm. Experimento 5.



Fonte: autor.

Analisando os valores do perfil da microdureza dos revestimentos do experimento 1 e 5, verifica-se que houve aumento de 14,18 HV no valor médio da microdureza da ZTA ao reduzir a energia de soldagem de $H = 12,4$ kJ/cm para $10,34$ kJ/cm. Energias de soldagem mais baixas resultam em taxas de resfriamento mais elevadas e, conseqüentemente, uma microdureza mais elevada na ZTA. KEJELIN et al (2006) obtiveram um aumento de 20 HV na microdureza da ZTA quando reduziram a energia de soldagem de 1500 kJ/cm para 1100 kJ/cm. Este fato pode ser explicado em função da variação na taxa de resfriamento e, conseqüentemente, nos níveis de microdureza da ZTA. Observou-se também, que o revestimento obtido no experimento 5, apresentou uma extensão de ZTA igual a $1,2$ mm, enquanto que o revestimento obtido no experimento 1 apresentou uma extensão de ZTA igual a $1,8$ mm. Essa diferença de extensão está relacionada com a diferença de energia de soldagem utilizada em cada experimento, ou seja, quanto maior a energia de soldagem, maior será a extensão da ZTA.

5 CONCLUSÃO

- O planejamento Experimental Fatorial utilizado no projeto mostrou-se eficiente na escolha dos melhores parâmetros de soldagem para obtenção de perfis geométricos de cordão de solda adequados às suas aplicações;
- Os valores de altura de reforço encontrados com as técnicas utilizada estão dentro da norma (maiores que 3mm);
- Os resultados mais satisfatórios foram os revestimentos que apresentaram 5,8% de diluição, 6,19 mm de reforço e 22 mm de largura
- Índice de convexidade próximo de 28%, que também demonstra a eficiência do processo.
- Os valores de microdureza foram influenciados diretamente pelo aumento da energia de soldagem utilizada.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, P. H. D., 2016, **Caracterização de Materiais Dissimilares com Revestimentos NiCrBC em Diferentes Substratos**, Dissertação, (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

ANTOSZCZYSZYN, T. J., 2014, **Revestimento de Liga de Níquel Inconel 625 por Plasma com Arco Transferido (PTA) Sobre Aços API 5L X70 e AISI 316L**, Dissertação, (Mestrado em Engenharia Mecânica), universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BATISTA, V. R.; SILVA, M. M. MELO, R. H. F.; MARCIEL, T. M.; SANTOS, M. A. **Efeitos dos Parâmetros de soldagem sobre a Geometria e Diluição de Revestimentos de Liga de Níquel Aplicados em Aço API 5L Gr B**. Campina Grande, 2011.

BALMER, **Processo de Soldagem ao Arco Elétrico MIG/MAG (GNAW)**. Ijuí-RS: Fricke Soldas LTDA, 2008

BRASIL. Agência Nacional de Petróleo. **Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2018**. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

BUSSO, Nicolangelo Del; MONTEIRO, Waldemar Alfredo. **Caracterização Microestrutural e Mecânica de Aço API-5L-X70 Após Soldagem Pelo Método de Arco Submerso**, p. 1665-167. In: 70º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2015.

CRUZ, J. A. G., 2014, **Uma Metodologia Para Modelagem e Controle da Altura do Reforço e da Largura do Cordão de Solda no Processo GMAW**, Dissertação, (Mestrado em Sistemas Mecatrônicos), Universidade de Brasília, Brasília.

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

KEJELIN, N. Z. 2006. **Influência dos parâmetros de soldagem na forma de zonas parcialmente diluídas em soldas de metais dissimilares**. Dissertação de mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil.

MOURA, J. S.; DA SILVA, M. D. F.; DE MIRANDA; FERRO, T.P.S.; DA SILVA, J. S., DA SILVA, J. S. **Corrosão: colunas de Perfuração de Poços de Petróleo**. Maceió, 2015.

NEVES, C. F. C., SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; J., E. Variables search technique applied to gas separation. **Química Nova**. v.25, n 2, p.327-329, 2002.

PETROBRÁS, **Plano de Negócios e Gestão 2019-2023**, 2018.

Disponível: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategiacorporativa/plano-de-negocios>>. Acesso: 06 de mai. 2019.

SANTOS, Aureliano; MOURA, Theophilo; SANTANA, Renato. 2015. **Avaliação de revestimentos à base de Inconel 625 depositados através do processo de soldagem GMAW em aço API 5L X70 utilizando Planejamento Fatorial**.

SANTOS, Aureliano. **Avaliação da resistência à corrosão de revestimentos à base de inconel 625 utilizando os processos de soldagem MIG e plasma pó**. Dissertação (pós-graduação em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

SILVA, Cleiton Carvalho et al . **Minimização de defeitos em revestimentos de superligas de níquel depositada pelo processo TIG com alimentação de arame frio**. **Soldag. insp.**, São Paulo , v. 19, n. 4, p. 323-332, dez. 2014 .