

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – Introdução

Neste capítulo serão exibidas e discutidas as respostas obtidas a partir dos ensaios realizados. A análise dos resultados será abordada em três agrupamentos de resultados, sendo este capítulo dividido em três partes. Na primeira parte, foi realizado um estudo sobre a influência dos parâmetros de pulso no processo MAG e no processo Eletrodo Tubular, através de um planejamento fatorial fracionário, com a finalidade de comparar os processos. Esta comparação pretendeu avaliar semelhanças quanto as variáveis influentes e as possíveis vantagens do processo Eletrodo Tubular sobre o MAG, que compense o maior custo do arame tubular em relação ao arame sólido. As observações e resultados provenientes desta comparação serão apresentados juntamente com as análises dos processos, à medida que essas estiverem sendo desenvolvidas. Na segunda parte, um novo planejamento fatorial foi definido, levando em consideração a necessidade encontrada no desenvolver do trabalho e a importância de uma variável adicional, a frequência de pulso. Esta variável é citada por vários autores como de grande importância no estudo do processo Eletrodo Tubular pulsado, mas a princípio não pôde ser explorada devido ao objetivo inicial deste trabalho, que é a comparação dos processos e que limitou a análise do processo Eletrodo Tubular à mesma análise do processo MAG (realizada anteriormente, conforme já mencionado no **Capítulo 3**). Maiores detalhes sobre essas mudanças, no entanto, serão explorados na ocasião dessas discussões. Para se definir este novo planejamento fatorial foram realizados testes preliminares para estabelecer os níveis dos fatores em estudo. Nesses testes variou-se a velocidade de alimentação do arame, cuja influência apresentou-se como a mais significativa na primeira parte do trabalho em ambos os processos estudados, e variou-se os parâmetros de pulso de modo a produzir uma corrente média e uma frequência desejadas. A última parte refere-se a uma análise de dureza e metalográfica em amostras produzidas com os dois processos, objetivando observar as diferentes microestruturas produzidas sob as mesmas condições, mas com processos diferentes e com o mesmo processo, mas sob diferentes condições.

É importante ressaltar que, apesar do estudo realizado sobre o processo MAG, as análises deste trabalho concentrar-se-ão no processo Eletrodo Tubular, que é de maior interesse neste, devido à escassez de fontes de pesquisa sobre a soldagem com Eletrodo Tubular no modo pulsado.

## 4.2 – Parte 1: Comparação entre os Processos MAG e Eletrodo Tubular

### 4.2.1 – Resultados Experimentais

Os valores das respostas medidas e calculadas, na parte 1 deste trabalho, conforme relatado no **Capítulo 3** estão apresentados na **Tabela 4.1** para o processo MAG e na **Tabela 4.2** para o processo Eletrodo Tubular.

Tabela 4.1 - Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo MAG.

Teste	Fatores				Respostas				
	Ip	Ib	CA	Va	P	IC	S <sub>T</sub>	Txdep	Rend
-	A	A	%	m/min	mm	%	mm <sup>2</sup>	kg/h	%
1	280	70	40	5	1,5	26,3	21,9	2,3	88,8
2	350	70	40	6	1,7	24,9	29,0	3,1	97,9
3	280	100	40	6	2,2	43,1	25,0	3,1	98,8
4	350	100	40	5	0,9	25,9	17,8	2,3	87,4
5	280	70	50	6	2,6	26,5	29,1	2,8	90,3
6	350	70	50	5	1,2	24,9	20,9	2,3	88,7
7	280	100	50	5	1,2	21,4	19,7	2,3	86,6
8	350	100	50	6	1,1	23,5	24,7	2,4	75,5
9	280	70	40	5	1,9	27,4	24,8	2,4	93,3
10	350	70	40	6	2,0	25,9	30,3	3,0	96,4
11	280	100	40	6	2,1	33,7	27,1	3,0	94,7
12	350	100	40	5	0,6	13,1	14,1	2,2	84,2
13	280	70	50	6	2,0	28,1	28,2	2,9	91,2
14	350	70	50	5	1,3	22,7	21,9	2,4	92,3
15	280	100	50	5	0,9	18,4	20,5	2,4	92,3
16	350	100	50	6	0,9	22,0	27,1	2,7	86,2

Tabela 4.2 – Sequenciamento e resultados dos experimentos para o processo Eletrodo Tubular.

Teste	Fatores				Respostas					
	Ip	Ib	CA	Va	P	IC	S <sub>T</sub>	Qualidade	Txdep	Rend
-	A	A	%	m/min	mm	%	mm <sup>2</sup>	-	kg/h	%
1	280	70	40	5	0,6	22,1	14,5	9,0	2,0	86,7
2	350	70	40	6	1,3	19,0	19,4	9,0	2,6	86,7
3	280	100	40	6	1,0	18,2	22,1	9,7	2,5	86,1
4	350	100	40	5	0,7	16,7	14,7	5,5	1,8	78,3
5	280	70	50	6	0,9	10,6	19,9	8,5	2,3	80,4
6	350	70	50	5	1,0	23,8	18,5	6,0	2,1	83,6
7	280	100	50	5	0,9	21,0	20,0	3,9	2,0	81,7
8	350	100	50	6	0,6	17,9	16,8	6,5	2,4	82,2
9	280	70	40	5	0,6	20,7	12,5	8,0	2,0	86,0
10	350	70	40	6	0,7	20,2	21,4	9,4	2,3	84,6
11	280	100	40	6	1,0	15,3	21,2	9,0	2,5	86,9
12	350	100	40	5	0,5	20,5	16,5	7,5	1,9	79,6
13	280	70	50	6	0,8	17,3	20,9	9,0	2,5	85,6
14	350	70	50	5	0,7	25,0	11,4	5,0	2,1	80,3
15	280	100	50	5	0,8	19,8	15,9	5,7	1,9	71,0
16	350	100	50	6	1,2	13,3	21,5	7,3	2,2	78,3
17	280	70	40	5	0,6	20,6	15,1	8,0	1,8	84,5
18	350	70	40	6	0,7	18,6	20,5	7,0	2,3	87,6
19	280	100	40	6	1,0	17,5	22,0	9,0	2,2	89,3
20	350	100	40	5	0,5	17,2	12,5	5,0	1,7	73,9
21	280	70	50	6	0,8	17,8	20,2	9,0	2,2	77,5
22	350	70	50	5	0,7	18,0	17,5	5,0	1,8	78,6
23	280	100	50	5	0,8	18,2	13,6	4,0	1,7	71,6
24	350	100	50	6	1,2	15,7	22,6	6,0	2,2	77,2

A **Figura 4.1** ilustra o perfil de alguns cordões de solda obtidos a partir de condições extremas do planejamento fatorial utilizado.

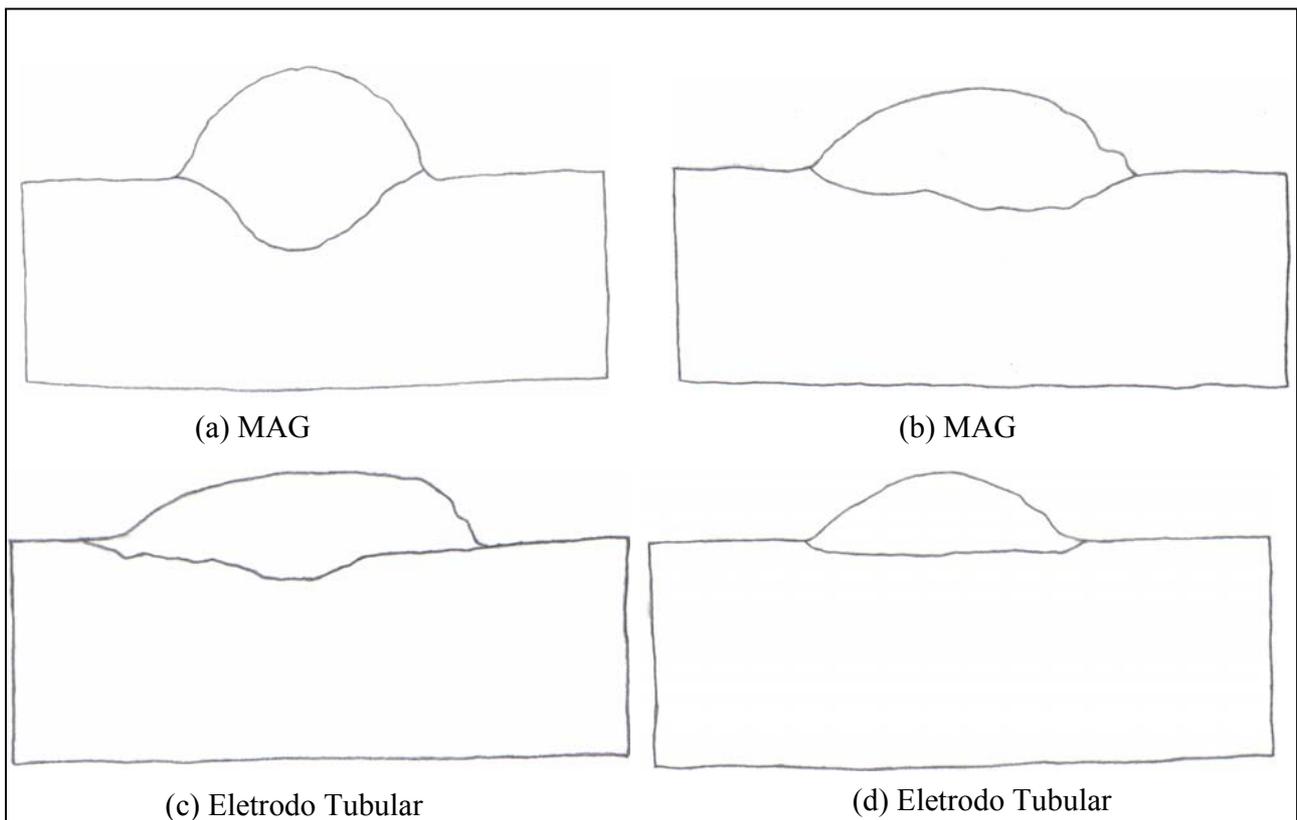


Figura 4.1 – Perfil dos cordões na condição: (a) e (c)  $I_p = 280$  A,  $I_b = 100$  A,  $CA = 40\%$  e  $V_a = 6$  m/min; (b) e (d)  $I_p = 350$  A,  $I_b = 70$  A,  $CA = 50\%$  e  $V_a = 5$  m/min.

#### 4.2.2 – Análise da Variância

Para avaliar de maneira mais consistente os efeitos dos fatores empregados sobre as respostas observadas, estas foram submetidas à análise de variância. Neste trabalho, considerou-se como critério de análise que um determinado fator de controle afetou estatisticamente uma resposta, quando o nível  $\alpha$  obtido for inferior a 5%, ou seja, uma confiabilidade estatística de 95%.

A **Tabela 4.3** mostra os valores do nível  $\alpha$  para as respostas referentes aos parâmetros estudados e interações entre parâmetros. Os números em negrito, nesta tabela, indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Pela análise, verifica-se, no processo MAG, que a velocidade de alimentação ( $V_a$ ) é o fator mais influente na penetração ( $P$ ), seguida pelas correntes de pico ( $I_p$ ) e de base ( $I_b$ ), que apresentam a mesma influência. O índice de convexidade é influenciado, pela ordem de significância, pela velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ), pela corrente de pico ( $I_p$ ) e pela interação da corrente de pico com o ciclo ativo ( $I_p \cdot CA$ ). A área total ( $S_T$ ) é influenciada, primeiramente, pela velocidade de

alimentação (Va), seguida da corrente de base (Ib) e da interação da corrente de pico com a velocidade de alimentação (Ip\*Va). A taxa de deposição (Txdep) é influenciada, pela ordem de significância, pela velocidade de alimentação (Va), pela interação entre a corrente de pico e a corrente de base (Ip\*Ib) e pelo ciclo ativo (CA). E o rendimento (Rend) é influenciado primeiramente, pela interação entre a corrente de pico e a corrente de base (Ip\*Ib), seguida do ciclo ativo (CA).

No processo Eletrodo Tubular, como pode ser observado na **Tabela 4.3**, todas as respostas foram fortemente influenciadas pela velocidade de alimentação do arame (Va). Além deste fator, a qualidade visual do cordão (Qualidade) foi influenciada, também, pela ordem de significância, pelo ciclo ativo (CA), pela corrente de base (Ib) e pela corrente de pico (Ip); e o rendimento (Rend) foi influenciado, primeiramente, pela corrente de base (Ib), seguida do ciclo ativo (CA). Nota-se ainda, que nenhuma interação entre os fatores influenciou significativamente as respostas. Entretanto, as interações da corrente de pico com a corrente de base (Ip\*Ib) e da corrente de pico com o ciclo ativo (Ip\*CA) situaram-se praticamente no limite de significância para as respostas índice de convexidade (IC) e rendimento (Rend), respectivamente. Por isto, serão consideradas significativas para efeitos de análises.

Tabela 4.3 – Resultado da análise de variância.

Resposta	Processo	Ip	Ib	CA	Va	Ip*Ib	Ip*CA	Ip*Va
P	MAG	<b>0,001</b>	<b>0,001</b>	0,088	<b>0,000</b>	0,217	0,846	0,064
	Eletrodo Tubular	0,502	0,631	0,502	<b>0,018</b>	0,297	0,631	0,923
IC	MAG	<b>0,034</b>	0,733	0,083	<b>0,021</b>	0,214	<b>0,044</b>	0,125
	Eletrodo Tubular	0,571	0,073	0,505	<b>0,002</b>	<b>0,055</b>	0,347	0,447
ST	MAG	0,120	<b>0,001</b>	0,738	<b>0,000</b>	0,305	0,451	<b>0,048</b>
	Eletrodo Tubular	0,688	0,509	0,577	<b>0,000</b>	0,179	0,986	0,753
Qualidade	MAG	-	-	-	-	-	-	-
	Eletrodo Tubular	<b>0,005</b>	<b>0,004</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,132	0,247	0,306
Txdep	MAG	0,093	0,052	<b>0,020</b>	<b>0,000</b>	<b>0,007</b>	0,451	0,402
	Eletrodo Tubular	0,921	0,164	0,562	<b>0,000</b>	0,347	0,362	0,989
Rend	MAG	0,095	0,051	<b>0,029</b>	0,264	<b>0,008</b>	0,591	0,482
	Eletrodo Tubular	0,102	<b>0,031</b>	<b>0,003</b>	<b>0,029</b>	0,087	<b>0,057</b>	0,607

Nota-se que para ambos os processos estudados a velocidade de alimentação do arame tem uma grande importância, pois é um fator muito influente nos dois processos, não apresentando significância apenas para o rendimento no processo MAG, conforme observado.

Uma diferença notória observada entre os processos é o número de fatores que os influenciam: enquanto o processo MAG é influenciado por vários fatores e interações o processo Eletrodo Tubular mostrou-se influenciado basicamente pela velocidade de alimentação do arame.

### 4.2.3 – Análise da Influência dos Parâmetros na Geometria do Cordão

#### a) Análise da Penetração

A penetração da solda é uma resposta muito importante, pois ela está diretamente ligada com a qualidade da solda. Uma penetração muito pequena pode resultar em um cordão sem resistência, comprometendo completamente a junta soldada. Por outro lado, uma solda com uma penetração excessiva torna-se crítica, principalmente em soldagem de chapas finas, podendo furar as mesmas. Entretanto, considera-se, neste trabalho, que uma resposta adequada é aquela que maximize a penetração. Este fato leva em consideração que os resultados obtidos dos testes não representam penetrações excessivas, mas apropriadas para permitir soldagens de chapas finas, conforme o objetivo principal do processo pulsado.

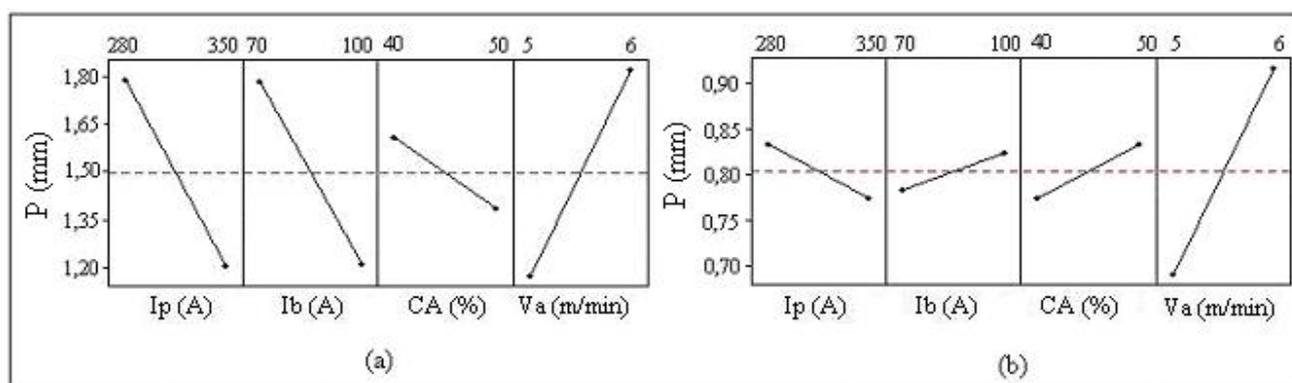


Figura 4.2 – Efeitos dos fatores na penetração para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A **Figura 4.2** apresenta o gráfico dos efeitos principais dos fatores na penetração para os processos MAG e Eletrodo Tubular. Observando esta figura nota-se que a penetração alcançada com o

processo MAG foi superior à do eletrodo tubular em todas as condições de soldagem. A velocidade de alimentação foi o fator mais influente em ambos os processos e mostrou similaridade de comportamento, ou seja, o seu aumento provocou o aumento da penetração, conforme o esperado, pois, em função da provável diminuição do comprimento do arco e da melhor abrangência do cordão de solda, houve uma atuação mais efetiva do arco provocando o aumento da penetração.

No processo MAG, influenciou ainda no a corrente de pico e a corrente de base, sendo que ambas, neste caso, favorecem o aumento da penetração quando utilizado em seus níveis mínimos. O aumento desses parâmetros promove o aumento da corrente média e, conseqüentemente, da energia fornecida, o que, teoricamente, provocaria uma elevação na energia imposta à peça. Entretanto, foi observado um comportamento contrário, havendo uma redução na penetração. O que pode ter havido, neste caso, é que o aumento da corrente média provocou um aumento na fusão do eletrodo, aumentando a quantidade de material de adição fundido, entre a ponta do arame e o material de base, provocando interferência na ação do jato plasma, que conforme Kobayashi (1987), pode prejudicar a penetração da solda.

Para o processo MAG, considerando os efeitos individuais de cada parâmetro, uma condição de máxima penetração pode ser obtida utilizando-se a corrente de pico, a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores associados à velocidade de alimentação do arame em seu nível superior. Já para o processo Eletrodo Tubular, a manutenção da corrente de pico em seu nível inferior, juntamente com os outros fatores em seus níveis superiores proporciona a maximização da penetração.

### ***b) Análise da Convexidade do Cordão***

A convexidade do cordão de solda é um parâmetro que está ligado à qualidade do cordão. Um cordão com uma convexidade inadequada pode ser causa de defeitos na solda. Caso a convexidade seja excessiva, pode ser um concentrador de tensões facilitando o aparecimento de trincas. Entretanto uma convexidade muito pequena muitas vezes também é considerado inadequado. Uma relação entre reforço e largura do cordão (índice de convexidade) inferior a 30% tem sido considerado como valores aceitáveis para este índice (Silva, 2000). Para efeitos deste trabalho relações entre 20 a 30% foram considerados como resultados aceitáveis.

Observando os efeitos principais obtidos para os dois processos, **Figura 4.3**, nota-se que a convexidade da solda gerada com o processo Eletrodo Tubular foi menor que à do processo MAG em

todas as condições. De forma geral em ambos os processos a convexidade se situou entre 17 a 28%, condição esta que satisfaz os requisitos de qualidade.

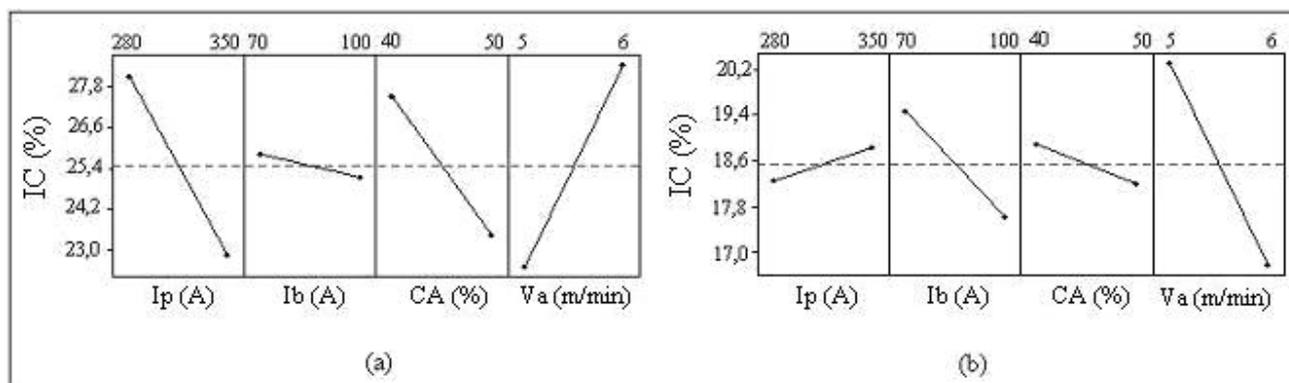


Figura 4.3 – Efeitos dos fatores na convexidade para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A velocidade de alimentação do arame se mostrou como sendo o parâmetro mais significativo em ambos os processos, e apresentou comportamento oposto com relação aos dois processos. No caso do MAG, o aumento da alimentação do arame gerou, como consequência, aumento na convexidade; porém no processo com Eletrodo Tubular este comportamento foi o oposto. O aumento da velocidade de alimentação do arame provoca a diminuição do comprimento do arco e conseqüentemente diminuição da largura do cordão. Como é provável que o reforço sofra menor influência, é portanto, de se esperar que a convexidade do cordão neste caso aumente, como ocorreu com o processo MAG. No processo com Eletrodo Tubular, talvez devido às características do arame, que segundo Araújo (2004), apresenta um arco mais largo, sendo que as gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo, portanto, toda a energia de soldagem mais uniformemente, o aumento da velocidade do arame pode ter resultado na formação de um cordão mais plano, e com convexidade menor. A menor convexidade dos cordões soldados com arame tubular comparativamente ao MAG pode ter sua explicação baseada na utilização de uma velocidade do arame não adequada ao processo, já que devido a presença do fluxo, a área metálica inferior ao arame sólido (Wang, 1995) conduz a necessidade de velocidades de alimentação maiores.

A corrente de pico influenciou significativamente o processo MAG sendo verificado que o seu aumento resultou em diminuição da convexidade do cordão, fato este esperado em função do aumento da taxa de fusão do arame e, conseqüentemente, do comprimento do arco.

Considerando as interações entre os fatores, observou-se no processo MAG que a corrente de pico interagiu significativamente com o ciclo ativo na convexidade do cordão, conforme mostrado na

**Figura 4.4.** Observa-se ainda, desta figura, que, para a minimização da convexidade, mantendo-se a corrente de pico em 350 A o ciclo ativo poderia ser fixado em 40%. No processo com eletrodo tubular, a interação da corrente de pico com a de base, praticamente, se situou no limite de significância, sendo por isto considerada significativa. Observa-se na **Figura 4.5** que a obtenção de uma convexidade mínima é favorecida pela utilização da corrente de pico e de base em seus níveis máximos.

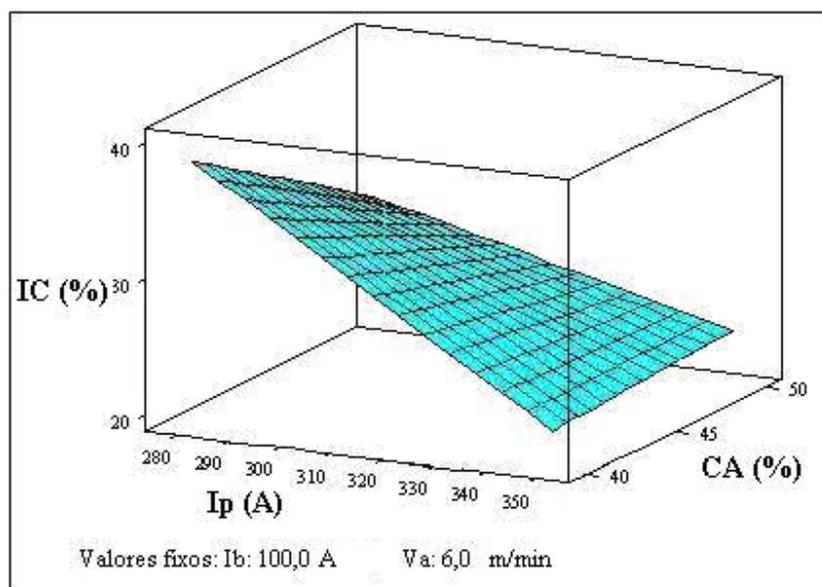


Figura 4.4 – Efeito da interação  $I_p \cdot CA$  sobre o IC no processo MAG.

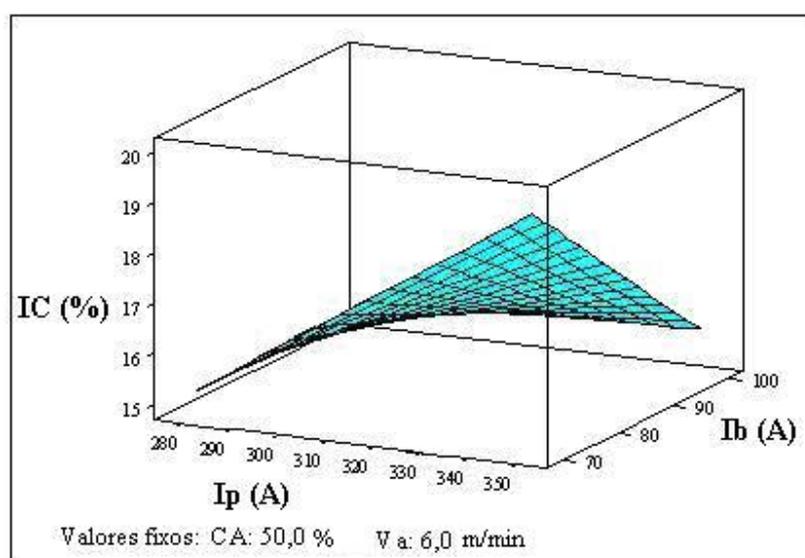


Figura 4.5 – Efeito da interação  $I_p \cdot I_b$  sobre o IC no processo Eletrodo Tubular.

### c) Análise da Área Total

A área total é a área depositada, ou seja, a área de penetração mais a área de reforço do cordão de solda. A sua importância na soldagem se dá tanto para a geometria do cordão, uma vez que ela determina o perfil da solda, quanto para a produtividade do processo, já que a área total pode medir o quanto do arame eletrodo foi utilizado para produzir o cordão.

Conforme pode ser visto na **Figura 4.6**, a área total do cordão de solda para o processo MAG foi superior à do eletrodo tubular em todas as condições de teste. Novamente a velocidade de alimentação do arame foi a mais significativa e mostrou comportamento similar em ambos os processos, ou seja, o seu aumento resultou em aumento da área total, como era de se esperar.

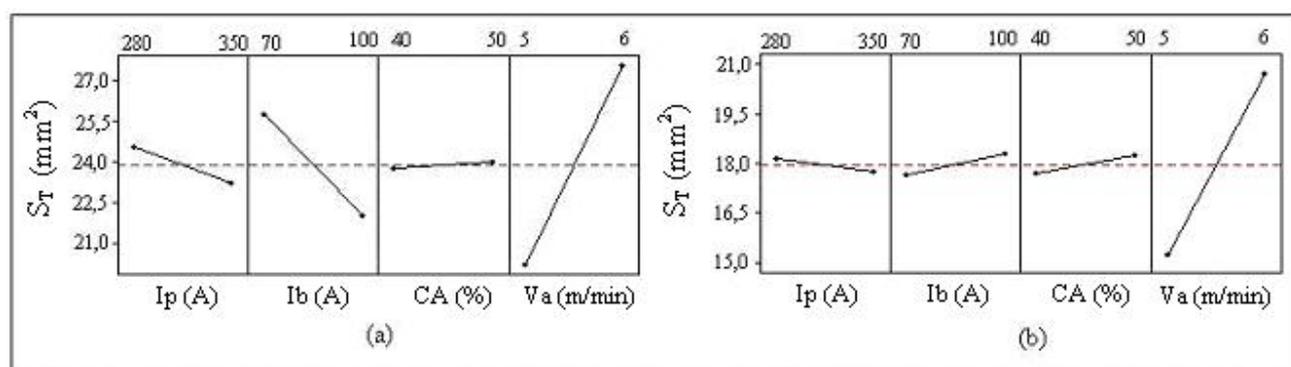


Figura 4.6 – Efeitos dos fatores na área total para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

A corrente de base também influenciou esta resposta no processo MAG, sendo que seu aumento promoveu a redução da resposta em estudo. Considerando que o aumento da  $I_b$  provoca uma elevação na corrente média, e em consequência, um aumento na fusão do eletrodo, há, portanto, uma diminuição do comprimento do eletrodo, já que a velocidade de alimentação está mantida constante e consequentemente, da energia gerada pelo efeito Joule. Esses fenômenos podem causar uma redução da penetração e, principalmente, do reforço do cordão, provocando uma diminuição da área total.

Observando a **Figura 4.6 (a)**, que mostra os efeitos dos fatores para o processo MAG, nota-se que a utilização da corrente de pico em seu nível inferior seria o adequado para maximizar a resposta em questão. No entanto, analisando a interação  $I_p \cdot V_a$  (**Figura 4.7**), nota-se que a utilização deste fator em seu nível superior associado à alimentação do arame também em seu nível superior permite que seja obtido o máximo de área depositada, dentro da superfície estudada. Logo, os resultados indicam que a

maior  $S_T$  pode ser obtida mantendo-se a  $I_b$  em seu nível inferior e todos os outros fatores em seus níveis superiores.

No processo Eletrodo Tubular, já que não foram observadas interações significativas, os resultados observados na **Figura 4.6 (b)** sugerem que a manutenção da  $I_p$  em seu nível inferior associada a todos os outros fatores em seus níveis superiores resultará no melhor resultado para a  $S_T$ .

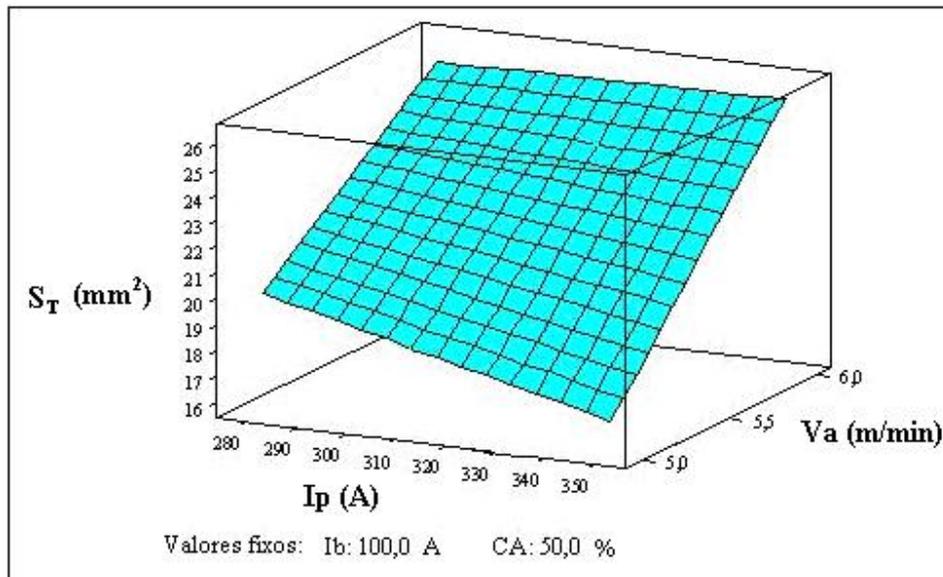


Figura 4.7 – Efeito da interação  $I_p \cdot V_a$  sobre a  $S_T$  no processo MAG.

#### ***d) Análise da Qualidade Visual do Cordão***

A qualidade visual do cordão é uma resposta importante para a adequação do processo e é resultante de uma inspeção visual do cordão de solda. Observou-se dos testes realizados que esta qualidade oscilou de forma bastante significativa, desde cordões com aspecto excelente até cordões de aspecto razoável.

Como pode ser observado na **Figura 4.8**, a diminuição do ciclo ativo (CA) e o aumento da velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) promovem uma melhor qualidade visual do cordão (Qualidade). Isto talvez ocorra, porque, com estas tendências há uma constância na relação entre a frequência e a velocidade de alimentação do arame, o que segundo (Alcan, 1992), promove a estabilidade do processo através da manutenção do tamanho da gota.

Por outro lado, o uso de corrente de pico ( $I_p$ ) e corrente de base ( $I_b$ ) em seus níveis maiores resultam em uma qualidade inferior. Isto se deve, provavelmente, a incorreta regulagem de parâmetros

que não proporciona uma manutenção da relação entre a velocidade de alimentação do arame e, conseqüentemente, da corrente média e a freqüência, promovendo instabilidades no processo, já que o aumento da  $I_m$  (através dos aumentos da  $I_p$  e  $I_b$ ) não implica em um aumento proporcional da freqüência.

Na análise dos efeitos principais de cada parâmetro sobre a resposta analisada observa-se que a melhor qualidade do cordão pode ser obtida trabalhando-se com a  $V_a$  em seu nível superior e os outros fatores em seus níveis inferiores.

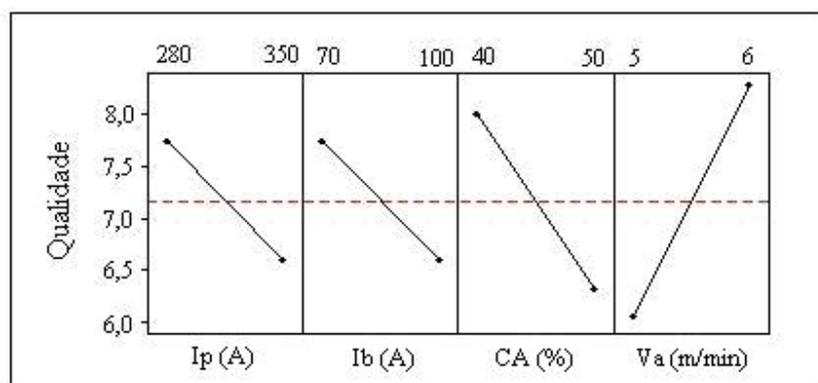


Figura 4.8 – Efeitos dos fatores na qualidade visual do cordão para processo Eletrodo Tubular.

#### 4.2.4 – Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade

Na avaliação das características de desempenho dos processos é fundamental a análise da taxa de deposição e do rendimento do processo. Este último, aliás, influencia diretamente nos custos de soldagem. As perdas decorrentes da formação de respingos ou escórias são os fatores que, geralmente, levam esses índices ao decréscimo.

Observando os efeitos principais obtidos para os dois processos, **Figura 4.9**, nota-se que a taxa de deposição gerada com o processo Eletrodo Tubular foi menor que a do processo MAG em todas as condições. Tal resultado já era esperado, pois como a velocidade de alimentação do arame foi a mesma para ambos os processos estudados, e como o Eletrodo Tubular apresenta uma menor densidade volumétrica que o arame sólido, soldados nas mesmas condições é de se esperar uma menor deposição para o Eletrodo Tubular.

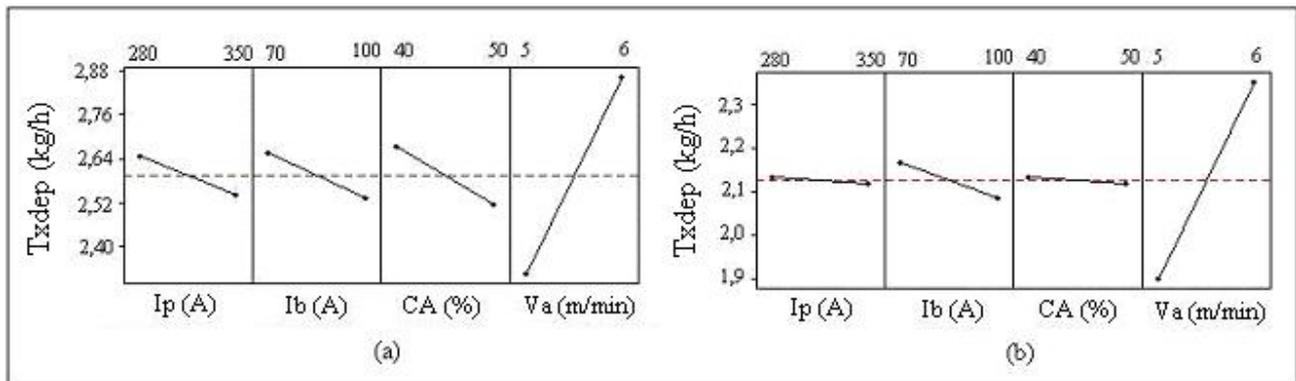


Figura 4.9 – Efeitos dos fatores na taxa de deposição para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

Com relação aos efeitos dos parâmetros, novamente a velocidade de alimentação foi a mais significativa para ambos os processos, mostrando um comportamento crescente com a taxa de deposição. O aumento da velocidade de alimentação gera, em consequência, um aumento do comprimento livre do eletrodo e, conseqüentemente, do aquecimento por efeito Joule. Desta maneira o aumento da energia gerada resulta numa maior fusão do arame e numa maior taxa de deposição em ambos os processos.

Os demais parâmetros estudados apresentaram basicamente o mesmo comportamento para os dois processos e se mostraram isoladamente pouco influentes na taxa de deposição.

De importante, ainda, na taxa de deposição se destaca a interação significativa  $I_p \cdot I_b$  no processo MAG, representada na **Figura 4.10**. De acordo com esta interação a utilização da corrente de pico em seu nível superior em conjunção com a corrente de base em seu nível inferior permite maximizar a taxa de deposição, muito embora, a utilização de uma corrente de pico em seu nível mínimo com um corrente de base em seu nível máximo permite praticamente obter a mesma taxa de deposição. Considerando a influência de todos os parâmetros para o processo MAG, a condição mais adequada que permite maximizar a taxa de deposição poderia ser a utilização da corrente de pico e velocidade de alimentação do arame em seus níveis superiores e a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores.

Para o processo Eletrodo Tubular a utilização da velocidade de alimentação em seu nível superior e dos outros fatores em seus níveis inferiores se mostrou como sendo a mais adequada para a maximização da taxa de deposição.

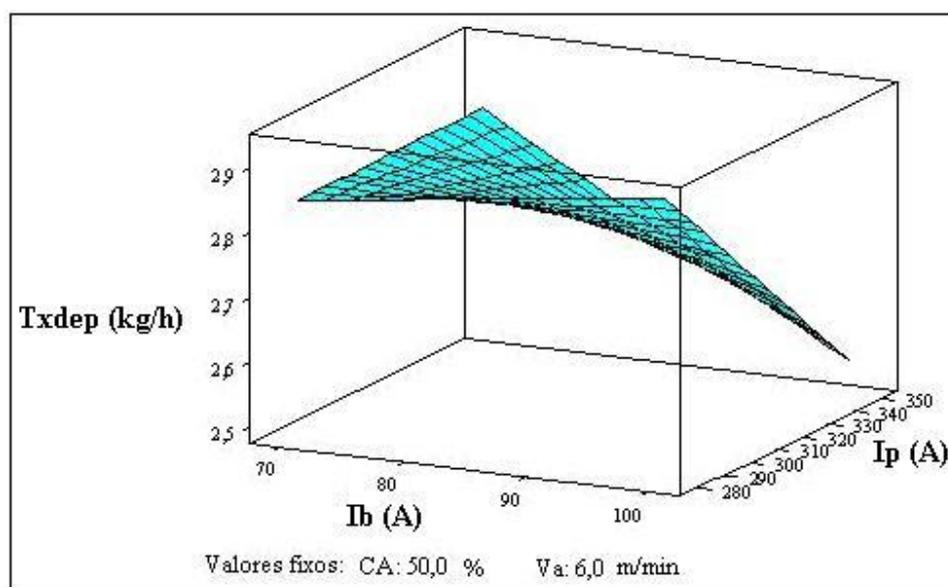


Figura 4.10 – Efeito da interação  $I_p \cdot I_b$  sobre a taxa de deposição no processo MAG.

Em relação ao rendimento do processo, a **Figura 4.11** mostra os efeitos principais dos fatores, e percebe-se a mesma tendência dos resultados anteriores, ou seja, o rendimento do processo MAG foi superior ao processo com eletrodo tubular em todas as condições de soldagem. Tal resultado era esperado, pois este último é influenciado pela formação de respingos e escórias oriundas do fluxo interno.

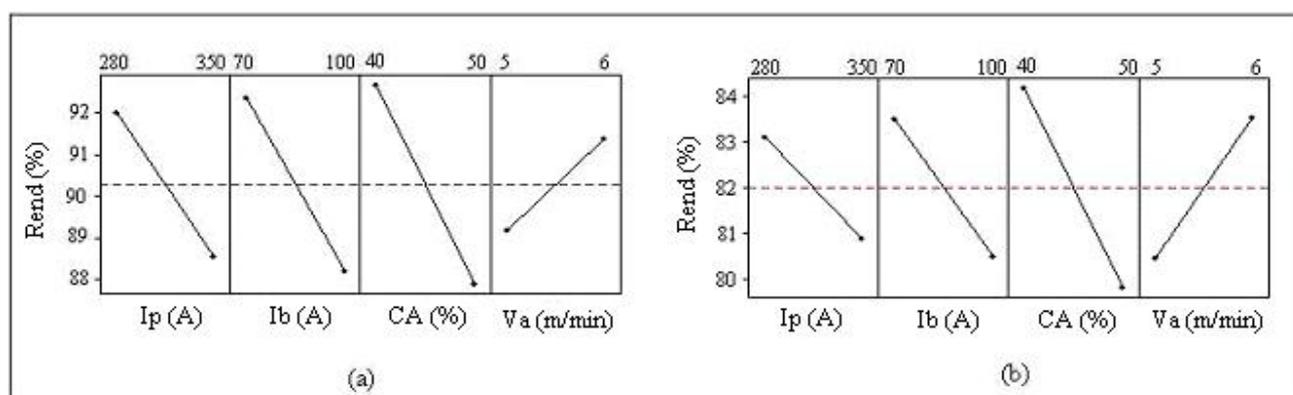


Figura 4.11 – Efeitos dos fatores no rendimento para o processo (a) MAG; (b) Eletrodo Tubular.

No processo MAG o único fator que se mostrou influente no rendimento foi o ciclo ativo, sendo que o seu aumento provoca a redução da resposta. Isto provavelmente pode ter ocorrido devido a uma regulagem incorreta dos parâmetros, que não manteve constante a relação entre a frequência e a velocidade de alimentação do arame que, segundo Alcan (1992) é necessária para manter a estabilidade

do processo. Neste caso, como não há a manutenção da referida relação, o aumento do ciclo ativo promove o aumento da frequência, mas não da velocidade de alimentação do arame. Em consequência, gotas de tamanhos diferentes em cada pulso podem ser formadas, provocando o aumento de respingos.

Em relação ao processo com Eletrodo Tubular, a **Figura 4.11** mostra que o aumento da corrente de base causa a redução do rendimento, provavelmente, gerada pela não proporcionalidade entre corrente média e frequência que pode causar instabilidades no processo através da produção de gotas de tamanhos variados provocando transferências com muitos respingos. Além disso, para a regulação dos parâmetros de pulso utilizada neste trabalho, não se sabia com certeza se estava garantida a condição de uma gota por pulso, podendo estar, inclusive, acontecendo destacamentos de mais de uma gota por pulso, o que provoca instabilidades e aumento de respingos.

Observa-se ainda que o rendimento é influenciado pelo ciclo ativo e a alimentação do arame, sendo que a utilização de um menor ciclo ativo e uma maior velocidade de alimentação do arame aparentemente favorecem o rendimento da soldagem com o eletrodo tubular. O aumento do ciclo ativo resulta em aumento da frequência. Logo, com essas tendências de variação (da frequência através do CA e da Va) há de uma certa forma uma manutenção da relação entre esses parâmetros o que provoca certa estabilidade no processo, diminuindo, portanto, a formação de respingos e aumentando o rendimento.

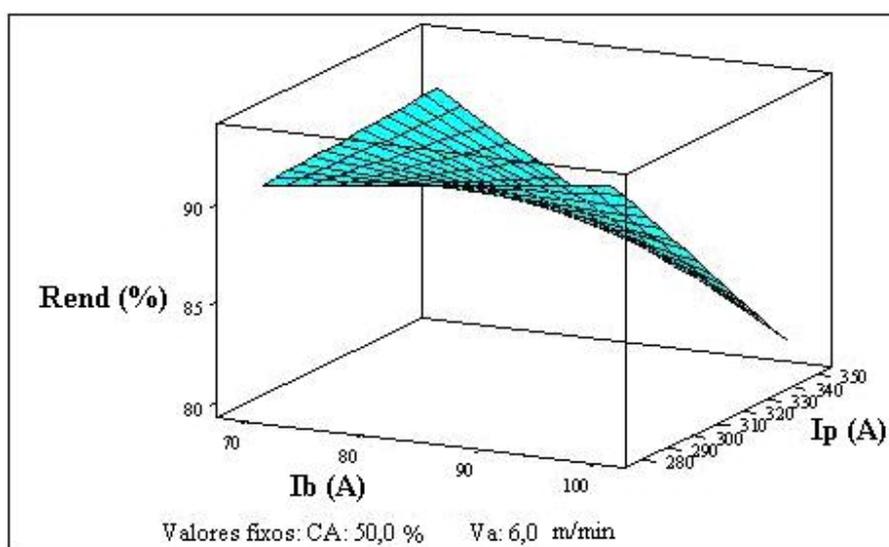


Figura 4.12 – Interação  $I_p \cdot I_b$  no processo MAG.

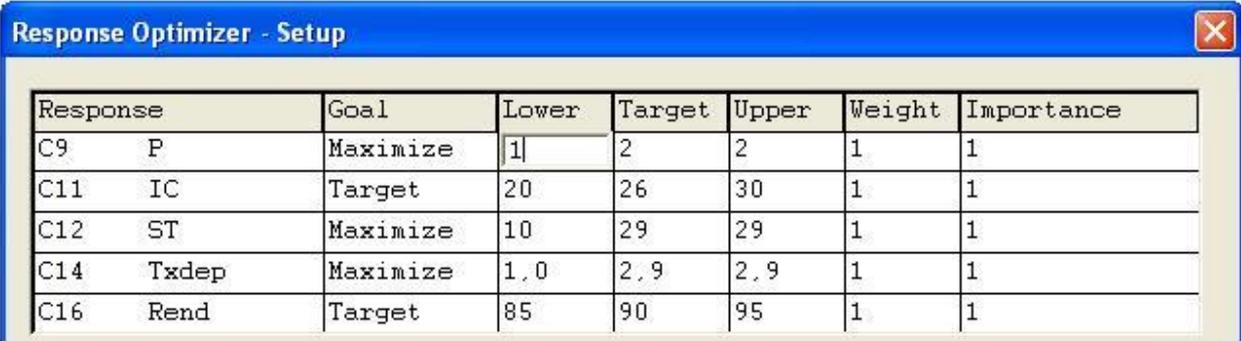
Considerando a interação significativa  $I_p \cdot I_b$ , mostrada na **Figura 4.12**, para o processo MAG a condição de corrente de pico e da alimentação do arame em seus níveis superiores associados a corrente de base e o ciclo ativo em seus níveis inferiores resultará no maior rendimento.

No processo com eletrodo tubular, o maior rendimento possível pode ser obtido utilizando a alimentação do arame em seu nível superior e os outros fatores em seus níveis inferiores.

#### 4.2.4 – Condições Otimizadas

Nas análises anteriores se procurou encontrar uma condição que permitisse otimizar uma resposta isoladamente. No entanto, o mais interessante e necessário, na prática, é encontrar uma resposta que permita conjugar todos os fatores na obtenção de uma geometria e de uma produtividade adequadas, ou seja, a condição ótima. Com este intuito utilizou-se a ferramenta “Response Optimizer” do software MINITAB para encontrar esta condição para os processos estudados. A **Figura 4.13** e a **Figura 4.14** mostram o campo da ferramenta “Response Optimizer”, onde se entra com os níveis das respostas pretendidas, já com os níveis estabelecidos para o processo MAG e Eletrodo Tubular, respectivamente. A **Tabela 4.4** mostra os resultados obtidos.

Observando a simulação delineada pelo “Response Optimizer” (**Tabela 4.4**) nota-se que as condições ótimas obtidas para os dois processos em estudo são diferentes, mas ambas sugerem o uso da corrente de pico em seu nível inferior. Nota-se também que a condição ótima obtida para o processo Eletrodo Tubular corresponde aos testes 3, 11 e 19 da **Tabela 4.2**. A **Tabela 4.5** mostra os resultados obtidos nestes testes, juntamente com as respostas previstas pelo “Response Optimizer”, mostrando que os resultados dos testes 3, 11 e 19 da **Tabela 4.2** aproximam-se do previsto pelo software, validando as análises realizadas.



Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C9 P	Maximize	1	2	2	1	1
C11 IC	Target	20	26	30	1	1
C12 ST	Maximize	10	29	29	1	1
C14 Txdep	Maximize	1,0	2,9	2,9	1	1
C16 Rend	Target	85	90	95	1	1

Figura 4.13 – Níveis das respostas pretendidas para o processo MAG.

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C9	P	Maximize	0,5	1,0	1,0	1
C11	IC	Minimize	20	20	30	1
C12	St	Maximize	15	20	22	1
C13	Qualidade	Maximize	6	9	9	1
C15	Txdep	Maximize	1,8	2,3	2,3	1
C17	Rend	Maximize	75,0	83	83	1

Figura 4.14 – Níveis das respostas pretendidas para o processo Eletrodo Tubular.

Tabela 4.4 – Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.

	Condição ótima	Respostas Previstas	Desejabilidade
MAG	$I_p = 280 \text{ A}$ $I_b = 70 \text{ A}$ $CA = 50 \%$ $V_a = 5,7 \text{ m/min}$	$P = 2,2 \text{ mm}$	1,00
		$IC = 26,0 \%$	1,00
		$S_T = 27,9 \text{ mm}^2$	0,94
		$Txdep = 2,8 \text{ kg/h}$	0,93
		$Rend = 90,3 \%$	0,94
		Coeficiente de desejabilidade global = 0,96	
Eletrodo Tubular	$I_p = 280 \text{ A}$ $I_b = 100 \text{ A}$ $CA = 40\%$ $V_a = 6 \text{ m/min}$	$P = 0,9 \text{ mm}$	0,93
		$IC = 16,9 \%$	1,00
		$S_T = 21,8 \text{ mm}^2$	1,00
		Qualidade = 9,2	1,00
		$Txdep = 2,4 \text{ kg/h}$	1,00
		$Rend = 87,4 \%$	1,00
Coeficiente de desejabilidade global = 0,99			

Tabela 4.5 – Quadro comparativo entre respostas previstas e obtidas.

<b>Respostas Analisadas</b>	<b>Resultados Previstos</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 11</b>	<b>Teste 19</b>
P (mm)	0,9	1,0	1,0	1,0
IC (%)	16,9	8,2	15,3	17,5
S <sub>T</sub> (mm <sup>2</sup> )	21,8	22,1	21,2	22,0
Qualidade	9,2	9,7	9,0	9,0
Txdep (Kg/h)	2,4	2,5	2,5	2,2
Rend (%)	87,4	86,1	86,9	89,3

#### 4.2.5 – Comentários Finais a Respeito da Comparação entre os Processos

A **Figura 4.15** apresenta a influência do tipo de processo estudado sobre as respostas analisadas. Através da análise desta figura é observado que, em relação ao processo MAG (GMAW), o processo Eletrodo Tubular (FCAW) apresenta menor penetração, índice de convexidade, área total, taxa de deposição e rendimento.

Portanto, aparentemente, o processo MAG apresenta um potencial elevado em relação ao processo Eletrodo Tubular, já que todas as respostas estudadas apresentam melhor resultado quando obtidas através do processo MAG, com exceção apenas do índice de convexidade. No entanto, este resultado não descreve precisamente a realidade. Segundo a literatura, a fusão do arame tubular apresenta diferenças em relação aos arames sólidos. Segundo Wang (1995), a área metálica do arame tubular é muito menor que a do arame maciço (com o mesmo diâmetro). Por isto, o processo com arame tubular apresenta uma densidade de corrente muito maior que a do processo com arame sólido, o que, provavelmente, implicaria na necessidade de utilização de uma maior velocidade de alimentação do arame. Por outro lado, Mota (1998) ressalta que o fluxo reduz o grau de “aquecimento ôhmico” (efeito Joule) do arame, durante a passagem da corrente. A taxa de aquecimento da capa metálica seria então menor devido ao consumo de calor requerido para a fusão do fluxo. Desta forma a energia necessária para fundir o arame tubular seria maior do que a necessária para fundir um arame maciço, precisando então, a soldagem com aquele, de níveis de energia maiores.

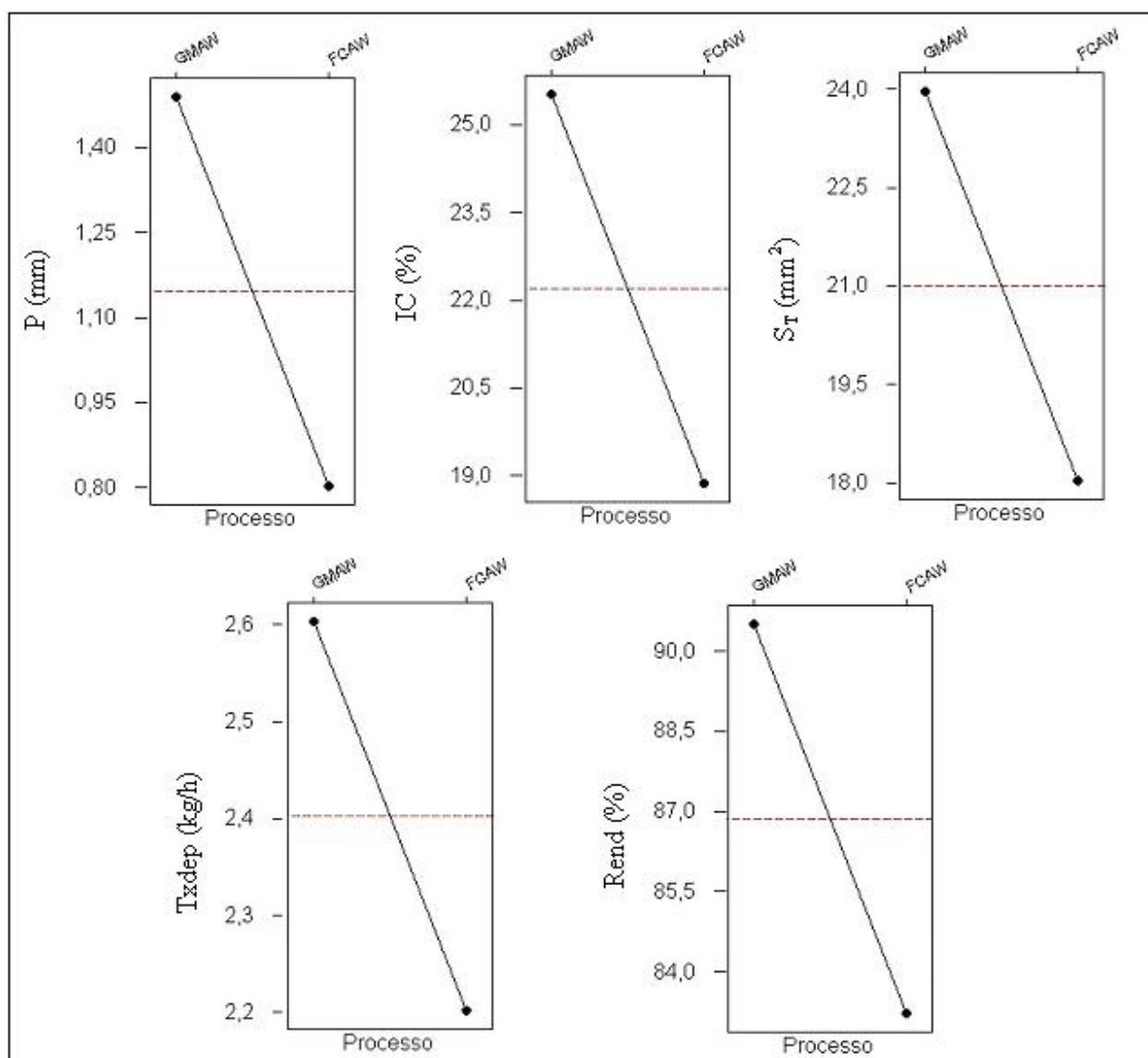


Figura 4.15 – Efeito do tipo de processo sobre as respostas estudadas.

Desta forma, as condições utilizadas neste trabalho até aqui não se mostraram muito adequadas à soldagem com arame tubular. Notou-se que não é possível conseguir as características das soldas produzidas com MAG nas soldas produzidas com Eletrodo Tubular, utilizando as mesmas condições de pulso daquele.

Como o objetivo principal deste trabalho é ampliar o conhecimento sobre a soldagem com Eletrodo Tubular, sentiu-se a necessidade de se estudar um pouco mais o processo através de outros testes, deixando de lado a comparação com o processo MAG, o que deixaria a pesquisa mais flexível e não dependente das condições utilizadas para o processo MAG. Essas considerações levaram a necessidade de novos testes, através dos quais se pudesse avaliar a influência da corrente média e

velocidade de alimentação do arame, cuja importância para o processo se mostrou muito grande, devido a sua grande e quase exclusiva influência sobre o processo Eletrodo Tubular. Além disso, sabe-se da literatura (Medeiros et al, 1989; Araújo, 2004, Saito, 2001), que o processo Eletrodo Tubular se sobressai em relação ao processo MAG, dentre outros aspectos, devido a maior taxa de deposição, o que, se pretende avaliar utilizando um nível adicional para a velocidade de alimentação.

Como esta parte do trabalho representa uma nova fase da pesquisa em questão, resolveu-se analisar também a influência de uma outra variável, a frequência, pois este é um parâmetro frequentemente analisado em trabalhos que avaliam as potencialidades da utilização do processo Eletrodo Tubular pulsado (Braga et al, 1998; Norrish et al, 1995; Medeiros et al, 1989). Assim sendo, um novo Planejamento Fatorial Completo foi definido para o estudo da influência dos parâmetros de pulso corrente média e frequência e da velocidade de alimentação do arame sobre as características geométricas e produtivas do processo Eletrodo Tubular. A definição dos níveis utilizados no fatorial completo foi estabelecida a partir de testes preliminares, que são apresentados, juntamente com o fatorial completo, no item seguinte.

## **4.3 – Parte 2: Análise do Processo Eletrodo Tubular Pulsado**

### **4.3.1 – Testes Preliminares**

Esta parte do trabalho tem o objetivo de definir um novo planejamento fatorial para o processo Eletrodo Tubular, com níveis de fatores mais apropriados para o processo, de modo que informações mais precisas possam ser obtidas a respeito do processo Eletrodo Tubular Pulsado.

Considerando o anteriormente exposto, verificou-se a necessidade de se fazer uma investigação preliminar da influência da velocidade de alimentação do arame associado à corrente média e frequência de pulsação. Estes novos testes seguiram a mesma metodologia de preparação e realização anteriormente descritas cujos detalhes encontram-se no **Capítulo 3**. Procurou-se ainda manter os valores de corrente de pico e base constantes nos doze primeiros testes e variar apenas os tempos de pico e de base de acordo com a corrente média e frequência pretendidas. É importante mencionar que esses testes foram derivados da condição ótima obtida na primeira parte do trabalho. Os dois últimos testes referem-se a condições sugeridas na literatura (Nascimento, 2003). A sequência de testes, bem como os parâmetros avaliados e os resultados obtidos estão apresentados na **Tabela 4.6**. Nota-se que apenas nos testes 13 e 14 utilizou-se valores de corrente de pico e de base diferentes dos anteriores.

Tabela 4.6 - Testes e resultados complementares.

Testes	Ip	Ib	Tp	Tb	Va	Im	F	P	IC	Txdep	Rend
-	(A)	(A)	ms	ms	(m/min)	(A)	(Hz)	(mm)	(%)	(kg/h)	(%)
1	280	100	4	4	5	190	125,0	0,9	21,0	2,0	81,7
2	280	100	4	4	6	190	125,0	1,1	17,7	2,2	81,1
3	280	100	4	4	7	190	125,0	1,2	17,3	2,5	86,6
4	280	100	4	6	5	172	100,0	0,5	21,9	1,7	70,4
5	280	100	4	6	6	172	100,0	1,1	18,2	2,5	86,1
6	280	100	4	6	7	172	100,0	1,0	39,6	3,5	90,5
7	280	100	4	8	5	160	83,3	1,0	18,4	2,1	84,3
8	280	100	4	8	6	160	83,3	1,0	22,2	2,0	86,6
9	280	100	4	8	7	160	83,3	0,5	42,9	2,8	97,5
10	280	100	4	6	7	172	100	1,2	23,8	3,1	87,0
11	280	100	2	2	7	190	250	1,2	21	3,1	88,5
12	280	100	2	3	7	172	200	1	27,6	3,1	85,6
13*	319	85	1,3	2	7,5	177,2	303	0,7	29,5	3,3	83,4
14*	353	142	1	1,6	9,5	223,2	385	1,3	25,2	4,6	81,1

\* Testes sugeridos pela literatura

Considerando os resultados obtidos na **Tabela 4.6**, a **Figura 4.16** apresenta o comportamento da penetração frente às influências isoladas da corrente média, velocidade de alimentação e frequência de pulsação. Nota-se uma tendência de aumento da penetração para o crescimento de todos os parâmetros analisados, entretanto, este crescimento não foi muito significativo, variando de aproximadamente 0,8 mm até 1,3 mm. Entretanto, ao observar-se o comportamento da convexidade do cordão (**Figura 4.17**) nota-se que a frequência praticamente não influenciou no seu formato, ao passo que o aumento da velocidade de alimentação do arame provocou uma tendência de crescimento da convexidade, sendo este parâmetro o mais influente nesta resposta. O aumento da corrente média por sua vez provocou uma leve tendência de diminuição da convexidade. Tais resultados apresentam coerência com o esperado.

Considerando os resultados obtidos para a taxa de deposição, **Figura 4.18**, observa-se uma tendência de crescimento da taxa de deposição com os aumentos da corrente média, velocidade de alimentação e frequência de pulsação. Observa-se ainda que de acordo com os testes realizados a taxa de deposição variou de aproximadamente 2 kg/h até 4,5 kg/h. Como o processo com eletrodo tubular exige taxas de deposições maiores para compensar o maior custo do arame frente ao processo MAG aparentemente tais resultados indicam a necessidade de se trabalhar com valores superiores de frequência de pulsação, de alimentação do arame e corrente média.

Entretanto, nota-se da **Figura 4.19** que o rendimento da solda é influenciado significativamente por tais condições. No caso da alimentação do arame fica nítido pelos resultados obtidos que velocidades superiores a 7 m/min diminuíram o rendimento da soldagem devido provavelmente a instabilidade do arco e instabilidade na transferência metálica, ocasionando maiores formações de respingos. O mesmo se observa para freqüências de pulsação superiores a 250 Hz e corrente média superior a 190 A.

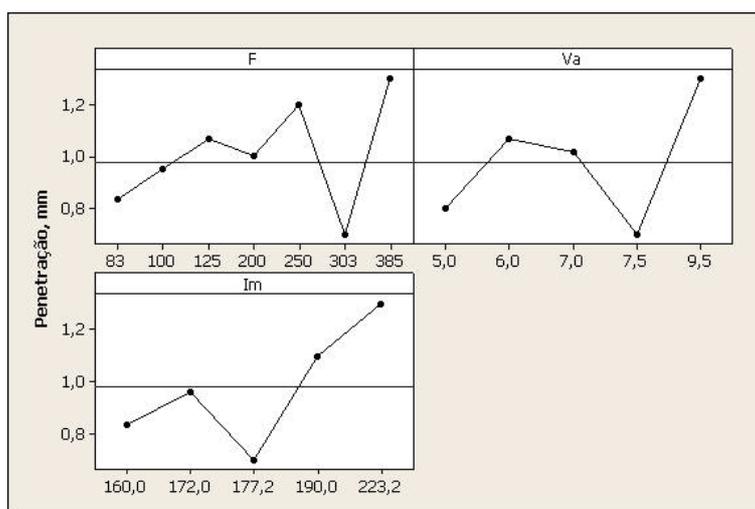


Figura 4.16 - Influência da freqüência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a penetração.

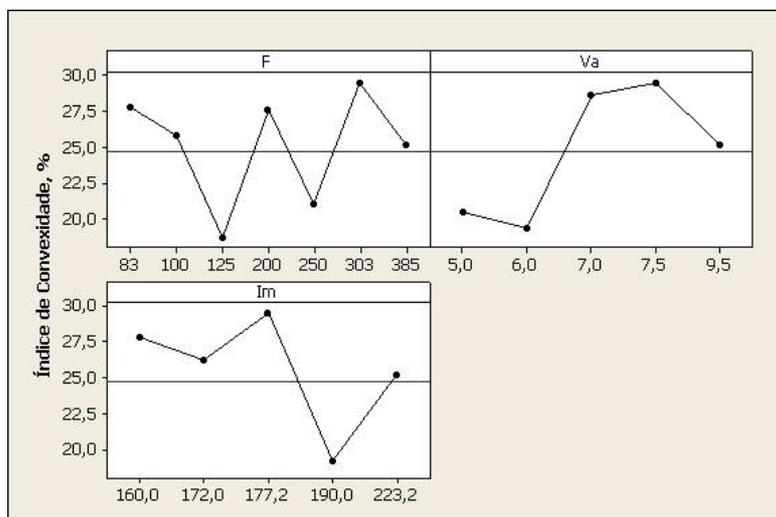


Figura 4.17- Influência da freqüência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a convexidade do cordão.

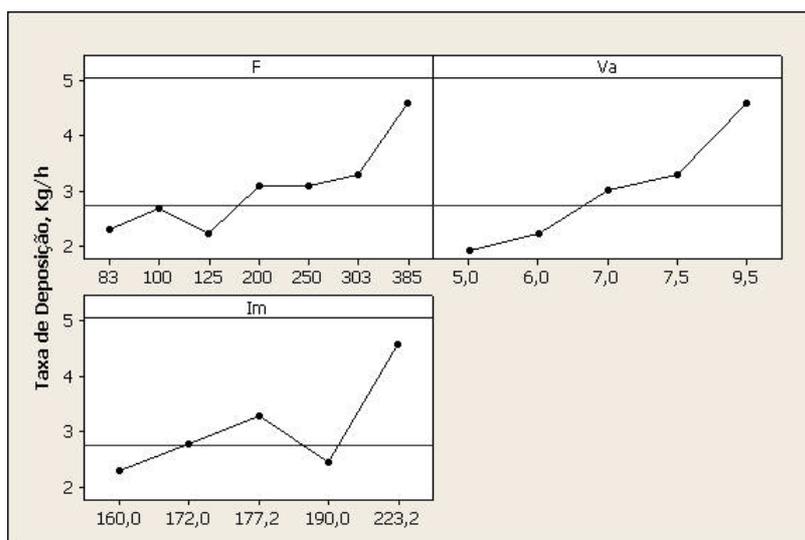


Figura 4.18 - Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre a taxa de deposição.

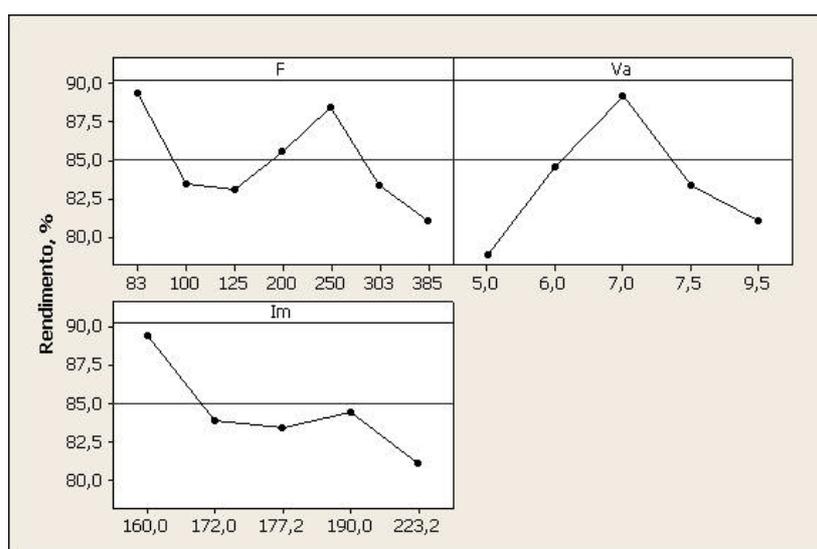


Figura 4.19 - Influência da frequência, velocidade de alimentação e corrente média sobre o rendimento da soldagem.

Com essas análises definiu-se os níveis das respostas a serem estudadas no planejamento fatorial completo. Escolheu-se para a corrente média o nível inferior de 160 A e o superior de 200 A; para a frequência escolheu-se 150 Hz e 200 Hz como nível inferior e superior e escolheu-se 6 m/min como sendo o nível inferior da velocidade de alimentação e 8 m/min como o nível superior. A escolha desses níveis foi baseada nos testes preliminares, com o intuito de obter principalmente, maiores

penetrações e taxas de deposição em relação a primeira parte do trabalho, de modo a compensar o maior custo do arame tubular, comparativamente, ao arame sólido, conforme comentado anteriormente.

### 4.3.2 – Planejamento Fatorial Completo

A ordem de testes, bem como os valores das respostas medidas e calculadas para o fatorial completo estão apresentados na **Tabela 4.7**.

Tabela 4.7 – Ordem de testes e resultados do fatorial completo.

OP	Im	F	Va	P	IC	S <sub>T</sub>	Qualidade	Txdep	Rend
-	(A)	(Hz)	(m/min)	mm	%	mm <sup>2</sup>	-	(Kg/h)	%
1	160	150	6	1,1	20,4	17,5	9	2,4	82,0
2	200	150	6	1,2	17,6	18,9	7	2,2	82,9
3	160	200	6	0,9	27,6	18,1	10	2,5	85,2
4	200	200	6	1,0	16,0	18,5	8	2,3	82,6
5	160	150	8	0,8	30,2	20,3	8	2,9	85,9
6	200	150	8	1,2	24,5	27,9	7	3,2	82,2
7	160	200	8	0,7	27,8	19,1	10	3,0	87,2
8	200	200	8	1,3	20,0	26,5	9	3,2	86,0
9	160	150	6	1,0	22,7	16,2	8	2,4	82,8
10	200	150	6	1,2	21,1	17,3	7	2,4	81,6
11	160	200	6	0,9	22,7	17,4	9	2,3	85,0
12	200	200	6	1,1	15,1	19,2	8	2,3	82,4
13	160	150	8	0,9	30,2	19,1	8	3,1	83,1
14	200	150	8	1,2	24,5	25,2	7	3,0	82,3
15	160	200	8	0,8	26,4	18,2	10	3,8	87,7
16	200	200	8	1,3	18,8	25,2	9	3,1	86,3

A **Figura 4.20** mostra o perfil de solda para as duas condições extremas do planejamento fatorial completo.

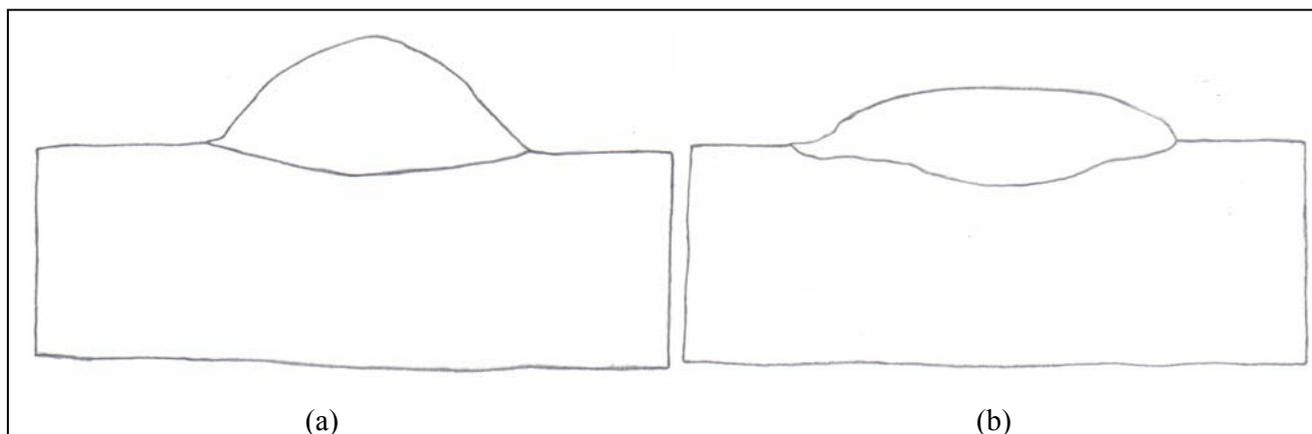


Figura 4.20 - Perfil dos cordões na condição: (a)  $F=160$  Hz,  $I_m=150$  A e  $V_a=8$  m/min; (b)  $F=200$  Hz,  $I_m=200$  A e  $V_a=6$  m/min.

#### 4.3.2.1 - Análise de Variância

Para que os resultados destes experimentos pudessem ser avaliados consistentemente, utilizou-se novamente a análise de variância, através do software MINITAB. Utilizando uma confiabilidade estatística de 95%, para que uma variável seja considerada estatisticamente significativa no processo, o nível  $\alpha$  obtido deve ser inferior a 5% (0,05).

A **Tabela 4.8** mostra os valores do nível  $\alpha$  para as respostas referentes aos parâmetros estudados considerando interações de até 3ª ordem. Os números em negrito, nesta tabela, indicam que os valores médios das respostas foram estatisticamente afetados pelos fatores de controle com 95% de confiabilidade.

Tabela 4.8 – Resultado da análise de variância para o novo planejamento fatorial.

Resposta	$I_m$	F	$V_a$	$I_m * F$	$I_m * V_a$	$F * V_a$	$I_m * F * V_a$	$R^2$	$R^2_{adj}$
P	<b>0,000</b>	<b>0,017</b>	0,347	0,081	<b>0,000</b>	<b>0,017</b>	0,081	96,28	93,02
IC	<b>0,000</b>	<b>0,038</b>	<b>0,000</b>	<b>0,024</b>	0,649	<b>0,046</b>	0,149	93,30	87,43
$S_T$	<b>0,000</b>	0,962	<b>0,000</b>	0,924	<b>0,000</b>	0,132	0,812	95,98	92,47
Qualidade	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,195	1,000	0,195	<b>0,022</b>	1,000	94,37	89,44
Txdep	0,459	0,347	<b>0,000</b>	0,459	0,914	0,347	0,459	87,50	76,56
Rend	<b>0,005</b>	<b>0,000</b>	<b>0,001</b>	0,384	0,636	<b>0,043</b>	0,070	91,59	84,24

Os resultados da análise de variância mostram que, ao contrário do que foi observado na parte 1 deste capítulo, onde, praticamente, somente a velocidade de alimentação do arame ( $V_a$ ) se mostrou

influyente no processo Eletrodo Tubular, este planejamento fatorial mostrou que a corrente média ( $I_m$ ), a frequência de pulso ( $F$ ) e as interações entre parâmetros também são muito influentes no processo. Além disso, o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) foi muito alto em todas as respostas indicando um resultado muito bom.

Os resultados mostraram que, pela ordem de significância:

- a penetração foi influenciada pela corrente média, pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação do arame ( $I_m \cdot V_a$ ), pela frequência de pulso e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação do arame ( $F \cdot V_a$ );
- a convexidade do cordão foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação, pela interação  $I_m \cdot F$  e pela interação  $F \cdot V_a$ ;
- a  $S_T$  foi influenciada pela corrente média, pela velocidade de alimentação e pela interação da corrente média com a velocidade de alimentação ( $I_m \cdot V_a$ );
- a Qualidade foi influenciada pela corrente média, pela frequência e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação ( $F \cdot V_a$ );
- a taxa de deposição foi influenciada somente pela velocidade de alimentação do arame;
- o rendimento foi influenciado pela corrente média, pela frequência, pela velocidade de alimentação e pela interação da frequência com a velocidade de alimentação ( $F \cdot V_a$ ).

### 4.3.2.2 - Análise da Influência dos Parâmetros na Geometria do Cordão

#### *a) Análise da Penetração*

Observando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 4.21**, nota-se que o aumento da corrente média (parâmetro mais significativo) provoca o aumento da penetração. Este fato já era esperado, pois o aumento deste parâmetro provoca o aumento da energia que, segundo Miills e Keene (1990) provoca uma maior pressão no arco, determinando um aumento na penetração.

Quanto à frequência de pulsação, outro fator significativo na penetração, observa-se na **Figura 4.21** que o seu aumento provocou uma redução na resposta. Isto se deve ao fato de que, nesta condição, o comprimento livre do eletrodo é menor (Miller, 1994), e, portanto, a energia gerada pelo efeito Joule também. Além disso, com o comprimento do eletrodo menor, ou seja, com um maior comprimento do arco não há uma adequada abrangência do cordão de solda, resultando em uma redução da penetração.

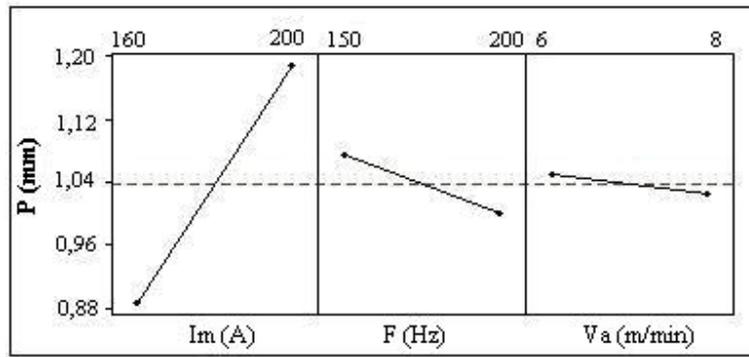


Figura 4.21 – Efeitos principais dos fatores sobre a penetração.

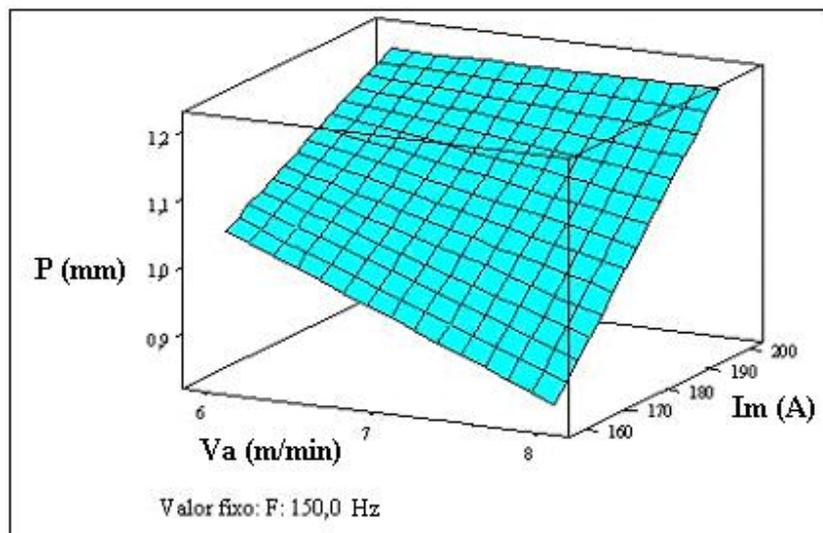


Figura 4.22 – Influência da interação  $Im \cdot Va$  sobre a penetração.

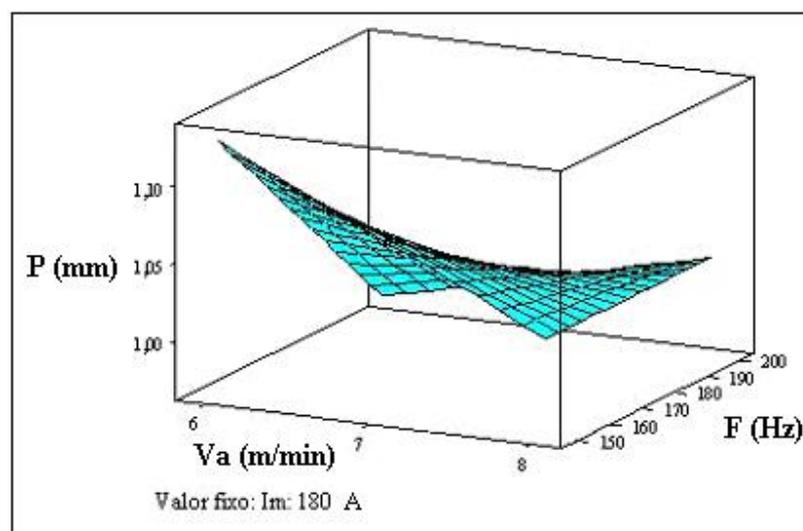


Figura 4.23 – Influência da interação  $F \cdot Va$  sobre a penetração.

Para se obter uma combinação de parâmetros que maximize a penetração deve-se levar em consideração, tanto o efeito individual de cada parâmetro, quanto o efeito das interações significativas observadas na análise de variância. Na **Figura 4.22**, que representa o comportamento da interação da corrente média com a alimentação do arame, observa-se que a maximização da penetração foi obtida quando a corrente média se situou em seu nível superior (200 A) associada à velocidade de alimentação também em seu nível superior (8 m/min), muito embora se observa que a utilização de velocidade de alimentação do arame com 6 m/min pode também gerar uma penetração adequada com uma pequena redução na penetração em relação a condição anterior. Já na **Figura 4.23**, que representa a interação da frequência com a alimentação do arame, nota-se que para esta condição de  $V_a$  de 8 m/min a frequência pode ser utilizada em qualquer nível sem influenciar significativamente na penetração. Desta forma a condição que, aparentemente, permite obter o melhor resultado para a penetração foi aquela na qual a corrente média e a alimentação do arame foram mantidas em seus níveis superiores conjuntamente com a frequência em seu nível inferior, muito embora a velocidade de alimentação possa também ser usada em seu nível inferior sem praticamente afetar significativamente o resultado.

### ***b) Análise da Convexidade do Cordão***

Com relação aos efeitos principais, **Figura 4.24**, nota-se pelos resultados que a convexidade de forma geral se situou em níveis considerados adequados para todos os testes. De forma particular observa-se que o aumento da corrente média (parâmetro mais significativo) provocou a redução da convexidade do cordão, fato este esperado, pois o aumento da energia do processo provoca um aumento na taxa de fusão do eletrodo. Entretanto, como a velocidade de alimentação do arame está constante, reduz-se o comprimento do eletrodo, e, portanto, a energia gerada pelo efeito Joule, diminuindo a deposição e provocando uma redução na convexidade do cordão.

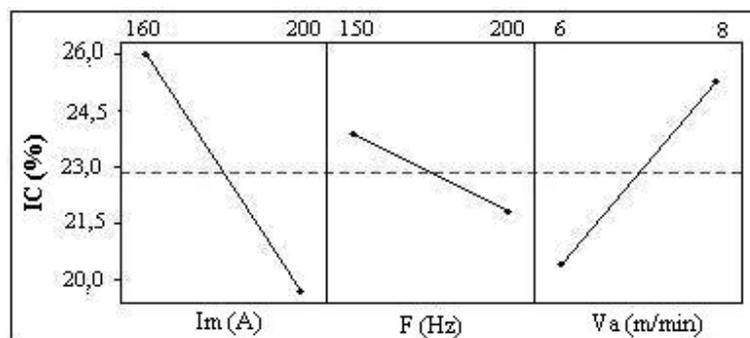


Figura 4.24 – Efeitos principais dos fatores sobre o índice de convexidade.

Em relação à alimentação do arame (segundo parâmetro mais significativo), a mesma figura mostra que o seu aumento provoca uma elevação no índice de convexidade, resultado este também esperado. Isto se deve ao aumento do comprimento do eletrodo e, portanto, da energia gerada pelo efeito Joule, causando o aumento da fusão do eletrodo e da taxa de deposição. O aumento da frequência de pulsação também resultou em uma redução da convexidade (**Figura 4.24**). Isto ocorre porque com o aumento da frequência há uma redução do comprimento do eletrodo, diminuindo a deposição, e, conseqüentemente, a convexidade do cordão.

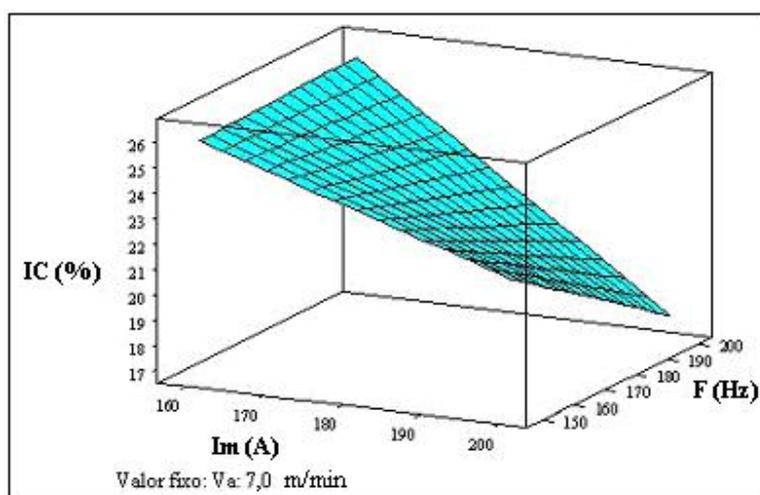


Figura 4.25 – Influência da interação  $I_m \cdot F$  sobre o índice de convexidade.

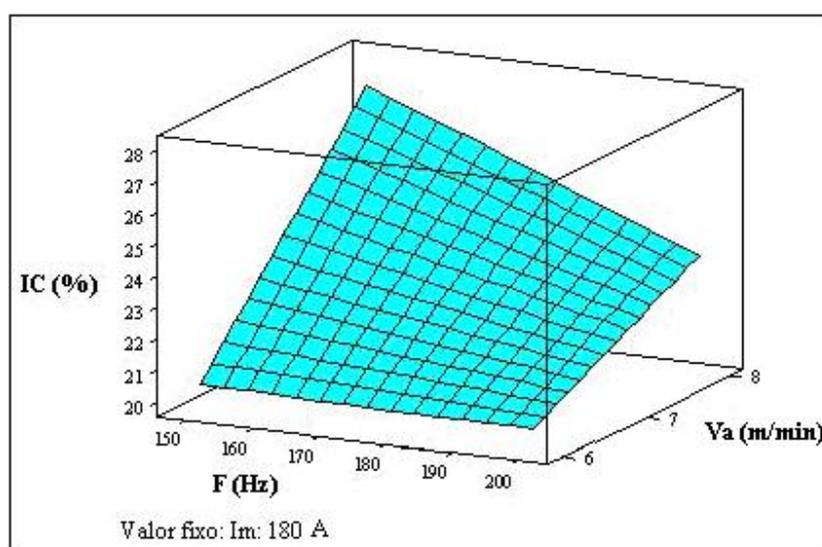


Figura 4.26 – Influência da interação  $F \cdot V_a$  sobre o índice de convexidade.

Ainda de importante para a análise do índice de convexidade têm-se as interações significativas apresentadas na **Figura 4.25** e na **Figura 4.26**. Nelas é possível observar que para se obter o cordão mais plano possível deve-se trabalhar com a corrente média e a frequência em seus níveis superiores, 200 A e 200 Hz, respectivamente, e com a velocidade de alimentação do arame em seu nível inferior, 6 m/min. Entretanto, outras opções também se mostram possíveis já que de forma geral a convexidade obtida se situou em níveis considerados adequados para aplicações práticas.

### c) Análise da Área Total

A **Figura 4.27** mostra que o aumento da corrente média provoca o aumento da área de depósito, fato esperado, pois com maior corrente uma maior energia é fornecida ao processo, o que resulta em um incremento na geometria do cordão, resultando em um aumento da área total.

O aumento da velocidade de alimentação, outro fator influente na área total, também promove o aumento da resposta em questão (**Figura 4.27**), o que ocorre devido ao aumento da energia gerada no processo, causado pela elevação do comprimento do eletrodo.

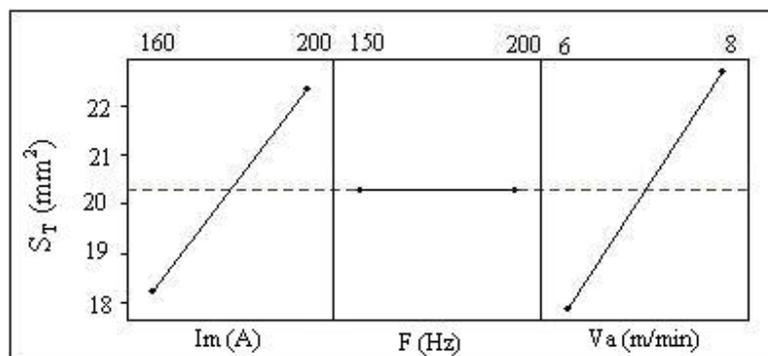


Figura 4.27 – Efeitos principais dos fatores sobre a área total.

Observando a interação significativa da corrente média com a velocidade de alimentação, apresentada na **Figura 4.28**, nota-se que a condição que torna a área total a maior possível é a da  $I_m$  e da  $V_a$  em seus níveis superiores, isto é, 200 A e 8 m/min, respectivamente. A **Figura 4.28** mostra que a frequência não exerce influência alguma sobre a  $S_T$ , o que, aliás, já havia sido observado na análise de variância. Para maximizar a resposta, visto que esta condição pode conduzir a condição mais produtiva do processo em estudo, portanto, pode-se usar qualquer um dos níveis de frequência estudados. Portanto, será sugerido aqui que se use a frequência em seu nível maior, pois nesta condição, a energia

gerada no processo é menor. Portanto, a utilização dos fatores estudados em seus níveis superiores resultará na maximização da  $S_T$ , dentro da superfície estudada.

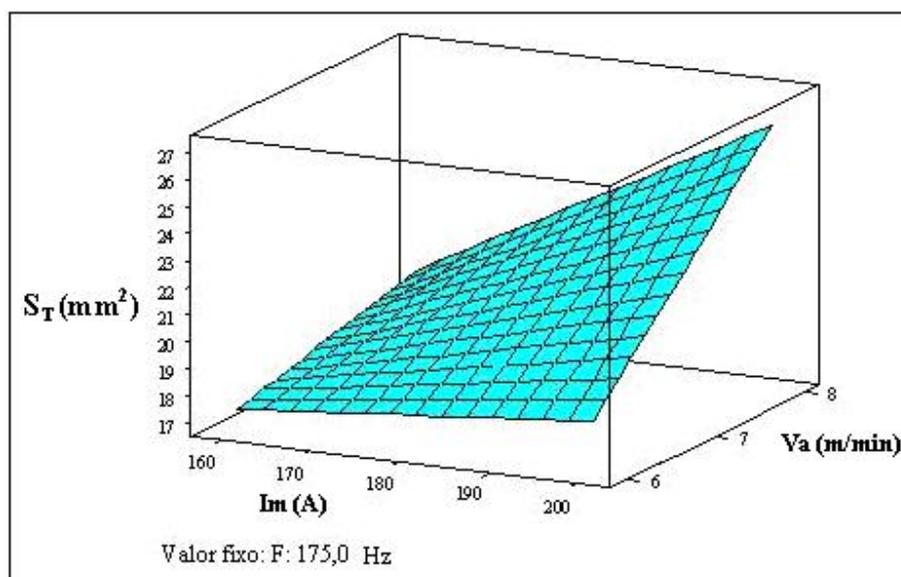


Figura 4.28 – Influência da interação  $Im*Va$  sobre a área total.

#### d) Análise da Qualidade Visual do Cordão

Na análise da qualidade visual do cordão foram levados em consideração aspectos como o formato e a ausência de irregularidades superficiais do cordão, sendo que de forma geral a qualidade foi considerada muito boa em todas as condições soldadas.

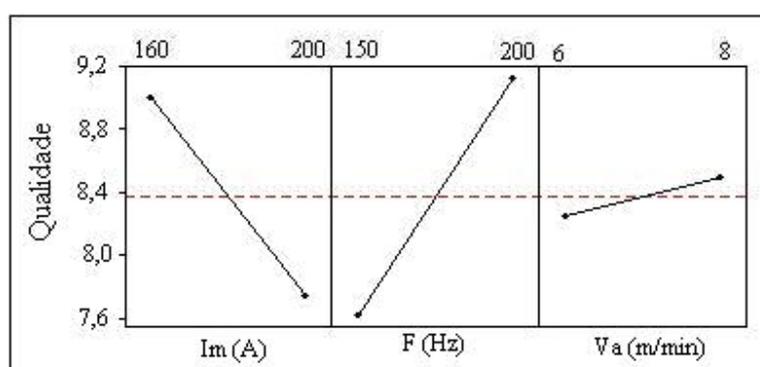


Figura 4.29 – Efeitos principais dos fatores na qualidade visual do cordão

Observando os efeitos principais dos parâmetros, **Figura 4.29**, nota-se que o aumento da corrente média causa a diminuição da qualidade visual do cordão, talvez provocada por uma instabilidade do arco. O aumento da frequência por sua vez provoca uma melhora na qualidade do cordão. Isto se deve ao fato de nesta condição o comprimento do eletrodo diminuir e, portanto, a convexidade do cordão também, resultando em um cordão mais plano e de melhor aspecto.

De importante, ainda, na qualidade, também se destaca a interação significativa da frequência com a velocidade de alimentação (**Figura 4.30**), que mostra que para se maximizar esta resposta deve-se trabalhar com a frequência e a velocidade de alimentação do arame em seus maiores níveis, ou seja, 200 Hz e 8 m/min, respectivamente. Portanto a manutenção da corrente média em seu nível inferior, associada a frequência e a velocidade de alimentação em seus níveis superiores resultará na maximização da qualidade visual do cordão.

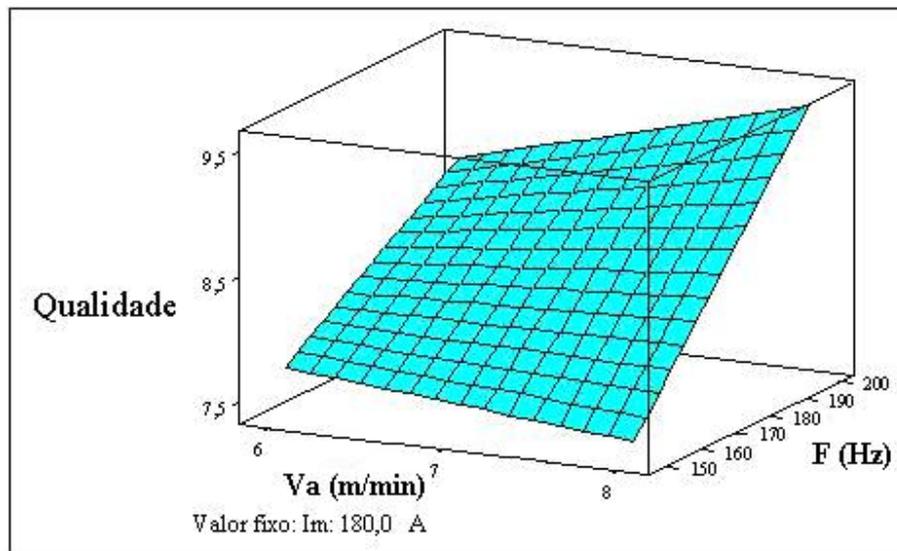


Figura 4.30 – Influência da interação F\*Va sobre a qualidade visual do cordão.

### 4.3.2.3 - Análise da Influência dos Parâmetros na Produtividade

A análise de produtividade do processo com eletrodo tubular é de fundamental importância na viabilidade de utilização deste processo frente a outros. Desta forma a análise da taxa de deposição e rendimento da soldagem permitirá determinar condições de tal forma a torná-lo mais competitivo.

Considerando os efeitos principais dos fatores na taxa de deposição, **Figura 4.31**, nota-se que o aumento da alimentação do arame provoca o aumento da deposição, fato este esperado, pois se sabe que o aumento da velocidade de alimentação provoca o aumento da fusão do arame, devido ao aumento

do comprimento do eletrodo. Logo, apesar de outros fatores, bem como suas interações não se mostrarem significativos dentro da superfície de estudo, os resultados sugerem que a obtenção da maior taxa de deposição possível seja possibilitada pela utilização da corrente média em seu nível inferior e da frequência de pulsação e velocidade de alimentação do arame em seus níveis superiores.

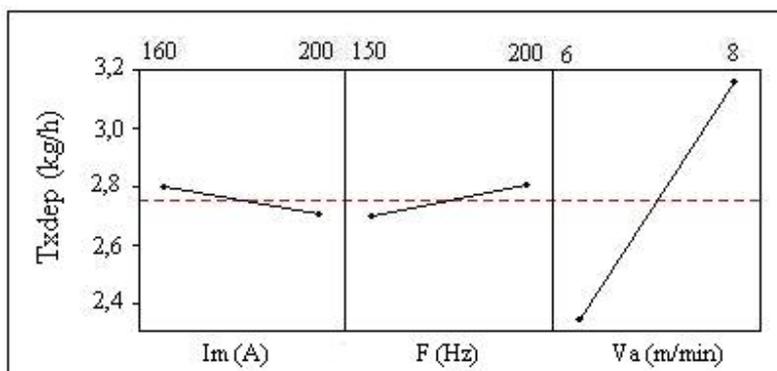


Figura 4.31 – Efeitos principais dos fatores na taxa de deposição.

Obviamente que quando se analisa a produtividade do processo deve-se levar em conta não apenas a deposição do processo, mas também o rendimento de deposição auferido pelo mesmo.

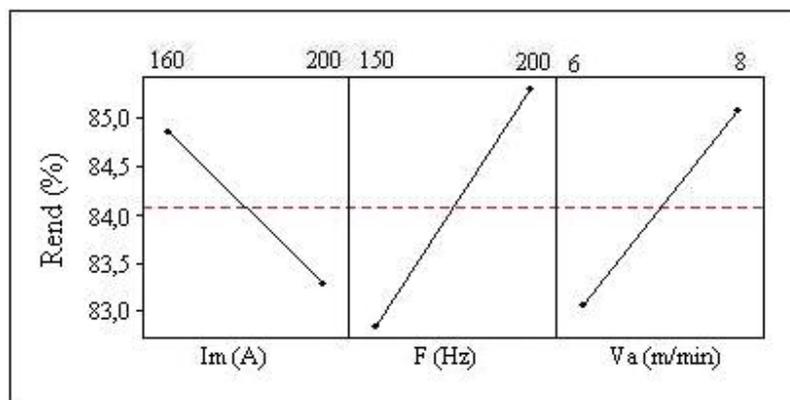


Figura 4.32 – Efeitos principais dos fatores no rendimento de deposição.

Assim sendo, considerando os efeitos principais dos fatores sobre o rendimento (**Figura 4.32**), em relação à frequência e à velocidade de alimentação do arame, observa-se que o aumento desses fatores promove o aumento do rendimento. Apesar de se encontrar na literatura (Alcan, 1992) que para manter a estabilidade do processo é necessário estabelecer uma relação constante entre a  $V_a$  e a  $F$ , notou-se nesses testes que não ocorreram muitos respingos, o que, aliás, é uma característica da soldagem com arames rutilicos. Com o aumento da frequência aumentam-se os ciclos de pulso, e,

portanto, a deposição. O mesmo ocorre com o aumento da alimentação do arame que, por sua vez, aumenta a deposição. Logo, com poucos respingos e com o aumento da deposição é correto que se obtenha um aumento do rendimento. Em relação à corrente média, observa-se na **Figura 4.32**, que o seu aumento promove a redução do rendimento da soldagem.

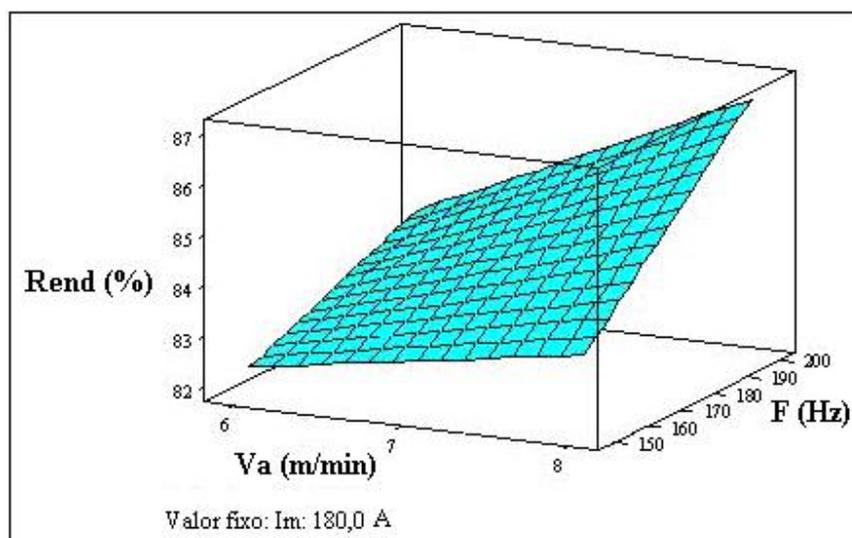


Figura 4.33 – Efeito da interação  $F \cdot Va$  sobre o rendimento de deposição.

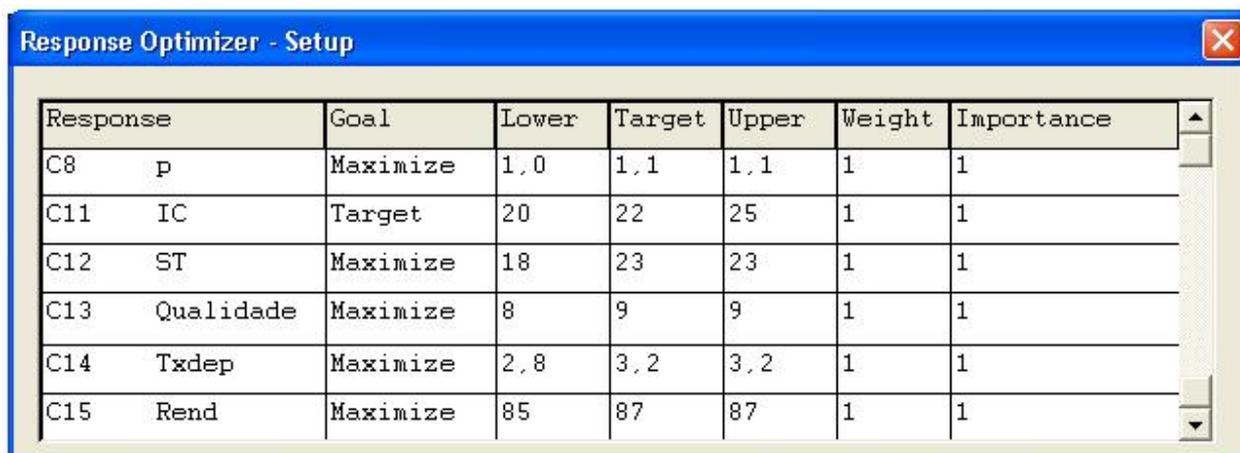
De importante ainda na análise do rendimento, se mostrou a interação significativa da frequência com a velocidade de alimentação do arame. Nota-se na **Figura 4.33**, que para obter o rendimento máximo deve-se utilizar os níveis superiores da frequência e da velocidade de alimentação, isto é, 200 Hz e 8 m/min, respectivamente.

Logo, em função dos resultados e análises sugere-se que a melhor condição de rendimento para o processo com eletrodo tubular, dentro da superfície de estudo, é aquela na qual a corrente média é mantida em seu nível inferior associado à frequência e alimentação do arame em seus níveis superiores, condição esta coincidente com aquela que permite a maximização da taxa de deposição.

#### 4.3.2.4 - Condições Otimizadas

Como se viu anteriormente é possível obter condições otimizadas individualmente. Entretanto, a grande dificuldade consiste em se obter uma condição que permita conciliar todas as respostas de tal forma que um critério único de otimização possa ser obtido. Através do software MINITAB e utilizando a ferramenta “Response Optimizer” procedeu-se a otimização global do processo, cujas condições estabelecidas estão apresentadas na **Figura 4.34**. A **Tabela 4.9** mostra os resultados, que

sugerem a utilização da corrente média em 186,5 A, a frequência em 200 A e a velocidade de alimentação em 8 m/min para produzir um resultado próximo ao previsto.



Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
C8 p	Maximize	1,0	1,1	1,1	1	1
C11 IC	Target	20	22	25	1	1
C12 ST	Maximize	18	23	23	1	1
C13 Qualidade	Maximize	8	9	9	1	1
C14 Txdep	Maximize	2,8	3,2	3,2	1	1
C15 Rend	Maximize	85	87	87	1	1

Figura 4.34 – Níveis das respostas pretendidas para o fatorial completo.

Tabela 4.9 - Quadro resumo das respostas obtidas pelo “Response Optimizer”.

Condição Ótima	Resultados Previstos	Desejabilidade
Im = 186,5 A F = 200,0 Hz Va = 8,0 m/min	P = 1,1 mm	1,00
	IC = 22,0 %	1,00
	$S_T = 23,4 \text{ mm}^2$	1,00
	Qualidade = 9,3	1,00
	Txdep = 3,2 kg/h	1,00
	Rend = 86,6	0,79
Coeficiente de desejabilidade global = 0,96		

Com o auxílio do software MINITAB, através da ferramenta “Contour Plot“, é possível encontrar também uma região otimizada, onde certa flexibilidade pode ser obtida na escolha dos valores de dois fatores, conforme pode ser observado na **Figura 4.35**. Nesta figura, a região branca é a região otimizada, dentro da qual deve-se escolher os valores dos fatores variados para um fator fixo. Note que os valores dos fatores mantidos fixos em cada caso são os sugeridos pela condição ótima obtida no “Response Optimizer”. Além disso, os limites das respostas requeridas estão dentro dos limites estabelecidos no “Response Optimizer” para a obtenção da condição ótima.

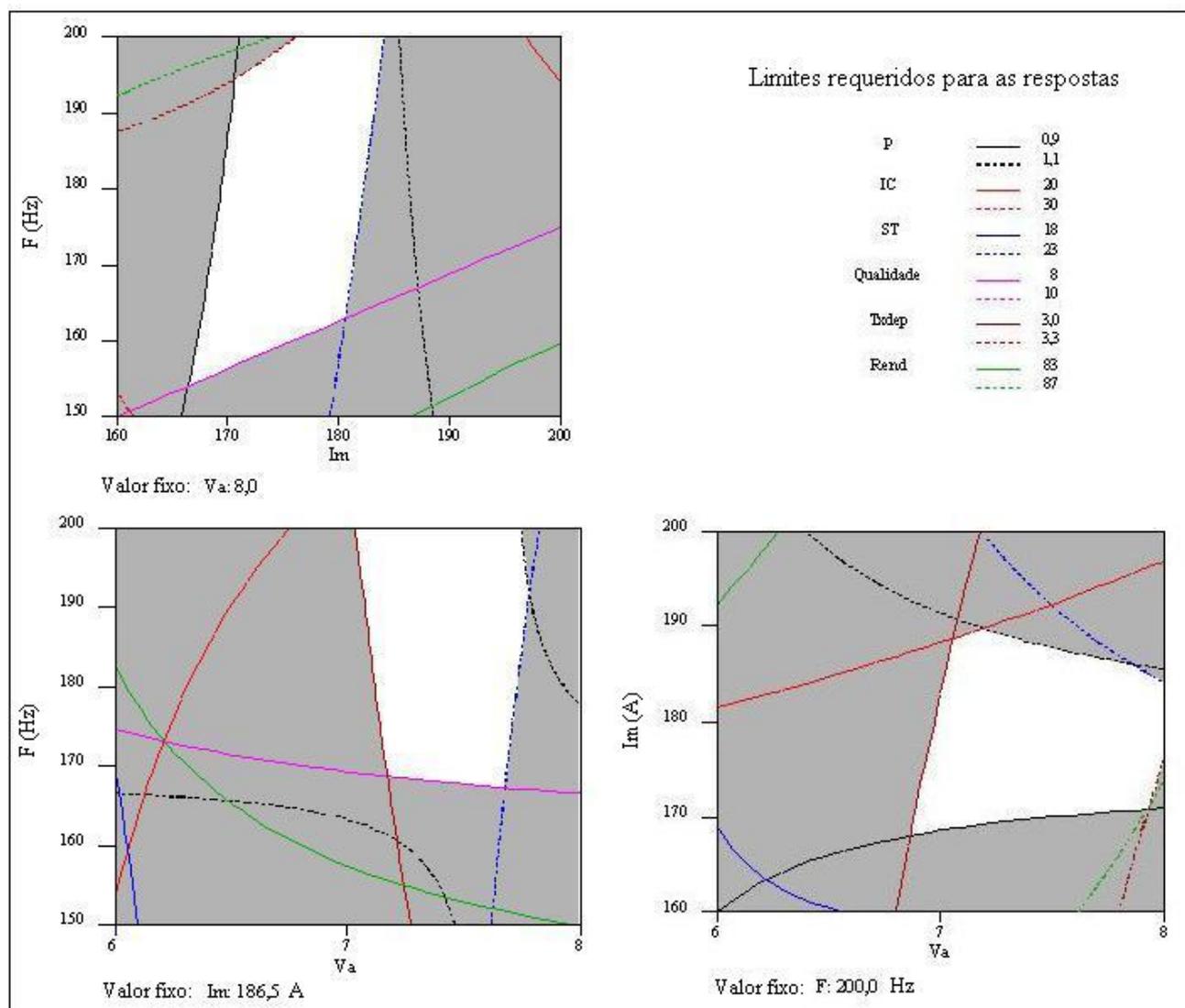


Figura 4.35 – Resultados do “Contour Plot” para o fatorial completo.

#### 4.3.2.5 - Considerações Finais

Comparando os resultados da otimização para o processo Eletrodo Tubular frente aos anteriores obtidos tanto para o processo Eletrodo Tubular, quanto para o processo MAG, nota-se que a penetração obtida pelo processo MAG continua maior do que a obtida pelo processo Eletrodo Tubular. No entanto, com a análise do novo fatorial houve um pequeno aumento desta resposta. Em relação à taxa de deposição, nota-se que, nesta nova condição, esta resposta melhora sensivelmente, sendo inclusive maior do que a resposta obtida pelo MAG. O índice de convexidade também apresenta uma melhora, sendo que na condição anteriormente analisada, ele apresentou um resultado inferior ao

mínimo considerado adequado neste trabalho. As outras respostas continuam adequadas e de acordo com o esperado, conforme verificado anteriormente.

#### 4.4 – Parte 3: Medidas de Dureza e Análise Metalográfica

Esta parte do trabalho tem o objetivo de apenas observar as diferenças de dureza atingida nas várias regiões da solda e também as diferenças entre as microestruturas formadas nas amostras soldadas com os processos MAG e Eletrodo Tubular sob as mesmas condições e nas amostras soldadas com o mesmo processo, mas sob condições diferentes. Portanto, não é foco deste trabalho uma análise profunda das microestruturas formadas, mas apenas lembrar de que as microestruturas e, conseqüentemente, a dureza na zona termicamente afetada (ZTA) são fatores que devem ser considerados na prática, quando se tratar de soldagem de materiais propícios a formação de microestrutura de elevada dureza e baixa tenacidade, como é o caso do aço ABNT 1045, aqui utilizado.

Logo, foram realizados ensaios de dureza Vickers com carga de 5 kg em cordões produzidos com o processo MAG e com o processo Eletrodo Tubular, com dois níveis de aporte térmico (H). Os resultados estão mostrados na **Tabela 4.10** e representam a média de várias medições. O desvio padrão ( $\sigma$ ) das medidas também se encontra na **Tabela 4.10**.

Nota-se que não houve variações de dureza nas ZTA's entre os processos ou entre os dois níveis de energia estudados. Apesar de ter-se observado níveis ligeiramente maiores de dureza utilizando o processo Eletrodo Tubular e a energia maior, a análise do desvio padrão ( $\sigma$ ) mostra que essas diferenças não são significativas. As durezas do metal depositado (cordão) e do metal base também não apresentaram grandes variações, como já era de se esperar.

Tabela 4.10 – Resultados de dureza da ZTA, cordão e metal base.

Processo	H (J/mm)	Im (A)	F (Hz)	Localização	Dureza (Hv)	$\sigma$
MAG	1195	190	125	ZTA	302	27
				cordão	213	15
				Metal base	200	12
	704	160	83	ZTA	282	31
				cordão	210	6
				Metal base	201	4
Eletrodo Tubular	1195	190	125	ZTA	316	50
				cordão	189	7
				Metal base	213	11
	704	160	83	ZTA	292	20
				cordão	210	19
				Metal base	208	15

Os resultados de dureza estão relacionados com as microestruturas formadas, as quais têm uma relação com aporte térmico da solda e com a velocidade de resfriamento da peça soldada.

As **Figuras 4.36 e 4.37** apresentam os perfis de dureza obtidos em diferentes níveis de energia para a soldagem com Eletrodo Tubular e as **Figuras 4.38 e 4.39** para a soldagem com MAG.

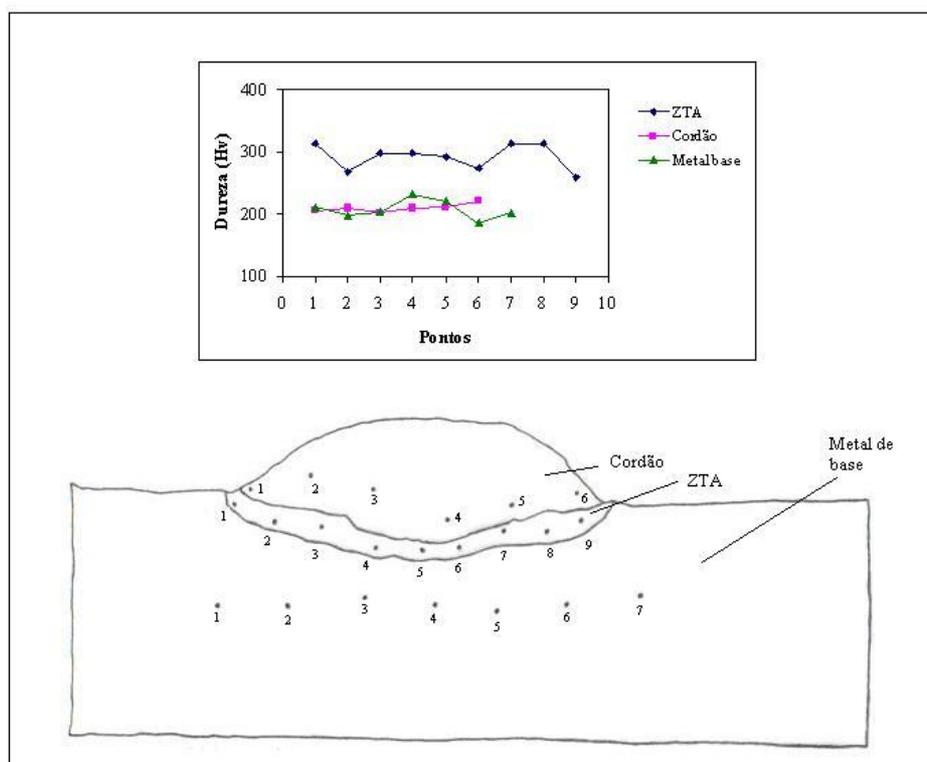


Figura 4.36 – Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular,  $H = 704 \text{ J/mm}$ .

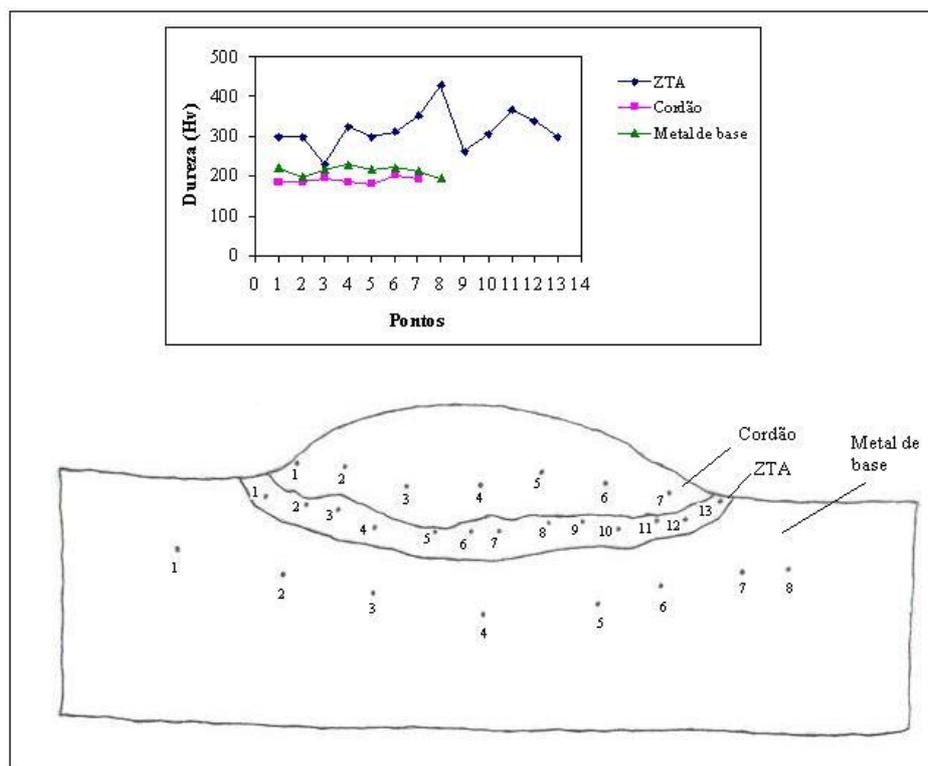


Figura 4.37 – Perfil de dureza da amostra produzida com Eletrodo Tubular,  $H = 1195 \text{ J/mm}$ .

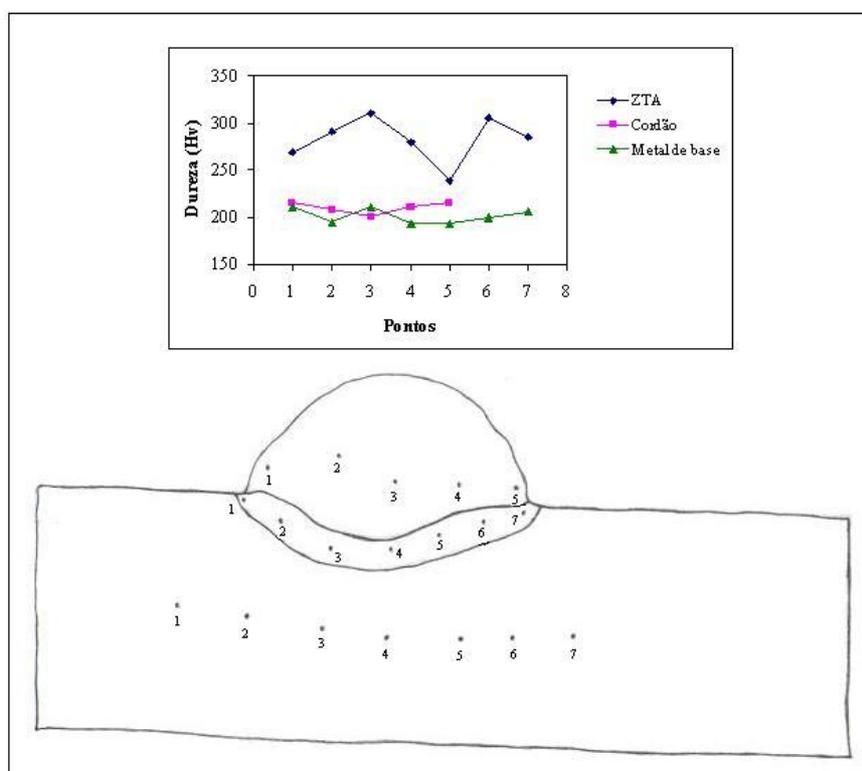


Figura 4.38 – Perfil de dureza da amostra produzida com MAG,  $H = 704 \text{ J/mm}$ .

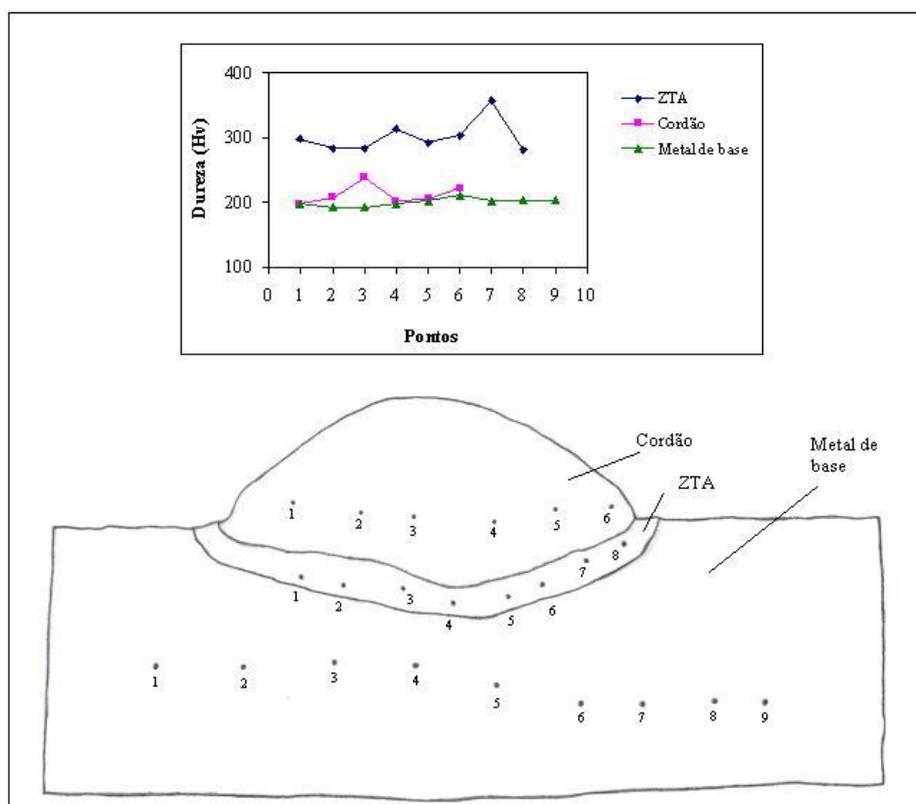


Figura 4.39 – Perfil de dureza da amostra produzida com MAG,  $H = 1195 \text{ J/mm}$ .

A **Figura 4.40** apresenta as microestruturas do cordão de solda produzido com o processo Eletrodo Tubular utilizando a condição de energia de  $704 \text{ J/mm}$ . Esta figura mostra todas as regiões do cordão, sendo possível perceber as diferenças entre elas. Nota-se na parte superior da figura a estrutura bruta de solidificação do metal de adição, caracterizado por uma estrutura colunar. Abaixo desta, encontra-se a linha de fusão, abaixo da qual inicia-se a zona termicamente afetada (ZTA). Nota-se que esta região pode ser dividida em duas: a primeira trata-se da região mais próxima à linha de fusão, que é mais afetada pela energia de soldagem e se caracteriza por apresentar grandes mudanças metalúrgicas. Abaixo desta, encontra-se uma região não muito afetada pelo calor por se localizar a uma maior distância da linha de fusão. A última região, na parte inferior da figura, mostra o metal de base, que não foi afetado pelo calor e, portanto, não apresenta estrutura refinada.

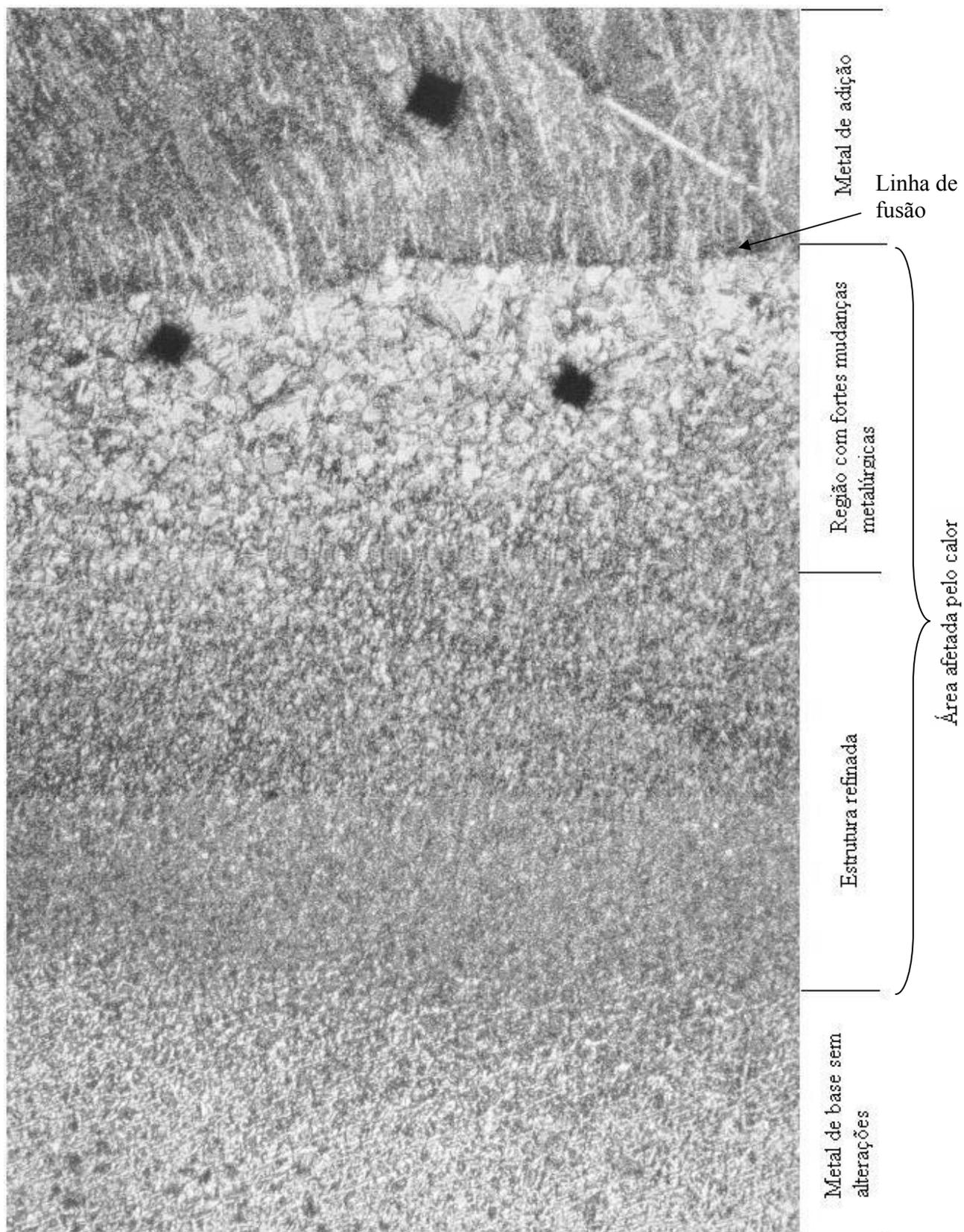


Figura 4.40 – Regiões micrográficas de uma amostra soldada, aumento: 50X.

A **Figura 4.41** apresenta as microestruturas formadas na ZTA da amostra soldada sob a condição de menor energia com o processo MAG, onde se observa a presença de uma grande quantidade de martensita, envolta da qual se esboçam contornos formados de troostita/bainita (perlita muito fina), caracterizados pelas regiões escuras, indicando possibilidades de alívio de tensões para deformações plásticas. A **Figura 4.42** apresenta uma ampliação da martensita observada na **Figura 4.41**, onde é possível observar mais claramente os planos octaedrais característicos desta estrutura.

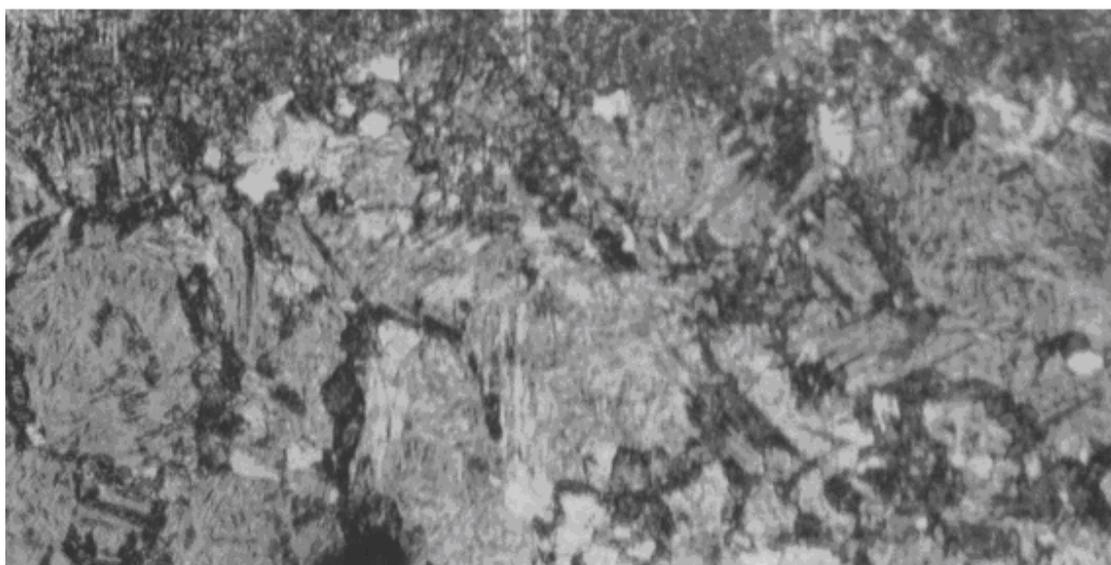


Figura 4.41 – Microestruturas da ZTA - processo MAG, H = 704 J/mm, aumento: 200X.

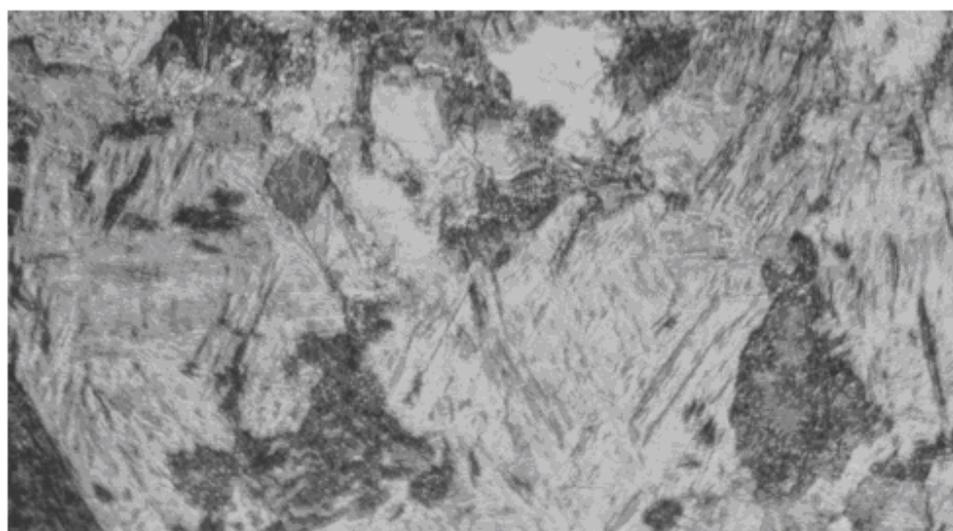


Figura 4.42 – Detalhes da Martensita – processo MAG, H = 704 J/mm, aumento 500X.

A **Figura 4.43** apresenta as microestruturas formadas na ZTA da amostra soldada na condição de menor energia utilizando o processo Eletrodo Tubular. Nela observa-se uma grande quantidade de ferrita com grãos bastante grandes e a presença predominante de martensita, além de perlita fina com locais onde se encontra bainita acicular, cujos detalhes podem ser melhor observados na **Figura 4.44**.

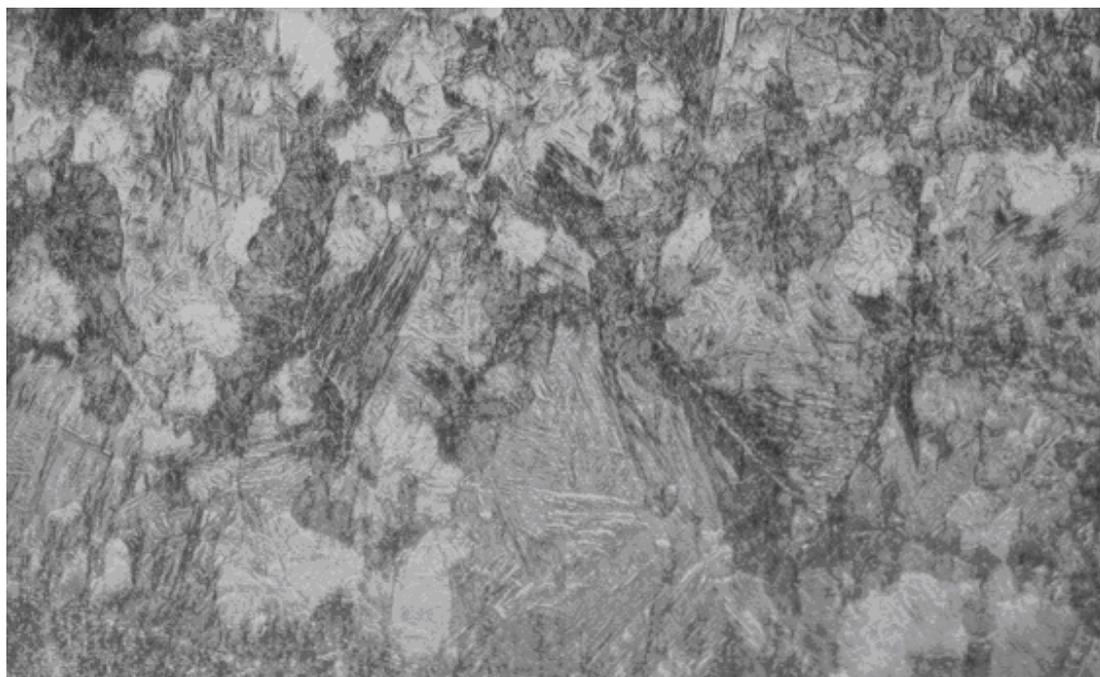


Figura 4.43 – Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular, H = 704 J/mm, aumento: 200X.

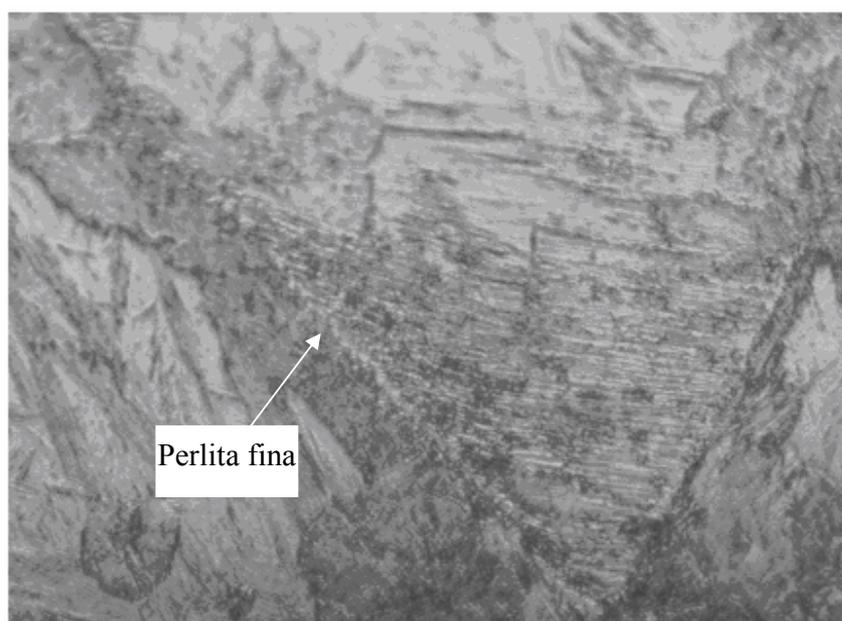


Figura 4.44 – Detalhes da perlita fina – processo Eletrodo Tubular, H = 704 J/mm, aumento: 500X.

Na **Figura 4.45**, apresenta-se uma comparação entre as amostras soldadas com Eletrodo Tubular sob as duas condições de energia estudadas. Nota-se nesta figura que a espessura da camada afetada termicamente da amostra soldada sob menor energia é menor que a espessura da camada afetada pelo calor no corpo de prova produzido sob maior energia.

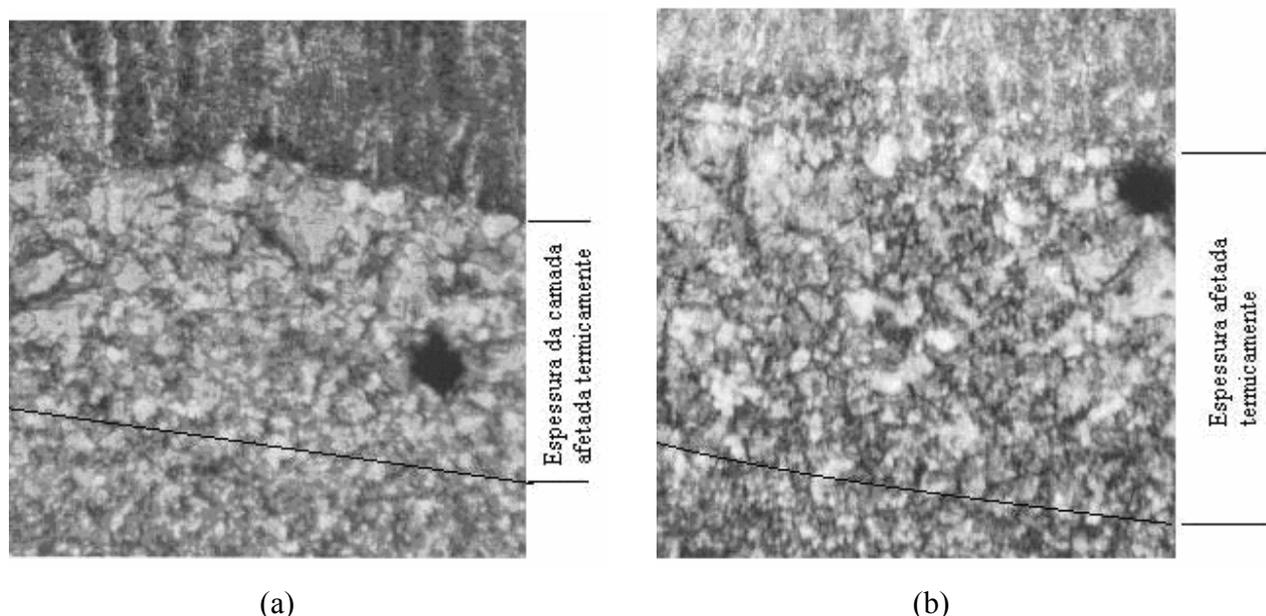


Figura 4.45 – Micrografia do cordão feito com processo Eletrodo Tubular com (a)  $H = 704 \text{ J/mm}$  (b)  $H = 1195 \text{ J/mm}$ , aumento: 50X

Apesar da grande quantidade de martensita, a dureza da ZTA das estruturas é diminuída pela presença de microestruturas mais dúcteis, tais como a ferrita e perlita, em ambos os processos. No processo MAG, conforme já comentado, observou-se a formação de redes de troostita/bainita, começando a envolver a martensita.

A **Figura 4.46** apresenta as microestruturas formadas em amostra soldada na condição de maior aporte térmico utilizando o processo MAG. Observa-se, nesta figura, que além de martensita e poucos grãos de ferrita, a ZTA apresenta perlita fina num início de envolvimento da martensita, o que, aliás, já foi observado anteriormente em solda produzida com o processo MAG. Na ZTA do cordão processado com maior energia nota-se a presença de ferrita em maior quantidade e com granulometria maior que na ZTA do cordão produzido com menor energia (**Figura 4.41**). Além disso, nota-se a formação de uma martensita mais grosseira devido a alta temperatura atingida (**Figura 4.47**).

Na **Figura 4.48** encontram-se as microestruturas formadas na ZTA de uma amostra soldada sob maior nível de energia utilizando o processo Eletrodo Tubular. Nela nota-se a presença das microestruturas martensita, perlita fina e ferrita. Comparativamente à amostra feita com menor nível de

energia (**Figura 4.43**), nota-se que a ferrita formada na estrutura do cordão apresenta tamanho de grão, notadamente, maior devido as altas temperaturas atingidas.

Com todas essas análises foi possível perceber que as estruturas formadas nos corpos de prova dos dois processos estudados foram diferentes. O processo MAG permitiu que se formasse, além de martensita, redes de perlita muito finas (troostita e bainita), que possibilitaram a diminuição da dureza na ZTA, condição esta que seria muito maior sem a formação dessas estruturas devido a grande quantidade de martensita. No processo Eletrodo Tubular, observou-se, além da martensita, a formação de ferrita em grande quantidade e em grãos bastante grandes.

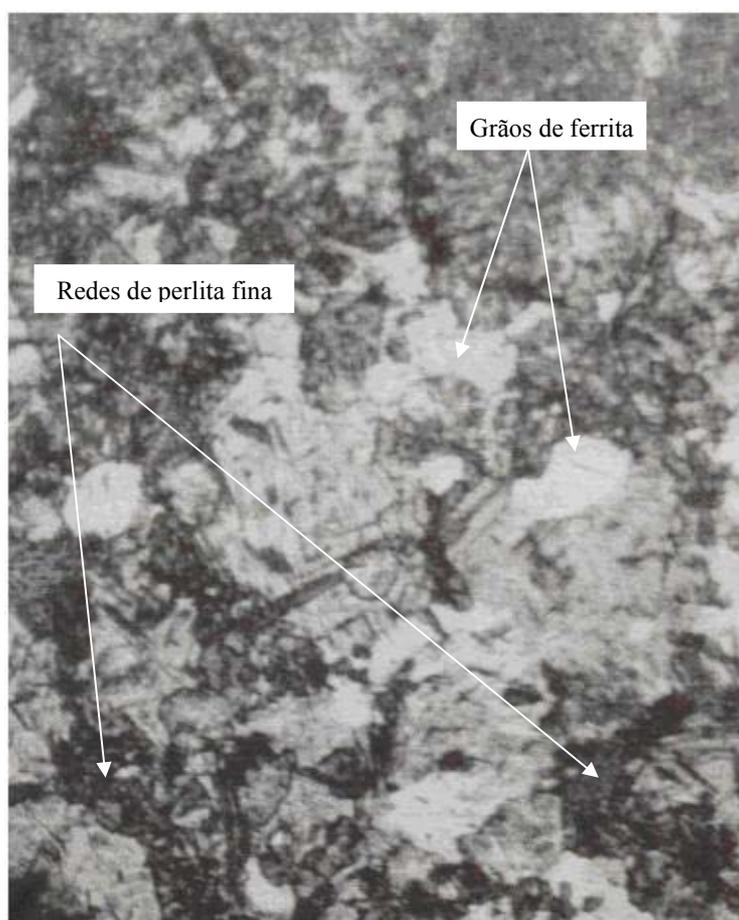


Figura 4.46 – Microestruturas da ZTA – processo MAG,  $H = 1195 \text{ J/mm}$ , aumento: 200X.

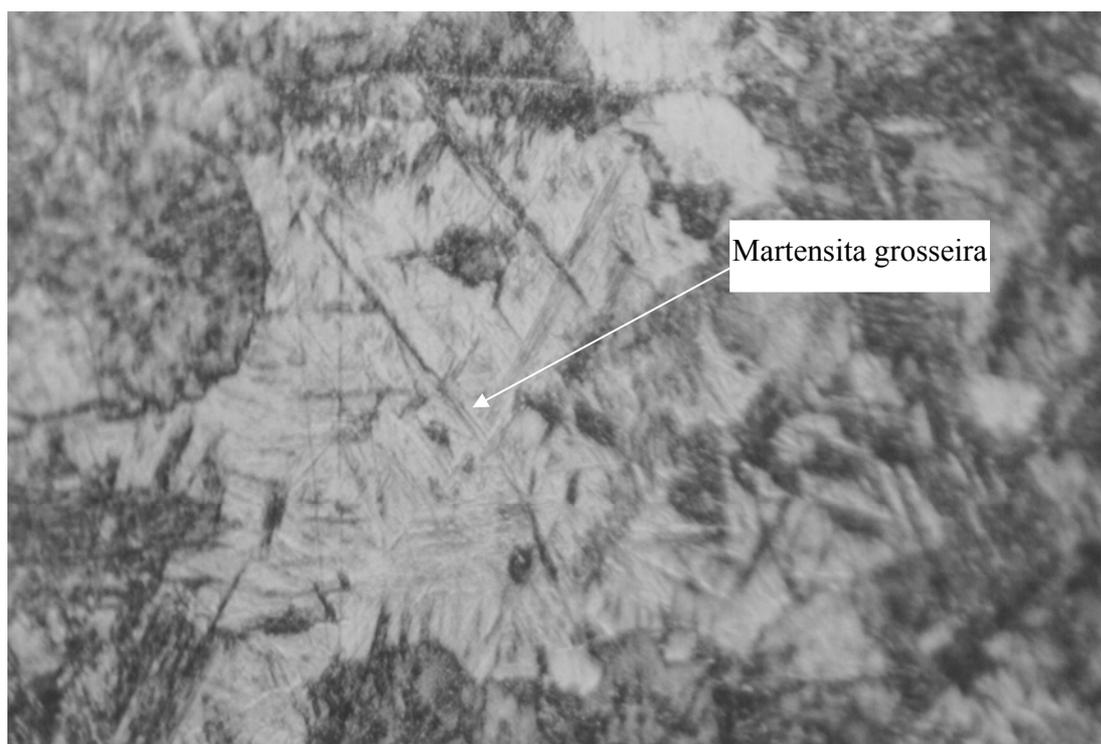


Figura 4.47 – Detalhes da martensita grosseira – processo MAG,  $H = 1195 \text{ J/mm}$ , aumento: 500X.

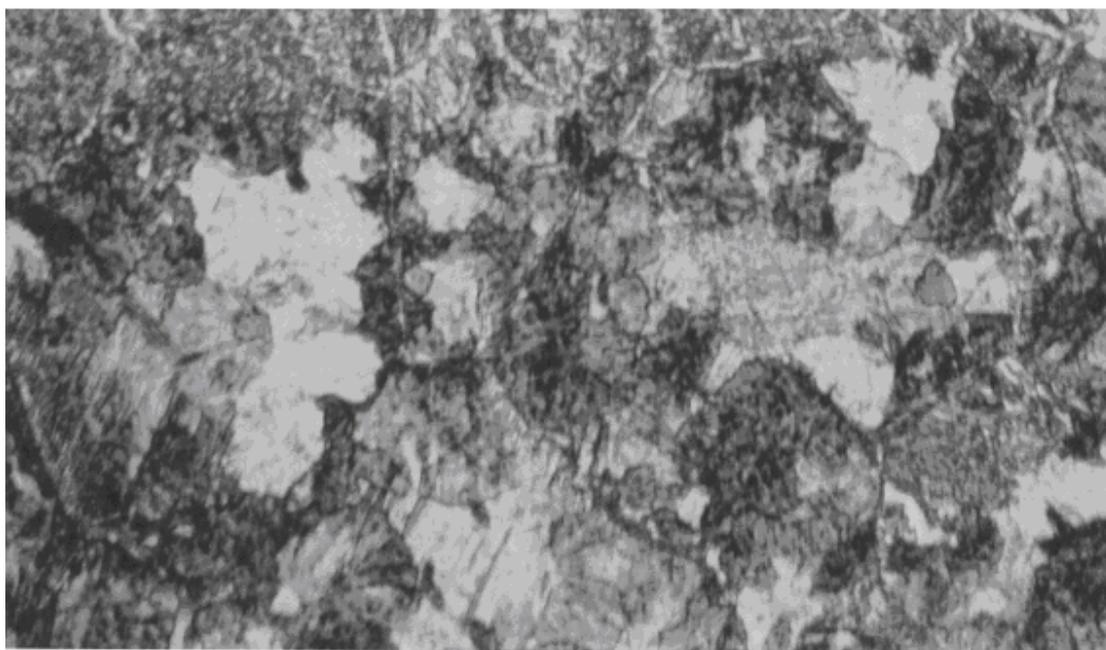


Figura 4.48 – Microestruturas da ZTA – processo Eletrodo Tubular,  $H = 1195 \text{ J/mm}$ , aumento: 200X.