

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Importância do Tema

Hoje em dia, onde a competição no mercado cresce ano a ano e palavras como qualidade e produtividade vêm se tornando cada vez mais familiares no ramo empresarial, o aprimoramento de produtos e processos produtivos tem sido cada vez mais importante para manter empresas competitivas no mercado.

Como o aprimoramento dos processos produtivos têm sido muito investigados, a soldagem também tem dado a sua contribuição. Este processo de fabricação tem recebido nos últimos anos grande interesse devido a sua versatilidade, sendo considerada atualmente o método mais importante de união de metais na construção de peças e estruturas.

Os processos de soldagem, em algumas empresas, apresentam-se como gargalos de produção, devido a pouca informação disponível a respeito da influência de seus parâmetros no comportamento dos cordões de solda.

Embora existam processos de soldagem de maior produtividade disponíveis, tais como arco submerso e processos robotizados, o arame tubular oferece ao usuário um processo mais flexível com aumentos reais em produtividade e qualidade, com um mínimo de capital investido. Como nem sempre processos mais modernos estão ao alcance de todos, uma pesquisa simplificada pode ter alto valor prático e fazer com que pequenas mudanças dêem grandes lucros.

Estudos mostram que o processo de soldagem com arame tubular (FCAW- Flux Cored Arc Welding) reúne várias das necessidades atuais com respeito a alta produtividade, boa qualidade e baixo custo. Trata-se de um processo que consiste em alimentar continuamente o arame para a poça de fusão, sendo este protegido pela decomposição dos ingredientes do fluxo interno, no caso de eletrodos autoprotetidos, ou ainda, com a proteção do fluxo interno e suplementada pela proteção de um fluxo de gás fornecido por uma fonte externa, no caso de eletrodos protegidos. Neste último caso, pode-se utilizar gases como CO₂ puro ou misturas de gases.

Os arames tubulares são mais caros que os arames sólidos, no entanto, seu alto potencial de capacidade produtividade e flexibilidade, garantirão retorno do capital investido, em curto prazo. Uma outra vantagem da utilização do arames tubulares é a possibilidade de

redução de riscos de defeitos de falta de fusão lateral, redução de respingos, aumento da penetração e uma ocorrência menor de porosidade, segundo estudos de Araújo (2004).

Uma análise mais detalhada do que se quer produzir, pode ajudar os profissionais da área de soldagem a identificar onde a utilização do eletrodo tubular é mais viável, trazendo mais economia e melhorias na qualidade. Devido à grande variedade da composição do fluxo interno utilizado, tem-se uma ampla e favorável aplicação a este tipo de arame.

No Brasil esta técnica ainda não tem sido muito desenvolvida, reflexos do limitado número de trabalhos técnicos e científicos sobre o processo com eletrodos tubulares comparativamente ao processo MIG/MAG. Talvez isto justifica um certo receio em sua implementação em indústrias brasileiras quando comparados aos eletrodos sólidos, visto que a migração de um processo para outro, em se tratando de equipamentos, é muito pequena.

Um método científico, fundamentado na estatística e que gradativamente vem sendo utilizado com grande êxito na elucidação de problemas no ramo industrial é o Planejamento e Análise de Experimentos (*DOE - Design Of Experiments*). Esta técnica estatística permite definir quais fatores, em que quantidades e em que condições devem ser coletados e controlados durante um determinado experimento, buscando maior precisão estatística na resposta, com menor custo operacional. Essa ferramenta permite obter resultados mais confiáveis, com economia de tempo e dinheiro.

De posse de todos esses fatos, sendo a soldagem um processo industrial em potencial, porém ainda com poucos dados sobre a influência dos parâmetros de ajuste no formato geométrico do cordão, este trabalho foi idealizado. A análise mais detalhada dos parâmetros do processo, através de um software adequado, permite buscar melhores condições de ajuste, otimizando assim suas respostas, sejam elas do ponto de vista geométrico ou econômico. Dessa forma, as possibilidades da utilização desse processo industrial se tornam maiores, verificadas a superioridade qualitativa e financeira do mesmo.

1.2 - Objetivos

Este trabalho teve como objetivo a análise e otimização dos parâmetros de soldagem sobre a qualidade e produtividade dos cordões de solda, em chapas de aço, utilizando no processo de soldagem, o arame tubular. As variáveis analisadas foram tensão, velocidade de alimentação do arame, ângulo de inclinação da tocha, tipo de gás de proteção, distância bico de contato peça e velocidade de soldagem.

Para atender ao objetivo principal, o trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira

etapa, Planejamento Fatorial Fracionário, foi analisada a influência dos parâmetros de entrada no processo de soldagem. Após analisados e selecionados os parâmetros mais significativos no processo, estes foram analisados mais detalhadamente numa segunda etapa, Planejamento Fatorial Completo e em seguida otimizados em função de um conjunto de respostas, Metodologia da Superfície de Resposta.

Como objetivos específicos, este trabalho teve o intuito de:

- Verificar de que forma os parâmetros influenciam no processo;
- Verificar quais parâmetros tem uma influência mais significativa no processo;
- Verificar quais parâmetros tem uma influência menos significativa no processo;
- Modelar o processo de soldagem com eletrodo tubular em função de um conjunto de respostas específico;
- Buscar uma região de condições operacionais que otimizem as respostas analisadas;
- Validar a região encontrada;

1.3 – Estrutura da Dissertação

Com o intuito de facilitar a compreensão, o trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução: Apresenta a importância do tema, o objetivo que se quer alcançar, bem como as justificativas para escolha do tema e sua estruturação textual.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Aborda o processo e as características da soldagem com eletrodos tubulares, através de informações encontradas em livros e artigos pertinentes ao assunto, como também uma algumas descrições sobre a ferramenta utilizada, o Minitab.
- Capítulo 3 – Metodologia experimental: Descreve-se a experimentação, mostrando o processo e as variáveis a serem investigadas em cada fase, além de definir a técnica do projeto e Análise de Experimento utilizada, justificando o porquê desta utilização entre as diversas técnicas existentes.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussões: Mostra os resultados obtidos e toda a análise sobre os mesmos.

- Capítulo 5 – Conclusões: Expõe as conclusões finais do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo far-se-á considerações a respeito da soldagem com eletrodos tubulares, suas características, propriedades e avanços em pesquisas publicados em trabalhos e artigos nacionais e internacionais. Também será apresentado uma breve descrição de alguns recursos do software Minitab utilizado no decorrer do trabalho. Através da revisão bibliográfica, será possível uma melhor definição do que realmente quer-se estudar, novos direcionamentos, bem como diminuir o tempo e custo da realização do trabalho.

2.1 - Fundamentos do Processo de Soldagem FCAW

FCAW (*Flux Cored Arc welding*) é um processo de soldagem onde a coalescência entre metais é obtida através de arco elétrico estabelecido entre a peça a ser soldada e um eletrodo alimentado continuamente. A soldagem com arame tubular se assemelha ao processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) mais comumente conhecido como MIG/MAG, (*Metal Inert Gás/ Metal Active Gas*) no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento, diferindo-se deste pelo fato de possuir um arame com formato tubular, possuindo em seu interior um fluxo. Este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a alta taxa de deposição característica da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo (Araújo, 2004).

A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame (metálico ou não metálico) podendo ser, ou não, complementada por um gás de proteção. De acordo com a existência ou não deste gás auxiliar de proteção, ele se classifica como “**dualshield**” - com proteção gasosa, apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de profunda penetração, ou “**innershield**” - sem a proteção gasosa, onde os ingredientes do fluxo vaporizam e deslocam com o ar para os componentes da escória que cobrem a poça para protegê-la durante a soldagem.

O fluxo interno do arame é composto de materiais inorgânicos ou metálicos, que possuem funções, tais como, melhoria das características do arco elétrico, da transferência do metal de solda, proteção à poça de fusão e também em alguns casos, quando necessário, a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória. A escória formada por

este processo, além de proteger a solda durante a solidificação, atua diretamente nas propriedades mecânicas, do resultado final (Fortes et al, 2004).

2.2 – Arames Tubulares

A variedade de elementos que podem ser usados no interior dos arames tubulares é grande, por isso a soldagem com este tipo de eletrodo se torna mais complexa. Mudanças para adequação a alguma aplicação particular ou requisito especial são mais facilmente obtidas com arames tubulares que com sólidos, justamente devido a essa flexibilidade. Isso envolve alterações na formulação e no percentual do fluxo.

Bauné et al (2000) relatam que não é simples de entender as várias reações químicas que envolvem estes elementos no ambiente do arco e como cada elemento contribui para o comportamento geral do fluxo com respeito ao desempenho do eletrodo, por exemplo, a estabilidade da transferência do metal, a viscosidade e destacabilidade da escória, as propriedades mecânicas finais da soldagem. Portanto, cada composição de fluxo, pode gerar um resultado final diferente.

2.3 - Classificação de Arames Tubulares

De acordo com Welding Handbook (1991), a norma AWS (*American Welding Society*) A5.20-69 classifica os arames tanto autoprotégidos como os que utilizam gás de proteção, seguindo o padrão geral utilizado para classificação, porém algumas mudanças são necessárias para acomodar a composição natural do eletrodo.

Por exemplo: Eletrodo E71T-1:

O prefixo E, indica que a soldagem é com arco elétrico, como nos demais sistemas de classificação.

O número 7 indica o limite de resistência mínimo em 70000 psi.

O número 1 indica que a soldagem pode ser feita em todas as posições (no caso de ser o número 0, é indicado para soldagem nas posições plana e horizontal).

A letra T indica que o eletrodo é tubular.

E finalmente, o número 1, indica características da composição química do metal depositado, tipo de corrente, polaridade de operação entre outras informações.

2.4 - Soldagem Com Gás de Proteção (FCAW-G)

Os processos de soldagem com gás de proteção, **Figura 2.1**, são amplamente utilizados na soldagem de aços de baixo carbono e de baixa liga, produzindo altas taxas de deposição e eficiência. Podem ser soldados em todas as posições e a uma grande variedade de juntas.

Este processo existe em duas versões: com fluxo não metálico e com fluxo metálico.

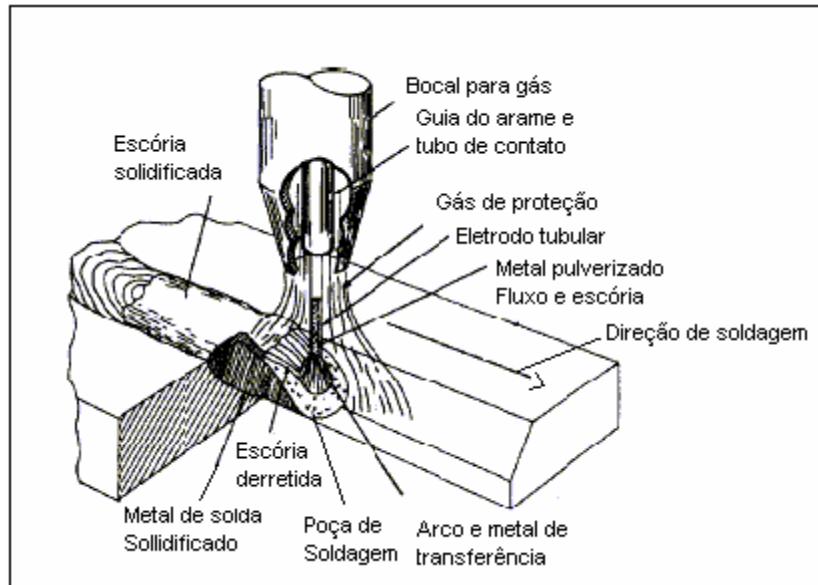


Figura 2.1 - Soldagem com proteção gasosa.

Quando o fluxo é não metálico (**flux cored wires**), os elementos do fluxo são formadores de escória e estabilizadores do arco. Eles têm a função secundária de proteger e purificar o metal de solda. Os elementos não metálicos também ajudam a reduzir o número de respingos e controlar as características de fusão do eletrodo.

A soldagem com eletrodos tubulares com gás de proteção, pode ser dividida em três tipos, de acordo com a formação da escória. Eles se dividem em: rutilico, básico e metálico.

Soldagem com **eletrodos rutilicos** possuem excelente soldabilidade. Segundo Widgery et al (1994), eles proporcionam um arco mais estável numa extensa gama de correntes, bom formato da gota e ainda pode ser utilizado para a soldagem em todas as posições. A capacidade de soldar em todas as posições é conseguida através da composição da escória, que começa a se solidificar a temperaturas altas o bastante para promover o apoio à poça de fusão. Esses arames tubulares possuem ótimos recursos operacionais, com baixo nível de respingos, e suas propriedades mecânicas são boas e atendem ou excedem as especificações AWS. Um modo de transferência mais comum é o spray. Outra característica

importante, é a fácil destacabilidade da escória.

Através do **rutílo** que é uma forma do dióxido de titânio, permitiu-se controlar o ponto de fusão e a viscosidade da escória, de tal modo que fosse possível fabricar eletrodos com escória consistente para a soldagem na posição vertical, ou escórias fluidas para a soldagem em altas velocidades na posição plana.

O dióxido de titânio é um componente estável que contribui com pouco oxigênio para a solda, porém favorece a transferência globular devido à fluidez.

Para uma transferência por spray estável, devemos manter baixa a energia superficial das gotículas bem finas. Para isso, deve-se permitir alguma oxidação da superfície das gotículas, e então os componentes básicos inibem a transferência do oxigênio da escória enquanto os componentes ácidos favorecem a transferência do oxigênio.

Para o fluxo rutílico, elementos de liga com ponto de fusão mais baixo, são necessários para abaixar o ponto de fusão do rutílo, já que para este, o ponto de fusão é aproximadamente 1800° C.

Os eletrodos E71T-1 para soldagem em todas as posições, contêm ingredientes do fluxo que produzem uma escória de rápida solidificação, e a fluidez adequada da poça de fusão para a soldagem fora de posição. A tensão do arco e a corrente de soldagem podem ser altas, devido ao suporte dado pela escória, conseguindo assim altas taxas de deposição. Como temos uma alta penetração, a espessura mínima para esse processo é de 4 mm na posição vertical e 6 mm na posição plana e horizontal.

Como características principais destes arames, temos:

- Gás de proteção: CO₂ ou a mistura de Ar + CO₂;
- Diâmetros disponíveis: 1,2 e 1,6 mm;
- Metal de solda com boa qualidade com baixo nível de hidrogênio difusível;
- Cordão com aparência suave e regular, com baixo nível de respingos;
- Facilidade de remoção da escória;
- Altas taxas de deposição em todas as posições com a transferência por spray;
- Ideal para juntas de topo com abertura na raiz e com auxílio de cobre-juntas cerâmicos.

Soldagem com **eletrodos básicos** tem como resultado solda com excelente ductibilidade e tenacidade. Seu modo de transferência é mais globular e sua soldabilidade não é tão boa, quando comparada com o eletrodo rutílico, gerando também uma quantidade maior de respingos e um cordão mais convexo. São empregados quando propriedades mecânicas e baixo nível de depósito de hidrogênio são requeridos. Até mesmo, com diâmetros pequenos não são usados fora de posição, devido às baixas correntes de soldagem e ao modo de

transferência globular que necessita do efeito da gravidade para completar sua transferência. A escória formada pelo eletrodo básico não dá o suporte à poça de fusão, conseguido com o eletrodo rutilico, relata French et al (1995). Se soubermos a composição do eletrodo básico, podemos saber previamente a composição da escória, ou seja, teremos o índice de basicidade da escória. Com este índice temos uma medida aproximada da capacidade de oxidação do fluxo, ou seja, este índice é usado para caracterizar um fluxo, com respeito às suas propriedades físicas e químicas. Porém, foi comprovado por Bauné et al (2000), que a basicidade é melhor expressa, de acordo com a quantidade de oxigênio do metal de solda.

A escória proveniente do processo de soldagem, segundo Fortes (2004), tem características importantes, tais como, moldar e suportar o metal de solda ou ajudá-lo a molhar o metal de base, ou seja, a capacidade de se misturar à parcela do metal de base fundido, aumentando assim, a diluição. Nos arames tubulares com fluxo não metálicos, os componentes estabilizadores do arco, devem ser selecionados para que seus resíduos não prejudiquem a formação de escória.

Quando o fluxo é metálico (**metal cored wires**), de acordo com estudos de Bauné et al (2000), seus elementos têm a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo, para aumentar a força do material depositado e também para desoxidá-lo. Quando aplicados em peças com boa qualidade de limpeza, produzem muito pouca escória vítrea, similar à dos arames sólidos (Araújo, 2004).

Os componentes do fluxo determinam a soldabilidade do arame e as propriedades mecânicas do metal de solda, ou seja, a seleção correta do eletrodo influencia diretamente na qualidade final da solda.

Esta breve descrição das características dos arames tubulares ilustra que, enquanto o arame rutilico oferece alta facilidade de execução, podendo soldar em todas as posições, porém para a soldagem com baixa responsabilidade, o arame básico e o “metal cored” oferecem potenciais vantagens em termos de propriedades mecânicas, nível de hidrogênio difusível, taxa de deposição e eficiência.

2.4.1 - Gás de Proteção

O início das pesquisas sobre os gases de proteção se deu na Segunda Guerra Mundial. Durante os últimos 50 anos, a indústria de gás industrial deu contribuições significativas à indústria de soldagem, pela produção e purificação de gases diferentes, como também misturas de gases. Tudo se iniciou com o processo GTAW, onde os gases hélio e argônio, que

eram as principais opções de gases que se tinha na época, tinham limitações de capacidade industrial.

Com o desenvolvimento de diferentes misturas e a variedade de fabricantes, a AWS (*American Welding Society*) percebeu a necessidade de padronizar os gases de proteção. Então, em 1997, foi produzido a norma AWS A5.32/A5.32M-97, Especificação de Gás de Proteção para Soldagem, o qual estabelece especificações para a pureza e umidade de componentes crus, como por exemplo, argônio, gás carbônico, oxigênio e hélio. O padrão também estabelece tolerância para as misturas de componentes e métodos para testar e registrar estas especificações. Isto proporcionou para o usuário, uma maior segurança em adquirir o que realmente está reivindicando, de acordo com suas necessidades específicas.

A principal função do gás de proteção é manter o nitrogênio, o oxigênio e hidrogênio fora da atmosfera da poça de fusão. Estes elementos podem acarretar formação de óxidos e, em menores proporções, nitretos. O que resulta em soldas deficientes, com retenção de escória, porosidades e fragilizações do cordão. Por isso, certas precauções devem ser tomadas para excluir esses gases nocivos da região de fusão, o que pode ser conseguido através dos gases de proteção.

As características do arco, a transferência do metal, penetração, largura, forma e propriedades mecânicas do cordão, velocidade máxima de soldagem, tendência ao aparecimento de mordeduras e custo da soldagem também são influenciados pelo gás de proteção.

Gases inertes como argônio e hélio, são utilizados, principalmente na soldagem de não ferrosos, particularmente os mais reativos como alumínio e magnésio. Ser um gás inerte significa, não oxidar e não ter nenhum efeito na composição química do metal de solda. Destes dois gases, o argônio é o mais utilizado por propiciar um arco mais estável. Dillenbeck & Castagno (1987) mostram que, dentre todos os gases de proteção, o argônio, além de ser o mais disponível no mercado, tem demonstrado ser um excelente gás devido ao seu baixo potencial de ionização. Porém, quando utilizados em chapas de aço, o baixo potencial de ionização do argônio causa uma redução de tensão, criando assim, baixa energia no arco, que resulta em menores níveis de penetração e aparecimento de mordeduras.

Um dos gases mais utilizados tanto para GMAW e FCAW é o CO₂. Quando aquecido a altas temperaturas, parte do CO₂ se dissocia, formando o monóxido de carbono (CO) que é mais estável que o CO₂, o que implica num efeito oxidante forte, que quando comparado com o hélio e argônio, tem uma maior penetração de parede lateral e velocidades de soldagens mais altas, gerando um arco rico em energia, segundo Bauné (2000).

O gás CO₂ é normalmente citado como um gás ativo, visto que ele não é quimicamente inerte. É o gás mais econômico, mas possui algumas desvantagens quando comparado a misturas ricas em argônio, como por exemplo, maior quantidade de respingos. Em se tratando de vantagens tem-se o baixo custo, o baixo calor irradiado, a razão profundidade / largura do cordão superior e o menor nível de hidrogênio difusível no metal de solda.

2.4.1.1 - Mistura de gases

O uso de misturas de gases na soldagem com arames tubulares, podem combinar as vantagens separadas de dois ou mais gases. O aumento de gás inerte aumenta a eficiência de transferência dos desoxidantes que estão no fluxo do arame. Por outro lado, a penetração será reduzida. Por exemplo, o argônio é capaz de proteger a poça de fusão em todas as temperaturas de soldagem. Sua presença em quantidade suficiente resulta na diminuição da oxidação comparativamente a proteção com CO₂ (100%).

A mistura mais empregada tanto para arames tubulares quanto para arames sólidos é a Ar + (15-25)% CO₂. Apesar dessa mistura ser mais cara, apresenta vantagens, que dependendo da aplicação viabiliza sua utilização. Dentre as principais vantagens destacam-se a quantidade reduzida de respingos por ter um arco mais suave, menor geração de fumos, acabamento e perfil do cordão superior, utilização de maiores velocidades de soldagem, penetração consistente e mais favorável, principalmente para arames tubulares. Na soldagem com 75%Ar-25%CO₂, utilizando mesma corrente e mesmo comprimento de arco energizado do eletrodo, os eletrodos tubulares básicos tendem a apresentar uma taxa de deposição superior, cerca de 2 a 17%, e o “metal cored” uma taxa de deposição inferior, cerca de 2 a 11%, quando comparado com eletrodos maciços de aço carbono do mesmo diâmetro. Nestas mesmas condições, quando comparados eletrodos maciços e tubulares rútilicos, estes tendem a apresentar valores muito próximos para a taxa de deposição (Starling et al, 2004).

A **Figura 2.2** mostra os efeitos na geometria do cordão, quando são utilizados gases e misturas diferentes de gases. Pode-se observar que a mudança do gás de proteção afeta sensivelmente as características geométricas do cordão de solda, confirmando estudos realizados por Sales (2001), onde o foco foi uma mudança de CO₂ puro para uma mistura de CO₂ + Ar.

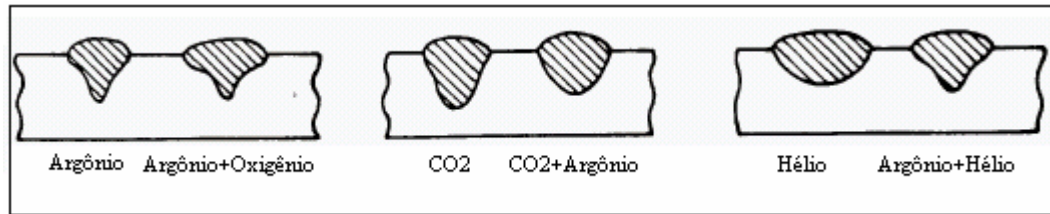


Figura 2.2 – Efeito do gás de proteção no perfil do cordão de solda com eletrodo tubular, Bracarense (2000).

2.5 - Soldagem Sem Gás de Proteção (FCAW-S)

A soldagem sem gás de proteção ou soldagem com eletrodo **autoprotégido**, **Figura 2.3**, é muito popular, por não requerer equipamento para gás de proteção, o que resulta numa maior facilidade de operação.

Uma grande variedade de fluxo para esse tipo de eletrodo tem sido desenvolvida, já que pode-se obter respostas mais adequadas com uma formulação de fluxo mais adequada, e como resultado, tem-se nesta área de fabricação, um grande interesse em pesquisas, acrescentam Widgery & Pixley (1988).

Um dos maiores problemas desse processo é a porosidade no metal de solda. Desde que não há nenhuma proteção atmosférica externa, nem um fluxo de solda que proteja eficazmente a área de soldagem, este pode facilmente ser contaminado pelo ar. Assim, a sensibilidade aos poros aumenta e é muito difícil de se controlar.

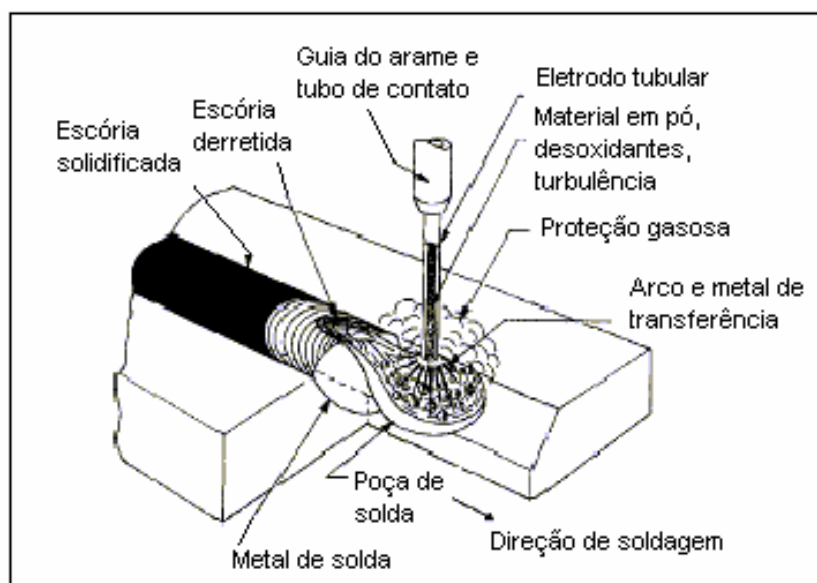


Figura 2.3 - Soldagem sem gás de proteção.

Os efeitos metalúrgicos e os parâmetros de soldagem são os principais focos de pesquisa para a solução deste problema. Vários modelos e avaliações matemáticas e termodinâmicas de susceptibilidade aos poros, também foram apresentados para esclarecer melhor o mecanismo de formação desses defeitos estudados por Bosworth (1991). De acordo com estudos realizados por Mckeown (1989), o nitrogênio é tipicamente considerado fator determinante para a formação de poros em soldagens com eletrodo autoprotetido, porém outras pesquisas mostram que só com a redução do nitrogênio contido no metal de solda não pode-se controlar eficazmente a porosidade. Segundo Xiong et al (2002), o oxigênio também tem sua parcela de contribuição à formação de porosidade. Reduzindo o potencial de oxigênio e nitrogênio na atmosfera de soldagem, como também o oxigênio e o nitrogênio contido no metal de solda, pode-se reduzir a quantidade de poros produzidos no cordão. A adição de alumínio também pode diminuir sensivelmente a produção de poros, pois ele tem forte habilidade de reduzir a quantidade de nitrogênio no metal de solda.

2.6 - Taxa de Deposição no Processo FCAW

A taxa de deposição é um dos fatores importantes na soldagem com eletrodos tubulares. Como a taxa de deposição está diretamente relacionada à economia do processo, esta vem sendo amplamente estudada.

Na soldagem com eletrodo tubular metálico a corrente é conduzida parcialmente pelo núcleo, já no caso de eletrodos com fluxo não metálico toda a corrente é conduzida pelo invólucro tubular metálico. Em contrapartida, em arames sólidos, a corrente é conduzida por toda a seção transversal. Pode-se observar, **Figura 2.4**, a diferença das seções transversais dos eletrodos com fluxo metálicos e não metálicos e também do arame sólido.

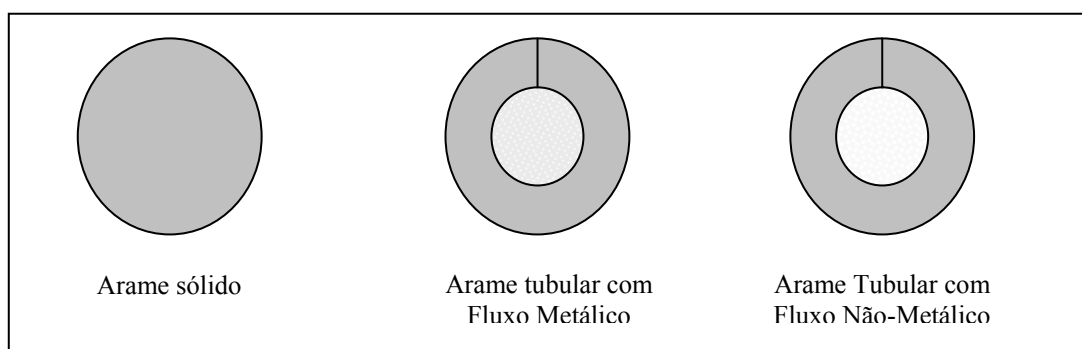


Figura 2.4 – Seção transversal de arames sólidos e tubulares.

As altas taxas de deposição alcançadas, foram mostradas por Widgery (1994),

utilizando o eletrodo rutílico E71T-1, “metal cored” e arame sólido, todos com diâmetro de 1,2 mm, como mostra a **Figura 2.5**. De acordo com o autor, à medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior em equipamentos com fonte convencional de energia, as taxas de deposição com arames tubulares, incluindo o “metal cored”, aumentam. Observou-se também que as menores taxas de deposição obtidas foram com a utilização do eletrodo sólido. Resultados similares também foram citados por Jones (1982), utilizando diferentes diâmetros e tipos de eletrodos tubulares.

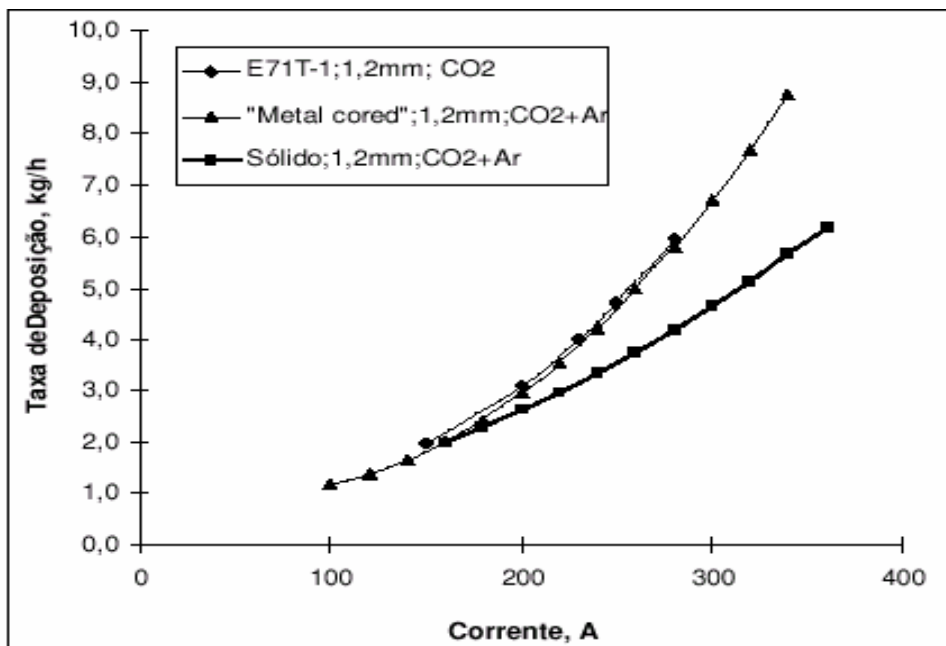


Figura 2.5 - Taxas de deposição de arames tubulares e sólidos, Widgery (1994).

2.7 - Tipos de Transferência Metálica

Segundo Modenesi (2000), diversos aspectos operacionais de soldagem são influenciados pela forma a qual o metal fundido transfere-se do eletrodo para a poça de fusão, em particular, a capacidade da soldagem em várias posições, o formato do cordão, o nível de respingos e fumos, como também a estabilidade e o desempenho operacional do processo.

Os modos de transferências metálicas dependem dos ajustes das variáveis operacionais, tais como: corrente, tensão, polaridade, diâmetro e composição do eletrodo utilizado, gás de proteção, comprimento energizado do eletrodo, do modo como as forças atuantes no processo interagem, entre outros. Eles são divididas em transferência por curto circuito, globular e spray.

No processo FCAW, a forma de transferência do metal depende particularmente do

fluxo interno do arame. De acordo com Norrish (1992), arames com fluxo interno metálico e que contêm muito poucas adições não metálicas, “metal cored”, se comportam de forma semelhante aos arames sólidos.

A transferência por curto-circuito requer correntes médias e baixas, enquanto a transferência globular e spray necessitam de correntes relativamente altas para que ocorram.

2.7.1 - Transferência por curto-circuito

Neste modo de transferência, uma grande gota é formada na extremidade do eletrodo e é transferida no momento em que esta toca o metal-base, conforme **Figura 2.6**. Isso ocorrerá, para correntes geralmente menores que 200A que pode variar em função do diâmetro do eletrodo e dos parâmetros escolhidos.

Devido à sua baixa corrente, por ser caracterizado por um arco frio, este tipo de transferência é ideal para chapas finas, passes de raiz em juntas com abertura e especialmente para a soldagem fora de posição em peças de pequena espessura. Quando utilizado para chapas com espessuras maiores que 6 mm, ocorre falta de fusão lateral devido ao baixo aporte térmico. Arames rutilicos têm desempenho inferior neste tipo de transferência (Fortes, 2004).

Na transferência por curto-circuito, a corrente média e as taxas de deposição podem ser limitadas empregando-se fontes de soldagem que permitam ao metal de solda ser transferido através do arco somente durante os intervalos de curtos-circuitos controlados ocorrendo a taxas um pouco maiores do que cinquenta por segundo. A aplicação de uma maior indutância é a solução usual para variar o aumento de corrente de tal maneira que as erupções que ocorrem imediatamente após o curto-circuito não causem respingos excessivos.

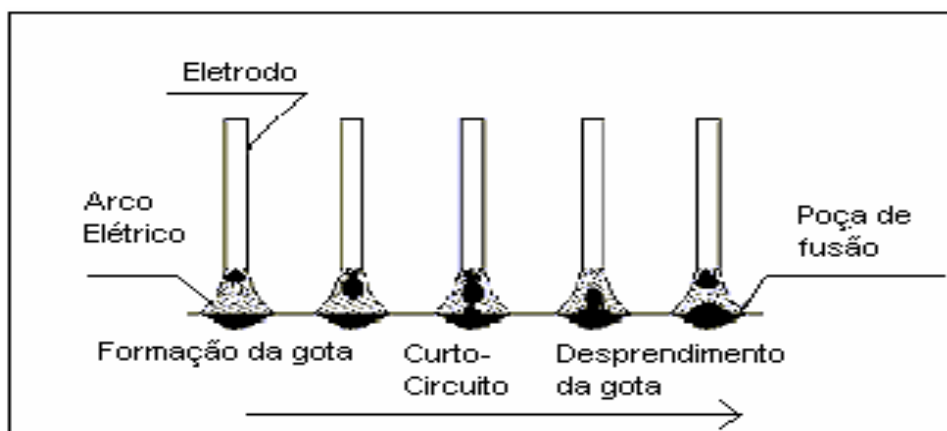


Figura 2.6 - Transferência por curto-circuito.

2.7.2 - Transferência globular

Neste modo de transferência, uma grande gota se acumula na extremidade do eletrodo, e esta é transferida pelo efeito da gravidade, devido ao seu grande volume, como pode ser observado na **Figura 2.7**. Nem sempre as gotas serão direcionadas para a poça de fusão de forma regular e por isso haverá uma quantidade maior de respingos no impacto com o metal de base ou com a poça de fusão.

Ocorre geralmente, para correntes maiores que 200A, dependendo do diâmetro do eletrodo. Segundo Norrish (1992), arames tubulares básicos operam normalmente com o modo de transferência globular não axial a correntes elevadas e com a transferência por curto circuito para correntes menores. Já para arames auto-protegidos, as transferências por curto circuito e globular repulsiva são típicas, sendo que a tendência dessa última pode ser reduzida através da formulação adequada do fluxo.

De acordo com os estudos de Starling et al (2004), para valores de corrente próximos a 160A, a soldagem com arame rutilico com CO₂ puro e uma mistura de 75%Ar-25%CO₂, resulta em uma transferência globular, com alguns curtos quando utilizada a mistura, com a formação de uma coluna de fluxo projetada em direção à poça de fusão. Para esta corrente, o tamanho médio das gotas de metal de solda e a frequência do destacamento das mesmas são próximos na soldagem com os dois gases citados. Porém, quando utilizada a mistura associada a baixas correntes, a coluna de fluxo parece tocar a poça de fusão, antes de se quebrar e de transferir para a mesma.

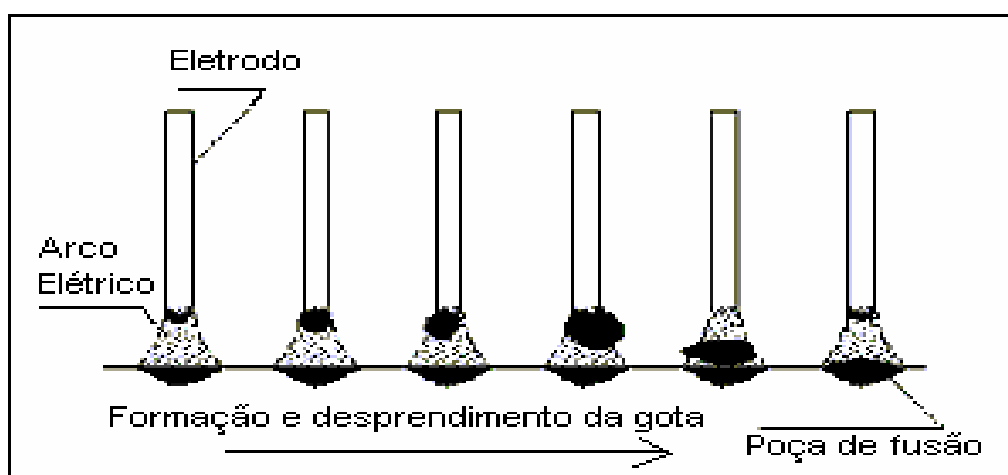


Figura 2.7 - Transferência globular.

2.7.3 - Transferência por spray

Neste modo de transferência, pequenas gotas são transferidas em forma de uma chuva de gotículas em queda livre, conforme **Figura 2.8**. A proteção de argônio ou mistura deste, é necessária para proteger o arco, sendo esse modo de transferência caracterizado pela quase ausência de respingos.

Pode-se ter dois tipos de transferência por spray, que estão diretamente ligadas aos gases. Quando se trata de soldagem com gás de proteção, e este for o argônio ou uma mistura deste com oxigênio, as gotas são muito finas e não causam curto-circuito do arco. Porém, quando se utiliza o dióxido de carbono ou uma mistura deste com argônio, a tendência é de formar uma gota na extremidade do arame que pode crescer até provocar um curto-circuito, caracterizando assim um modo de transferência chamado falso spray ou quase globular (Fortes, 2004). Segundo Norrish (1992), parte do fluxo forma uma camada de escória na superfície da gota, onde uma parte desta se decompõe formando gases de proteção e o restante é transferido para a poça de fusão, produzindo uma camada de escória.

Estudos realizados por Bracarense et al (2000), que estudaram a transferência do metal na soldagem com eletrodo rutilico com proteção de 75%Ar-25%CO₂, mostraram que o fluxo forma uma coluna que toca a poça de fusão e que se quebra imediatamente antes da transferência da gota do metal fundido. Sendo que esta sustenta a gota, retardando a sua transferência para a poça de fusão, permitindo assim seu crescimento.

Segundo Starling (2004), na soldagem com eletrodos rutilicos com a proteção de uma mistura de 75%Ar-25%CO₂, para correntes de 236 A, o tamanho da gota observado foi similar ao diâmetro do eletrodo, porém, para correntes de 275 A, o tamanho da gota continuou similar ao diâmetro do eletrodo, entretanto com uma frequência de transferência das gotas maior. Notou-se também, que pela ação da coluna do fluxo, a gota metálica se deformou, não tendo mais um formato tipicamente circular. Para esta corrente a transferência ainda foi do tipo globular e a coluna do fluxo pareceu estar dificultando a transição para a transferência por spray.

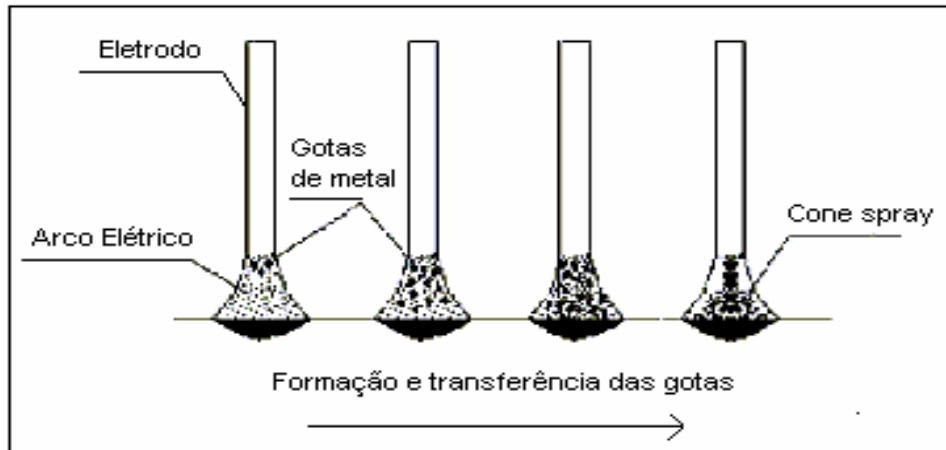


Figura 2.8 - Transferência por spray.

2.7.4 - Transferência por arco pulsado

O modo de transferência por spray é aquele que oferece maior estabilidade dentre os demais, porém é necessário um nível alto de corrente, o que inviabiliza sua utilização para a soldagem de chapas finas, devido a seu grande aporte de calor. Durante os últimos anos este modo de transferência tem sido largamente desenvolvido, para assegurar a soldagem com a transferência por spray, a um nível de corrente médio, confirmam Pixley & Mckeown (1988). No modo pulsado, que utiliza uma corrente média, decorrente de uma corrente de pico e uma de base e também o tempo de permanência da corrente nestes valores, **Figura 2.9**.

Durante o tempo na corrente de base, o arco é mantido aberto, porém não há transferência de metal, o que ocorre somente durante o tempo de pico. Ou seja, a soldagem ocorre a uma alta corrente, com uma corrente média que permanece baixa ao longo do processo, o que viabiliza a utilização deste modo de transferência na soldagem de chapas finas ou ainda, em todas as posições de soldagem.

Pesquisas envolvendo a utilização do modo pulsado têm sido divulgadas recentemente, e via de regra, se concentram na análise da influência dos parâmetros de pulso na geometria do cordão e produtividade da solda (Oliveira, 2005; Saito, 2001).

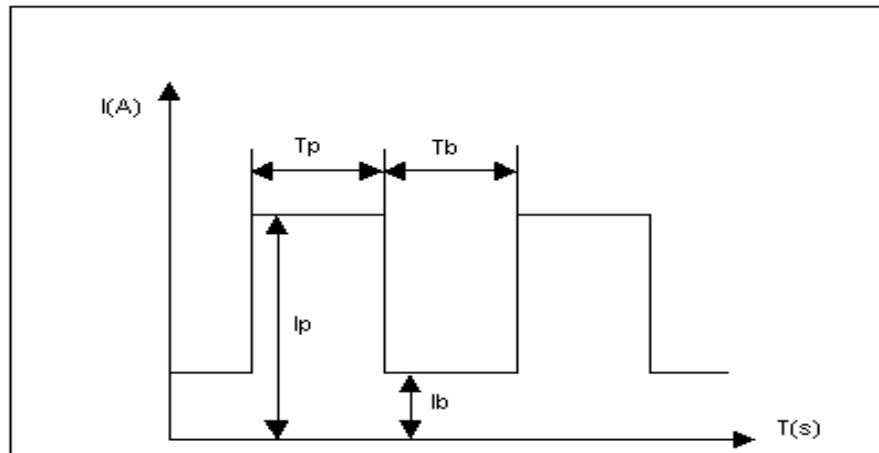


Figura 2.9 - Esquema de uma onda pulsada.

2.8 - Hidrogênio Difusível

O hidrogênio no metal de solda é considerado como um dos mais graves problemas, pois é o agente responsável por trincas a frio. Segundo Araújo (2004), na maioria dos casos, as trincas induzidas pelo hidrogênio podem ocorrer até 48 horas após a soldagem e dificilmente poderão ser reparadas. Por isso, é muito importante avaliar as formas de controlar o teor de hidrogênio no metal de solda no processo de soldagem com arame tubular.

Existe um consenso com relação as principais fontes de hidrogênio em cordões depositados com arames tubulares. Estas fontes, relatadas por Monteiro (1999) são: umidade e compostos hidrogenados presentes no fluxo, presença de resíduos lubrificantes na superfície do arame, condições atmosféricas durante a soldagem e teor de umidade no gás de proteção. Baseando-se em pesquisas anteriores, a quantidade de hidrogênio difusível encontrada no metal de solda é relativamente alta se comparando, por exemplo, com soldas depositadas com eletrodo revestido e com o arame sólido.

No caso de eletrodos revestidos rútilicos, estes não podem ser utilizados para soldas de alta responsabilidade porque, pela natureza de seu revestimento, possuem componentes que contêm água, porém são essenciais a um desempenho satisfatório (French et al, 1995).

Segundo Monteiro (1999), quanto maior a corrente, maior o teor de hidrogênio difusível no metal de solda depositado com arame tubular. Dependendo dos parâmetros de soldagem e, particularmente, da corrente, pode ocorrer incidência direta do fluxo interno do arame sobre a poça de fusão. Esta situação pode ser responsável pelo aumento do teor de hidrogênio difusível no metal de solda com o aumento da corrente.

Alguns eletrodos autoprotégidos têm sido desenvolvidos especificamente para

soldagem de aços com revestimento de zinco e aços ligados ao alumínio, muito comuns na indústria automobilística. Normalmente, o processo com eletrodo auto-protégido é usado para trabalhos em campo, porque eles permitem correntes de ar maiores.

Monteiro (1999) também informa que a quantidade de hidrogênio difusível contido na solda com o eletrodo E71T-1, aumenta quase que linearmente com o aumento da corrente. E mostra também que essa quantidade aumenta com o tempo de exposição do eletrodo à atmosfera. Porém, eletrodos básicos têm maior resistência ao aumento da quantidade de hidrogênio difusível, quando exposto ao tempo. Devido a esse fato, o armazenamento correto dos eletrodos é de grande importância ao processo.

Não se deve esquecer que no caso de arames tubulares rútilicos, o teor de hidrogênio difusível é fortemente dependente do processo de fabricação e da formulação do fluxo, de modo que os fluxos são desenvolvidos para atingirem baixos níveis de hidrogênio difusível, completa Fortes (2004).

2.9 - Qualidade da Solda

Uma diferença essencial entre os arames sólidos e os arames tubulares para soldagem com gás de proteção é o modo de transferência do metal de solda em uma soldagem ao arco aberto.

Trabalhos realizados por Fortes (2004) e Araújo (2004), relatam que arames sólidos, que utilizam uma mistura Ar + CO₂ para a soldagem ao arco aberto, produzem um arco pequeno e uma transferência de metal muito estreita. As gotas atravessam o arco ao longo de uma linha de centro, uma após outra a uma alta frequência. Por isso, as gotas penetram na poça de fusão dentro de uma área de projeção relativamente pequena. Portanto, toda a energia contida nas gotas fica concentrada nessa pequena área.

Arames tubulares possuem um arco mais largo, portanto as gotas espalham-se e criam uma área de projeção maior, distribuindo a energia de soldagem de forma mais uniforme. O arco mais largo dos arames tubulares produz uma poça de fusão calma e plana que forma um cordão de solda de aspecto liso e com boa molhabilidade. Essas diferenças têm um efeito significativo na qualidade do metal de solda.

Na soldagem com arames sólidos, a penetração é estreita e pequena, num formato dediforme, finger, por isso há uma maior risco de defeitos por falta de fusão. Um pequeno desalinhamento da tocha pode causar uma falta de fusão lateral para uma junta em ângulo. Na soldagem com arames tubulares, a penetração tem uma forma mais rasa, porém mais larga,

possibilitando uma tolerância muito maior para desalinhamentos da tocha, com isso, reduz os riscos de defeitos de falta de fusão. Esse efeito é ainda mais evidente quando é utilizado o CO₂ como gás de proteção, pois o CO₂ tem uma condutibilidade térmica maior, fazendo com que a energia térmica do arco se espalhe sobre uma área maior, favorecendo uma penetração na forma circular (Araújo, 2004). Na **Figura 2.10**, essa diferença geométrica do cordão foi evidenciada.

Monteiro (1999), também evidencia que uma outra vantagem da soldagem com arames tubulares é a quantidade reduzida de respingos, a qual pode ser facilmente verificada na soldagem com arame rutilico.

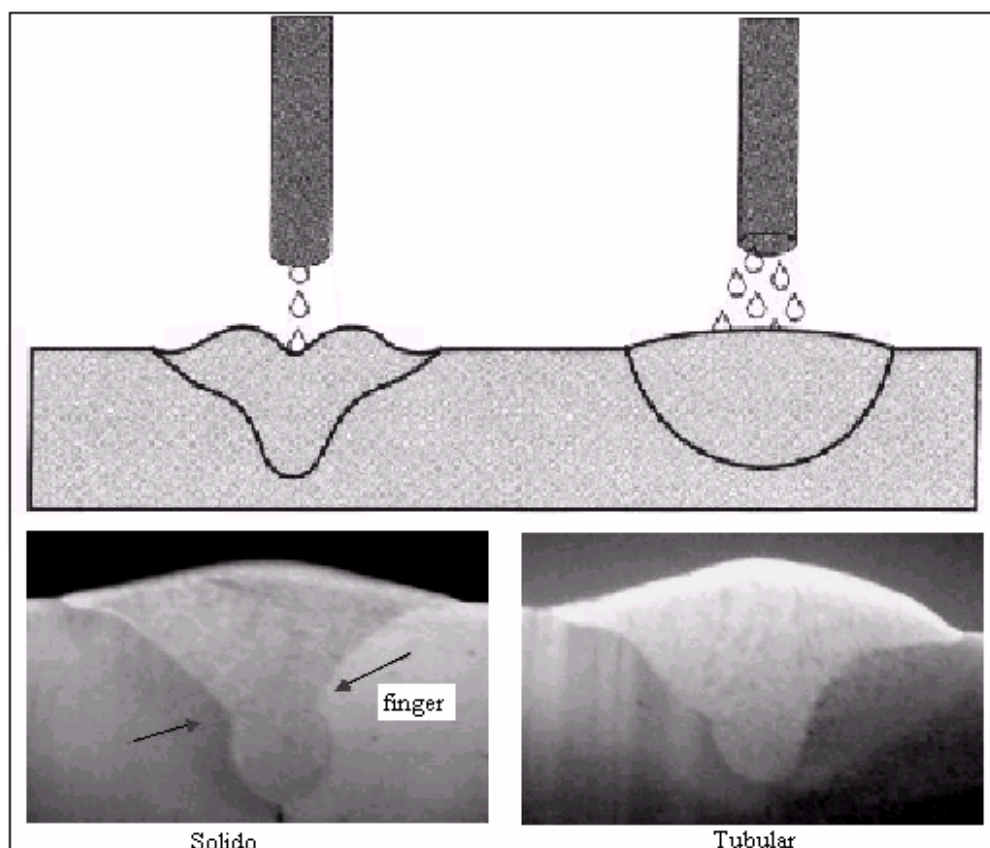


Figura 2.10 – Transferência de gotas de arames sólidos/tubulares, Araújo (2004).

2.10 - Características da Soldagem com Eletrodo Tubular

Como todo processo, a soldagem com eletrodos tubulares tem suas vantagens e limitações. Para sua aplicação, estas devem ser analisadas, juntamente com os resultados práticos, para que então, esta se torne ou não conveniente.

2.10.1 - Vantagens

Os benefícios da soldagem com arames tubulares estão relacionados a três características gerais:

- Produtividade relacionada à utilização de arames contínuos;
- Benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame;
- Auxílio da escória na forma e aspecto do cordão de solda.

Mais detalhadamente:

- Alta qualidade do metal depositado;
- Ótima aparência da solda (solda uniforme);
- Excelente contorno em soldas de ângulo;
- Solda vários tipos de aços e em grandes faixas de espessuras;
- Fácil operação devido à alta facilidade de mecanização;
- Alta taxa de deposição devido a alta densidade de corrente;
- Relativamente alta eficiência de deposição;
- Economiza engenharia para projeto de juntas;
- Arco visível;
- Requer menor limpeza do que no GMAW;
- Distorção reduzida sobre o SMAW;
- Uso de eletrodos autoprotégidos elimina a necessidade do uso de aparelhos de gás além de ser mais tolerante para condições ao ar livre;
- Alta tolerância com relação a contaminantes que podem originar trincas;
- Resistente a trincas do cordão;
- Alta produtividade.

2.10.2 - Limitações

Como limitações do processo tem-se:

- Limitado à soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel;
- Necessidade de remoção de escória;
- O arame tubular é mais caro na base de peso do que o arame de eletrodo sólido, entretanto, a medida que aumentam os elementos de ligas esta relação diminui;
- O equipamento é mais caro se comparado ao utilizado para soldagem pelo processo SMAW,

mas a alta produtividade compensa;

- Restrição da soldagem ao ar livre (somente para soldagem FCAW com gás de proteção);
- O alimentador de arame e a fonte de energia devem estar próximos ao local de trabalho;
- São gerados mais fumos do que os processos GMAW e SAW.

2.11 – Variáveis do Processo

Muitas variáveis interferem nas características do cordão de solda, como por exemplo, a tensão, a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação do arame, a distância bico de contato peça, a inclinação da tocha, como também a proteção gasosa.

A **tensão** é um parâmetro importante, pois afeta tanto o modo de transferência metálica quanto à geometria do cordão. A tensão tem uma influência direta no comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. Quando a tensão do arco diminui, a penetração aumenta. Quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras.

Existe uma faixa de tensão (corrente) aplicável para cada diâmetro de arame tubular, que fornece uma determinada taxa de deposição. Na ocasião da escolha do arame tubular, é necessário fazer uma avaliação da faixa de corrente que será aplicada, dependendo da espessura do material a ser soldado. A **Tabela 2.1** mostra taxas de deposição obtidas com arames tubulares em função da corrente, tensão.

Tabela 2.1 – Parâmetros de soldagem para arames rútilicos, Fortes (2004).

Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Taxa de deposição (kg/h)
1,2	150	28	1,90
	210	29	2,85
	250	30	3,85
	290	33	4,85
	330	34	5,75

A **velocidade de soldagem** influencia na energia de soldagem, ou seja, na quantidade de calor cedido à peça, como também na penetração. Uma velocidade de soldagem muito baixa gera grandes aportes térmicos, podendo o material sofrer mudanças não desejadas em suas microestruturas. Quando se trata de soldagem com arames tubulares com fluxo não

metálico, baixas velocidades de soldagem dificultam o controle da escória que pode passar a frente da poça de fusão e gerar inclusões de escória (Araújo, 2004). Em trabalhos realizados por Lee et al (1998), foram utilizadas velocidades de soldagem de até 42 cm/min.

A **velocidade de alimentação do arame** governa o fluxo de corrente, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação, maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame alimentado à poça de fusão. Wainer (1992) mostra uma relação direta entre velocidade de alimentação do arame e corrente, juntamente com uma relação inversa ao comprimento do arco. Para valores muito altos de velocidades de alimentação do arame, tem-se altas correntes, o que pode implicar em mordeduras. Baixas velocidades de alimentação do arame podem gerar uma solda com falta de penetração, falta de fusão e formato irregular do cordão. Variações inesperadas ou controladas de forma inadequada da velocidade de alimentação do arame são causas frequentes de instabilidade do processo de soldagem.

A **distância bico de contato peça** também é um parâmetro importante. Como pode ser visto na **Figura 2.11**, o gráfico a) mostra valores adequados de tensão, corrente e distância bico de contato peça, o que nos dá uma potência disponível $(V_1 I_1 + R_1 I_1^2)$ para fundir o eletrodo. Se aumenta-se a distância bico de contato peça, aumenta-se a tensão (gráfico b), então, a energia passará para $V' I' + (R_2 I')^2$, ou seja, a corrente diminui, e por conseqüência, a energia e a velocidade de fusão também diminuem.

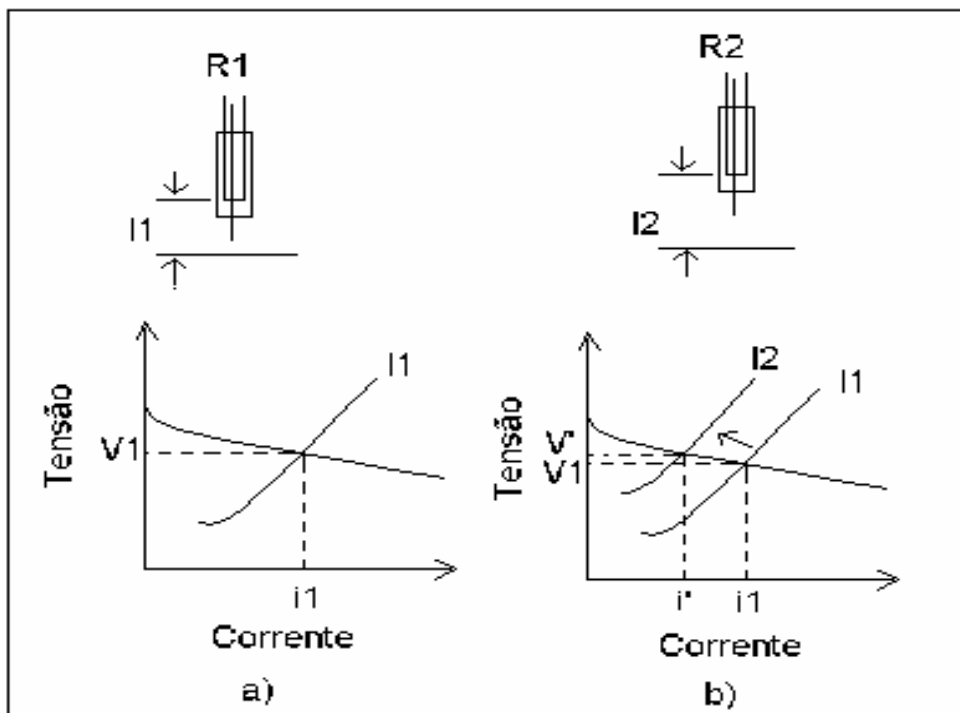


Figura 2.11 – Influência da distância bico de contato peça na corrente de soldagem.

Quando a distância bico de contato peça é muito grande pode-se ter uma deficiência na ação do gás de proteção. Para uma taxa de alimentação de arame fixa, qualquer aumento nesta distância, tem o efeito de reduzir a corrente fornecida pela fonte. Se a velocidade de alimentação do arame é aumentada para compensar a queda de corrente resultará em um significativo aumento na taxa de deposição do metal de solda, **Figura 2.12**.

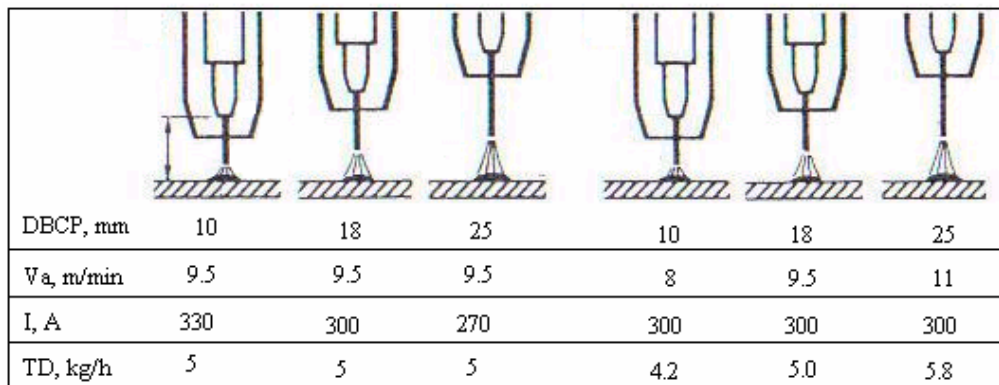


Figura 2.12 - Efeito da distância bico de contato peça na corrente e na taxa de deposição, Houdcroft (1988).

Casos de soldas executadas em locais de difícil acesso ou em casos de chanfros estreitos, pode-se utilizar um bico de contato protuberante em relação ao bocal, tomando-se o devido cuidado com a ação do gás de proteção.

A **inclinação da tocha**, ou o ângulo entre o eixo do arame e a linha da junta, interferem no controle da escória e no perfil do depósito. O ângulo recomendado para juntas em ângulo e de topo está entre 60° e 70° , na utilização na técnica “puxando”, ou seja, o arame apontando para o cordão já formado, **Figura 2.13**. Nesta técnica, a força do arco faz com que a escória não passe à frente da poça de fusão, reduzindo assim o risco da escória ficar presa. Neste caso temos maior penetração, menos respingos, cordão mais estreito e mais convexo e um arco mais estável. Quando se utiliza a técnica “empurrando”, temos características tais como: menor penetração, mais respingos, cordão mais plano e mais largo, menor visibilidade para o soldador. Esta técnica é empregada quando grandes valores de penetração não são requeridos. Quando utiliza-se ângulo neutro tem-se características intermediárias aos dois casos citados anteriormente.

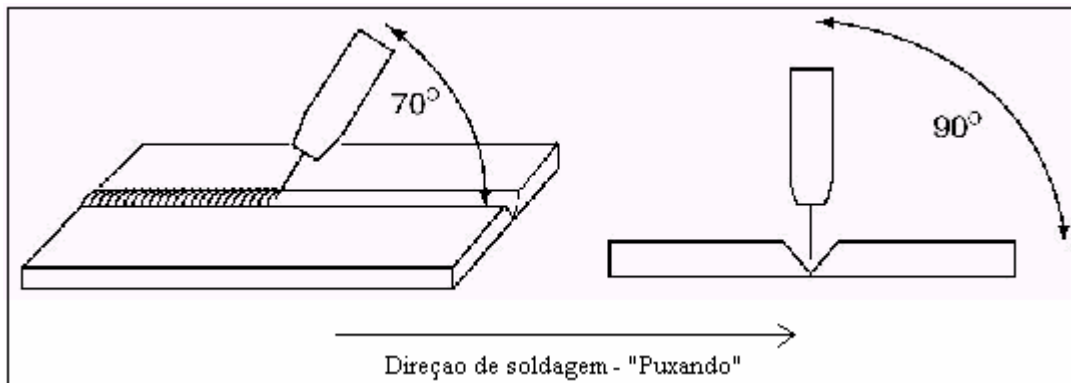


Figura 2.13– Ângulos de soldagem recomendados para juntas em ângulo e de topo.

2.12 – Delineamento de Experimento

No ambiente industrial, em especial no desenvolvimento de novos produtos e processos, é necessária em determinadas ocasiões, a obtenção de informações a respeito do comportamento de um determinado fenômeno de forma empírica. Devido a isso, a importância de se fazer uso de métodos científicos se tornou imprescindível. Assim, muitas vezes torna-se necessário planejar detalhadamente a realização de um determinado experimento de forma a obter um maior número de informações a seu respeito. Além de minimizar custos operacionais, tal atitude dará a garantia de que os resultados obtidos conterão dados relevantes para a solução a ser almejada. Desta maneira, podem ser desenvolvidos produtos com melhores características, ocorrer redução tanto do tempo de desenvolvimento quanto da sensibilidade desses produtos frente às variações de condições ambientais, além de aumentar a produtividade de processos. Tendo isto em vista, o Projeto e Análise de Experimentos vem como resposta à esse tipo de situação, propondo uma técnica que visa particularmente dois grandes objetivos: a maior precisão estatística na análise das respostas com o menor custo operacional possível.

A essência de um bom planejamento fundamenta-se essencialmente na capacidade de se projetar um experimento de maneira que ele forneça o tipo de informação desejado. Para isto, é necessário que se tenha uma idéia clara do objetivo do estudo e saber qual a melhor maneira de se coletar os dados, além do modo como estes serão avaliados.

Segundo Montgomery (1984) para que um Projeto de Experimentos seja bem sucedido, algumas etapas devem ser seguidas. São elas:

- Conhecimento e exposição do problema;

- Escolha dos parâmetros e níveis;
- Seleção da(s) resposta(s);
- Escolha do projeto de experimentos
- Realização do experimento;
- Análise dos resultados;
- Conclusões e recomendações.

2.12.1 Estimativa do erro experimental

Para a determinação do erro experimental existem diversas técnicas estatísticas. Para experimentos que utilizam a replicagem, normalmente por possuírem pequenos números de parâmetros ou mesmo facilidade em se coletar os dados, existem técnicas específicas para o cálculo desses erros. Outros experimentos, por motivos financeiros ou técnicos, são impedidos de serem repetidos e por isso não utilizam a técnica da replicagem. Para estes casos, outras técnicas podem ser úteis para o cálculo do erro experimental, como por exemplo, desconsiderar efeitos de interação de ordem superior, utilizando-se assim, essas interações não consideradas no cálculo desse erro.

O erro experimental pode ser facilmente verificado através da replicagem dos pontos centrais, que são também utilizados para verificar a linearidade dos resultados obtidos.

2.12.2 Teste de significância dos efeitos

Em se tratando de análise de significância dos parâmetros, esta pode ser realizada baseada no P_{value} de cada parâmetro estudado. Utilizando um nível de significância de 5%, quando tem-se o P_{value} menor que 0,05, pode-se dizer que este parâmetro é significativo, ou seja, exerce influência no processo. O P_{value} é gerado pelo software Minitab.

Quando se estudam muitas variáveis ao mesmo tempo, juntamente com mais de uma resposta, a análise de qual parâmetro é mais influente fica um pouco confusa, pois um parâmetro é o mais significativo para uma resposta, porém não é tão significativo para outra. Essa dificuldade pode ser resolvida através de um recurso interno do Minitab, que faz uma análise de significância de cada fator nas respostas de interesse, obtendo assim uma conclusão mais segura. Este recurso, **a análise estatística multivariada**, ajuda a entender a base da estrutura de dados e/ou formar um número menor de variáveis não correlacionadas, como por exemplo, para evitar a multicolinearidade na regressão. Através da análise estatística

multivariada, pode-se analisar a estrutura de covariância dos dados com a finalidade de entendimento ou de reduzir a dimensão dos dados. Para isso, o caminho utilizado é a seleção do item “*Principal Components*”, seleção do grupo de respostas a ser analisado, depois faz-se o gráfico de pareto com as colunas geradas pelo passo anterior. A partir daí, procede-se a análise dos resultados. Tem-se como resultado, um valor de “*eigenvalue*” e “*proportion*”, através dos quais se pode verificar a porcentagem de participação de cada parâmetro no conjunto de resposta proposto. Pode-se utilizar para esta verificação somente os valores de proporção para “*eigenvalues*” maiores que 1, pois assim já se tem um resultado adequado, visto que estes significam a maioria proporcional.

Para cada grupo de resposta de interesse, tem-se um resultado diferente das variáveis mais influentes. Com essa análise tem-se a influência das variáveis no processo em porcentagem de participação, para um conjunto específico de respostas.

Quando se trabalha com experimentos utilizando pontos centrais, podemos estimar o erro experimental através deste e ainda analisá-lo para verificar se a região que se está trabalhando está próxima ou não da região de ótimo para cada resposta. Esta análise também é feita através do P_{value} , agora dos pontos centrais, utilizando o mesmo nível de significância de 5%.

2.12.3 Metodologia da Superfície de Resposta

A Metodologia da Superfície de Resposta (RSM – Response Surface Methodology) foi introduzida por Box na década de 50 e tem obtido grande sucesso na sua utilização em diversos processos industriais (Neto et al, 1995). Esta ferramenta permite avaliar como as respostas são afetadas quando as variáveis de entrada são ajustadas fora da região de interesse, saber quais variáveis de entrada quando combinadas afetam a resposta e também saber quais valores destas variáveis terão a resposta desejada (maximizada ou minimizada) e qual a superfície de resposta mais próxima deste ótimo.

Esta técnica matemática e estatística é utilizada para a análise e modelamento de problemas onde a resposta de interesse é influenciada por vários parâmetros e o objetivo é otimizar esta resposta. Para isto são geralmente utilizados polinômios de primeira e segunda ordem, **Tabela 2.2.**

Tabela 2.2 – Descrição das funções para modelos de primeira e segunda ordem.

ORDEM	FUNÇÃO
Primeira	$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$
Segunda	$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$

Através da análise de variância, pode-se analisar estatisticamente se o modelo matemático é adequado ou não, e também a significância dos coeficientes. A adequação é determinada através do teste de hipótese, ou seja, da distribuição de F em um determinado nível de significância, geralmente utilizado 5%. O valor do P_{value} mostra a probabilidade de erro ao aceitar a hipótese.

O software Minitab permite obter os valores de R^2 , que indicam qual a porcentagem é efetivamente explicada pelo modelo matemático. Após obter os modelos completos, pode-se analisar a necessidade ou não de obter um modelo reduzido. Isto é feito através da análise dos P_{value} da regressão, ou seja, se o valor do P_{value} da regressão for menor que 0,05, podemos dizer que o modelo é adequado e não é necessário obter o modelo reduzido. Caso o P_{value} seja maior que 0,05, o modelo não é significativo e então há a necessidade de obter o modelo reduzido através da eliminação de fatores e interações não significativas de cada resposta. Os valores de R^2 do modelo reduzido serão maiores e o erro padrão será menor quando comparado com o modelo completo.

Na metodologia da superfície de resposta tem-se o design quadrático, mais conhecido como CCD, *Central Composite Design*. Este é formado por três grupos de elementos experimentais: um fatorial completo, um número de pontos centrais (center point) e um número de pontos estrela (*star points*), o que permite a estimativa da curvatura do modelo. Para a sua formação, são utilizados os níveis especificados pelo experimentador (+1 e -1), o valor do ponto central (0) e os valores extremos calculados pelo software Minitab (+2 e -2).

Nesta etapa pode-se observar que alguns experimentos da fase anterior podem ser aproveitados, facilitando ainda mais sua execução.

2.12.4 Otimização das respostas

Para a otimização de respostas, um recurso utilizado é o “*Response Optimizer*”. Através dele pode-se simular várias combinações de parâmetros e suas respectivas respostas como também, obter a combinação ideal de parâmetros que resulta numa condição satisfatória

geral. Para isso, se define uma faixa aceitável para cada resposta e seus respectivos pesos e importância, através da qual será realizada a análise e finalmente processados os resultados.

Este recurso fornece inicialmente a melhor combinação de parâmetros que otimiza todas as respostas simultaneamente. A **Figura 2.14**, mostra um exemplo de resultado para uma combinação ideal de parâmetros. O valor de **d**, é o valor da “desejabilidade” (o que se deseja obter, baseado na faixa peso e importância citados anteriormente) individual de cada resposta e **D** é o valor das desejabilidades combinadas de todas as respostas. Quanto mais próximo do valor 1 estiver o valor das “desejabilidades” melhor, ou seja, quanto mais próxima de 1 estiver as desejabilidades individuais, mais próximos de 1 estará o valor de **D**, assim todas as respostas estarão muito próximas do ótimo especificado nas faixas aceitáveis.

Este recurso também possibilita simular várias combinações de parâmetros e suas respectivas respostas, podendo assim, obter um resultado combinado satisfatório a uma aplicação específica. Pode-se trabalhar com uma combinação não ideal, porém, que seja mais viável do ponto de vista produtivo e financeiro, e ainda sim se obter resultados satisfatórios. O interessante dessa ferramenta é que se pode prever o resultado final de cada combinação, sem perda de tempo e dinheiro.

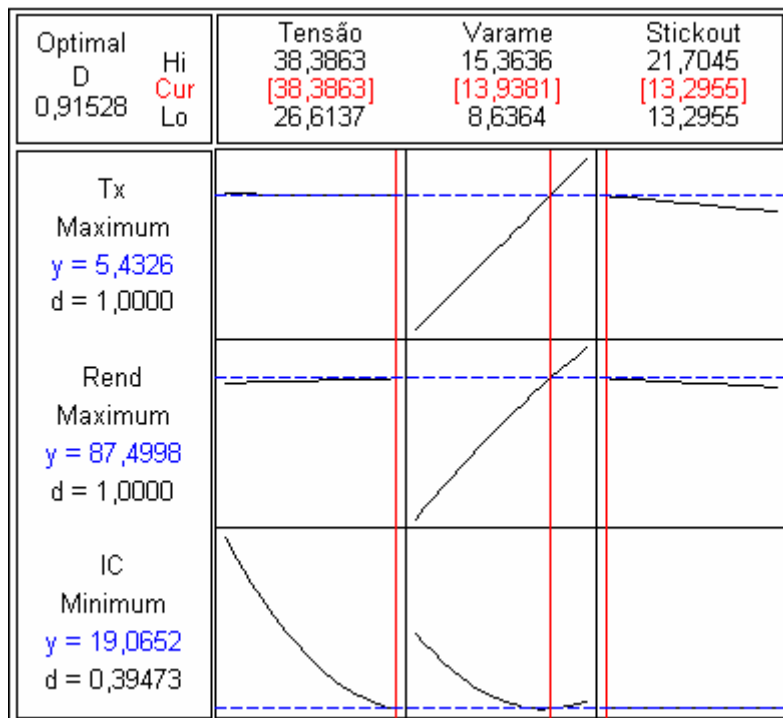


Figura 2.14 – Exemplo de resultado da ferramenta “Response Optimizer”.

Quando não se quer trabalhar com uma única combinação de parâmetros e sim com uma região onde se pode obter várias combinações de respostas que possa atender os

objetivos específicos de forma satisfatória, um recurso utilizado é o “*Overlaid Contour Plot*”. Este é baseado no “*Contour Plot*”, que fornece as linhas de contorno para cada resposta estudada. As linhas de contorno representam em duas dimensões, a relação funcional entre a resposta e os fatores. Pontos que tem a mesma resposta estão unidos para produzir linhas de contorno de uma resposta constante. O “*Overlaid Contour Plot*”, fornece um gráfico onde é identificada uma área comum, a todas as respostas, baseada nas faixas desejadas pré-determinadas, através da qual se obtém maior flexibilidade para as combinações de parâmetros, de acordo com as necessidades estabelecidas para cada aplicação. Essa flexibilidade permite uma análise financeira, por exemplo, para identificar qual a combinação dentro dessa intersecção de áreas é mais viável economicamente.

2.13 – Considerações Finais

A revisão bibliográfica realizada sobre a soldagem com eletrodos tubulares foi de suma importância para a realização deste trabalho, pois através dela foi possível verificar a verdadeira necessidade de informações a respeito deste processo, como também obter informações iniciais para a elaboração dos ensaios. Apesar do baixo nível de informações encontrado, foi possível fazer uma triagem para que se pudesse trabalhar numa faixa mais adequada de alguns parâmetros referentes ao processo.

Após ter a idéia da faixa de cada parâmetro e seu comportamento, o próximo passo foi fazer uma análise minuciosa do que se queria estudar. Definido o foco principal do trabalho, analisar a influência de cada parâmetros num conjunto de respostas específico, foi necessário verificar qual ferramenta seria mais eficiente para obter resultados confiáveis com o menor tempo e custo possível. Realizada esta verificação, optou-se pelo delineamento de experimento, utilizando planejamentos fatoriais fracionários, fatoriais completos e a metodologia da superfície de resposta para posterior modelamento e otimização dos parâmetros estudados.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se os equipamentos, materiais e metodologia para análise da combinação ideal de parâmetros para a soldagem com arames tubulares e seus resultados que viabilizem ou não sua utilização.

Como o objetivo do trabalho foi fazer um mapeamento de parâmetros, estes foram descritos de forma detalhada, desde os testes preliminares até o experimento principal, ou seja, a cada passo do experimento foram detalhados o porquê da utilização de cada grupo de parâmetros utilizados.

A parte experimental se dividiu em fases; uma fase inicial, que visou a obtenção dos parâmetros que mais influenciam nas respostas (penetração, taxa de deposição, diluição, índice de convexidade, rendimento), o experimento principal, cuja função foi uma análise e verificação da região de trabalho, e finalmente, utilizando os parâmetros mais influentes, se procedeu a otimização do processo de soldagem com posterior validação dos resultados.

Resumidamente o trabalho se dividiu em:

- Análise da influência dos parâmetros nas respostas (Fatorial Fracionário);
- Análise detalhada dos fatores mais influentes (Fatorial Completo);
- Otimização do processo de soldagem (RSM);
- Confirmação dos resultados obtidos.

3.1 – Banco de Ensaios e Montagem Experimental

O banco de ensaios utilizado para a execução dos experimentos pode ser verificado na **Figura 3.1.**

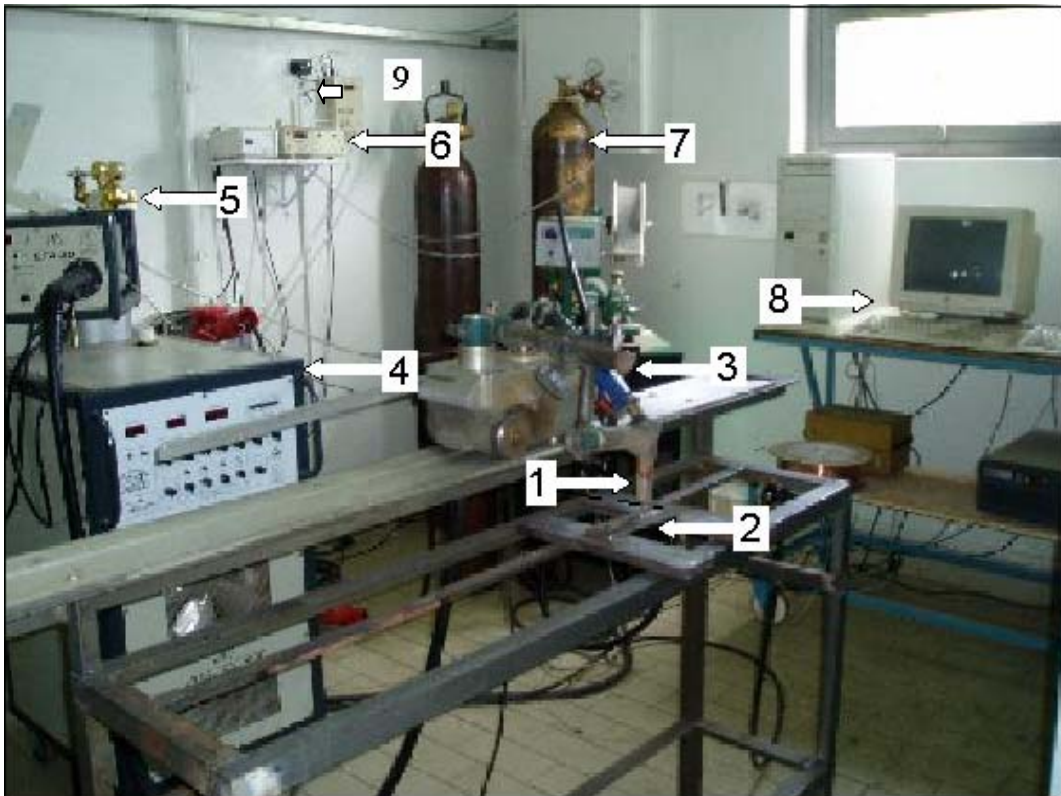


Figura 3.1 – Banco de ensaios – Laboratório de soldagem-UNIFEI.

Onde:

- 1 – Tocha;
- 2 – Corpo de prova;
- 3 – Carrinho que conduz a tocha;
- 4 – Fonte de tensão constante;
- 5 – Sistema de alimentação de arame;
- 6 – Tacômetro;
- 7 – Cilindro de gás de proteção;
- 8 – Sistema de aquisição;
- 9 – Medidor de vazão.

Para a realização dos cordões de solda, utilizou-se uma fonte de soldagem multiprocessos Inversal 300, com comando digital e funcionamento no modo normal. A tocha de soldagem (1) foi acoplada a um carro (3) com ajuste de velocidade e acoplada a um sistema mecânico que permite o ajuste de posicionamento da tocha nas condições especificadas. Para avaliar o comprimento do arame consumido na realização de cada cordão, foi utilizado um tacômetro (6), acoplado à fonte de soldagem. A medida do tempo do arco aberto foi feita utilizando um cronômetro. A vazão constante no processo foi registrada no

medidor de vazão (9). Utilizou-se em todos os testes, um sistema de aquisição de dados (8) para tensão e corrente, através do software Oscilos4 e tempo de aquisição de 1 segundo, onde pode-se observar as características dinâmicas de transferência das gotas e obter a corrente imposta no processo.

Todos os testes foram realizados através de simples deposição sobre chapas de aço ABNT 1045, sendo a fase inicial realizada com chapas de dimensões 150mmx50mmx6mm e nas demais, chapas de 75mmx50mmx9mm.

Como metal de adição foi utilizado o arame AWS E71T-1, com diâmetro de 1,2 mm, fabricado pela Hyndai. Suas propriedades mecânicas e composição química, segundo fabricante foram dispostas na **Tabela 3.1**.

Tabela 3.1 – Composição química e propriedades mecânicas do arame.

DADOS TÉCNICOS				
Composição Química, [%]				
Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre
0,03	0,55	1,45	0,013	0,01
Propriedades Mecânicas				
Limite de Resistência (N/mm ²)	Limite de Escoamento (N/mm ²)	Alongamento [%]	Charpy 18° C	
580	525	29	104	

3.2 – Fase Inicial – Fatorial Fracionário

Anteriormente a esta fase, foram realizados testes exploratórios onde observou-se que:

- Para tensões próximas a 25V, a transferência típica é globular.
- Um aumento excessivo de tensão causa instabilidade do arco e com isso, defeitos superficiais, principalmente porosidades alongadas, defeito este também evidenciado por Jones (1982).
- Para uma tensão de 32V associada a uma velocidade de alimentação do arame de 15m/min e uma velocidade de soldagem de 50 cm/min, obteve-se um cordão com bom aspecto superficial e uma transferência tipicamente “spray”.
- Velocidades de alimentação do arame altas, associadas à tensões baixas causam fusão do

eletrodo com a poça de fusão.

Juntamente com estas observações e de acordo com a literatura disponível, foram idealizados os níveis dos parâmetros estudados na fase inicial deste trabalho. Para se obter resultados confiáveis com um número reduzido de ensaios, utilizou-se do delineamento de experimentos (DOE) para o planejamento dos ensaios e do software Minitab para análise dos resultados. Sendo que o planejamento do experimento é o fator principal na solução futura do problema que motivou a investigação.

Como o objetivo nesta fase foi analisar quais os parâmetros que mais influenciaram no resultado final (características geométricas e econômicas), e tendo em vista uma fase de rastreabilidade, utilizou-se do maior número de parâmetros que se julgou interferir nestas respostas.

3.2.1 – Definição dos parâmetros e respostas

Vários parâmetros influenciam no processo de soldagem, como já foi evidenciado. Diferentemente da soldagem com arames sólidos, onde muitas informações estão disponíveis, no caso de eletrodos tubulares estas informações são mais escassas. De certa forma, tensão, velocidade de alimentação do arame, tipo de gás de proteção, distância bico de contato peça, velocidade de soldagem e ângulo de inclinação da tocha tem conhecida influência em maior ou menor grau nos processos de soldagem. Como o objetivo foi fazer uma análise mais ampla, foram utilizados todos os parâmetros citados anteriormente. Os níveis analisados nesta fase foram cuidadosamente escolhidos, através da literatura disponível.

Como ponto exploratório decidiu-se utilizar a resposta geometria do cordão, expressa em termos de penetração, diluição e índice de convexidade e também o fator econômico expresso pela taxa de deposição e rendimento.

Para efeito de análise, considerou-se que uma soldagem adequada é aquela que obtém a máxima penetração, diluição, rendimento, taxa de deposição e um índice de convexidade entre 20 e 30%.

Quanto aos gases de proteção, estes foram escolhidos de acordo com a literatura. De acordo com alguns autores, tais como Lowery (1977), Stenbacka & Person (1989), existem vantagens na utilização de misturas de gases na soldagem de chapas de aço carbono. Então, para se fazer comparação da utilização de gases puros e misturas de gases, foi utilizado CO₂ puro e uma mistura de 25%Ar + 75% CO₂.

De acordo com teoria e a prática, foram determinados os parâmetros fixos e os

parâmetros variáveis que serão analisados. Os parâmetros fixos para todo o trabalho, foram:

- Diâmetro do eletrodo: 1,2 mm;
- Vazão de gás: 15 l/min;
- Recuo do bico de contato: 5 mm;
- Material de base: Aço ABNT 1045.

Nesta fase foram utilizadas chapas de 150mmx50mmx6mm.

Para os parâmetros variáveis, foi utilizada uma faixa, cuja soldabilidade foi verificada, baseado nos testes preliminares e nos trabalhos estudados. Optou-se por uma faixa de parâmetros grande, já que se trata de uma fase exploratória. Em trabalhos realizados por French e Bosworth (1995), foram utilizadas velocidades de alimentação do arame de 10 e 11 m/min; já Modenesi (2004) utilizou velocidades de até 14 m/min, por isso, os valores utilizados nesta fase foram especificados numa faixa mais alta, pois se tratou de uma fase de caráter exploratório. No caso da tensão, o valor máximo encontrado na literatura foi de 34V, porém este parâmetro foi também extrapolado para 36V para uma análise mais detalhada do comportamento deste acréscimo. A distância bico de contato peça de 10 a 20mm foi indicado na literatura, Fortes (2004), para a soldagem com eletrodo rutilico de diâmetro 1,2mm, da mesma forma que foi indicado o ângulo de inclinação da tocha entre 60° e 70° .

Baseado nestas condições, decidiu-se adotar os parâmetros com seus respectivos níveis mínimos e máximos, de acordo com o estabelecido na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 – Níveis operacionais para os testes iniciais.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Tensão(V)	29	36
Velocidade de alimentação(m/min)	10	14
Gás de proteção	C25	CO ₂
Distância bico de contato peça(mm)	15	20
Velocidade de soldagem(cm/min)	40	60
Ângulo de inclinação da tocha (°)	-20	20

Para o valor da distância bico de contato peça indicado na tabela, está incluído o valor do recuo do bico de contato, ou seja, para um valor de 15mm para a distância bico de contato peça, tem-se 5 mm de recuo, **Figura 3.2**.

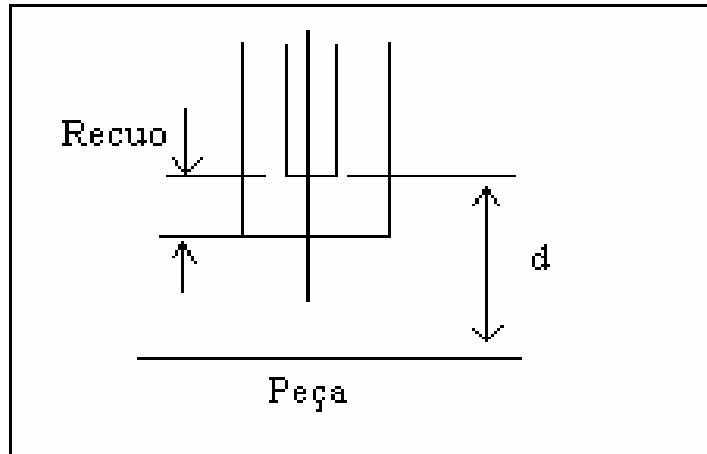


Figura 3.2 – Definição de distância bico de contato peça.

A polaridade utilizada para todo o trabalho foi CC+, pois se tratando de eletrodos rútilicos, a aplicação de polaridade negativa produziria características operacionais inferiores e eventualmente porosidade.

3.2.2 – Determinação da seqüência de realização dos ensaios

Para a execução dos experimentos foi utilizado um Planejamento Fatorial Fracionário em dois níveis, com uma replicagem para minimizar o erro e também quatro pontos centrais, para verificar a linearidade dos resultados obtidos. A seqüência de realização dos ensaios foi gerada pelo software, ou seja, numa ordem padrão. Devido ao objetivo, foi definida a utilização de uma fração de 1/8, cuja resolução é III, a qual foi suficiente para o propósito desta fase, já que esta foi de caráter exploratório. Neste caso, tem-se 2^{6-3} experimentos, ou seja, 8 ensaios com uma replicagem e mais 4 pontos centrais, o que totaliza em 20 ensaios. Este número de variáveis foi importante devido ao desconhecimento da influência das mesmas sobre as respostas. A **Tabela 3.3** mostra o planejamento dos ensaios gerado pelo sistema.

Tabela 3.3– Planejamento Fatorial Fracionário.

Ordem Padrão	Condições de soldagem					
	V (V)	Va (m/min)	Gás	d (mm)	Vs (cm/min)	A (°)
1	29,0	10	C25	20	60	20
2	36,0	10	C25	15	40	20
3	29,0	14	C25	15	60	-20
4	36,0	14	C25	20	40	-20
5	29,0	10	CO ₂	20	40	-20
6	36,0	10	CO ₂	15	60	-20
7	29,0	14	CO ₂	15	40	20
8	36,0	14	CO ₂	20	60	20
9	32,5	12	C25	17,5	50	0
10	32,5	12	CO ₂	17,5	50	0

Observação: Para o ângulo, foi utilizada a denominação 20 para a posição “puxando” e -20 para a posição “empurrando”. No caso de ângulo 0 (zero), a tocha ficou a 90°.

3.2.3 - Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi idêntica no decorrer de todo o trabalho. Sendo estes cortados, esmerilhados, pesados e identificados cuidadosamente, para a execução dos cordões de solda. Após executada a solda, os corpos de prova foram seccionados em dois locais para diminuir o erro, sendo o cordão não uniforme em toda a sua extensão, depois polidos e atacados quimicamente com uma solução de Nital 4%, para a realização das leituras geométricas necessárias. Para a leitura da penetração, do reforço e de suas respectivas áreas, como também da largura, foi utilizado um projetor de perfil e um planímetro. Como a leitura foi feita em duas seções do corpo de prova, foi utilizado um valor médio de cada medida. Essas leituras foram realizadas conforme a **Figura 3.3**.

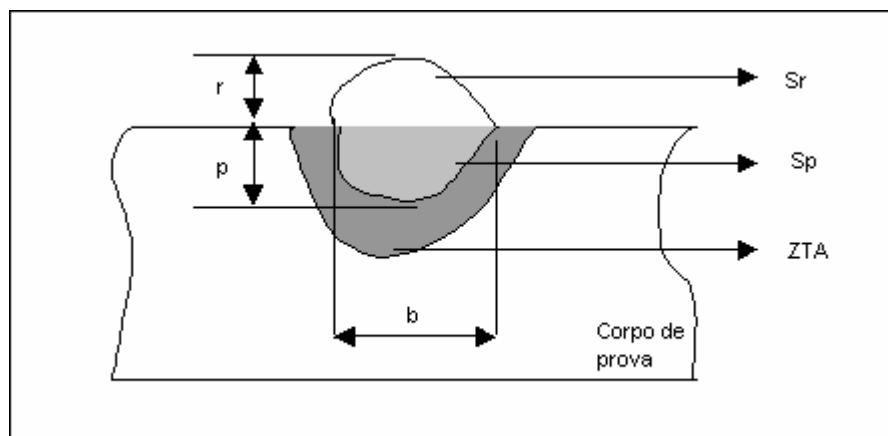


Figura 3.3 – Representação da área da seção transversal do cordão de solda.

3.2.4 – Determinação das respostas

Para a obtenção das respostas de todas as fases do trabalho, foram utilizadas as áreas de secções transversais citadas e mostradas na **Figura 3.3**, e também através da pesagem dos corpos de prova, antes e depois da soldagem. Foram medidas diretamente, a penetração, o reforço, a largura, áreas penetrada, de reforço e área total. Todas essas medidas foram feitas em duas faces, devido à irregularidade do cordão, e utilizada a média aritmética. Os valores de taxa de deposição, taxa de fusão, rendimento, índice de convexidade e índice de perdas são dependentes das medidas anteriores e das medidas de tempo e comprimento do arame consumido durante a realização de cada cordão.

A taxa de deposição foi definida segundo a **equação 3.1**, e foi dado em kg/h.

$$TD = 3,6 * \frac{(m_f - m_i)}{t} \quad (3.1)$$

onde m_f = massa do corpo de prova após a soldagem

m_i = massa do corpo de prova antes da soldagem

t = tempo de arco aberto

A taxa de fusão foi definida segundo a **equação 3.2**.

$$TF = \frac{dens. * vol.}{t} \quad (3.2)$$

onde: dens = 6,47 g/cm³

$$vol = \frac{\pi * \phi^2}{4} * l, \text{ sendo: } \phi = \text{diâmetro do arame}$$

l = comprimento consumido do arame.

Através da taxa de deposição e taxa de fusão, pode-se calcular o rendimento, em (%), através da **equação 3.3**.

$$\eta = \frac{TD}{TF} \quad (3.3)$$

O índice de convexidade foi obtido através do reforço e da largura, dado em %, conforme **equação 3.4**.

$$IC = \frac{r}{b} \quad (3.4)$$

A diluição foi calculada através de uma relação de áreas, conforme a **equação 3.5**.

$$D = \frac{S_p}{S_t} \quad (3.5)$$

Todos os valores lidos e calculados foram apresentados no próximo capítulo.

3.3 – Experimento Principal – Fatorial Completo

Nesta fase foram utilizados os resultados do planejamento fatorial fracionário, ou seja, os parâmetros que mais influenciaram no processo. Através destes, pode-se fazer uma varredura de todas as combinações dos parâmetros através de um planejamento fatorial completo. Foi idealizado um planejamento fatorial com 2^3 experimentos, somados a uma replicagem e mais cinco pontos centrais. É importante lembrar que nesta fase tem-se um experimento com resolução V, reforçando a confiabilidade dos resultados.

Todos os fatores fixos foram mantidos, exceto a dimensão do metal base, que passou a ser 75mmx50mmx9mm (aproximadamente). As respostas analisadas foram as mesmas da fase anterior.

Através do fatorial completo, pode-se saber se a região trabalhada foi a região de ótimo ou não, sendo este, o resultado mais relevante desta fase.

3.4 – Modelamento e Otimização do Processo

Após a verificação, estar ou não na região de ótimo, através do valor do P_{value} dos pontos centrais de cada parâmetro analisado do planejamento fatorial completo, partiu-se então, para a realização do modelamento e otimização do processo. Para isso foi utilizada a Metodologia da Superfície de Resposta (RSM), através de um Central Composite Design

(CCD), o qual é formado por um planejamento fatorial completo, somado a um número de pontos centrais e um número de pontos estrelas. Neste caso, foi utilizado um planejamento fatorial com 2^3 experimentos, somados a seis pontos centrais e seis pontos estrela. Essa metodologia gerou um modelo para cada resposta analisada, onde cada uma delas foi analisada separadamente em função de seus parâmetros e as interações destes.

A Metodologia da Superfície de Resposta também possibilitou encontrar uma região na qual todas as respostas analisadas anteriormente foram compatíveis com as faixas pré-determinadas, ou seja, uma região onde várias combinações diferentes de parâmetros, resultaram num conjunto de respostas adequado, de acordo com valores desejados, estabelecidos previamente. Em seguida, pode-se realizar a confirmação e validação dos resultados obtidos no modelamento gerado, para a verificação da confiabilidade da ferramenta utilizada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os ensaios realizados, conforme sequenciamento de testes descritos nos capítulos anteriores.

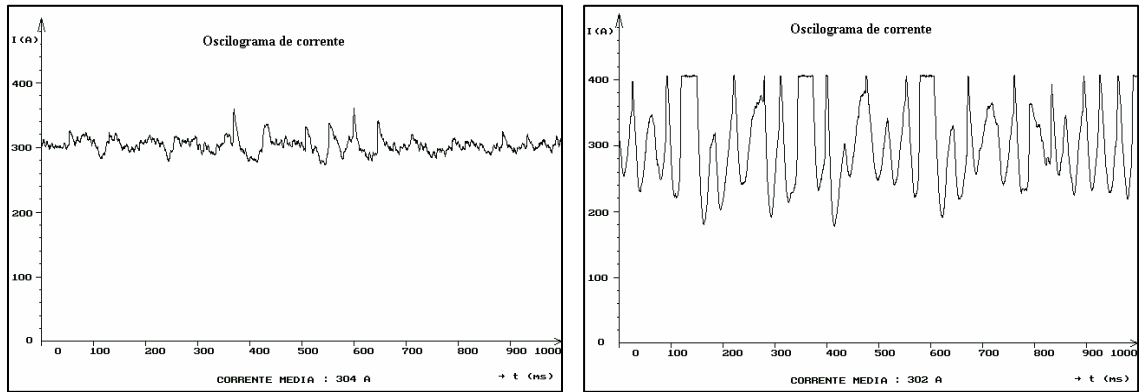
Como descrito anteriormente, no início foram analisados seis parâmetros, para finalmente ser realizado o desenvolvimento do modelo dos parâmetros mais significativos, que no caso foram três.

Depois de apresentados os resultados, os mesmos foram processados e analisados através do software comercial Minitab, sendo estabelecidos a significância dos parâmetros e sua influência em cada resposta, com posterior modelamento das respostas: penetração, taxa de deposição, rendimento, índice de convexidade e diluição. Foram realizados testes de confirmação para a validação dos resultados obtidos.

4.1 – Fase Inicial – Fatorial Fracionário

Na execução dos ensaios pode-se perceber um nível mais elevado de respingos e de fumos, quando se utiliza o gás CO₂ puro. Pode-se notar também uma maior estabilidade do arco e uma transferência metálica mais suave quando a mistura de gases foi utilizada, conforme **Figura 4.1**.

Observou-se que quando foi utilizado C25, **Figura 4.1 (a)**, a transferência foi mais suave que quando utilizado CO₂ puro, **Figura 4.1(b)**. Os parâmetros utilizados para a realização desses cordões foram: tensão de 29V, velocidade de alimentação do arame de 14 m/min, distância bico de contato peça de 15mm, velocidade de soldagem de 60 cm/min e ângulo de inclinação da tocha de 20° na posição empurrando, variando-se os dois tipos de gases analisados. Mesmo sem a utilização desse recurso, é fácil perceber a diferença no modo de transferência no momento da execução dos cordões de solda.



(a) C25

(b) CO2

Figura 4.1 – Comparação dos oscilogramas de corrente utilizando gases diferentes.

Na **Figura 4.2** tem-se uma foto dos cordões de solda, de acordo com a ordem gerada pelo software Minitab

- Do cordão 1 ao 8, tem-se os testes com a variação de parâmetros gerado;
- Do cordão 9 ao 16, as replicagens dos 8 testes anteriores;

Do cordão 17 ao 20, estão os ensaios realizados com os pontos centrais.

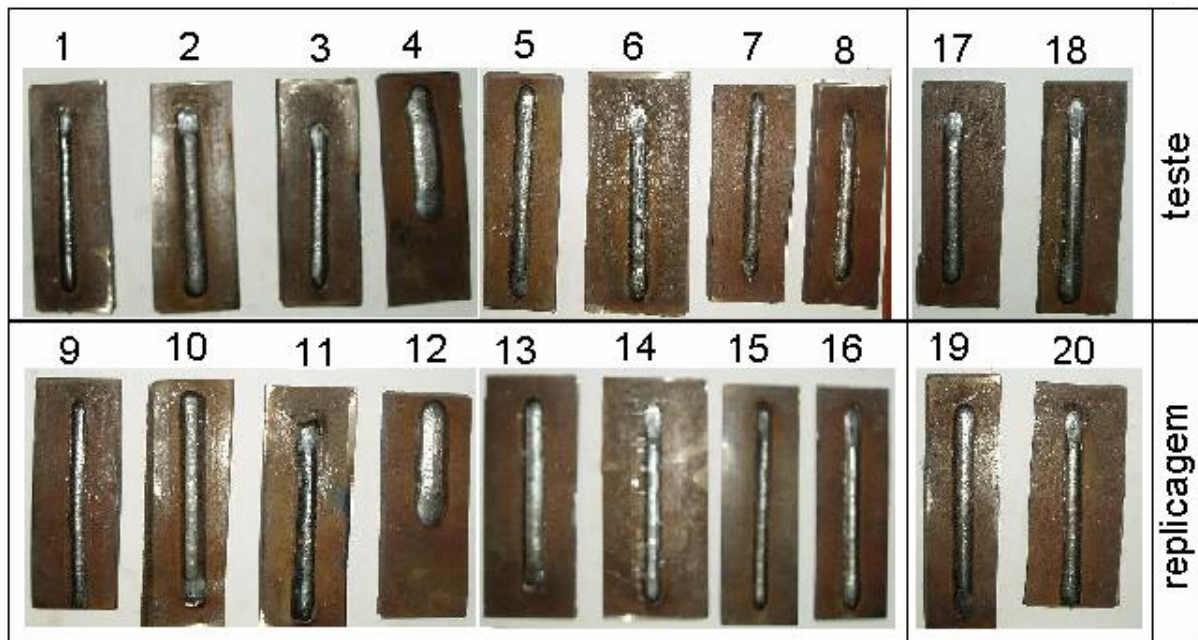


Figura 4.2 – Cordões de solda obtidos no fatorial fracionário.

Pode-se observar também nestes testes, alguns defeitos superficiais tal como o mostrado na **Figura 4.3**. Estes defeitos podem ser provenientes da combinação de parâmetros, cujo excesso de calor associado ao processo de solidificação da escória, produza essa

imperfeição, como porosidades alongadas (Jones,1982), ou ainda das condições ambientes que podem causar perturbações no arco.



Figura 4.3 – Defeito superficial representado por uma porosidade alongada.

4.1.1 – Resultados obtidos dos ensaios

Os dados coletados antes e durante a soldagem, são mostrados na **Tabela 4.1**, onde o índice 1 representa a primeira seqüência e o índice 2, a replicagem. As siglas mi e mf referem-se às massas inicial e final respectivamente, ou seja, medidas das massas dos corpos de prova antes e depois da soldagem, obtidos através de uma balança de precisão. A variável l refere-se ao comprimento do arame consumido e t refere-se ao tempo de arco aberto. Os valores relacionados em 9 e 10 se referem aos pontos centrais.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos no ensaio.

OP	mi1	mi2	mf1	mf2	l1	l2	t1	t2
*	g	g	g	g	m	m	s	s
1	350,70	369,20	363,10	382,90	1,90	2,13	11,81	13,69
2	388,70	392,10	407,10	412,40	2,62	2,78	16,84	18,77
3	373,70	416,60	388,90	434,40	2,40	2,76	10,19	11,82
4	402,80	387,00	421,00	403,60	2,82	2,55	12,25	10,79
5	383,80	471,50	403,90	489,20	3,18	2,76	18,82	16,39
6	517,00	508,90	528,20	520,10	1,98	1,90	12,03	11,40
7	372,20	383,50	397,60	410,50	3,51	4,07	17,74	17,57
8	376,70	384,10	392,70	402,10	2,51	2,78	10,75	11,94
9	364,50	407,00	380,60	427,50	2,46	3,17	12,26	15,59
10	369,60	464,00	388,80	482,50	3,00	2,68	14,66	14,13

Na ocasião da retirada da escória, procedimento anterior à pesagem final do corpo de

prova, foi atribuída uma nota, ou classificação, para explicar a facilidade desta retirada e também uma classificação para a qualidade superficial do cordão de solda, **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 – Classificação para remoção de escória e qualidade superficial.

OP	Classificação			
	Remoção de escória1	Remoção de escória2	Qualidade superficial1	Qualidade superficial2
1	2	1	2	2
2	4	4	2	2
3	3	2	3	3
4	3	3	1	1
5	3	3	3	3
6	1	2	1	1
7	1	1	2	2
8	3	4	3	3
9	3	3	3	3
10	4	3	3	3

O critério adotado para a classificação da remoção de escória e para a qualidade superficial foi determinado segundo um padrão estabelecido.

Para remoção de escória:

- 4– Totalmente solta;
- 3 – Solta, remoção com leve toque;
- 2 – Solta, remoção com toques mais fortes;
- 1 – Remoção com leves batidas.

Para qualidade superficial:

- 3 – Bom (de 9 à 10);
- 2 – Médio (de 6 à 8);
- 1 – Regular (até 5).

A classificação para qualidade superficial foi dada por duas pessoas e registrada a média aritmética das duas notas. De uma maneira geral, observou-se que a facilidade de remoção da escória neste processo foi muito grande, como já previsto na literatura (Fortes, 2004). Em se tratando de qualidade, observou-se que as notas mais baixas atribuídas coincidiram com os corpos de provas que apresentaram defeitos superficiais e não regularidade do cordão.

Logo após a preparação, foram realizadas as medidas geométricas de cada corpo de prova através dos equipamentos já descritos. Os resultados dessas medidas são apresentados na **Tabela 4.3**, onde os índices (r), (p), (b), (Sr), (St), (Sp) referem-se respectivamente ao

reforço, penetração, largura, área do reforço, área total e área penetrada do cordão. Novamente, a resposta do experimento e de sua replicagem foram emparelhados para que observassem a sua proximidade, porém os valores nem sempre estiveram tão próximos devido ao erro experimental.

Tabela 4.3– Parâmetros geométricos dos cordões de solda.

OP	r1	r2	p1	p2	b1	b2	Sr1	Sr2	Sp1	Sp2	St1	St2
*	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²
1	2,55	2,48	1,47	1,38	8,75	8,45	14,01	14,13	9,38	8,35	23,46	22,36
2	2,43	2,63	2,28	2,25	12,85	12,13	20,24	21,49	17,38	16,76	37,69	38,41
3	2,75	2,50	1,98	2,10	10,45	11,05	19,83	17,48	11,03	12,43	31,01	30,88
4	2,35	2,40	2,05	1,70	18,15	16,80	32,38	31,80	22,70	17,35	55,39	48,85
5	2,68	2,45	1,80	1,60	12,93	12,60	22,43	21,95	12,36	10,83	34,93	32,72
6	1,59	1,80	2,22	2,15	12,40	11,48	12,96	13,25	16,70	15,35	29,86	28,70
7	4,35	4,50	2,90	3,00	11,00	9,55	29,65	27,40	16,25	19,90	45,78	47,38
8	2,80	2,70	3,02	2,95	10,55	11,75	18,83	20,63	19,13	18,45	37,88	39,09
9	2,65	2,45	2,00	1,90	12,10	12,73	20,54	19,95	16,15	14,47	36,46	34,80
10	2,80	2,78	2,30	2,18	12,50	12,68	20,15	22,18	17,38	15,45	37,74	37,50

Através dos dados da **Tabela 4.1** e da **Tabela 4.3**, somados às equações do item 3.2.4, obteve-se as respostas apresentadas nas **Tabelas 4.4** e **4.5**, representadas por (η), (TD), (IC), (D), e (I) respectivamente, rendimento, taxa de deposição, índice de convexidade, diluição e corrente de soldagem.

Tabela 4.4 – Respostas a serem analisadas.

OP	η_1	η_2	TD1	TD2	IC1	IC2	D1	D2	I1	I2
*	%	%	kg/h	kg/h	%	%	%	%	A	A
1	89,19	87,90	3,78	3,60	29,14	29,29	39,97	37,34	240,90	236,69
2	95,98	99,79	3,93	3,89	18,87	21,65	46,12	43,63	271,75	264,36
3	86,55	88,14	5,37	5,42	26,32	22,62	35,55	40,24	304,90	316,62
4	88,20	88,96	5,35	5,54	12,95	14,29	40,98	35,52	341,31	302,25
5	86,38	87,64	3,84	3,89	20,70	19,44	35,38	33,09	252,93	238,76
6	77,30	80,56	3,35	3,54	12,82	15,69	55,92	53,49	269,11	246,75
7	98,89	90,66	5,15	5,53	39,55	47,12	35,50	42,01	282,72	289,55
8	87,11	88,49	5,36	5,43	26,54	22,98	50,50	47,20	295,42	293,25
9	89,44	88,38	4,73	4,73	21,90	19,25	44,30	41,59	275,57	268,95
10	87,46	94,34	4,71	4,71	22,40	21,89	46,04	41,21	271,48	272,06

4.1.2 – Análise dos resultados

Através do software Minitab, os dados acima foram processados, para então, se analisar qual a influência das variáveis nas respostas. Para essa análise foi utilizado um intervalo de confiança de 95%, ou seja, para valores de alfa (α) menores que 5%, admitiu-se que a variável de controle em questão, influencia na resposta, **Tabela 4.5**. Vale ressaltar que quanto menor for o valor de alfa, maior será a influência do parâmetro na resposta analisada.

Tabela 4.5 – Análise de significância dos parâmetros nas respostas.

Respostas	Variáveis de controle (α)						
	V	Va	Gás	d	Vs	A	VxA
Penetração	0,001	0,000	0,000	0,000	0,547	0,000	0,048
Ordem de Influência	2	1	1	1		1	3
Taxa de deposição	0,677	0,000	0,122	0,196	0,015	0,422	0,014
Ordem de Influência		1			3		2
Rendimento	0,470	0,328	0,104	0,267	0,001	0,001	0,152
Ordem de Influência					1	1	
Índice convexidade	0,000	0,001	0,009	0,009	0,343	0,000	0,039
Ordem de Influência	1	2	3	3		1	4
Diluição	0,000	0,156	0,019	0,016	0,002	0,313	0,447
Ordem de Influência	1		4	3	2		

Obs.: Os números em negrito na tabela, mostram a ordem de influência dos parâmetros significativos em cada resposta, realizados de acordo com uma simples análise dos mesmos.

Considerando os resultados, **Tabela 4.5**, observou-se que através da seqüência dada pelos números em negrito, não foi possível determinar os parâmetros mais influentes no conjunto de respostas, devido ao elevado número de parâmetros observados e à coincidência de valores de significância. A opção então, foi fazer uma análise estatística multivariada, para se obter essa ordem de influência de uma maneira mais segura. Neste caso, as respostas de interesse, escolhidas aleatoriamente, foram a penetração, taxa de deposição, índice de convexidade e diluição. Os valores obtidos para os “*eigenvalues*” foram 1.8181, 1.3591, 0.6990, 0.1238 e para a proporção foram 0.455, 0.340, 0.175 e 0.031

O resultado obtido, baseado na escolha acima, foi que a velocidade de alimentação do arame tem uma participação de 21,9%, a tensão 18,5%, o ângulo de inclinação da tocha

14,5 %, o gás de proteção 12,9%, a distância bico de contato peça 11,9% e a velocidade de soldagem 6,8%. Ficou muito claro que a velocidade de alimentação do arame foi incontestavelmente influente, independente das respostas analisadas, sendo que os demais parâmetros variaram de acordo com o grupo de resposta escolhido.

Para essa fase de testes, foi feita uma revisão bibliográfica minuciosa, para a obtenção dos níveis dos fatores indicados. Devido a esse cuidado, os resultados foram satisfatórios, porém, trabalhou-se nesta fase com um experimento de resolução III. Tem-se seis fatores em dois níveis e foram executados somente 8 experimentos, sem considerar os pontos centrais.

Os pontos centrais indicam a curvatura dos dados analisados, ou seja, pode-se observar através dos mesmos, se as respostas seguiram ou não um comportamento linear. A **Figura 4.4** mostra um exemplo do comportamento dos fatores na resposta índice de convexidade. Pode-se observar que os pontos centrais estão deslocados das retas referentes a cada parâmetro. Se esse ponto estivesse no centro da reta, poder-se-ia dizer que a resposta analisada teve um comportamento linear, ou seja, se aumentasse ou diminuísse o valor de um parâmetro isoladamente, aumentaria ou diminuiria o valor da resposta linearmente, de acordo com a inclinação da reta. Essa análise foi feita para todas as respostas, obtendo-se várias combinações diferentes.

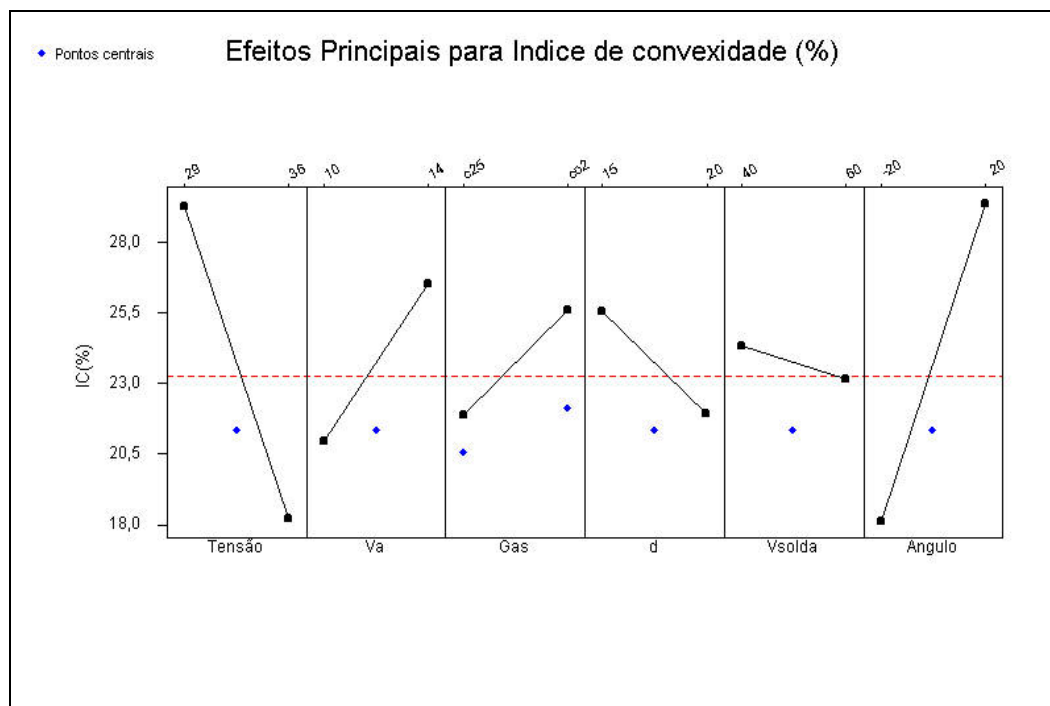


Figura 4.4 – Efeitos principais no índice de convexidade.

De posse dos parâmetros mais influentes e do comportamento dos dados para cada resposta, pode-se então, caminhar em busca da melhor combinação de parâmetros que satisfizesse todas as respostas simultaneamente. O número de parâmetros estudados nesta fase foram seis, na próxima esse número deverá ser reduzido, devido a sua significância. Observou-se que tensão e velocidade de alimentação do arame foram os parâmetros mais influentes. O gás de proteção e o ângulo de inclinação variaram entre terceira e quarta posição, dependendo das respostas especificadas.

Para fazer uma análise mais detalhada da influência do gás de proteção e da inclinação da tocha, foi utilizado a ferramenta “*Response Optimizer*” do software Minitab. Através deste recurso, pode-se simular resultados de combinações diferentes de fatores. Para isso foi necessário estabelecer uma faixa aceitável das respostas analisadas. Essa faixa e a previsão das respostas obtidas na simulação, para uma solução global, são mostradas na **Tabela 4.6**.

Tabela 4.6 – Faixas desejadas e previsão das respostas.

Respostas	Nível		Previsão
	Inferior	Superior	
Penetração (mm)	1,8	2,5	2,52
Taxa de deposição (kg/h)	3,8	5,0	5,01
Rendimento (%)	80	85	85,77
Índice de convexidade (%)	18	23	18,27
Diluição (%)	35	45	45,00

A combinação dos parâmetros que forneceram esse resultado otimizado, chamado solução global, é apresentado na **Tabela 4.7**. Pode-se observar que não é possível obter tal precisão desses parâmetros conforme indicado na tabela (valores de velocidade de alimentação e distância bico de contato peça), por isso, quando utilizado valores exequíveis para tais, o resultado alcançado é apresentado na Solução Global 1, na mesma tabela. Outro fato importante a ser observado é o valor da desejabilidade muito próximo de 1, ou seja, todas as respostas estão muito próximas dos valores da faixa ótima pré-determinada.

Tabela 4.7 – Solução Global.

Parâmetro	V	Va	Gás	d	Vs	A	Desejabilidade
Solução Global	36	13,2869	CO2	17,3598	40	-20	0,99471
Solução Global 1	36	13,3	CO2	17,4	40	-20	0,98471

Através de várias combinações destes parâmetros, pode-se observar que a mudança do gás de CO₂ para C25, altera consideravelmente a solução global. Utilizando a mesma faixa desejada pré-estabelecida para este resultado, variando somente o tipo de gás de proteção, verificou-se essa variação de respostas, **Tabela 4.8**.

Tabela 4.8 – Comparação da utilização de diferentes gases.

Gás	p	TD	η	IC	D
CO2	2,52	5,01	85,8	18,27	45,00
C25	1,97	5,10	89,2	14,56	40,78

Em função destes resultados simulados, tendo em vista o valor da penetração consideravelmente maior e o baixo custo do CO₂, a opção por este gás foi determinada como parâmetro fixo. Outro fator observado foi o ângulo de inclinação da tocha, que quando analisado individualmente, confirma a literatura (Fortes, 2004) que diz que o melhor ângulo de inclinação é na posição puxando, com uma inclinação de 20°, pois resulta numa maior penetração. Resultado este, simulado e confirmado, sendo que a penetração varia de 2,52mm para 3,11mm, tornando este resultado mais adequado, como se trata de chapas mais espessas. Na Tabela 4.7, observou-se que o ângulo indicado é -20° (solução ótima), porém sua mudança para positivo, mantendo-se todos os outros parâmetros fixos, melhora todas as respostas analisadas, exceto o índice de convexidade, sendo este ainda mantido dentro da faixa estabelecida, justificando então, a escolha pela inclinação positiva, **Tabela 4.9**.

Tabela 4.9 – Comparação da variação das inclinações positiva e negativa.

Respostas	p	TD	η	IC	D
Solução global	2,52	5,01	85,8	18,78	45,00
Inclinação positiva	3,11	5,22	94,9	26,83	45,36

Quando a distância bico de contato peça foi analisada, pode-se verificar uma maior influência desta quando comparada com a velocidade de soldagem, sendo esta última, o parâmetro que teve menor influência no processo. Por isso, na próxima fase, a velocidade de soldagem será considerada um parâmetro fixo, sendo este igual ao valor médio utilizado, ou seja, 50 cm/min, e a distância bico de contato peça permanece sendo um parâmetro variável.

Utilizando mais uma vez o “**Response Optimizer**” pode-se confirmar a ordem de

influência de todas as variáveis geradas pela análise estatística multivariada, o que dá mais credibilidade à ferramenta. Após fazer várias simulações dos conjuntos de parâmetros, observa-se que as respostas variam bastante, porém, em todos os casos, estas permaneceram na faixa desejável, o que foi um bom indício que a região trabalhada está próxima da região de ótimo.

A ordem original gerada pela análise estatística multivariada foi velocidade de alimentação do arame, tensão, gás de proteção ou ângulo de inclinação da tocha, distância bico de contato peça e com o menor nível de significância a velocidade de soldagem. Depois de todas as análises realizadas, pode-se concluir que na próxima fase, os parâmetros a serem analisados serão: tensão, velocidade de alimentação do arame e distância bico de contato peça.

É importante observar que toda a análise realizada para a seleção desses parâmetros foi baseada nos propósitos desse trabalho, porém, através da ferramenta estatística utilizada pode-se dar mais ênfase a uma ou outra resposta, ou ainda alterar as faixas desejadas para cada resposta, fazendo com que a ordem de significância de cada parâmetro seja alterada de acordo com os novos propósitos especificados.

4.2 – Experimento Principal – Fatorial Completo

Através do fatorial completo foi possível verificar se a região trabalhada estava próxima ou não da região de ótimo, ou seja, se a combinação que seria encontrada seria um ótimo global, ou somente um ótimo local. Para isso, foram realizados 2^3 experimentos, com uma replicagem, somados a cinco pontos centrais, que totalizam 21 ensaios. A matriz de experimentos com os respectivos resultados obtidos para as respostas estudadas são mostrados na **Tabela 4.10**.

Após o processamento dos dados, foram feitas as análises de significância dos fatores individuais e suas interações, bem como a dos pontos centrais. Essa análise foi baseada nos valores de P_{value} , através dos quais foi possível a verificação da proximidade ou não da região de ótimo. Estes valores estão relacionados na **Tabela 4.11**, onde os valores em negrito indicam os fatores ou interações significativas.

Tabela 4.10 – Resultados Obtidos – Fatorial Completo.

Matriz de Experimentos				Resultados obtidos				
OP	V	Va	d	p	TD	η	IC	D
1	29,0	10,0	15,0	1,85	3,61	83,8	32,65	32,50
2	36,0	10,0	15,0	1,98	3,45	78,9	20,00	40,56
3	29,0	14,0	15,0	2,38	5,09	84,9	58,02	27,58
4	36,0	14,0	15,0	2,85	5,20	84,2	20,00	44,08
5	29,0	10,0	20,0	1,60	3,78	83,7	31,87	34,25
6	36,0	10,0	20,0	1,98	3,62	80,0	24,30	37,16
7	29,0	14,0	20,0	1,92	5,38	85,7	54,02	20,54
8	36,0	14,0	20,0	2,90	4,32	84,9	20,45	44,92
9	29,0	10,0	15,0	1,92	3,62	82,2	31,85	38,72
10	36,0	10,0	15,0	1,88	3,53	79,9	23,36	46,65
11	29,0	14,0	15,0	2,42	5,19	87,3	53,57	31,45
12	36,0	14,0	15,0	2,90	5,36	87,9	27,97	46,17
13	29,0	10,0	20,0	1,50	3,69	81,3	29,83	37,26
14	36,0	10,0	20,0	1,90	3,68	83,9	26,73	46,71
15	29,0	14,0	20,0	1,90	5,42	86,6	49,41	30,77
16	36,0	14,0	20,0	2,80	4,72	86,1	27,05	42,34
17	32,5	12,0	17,5	2,20	4,55	85,5	27,27	41,53
18	32,5	12,0	17,5	2,20	4,25	84,8	26,17	42,19
19	32,5	12,0	17,5	2,30	4,37	86,1	29,00	42,65
20	32,5	12,0	17,5	2,17	4,43	86,5	26,79	41,89
21	32,5	12,00	17,50	2,30	4,43	85,8	25,22	42,08

Tabela 4.11 – Análise significância para as respostas analisadas.

Pvalue	p	TD	η	IC	D
V	0,000	0,001	0,157	0,000	0,000
Va	0,000	0,000	0,000	0,000	0,095
d	0,000	0,353	0,484	0,741	0,356
V*Va	0,000	0,038	0,326	0,000	0,019
V*d	0,000	0,001	0,480	0,129	0,940
Va*d	0,117	0,005	0,298	0,249	0,603
V*Va*d	0,307	0,001	0,304	0,807	0,570
PC	0,040	0,388	0,018	0,001	0,032

Observou-se na **Tabela 4.11** que os P_{value} dos pontos centrais (PC) para a penetração, rendimento, índice de convexidade e diluição (valores em negrito) são menores que 0,05, indicando que a região trabalhada foi a região de ótimo para essas respostas. No caso da taxa de deposição, o P_{value} apresentou um valor maior que 0,05 mostrando que para esta resposta, a região em questão, não foi a melhor, ou seja, não foi a região de ótimo. Porém, mesmo obtendo uma taxa de deposição fora da região de ótimo, este valor ainda foi satisfatório para

os propósitos do trabalho. Sendo assim, foi possível passar para a próxima fase, o modelamento e otimização dos experimentos, partindo do princípio que a região utilizada, foi a região de ótimo para praticamente todas as respostas. Este passo foi importante, pois a utilização da técnica de análise baseada na metodologia da superfície de resposta, só se justifica quando se tem a certeza de que a região de trabalho é a correspondente ao ótimo.

4.3 – Modelamento e Otimização

Como já foi dito no capítulo anterior, pode-se aproveitar os experimentos realizados no fatorial completo para complementar o experimento da superfície de resposta, facilitando assim a realização dos ensaios.

Na **Tabela 4.12**, são listados os parâmetros de controle do processo e seus respectivos níveis, para o modelamento da superfície de resposta, utilizando um planejamento 2^3 experimentos, somados a seis pontos estrelas e seis pontos centrais.

Tabela 4.12 - Parâmetros de controle do processo e seus níveis.

Parâmetro	Unidade	Níveis				
		-2	-1	0	+1	+2
V	V	26,6	29,0	32,5	36,0	38,4
Va	m/min	8,6	10,0	12,0	14,0	15,4
d	mm	13,3	15,0	17,5	20,0	21,7

A **Tabela 4.13**, mostra a matriz de experimentos e os resultados obtidos seguida da **Figura 4.5**, onde são expostos os perfis dos cordões, dos ensaios da superfície de resposta. Através desta figura pode-se ver o efeito das combinações dos parâmetros na geometria dos cordões.

De acordo com Houdcroft (1988), o cordão realizado com a distância bico de contato de 20mm, resulta numa penetração menor do que o realizado com 15mm, o que pôde ser observado no experimento, onde foram mantidos fixas a tensão e a velocidade de alimentação do arame, variando-se apenas essa distância. Vale ressaltar que as pequenas diferenças se devem aos erros experimentais, como se observa nos ensaios 2 e 6, por exemplo. Em geral, os resultados apresentaram um comportamento coerente com o esperado.

Tabela 4.13 – Matriz de experimentos e resultados obtidos.

Matriz de Experimentos				Resultados Obtidos				
OP	V	Va	d	p	TD	η	IC	D
1	29,0	10,0	15,0	1,89	3,62	82,49	32,10	38,76
2	36,0	10,0	15,0	1,93	3,49	79,47	21,68	44,26
3	29,0	14,0	15,0	2,40	5,14	86,83	55,49	30,26
4	36,0	14,0	15,0	2,88	5,28	86,03	26,10	45,13
5	29,0	10,0	20,0	1,55	3,74	82,82	29,58	35,51
6	36,0	10,0	20,0	1,94	3,65	81,99	25,52	43,23
7	29,0	14,0	20,0	1,91	5,40	86,12	50,57	26,95
8	36,0	14,0	20,0	2,85	4,52	85,58	24,70	43,67
9	26,6	12,0	17,5	1,90	4,63	86,21	50,00	26,88
10	38,4	12,0	17,5	2,40	4,59	84,10	23,80	42,11
11	32,5	8,6	17,5	1,60	3,11	82,00	32,94	35,22
12	32,5	15,4	17,5	3,40	6,06	89,12	44,21	44,37
13	32,5	12,0	13,3	2,80	4,88	85,37	25,05	41,66
14	32,5	12,0	21,7	1,90	4,65	86,42	23,75	35,05
15	32,5	12,0	17,5	1,90	4,55	86,05	27,27	42,43
16	32,5	12,0	17,5	2,28	4,25	83,51	24,91	42,19
17	32,5	12,0	17,5	2,30	4,37	84,82	26,85	42,65
18	32,5	12,0	17,5	2,15	4,18	86,49	26,79	39,80
19	32,5	12,0	17,5	2,30	4,22	85,79	25,06	44,30
20	32,5	12,0	17,5	2,35	4,50	86,08	27,15	45,10

Obtidos os resultados do experimento, o próximo passo foi o desenvolvimento dos modelos matemáticos para cada resposta. Para isso, considerou-se que as respostas podem ser expressas em função da tensão, velocidade de alimentação do arame e da distância bico de contato peça. Ou seja, $y = f(V, Va, d)$, onde a relação selecionada segue o modelo da equação descrita na **Tabela 3.5** do capítulo anterior, e no presente caso assume a forma da **equação 4.1**.

$$Y = b_0 + b_1 * V + b_2 * Va + b_3 * d + b_{11} * V^2 + b_{22} * Va^2 + b_{33} * d^2 + b_{12} * V * Va + b_{13} * V * d + b_{23} * Va * d \quad (4.1)$$

Através da análise de regressão, foram determinados, a partir dos resultados obtidos que constam na **Tabela 4.13**, os coeficientes do modelo através do software Minitab. Estes coeficientes estão listados na **Tabela 4.14**. Observa-se que foram colocados os valores completos de todos os coeficientes para obter valores mais precisos das respostas.

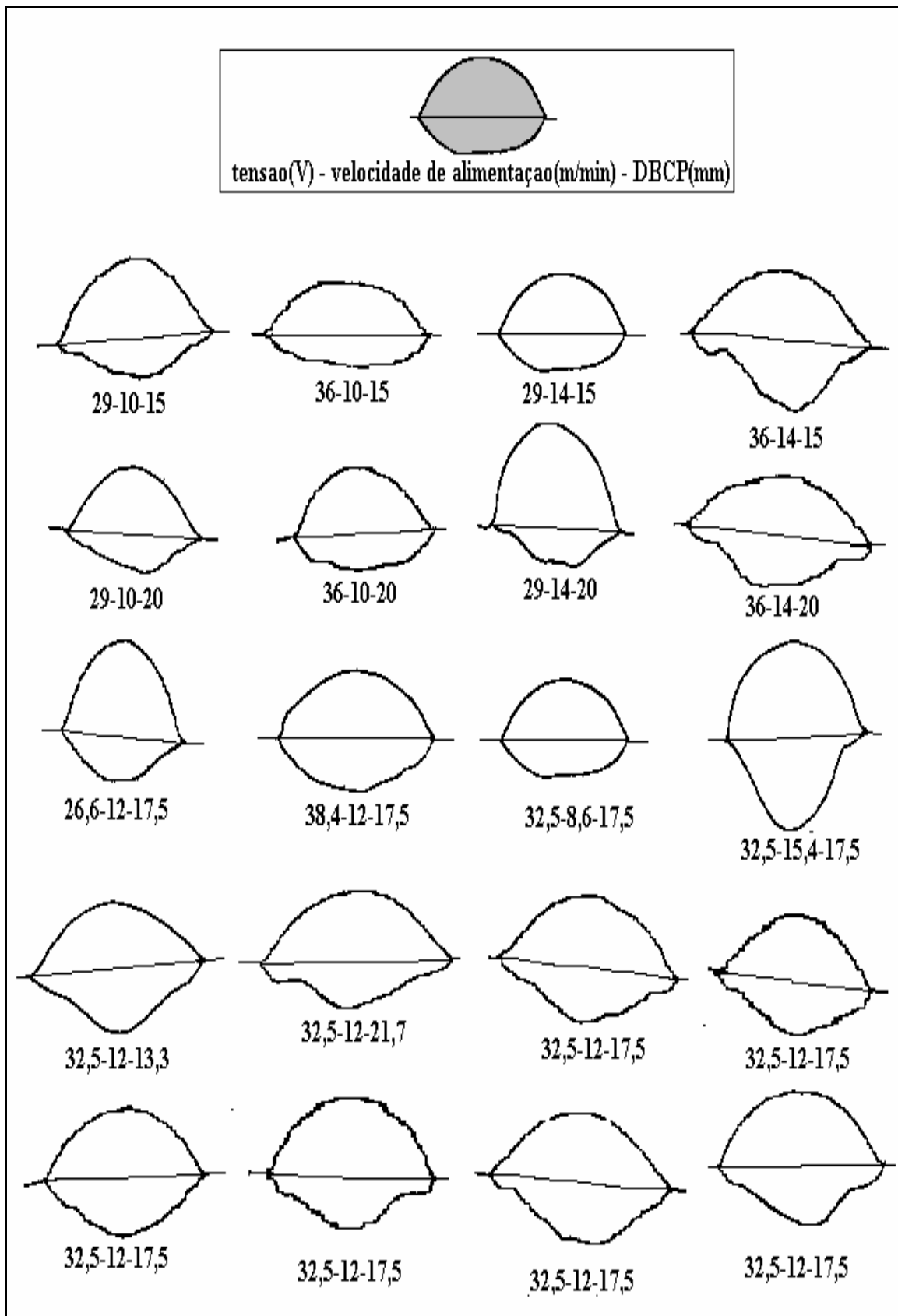


Figura 4.5 – Perfis dos cordões da superfície de resposta.

Tabela 4.14 – Coeficientes calculados através da análise de regressão.

Coeficiente	Parâmetro	p (mm)	TD(kg/h)	η (%)	IC	D(%)
b ₀	Livre	9,42554	-8,10561	33,9245	260,39	-156,616
b ₁	V	-0,0470957	0,19279	1,0526	-15,3706	10,61
b ₂	Va	-0,671156	0,930786	3,22602	4,13008	-5,7698
b ₃	d	-0,45579	0,214323	1,2195	1,91817	4,89528
b ₁₁	V ²	-0,00478848	0,00218688	-0,0367042	0,296282	-0,216778
b ₂₂	Va ²	0,0162712	0,0044876	-0,0766093	1,05541	-0,195426
b ₃₃	d ²	0,00192829	0,0130544	-0,0300795	-0,126394	-0,206531
b ₁₂	V*Va	0,0176786	-0,00928571	0,0448214	-0,728214	0,328036
b ₁₃	V*d	0,0115714	-0,014	0,035	0,141143	0,0581429
b ₂₃	Va*d	-0,00475	-0,0195	-0,10025	-0,191	-0,01225

Em função destes coeficientes, pode-se determinar os modelos matemáticos completos para cada resposta sendo os mesmos apresentados na **Tabela 4.15**.

Através da análise de variância (ANOVA), pode-se verificar a adequação do modelo a um nível de significância de 5%, caso os P_{value} da regressão sejam menores que 0,05, o modelo está adequado e não é necessário obter o modelo reduzido. Uma análise também realizada foi se houve ou não falta de ajuste ao modelo desenvolvido, para isto, foi observado o valor do “*Lack-of-fit*” (falta de ajuste). Nesta verificação, a análise de ajuste é contrária à análise dos P_{value}, ou seja, não há falta de ajuste para valores maiores que 0,05 ou ainda, não há evidência de que o modelo não explica a variação das respostas. Os ajustes e os P_{value} estão relacionados na **Tabela 4.16**, onde se observou que para o modelo em questão, não houve falta de ajuste para nenhuma das respostas analisadas e que para o modelo completo em questão, não há necessidade de buscar o modelo reduzido, ou seja, o modelo completo é suficientemente confiável.

Tabela 4.15 – Modelos matemáticos completos.

RESPOSTAS	MODELO MATEMÁTICO COMPLETO
Penetração	$9,42554 - 0,0470957*V - 0,671156*Va - 0,45579*d - 0,00478848*V^2 + 0,0162712*Va^2 + 0,00192829*d^2 + 0,0176786*V*Va + 0,0115714*V*d - 0,00475*Va*d$
Taxa de deposição	$-8,10561 + 0,19279*V + 0,930786*Va + 0,214323*d - 0,00218688*V^2 + 0,0044876*Va^2 + 0,0130544*d^2 - 0,00928571*V*Va - 0,014*V*d - 0,0195*Va*d$
Rendimento	$33,9245 + 1,0526*V + 3,22602*Va + 1,2195*d - 0,0367042*V^2 - 0,0766093*Va^2 - 0,0300795*d^2 + 0,0448214*V*Va + 0,035*V*d - 0,10025*Va*d$
Índice de convexidade	$260,39 - 15,3706*V + 4,13008*Va + 1,91817*d + 0,296282*V^2 + 1,05541*Va^2 - 0,126394*d^2 - 0,728214*V*Va + 0,141143*V*d - 0,191*Va*d$
Diluição	$-156,616 + 10,61*V - 5,7698*Va + 4,89528*d - 0,216778*V^2 - 0,195426*Va^2 - 0,206531*d^2 + 0,328036*V*Va + 0,0581429*V*d - 0,01225*Va*d$

Tabela 4.16 – Adequação do modelo matemático completo.

RESPOSTAS	Falta de ajuste	P _{value}	ADEQUAÇÃO
Penetração	0,185	0,001	Sim
Taxa de deposição	0,054	0,000	Sim
Rendimento	0,342	0,006	Sim
Índice de convexidade	0,052	0,000	Sim
Diluição	0,053	0,005	Sim

A probabilidade P_{value} define a significância dos coeficientes de cada modelo para cada resposta. Quanto menor o valor do P_{value}, maior a significância do coeficiente no modelo, como já foi visto anteriormente. Os valores em negrito mostrados na **Tabela 4.17** indicam os parâmetros significativos, lembrando que quando tem-se uma interação significativa, mesmo

o valor individual não sendo, este deve ser considerado significativo pelo princípio da hierarquia.

Tabela 4.17 – Significância dos coeficientes dos modelos completos.

Termo	Probabilidade de significância (Pvalue)				
	p	TD	η	IC	D
Livre	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
V	0,007	0,317	0,083	0,000	0,000
Va	0,000	0,000	0,000	0,000	0,976
d	0,014	0,548	0,464	0,315	0,117
V ²	0,328	0,708	0,195	0,000	0,010
Va ²	0,281	0,801	0,366	0,000	0,372
d ²	0,837	0,268	0,574	0,133	0,154
V*Va	0,137	0,502	0,487	0,000	0,068
V*d	0,216	0,218	0,497	0,086	0,660
Va*d	0,763	0,320	0,275	0,172	0,958

Na **Tabela 4.18**, tem-se os valores de R^2 , R^2 (ajustado) e os valores do desvio padrão esperados para cada modelo, gerados pela regressão, lembrando que o valor de R^2 expressa a parcela que pode ser explicada do modelo.

Tabela 4.18 – Valores de R^2 , R^2 (ajustado) e erro padrão para modelos completos.

RESPOSTAS	R^2 - %	R^2 (ajustado) - %	Erro Padrão
Penetração(mm)	88,7	78,6	0,2167
Taxa de deposição(kg/h)	92,8	86,3	0,2638
Rendimento(%)	84,0	69,5	1,2280
Índice de convexidade	98,3	96,8	1,8360
Diluição(%)	84,7	70,8	3,1770

Apesar do modelo completo ser suficientemente confiável, com a finalidade de refiná-lo um pouco mais, foi realizada uma análise dos valores de P_{value} , **Tabela 4.17**, e eliminação dos coeficientes com menor significância, construindo assim um modelo mais conciso. A **Tabela 4.19** mostra os novos coeficientes para os modelos matemáticos reduzidos, determinados através do software Minitab.

Tabela 4.19 – Coeficientes calculados para os modelos reduzidos.

Coeficiente	Parâmetro	p (mm)	TD(kg/h)	η (%)	IC(%)	D(%)
b ₀	Livre	5,97864	-3,50999	20,2641	260,39	-81,1227
b ₁	V	-0,155847	0,223509	1,96598	-15,3706	10,6342
b ₂	Va	-0,363772	0,395453	2,8441	4,13008	-10,6744
b ₃	d	-0,0692286	0,002953	1,30422	1,91817	-0,59066
b ₁₁	V ²	*	*	-0,03305	0,296282	-0,201497
b ₂₂	Va ²	*	*	*	1,05541	*
b ₃₃	d ²	*	0,01241	*	-0,126394	*
b ₁₂	V*Va	0,0176786	*	*	-0,728214	0,328036
b ₁₃	V*d	*	-0,014	*	0,141143	*
b ₂₃	Va*d	*	*	-0,10025	-0,191	*

Observação: * coeficiente eliminado

Os modelos matemáticos reduzidos construídos a partir dos novos coeficientes gerados, são apresentados na **Tabela 4.20**, onde pode-se observar modelos mais simples, construídos através dos coeficientes mais significativos para cada resposta.

Tabela 4.20 – Modelos matemáticos reduzidos em suas formas finais.

RESPOSTAS	MODELOS MATEMÁTICOS REDUZIDOS
Penetração	$5,97864 - 0,155847*V - 0,363772*Va - 0,0692286*d + 0,0176786*V*Va$
Taxa deposição	$-3,50999 + 0,223509*V + 0,395453*Va + 0,002953*d + 0,01241*d^2 - 0,014*V*d$
Rendimento	$20,2641 + 1,96598*V + 2,8441*Va + 1,30422*d - 0,03305*V^2 - 0,10025*Va*d$
Diluição	$-81,1227 + 10,6342*V - 10,6744*Va - 0,59066*d - 0,201497*V^2 + 0,328036*V*Va$

Os novos valores dos ajustes e dos P_{value} estão relacionados na **Tabela 4.21**, onde observou-se que para o modelo reduzido, o valor do “*Lack of fit*” (falta de ajuste) aumentou,

tornando este modelo ainda mais ajustado. Observou-se também que para todas as respostas, os modelos permaneceram adequados, tendo os valores de P_{value} ainda diminuídos.

Tabela 4.21 – Adequação dos modelos matemáticos reduzidos.

PARÂMETRO	Falta de ajuste	P_{value}	ADEQUAÇÃO
Penetração	0,245	0,000	Sim
Taxa de deposição	0,102	0,000	Sim
Rendimento	0,479	0,000	Sim
Índice de convexidade	0,052	0,000	Sim
Diluição	0,078	0,000	Sim

Além do melhor ajuste para o modelo reduzido, os valores de R^2 (ajustado) sofreram aumento e os valores para o erro padrão foram diminuídos, aumentando assim a confiabilidade do modelamento. A **Tabela 4.22** apresenta uma comparação entre os valores de R^2 , R^2 (ajustado) e erro padrão para os modelos matemáticos completos e reduzidos, evidenciando essa variação. Pode-se observar também, que para o índice de convexidade, o modelo completo foi conservado, pois a eliminação de quaisquer de seus coeficientes, causou uma diminuição do R^2 , ou seja, diminuiu a confiabilidade do modelo.

Tabela 4.22 – Valores de R^2 , R^2 (adj) e erro padrão para os modelos completo e reduzido.

RESPOSTA	R^2		R^2 (ajustado)		Erro Padrão	
	Completo	Reduzido	Completo	Reduzido	Completo	Reduzido
Penetração	88,7	83,7	78,6	79,3	0,217	0,213
Taxa de deposição	92,8	91,5	86,3	88,5	0,264	0,242
Rendimento	84	80,5	69,5	73,5	1,228	1,145
Diluição	84,7	79,7	70,8	72,5	3,177	3,085

Através da determinação dos modelos reduzidos para cada resposta, partiu-se para a análise dos parâmetros significativos, como também de suas interações.

4.3.1 – Efeitos dos parâmetros de entrada

Para a análise dos efeitos individuais, utilizou-se os modelos matemáticos reduzido, exceto para o índice de convexidade, e a representação gráfica dos parâmetros a serem estudados nos limites -2, -1, 0, +1 e +2, mantendo-se constante os pontos centrais nos demais parâmetros.

4.3.1.1 – Efeitos dos parâmetros na penetração

Para a penetração, o modelo reduzido proposto é:

$$p = 5,97864 - 0,155847*V - 0,363772*Va - 0,0692286*d + 0,0176786*V*Va \quad (4.2)$$

Através do modelo reduzido, **equação (4.2)**, verificou-se que a velocidade de alimentação do arame (V_a), a tensão (V) e a distância bico de contato peça (d), influenciam na penetração, sendo que o primeiro é o mais influente. A interação $V*V_a$ influencia de forma significativa na resposta penetração da solda.

Na **Figura 4.6** tem-se a influência da tensão, velocidade de alimentação do arame e da distância bico de contato peça na penetração da solda.

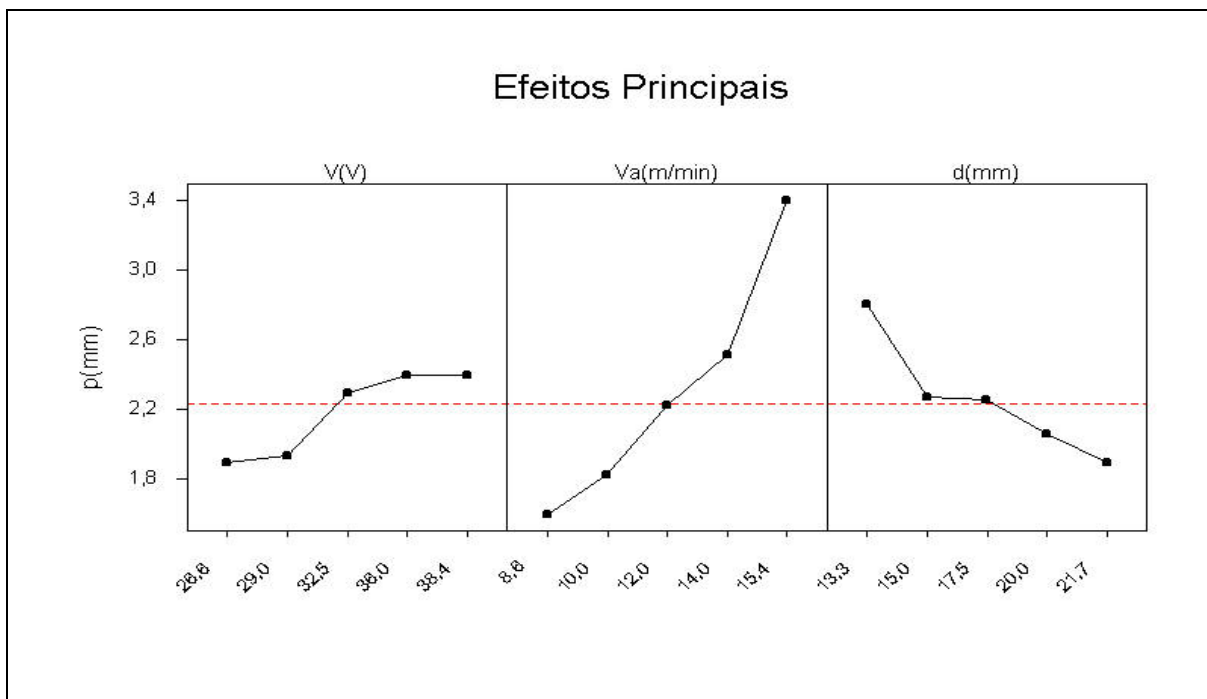
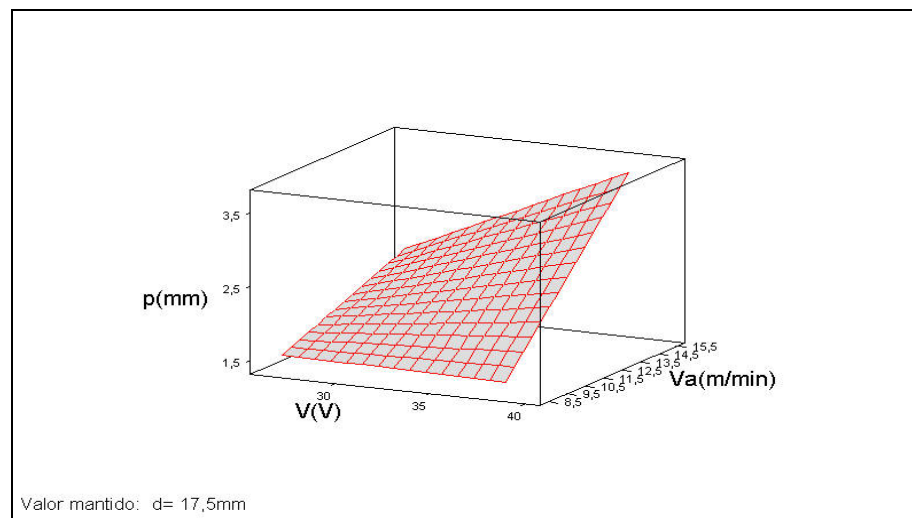


Figura 4.6 – Efeitos dos parâmetros principais na penetração.

Observa-se na **Figura 4.6** que, o aumento da tensão até 32,5V causa um aumento da penetração um pouco mais significativo do que para valores acima deste, onde a penetração permanece relativamente constante. É importante lembrar que valores excessivamente altos de tensão podem causar defeitos superficiais no cordão. O aumento da velocidade de alimentação do arame causa um aumento na penetração, resultado inverso ao da distância bico de contato peça. Esses gráficos confirmam a maior significância da velocidade de alimentação na penetração da solda.

O objetivo deste trabalho é maximizar a penetração visto que a chapa de trabalho é uma chapa de média espessura. Para isso, de acordo com os efeitos individuais dos parâmetros, a combinação ideal para se obter a penetração máxima estabelecida, foi o valor da tensão em níveis próximos a 32V, associado a uma velocidade de alimentação do arame no máximo e o valor da distância bico de contato peça no mínimo.

Na **Figura 4.7**, pode se observado a superfície de resposta da interação da velocidade de alimentação com a tensão, utilizando para a distância bico de contato peça, o valor médio igual a 17,5 mm.



4.7 – Superfície de resposta V*Va para a penetração.

Considerando a interação significativa da tensão com a velocidade de alimentação do arame, **Figura 4.8**, observou-se que uma máxima tensão associada a uma máxima velocidade de alimentação do arame, maximiza a penetração, porém aumenta o risco de defeitos superficiais devido ao valor excessivo da tensão. Por outro lado, a utilização de uma baixa velocidade de alimentação do arame, diminui consideravelmente a penetração, que não é o objetivo. Portanto, a melhor solução encontrada foi a utilização de uma tensão média

associada a uma alta alimentação do arame.

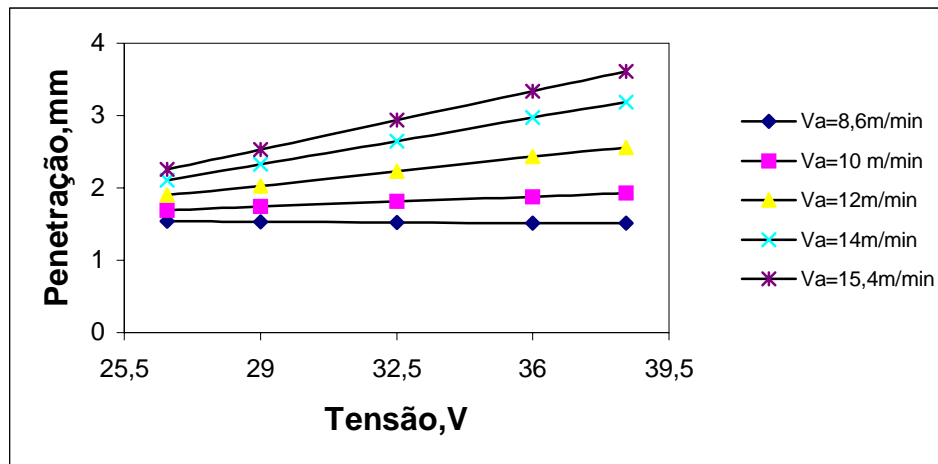


Figura 4.8 – Efeito da interação V*Va na penetração, d=17,5 mm.

Considerando todos os aspectos citados, a combinação de parâmetros mais indicada, que maximiza a penetração é a combinação de uma tensão média, associada à velocidade alimentação máxima e distância bico de contato peça média.

4.3.1.2 – Efeitos dos parâmetros na taxa de deposição

Para a taxa de deposição, o modelo reduzido proposto é:

$$TD = -3,50999 + 0,223509*V + 0,395453*Va + 0,002953*d + 0,01241*d^2 - 0,014*V*d \quad (4.3)$$

Através do modelo proposto, **equação (4.3)**, pode-se verificar que a velocidade de alimentação do arame (Va), a tensão (V) e a distância bico de contato peça (d) influenciam na taxa de deposição, sendo o primeiro com maior intensidade.

Pode-se observar na **Figura 4.9**, os efeitos dos parâmetros de entrada na taxa de deposição. Observou-se que, a velocidade de alimentação do arame é claramente, o parâmetro mais influente nesta resposta. Quando se tem um aumento deste parâmetro, a taxa de deposição tem um acréscimo significativo. O aumento da tensão não causa uma variação muito significativa na taxa de deposição. No caso de se aumentar a distância bico de contato peça, tem-se um decréscimo da taxa de deposição até um valor de 17,5mm, e a partir desse valor essa resposta começa a aumentar. Esse decréscimo verificado na taxa de deposição com

o aumento da distância bico de contato peça até 17,5 mm, contrário ao esperado, pode ser justificado, devido às incertezas das medições, visto que a variação dessa resposta não é muito grande.

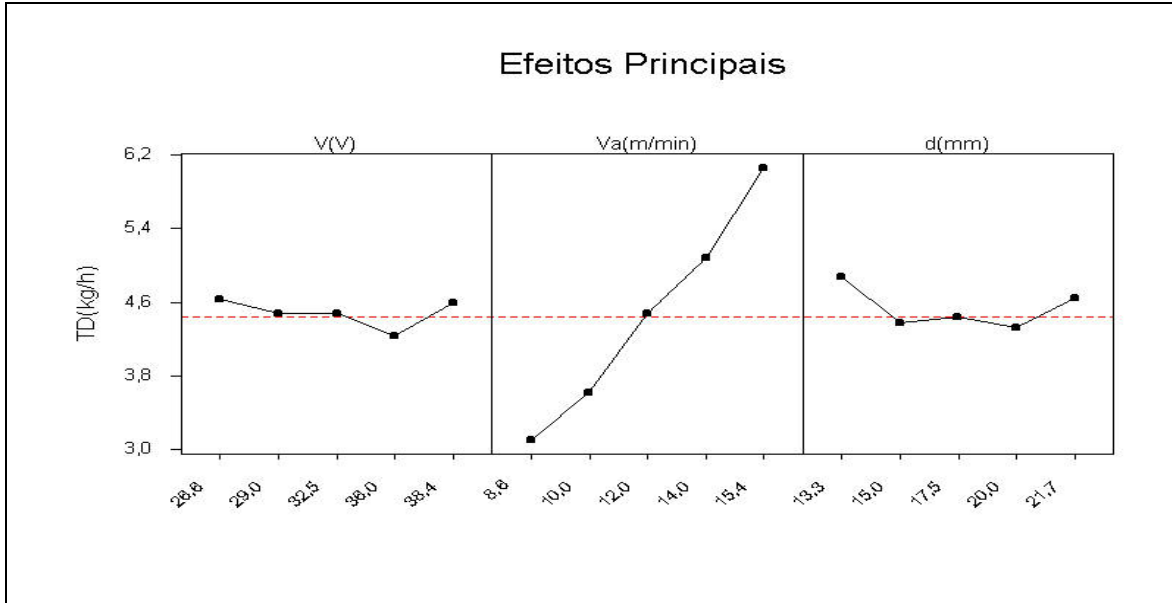


Figura 4.9 – Efeitos dos parâmetros principais na taxa de deposição.

Considerando a superfície de resposta para $V*d$, **Figura 4.10**, observou-se que para obter uma taxa de deposição máxima, deve-se combinar valores de tensão máximos associados a valores mínimos de distância bico de contato peça, ou uma combinação contrária a esta, ou seja, mínima tensão associada a máxima distância bico de contato peça. A segunda combinação proposta é mais indicada devido aos riscos de defeitos causados pela alta tensão proposta na primeira.

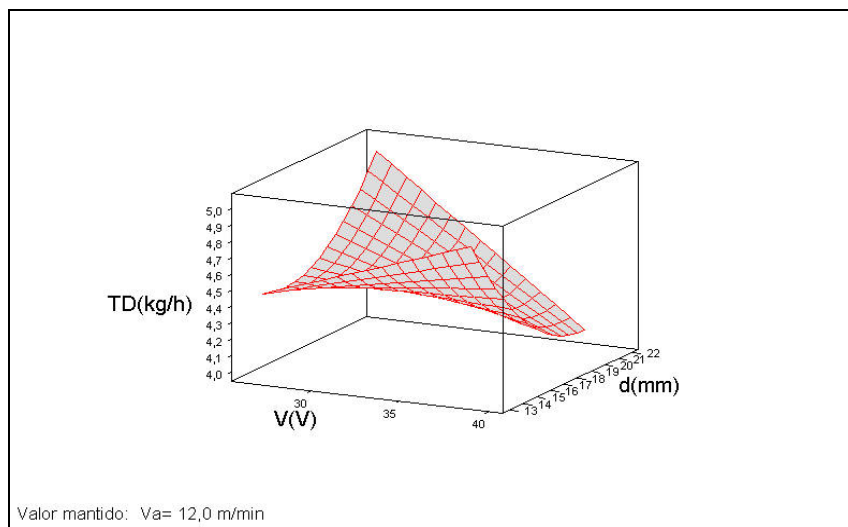


Figura 4.10 – Superfície de resposta $V*d$ para a taxa de deposição.

Considerando a interação significativa da tensão com a distância bico de contato peça, **Figura 4.11**, pode-se confirmar as observações feitas para a figura anterior. Por outro lado, observou-se que a utilização de uma tensão média associada a uma baixa distância bico de contato produz uma taxa de deposição significativa, dentro de uma faixa considerada desejada para este processo.

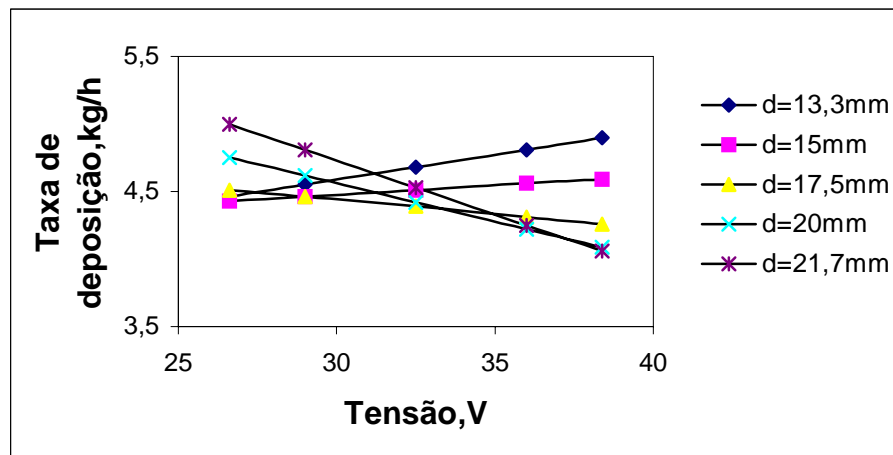


Figura 4.11 – Efeito da interação V*d na taxa de deposição, Va=12m/min.

Considerando todos os aspectos citados, a combinação de parâmetros mais indicada, que maximiza a taxa de deposição é a combinação de uma tensão média, associada à distância bico de contato peça mínima e velocidade de alimentação do arame média.

4.3.1.3 – Efeitos dos parâmetros no rendimento

Para o rendimento, o modelo reduzido proposto é:

$$\eta = 20,2641 + 1,96598*V + 2,8441*Va + 1,30422*d - 0,03305*V^2 - 0,10025*Va*d \quad (4.4)$$

De acordo com o modelo, **equação (4.4)**, os parâmetros tensão, velocidade de alimentação do arame e distância bico de contato peça influenciam no rendimento, sendo o segundo parâmetro o mais influente, comportamento similar ao da taxa de deposição.

Analisando os efeitos individuais dos parâmetros, **Figura 4.12**, observou-se que o aumento da tensão causa uma diminuição não muito significativa no rendimento, fato este esperado pelo comprimento do arco. Com o aumento da velocidade de alimentação do arame

e da distância bico de contato peça o rendimento também aumenta, sendo esse aumento mais expressivo quando aumentamos a velocidade de alimentação do arame.

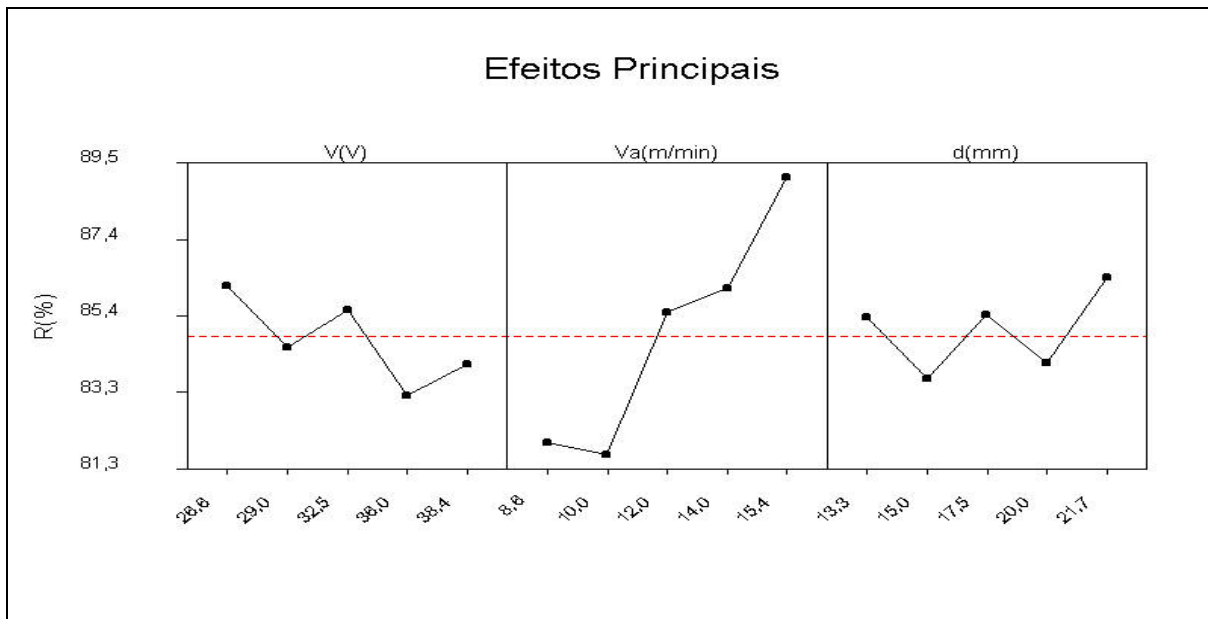


Figura 4.12 – Efeitos dos parâmetros principais no rendimento.

Considerando a superfície de resposta da interação significativa $Va*d$, **Figura 4.13**, observou-se que para velocidade de alimentação máxima associada a uma distância do bico de contato mínima, maximiza o rendimento.

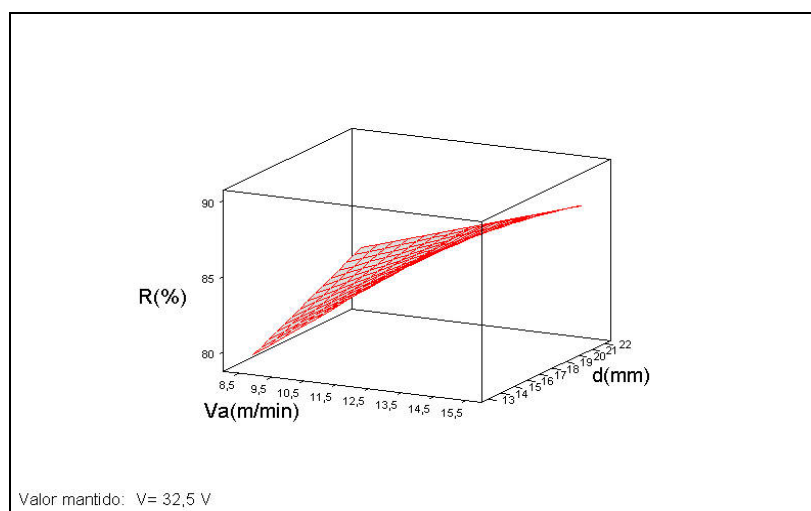


Figura 4.13 – Superfície de resposta $Va*d$ para o rendimento.

Na **Figura 4.14**, essa combinação pode ser observada mais claramente. Através dessa figura observa-se também que uma máxima velocidade de alimentação associada à uma

distância bico de contato máxima ou mínima, alcança valores próximos ao máximo para o rendimento, sendo que uma distância maior para o bico de contato peça é mais interessante do ponto de vista operacional.

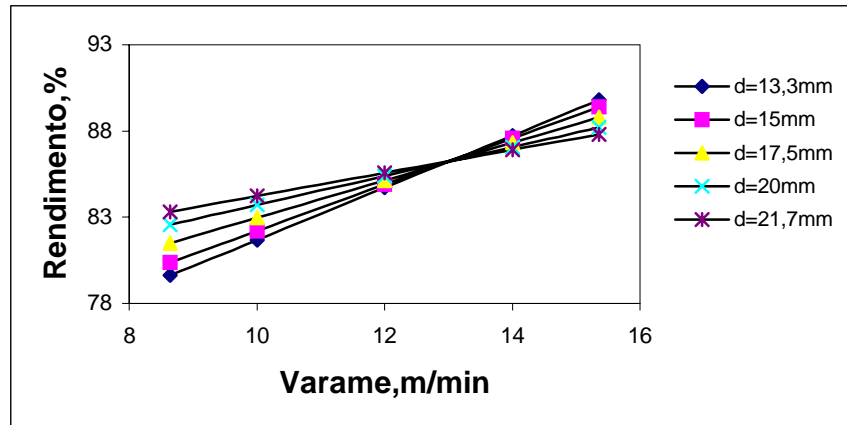


Figura 4.14 – Efeito da interação $Va*d$ no rendimento, $V=32,5$ V.

Considerando todos os aspectos citados anteriormente, a combinação mais indicada de parâmetros, que maximiza o rendimento é a combinação de uma tensão média, associada à distância bico de contato peça máxima e velocidade de alimentação do arame máxima.

4.3.1.4 – Efeitos dos parâmetros no índice de convexidade

Para o índice de convexidade, o modelo completo proposto é:

$$IC = 260,39 - 15,3706*V + 4,13008*Va + 1,91817*d + 0,296282*V^2 + 1,05541*Va^2 - 0,126394*d^2 - 0,728214*V*Va + 0,141143*V*d - 0,191*Va*d \quad (4.5)$$

Através do modelo, **equação (4.5)**, observou-se que os parâmetros individuais que mais influenciam no índice de convexidade são a tensão e a velocidade de alimentação do arame. Os termos quadráticos da tensão e da velocidade de alimentação do arame e da interação destes dois parâmetros também exercem uma influência significativa nesta resposta.

Os efeitos dos parâmetros individuais, **Figura 4.15** mostraram que aumentando o valor da tensão, temos uma diminuição do índice de convexidade, devido a um maior espalhamento do arco. Já para a velocidade de alimentação do arame tem-se o inverso, um aumento no índice de convexidade é causado com o aumento deste parâmetro, a partir de 10 m/min, resultado este esperado em função da maior concentração do arco.

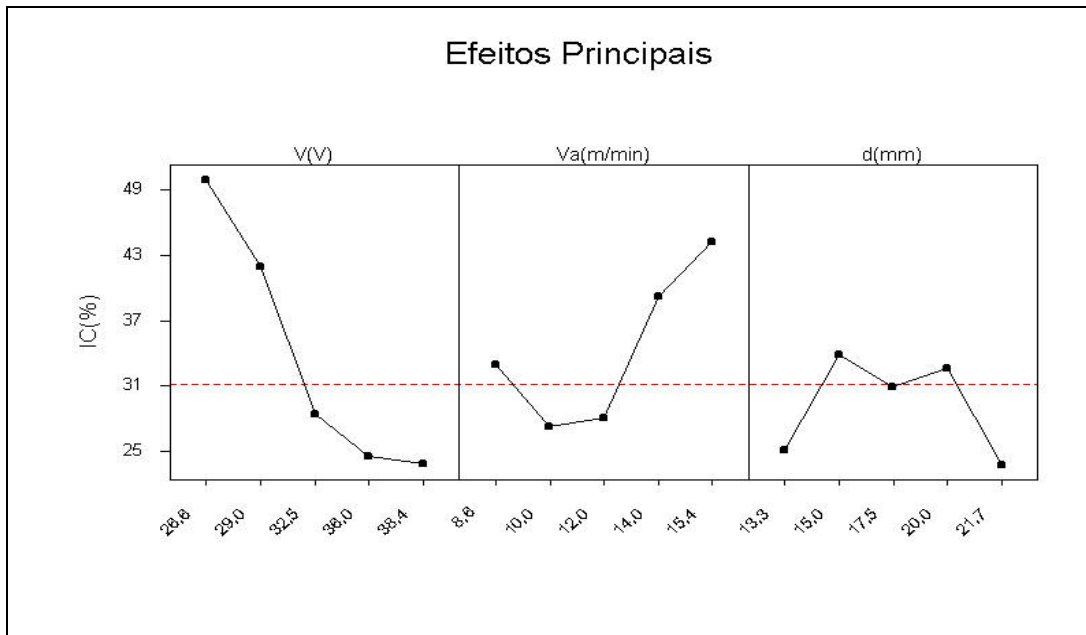


Figura 4.15 – Efeitos principais dos parâmetros no índice de convexidade.

Nas **Figuras 4.16, 4.17 e 4.18**, podem-se observar os resultados das interações $V*Va$, $V*d$ e $Va*d$ respectivamente. Na análise da interação $V*Va$, observou-se que houve um decréscimo no índice de convexidade para velocidades de alimentação do arame, iguais e superiores a 12m/min, com o aumento a tensão. Todavia, para as velocidades de 10 e 8,36m/min, ao passar pelo ponto central o resultado se inverteu, porém com pouca intensidade. Já para a interação, $V*d$, obteve-se o menor valor para o índice de convexidade, com uma combinação de máxima tensão e mínima distância bico de contato peça. Porém é importante observar que a variação nesta resposta para valores máximos e mínimos da distância bico de contato peça, é relativamente pequena. No caso da interação $Va*d$, uma associação de média velocidade de alimentação e máxima distância do bico de contato, minimiza a resposta analisada.

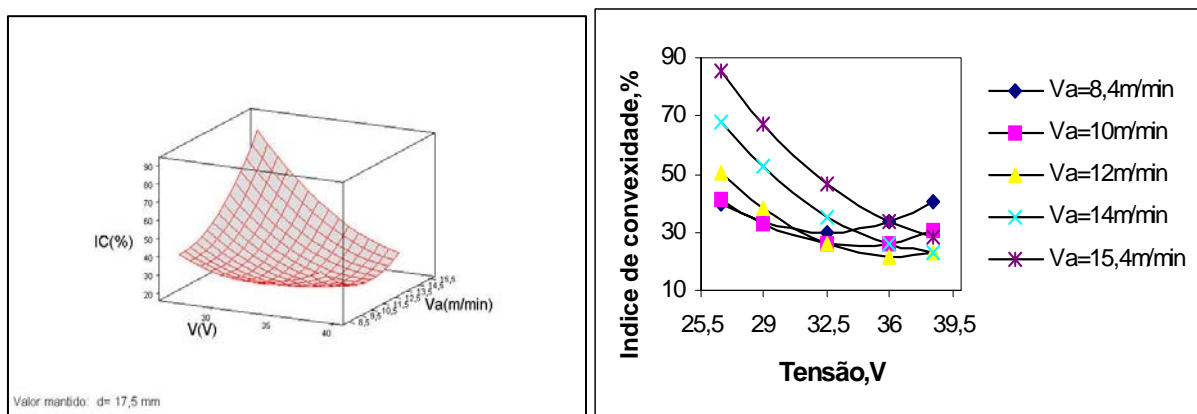


Figura 4.16 – Efeito da interação $V*Va$ no índice de convexidade, $d=17,5$ mm.

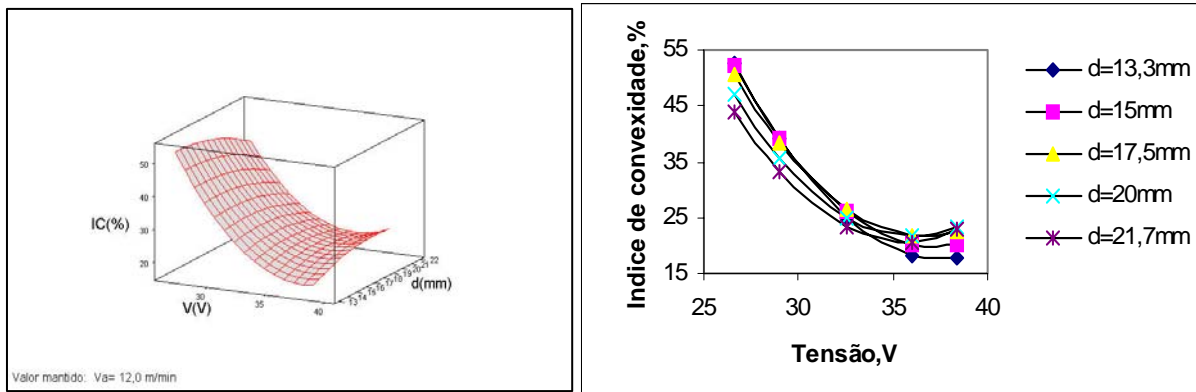


Figura 4.17 – Efeito da interação V*d no índice de convexidade, $V_a=12\text{m/min}$.

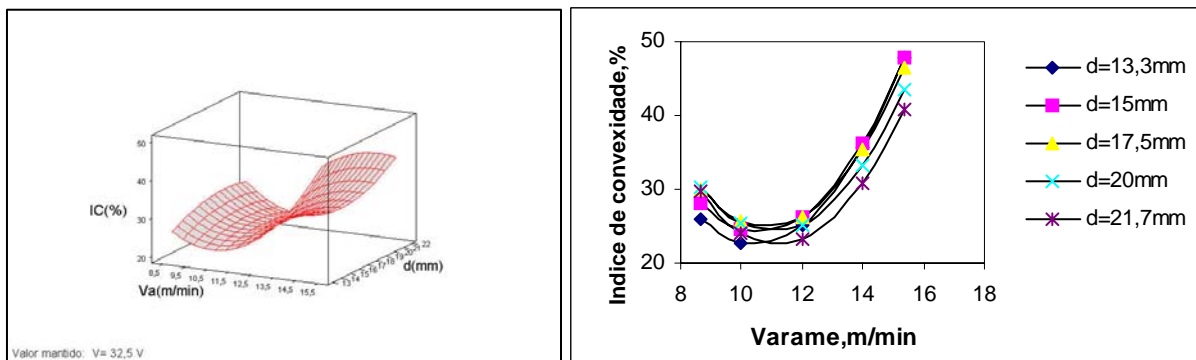


Figura 4.18 - Efeito da interação V_a*d no índice de convexidade, $V=32\text{ V}$.

Portanto, de acordo com as considerações anteriores, para se obter um índice de convexidade mínimo, a combinação mais adequada de parâmetros encontrada foi uma associação de uma média tensão, velocidade de alimentação mínima e máxima distância bico de contato peça.

4.3.1.5 – Efeitos dos parâmetros na diluição

Para a diluição, o modelo reduzido proposto é:

$$D = -81,1227 + 10,6342*V - 10,6744*V_a - 0,59066*d - 0,201497*V^2 + 0,328036*V*V_a \quad (4.6)$$

Pelo modelo, **equação (4.6)**, pode-se identificar que os parâmetros tensão e velocidade de alimentação foram os mais influentes na diluição. O termo quadrático da tensão e a interação da tensão com a velocidade de alimentação do arame têm sua parcela de influência, porém não muito significativa.

De acordo com os efeitos individuais, **Figura 4.19**, pode-se observar que o aumento da tensão causa um aumento da diluição. O mesmo acontece com a velocidade de alimentação do arame, exceto para 14m/min, porém com uma tendência clara de aumento. No caso da distância bico de contato peça, observou-se uma tendência de queda da diluição com o aumento deste parâmetro.

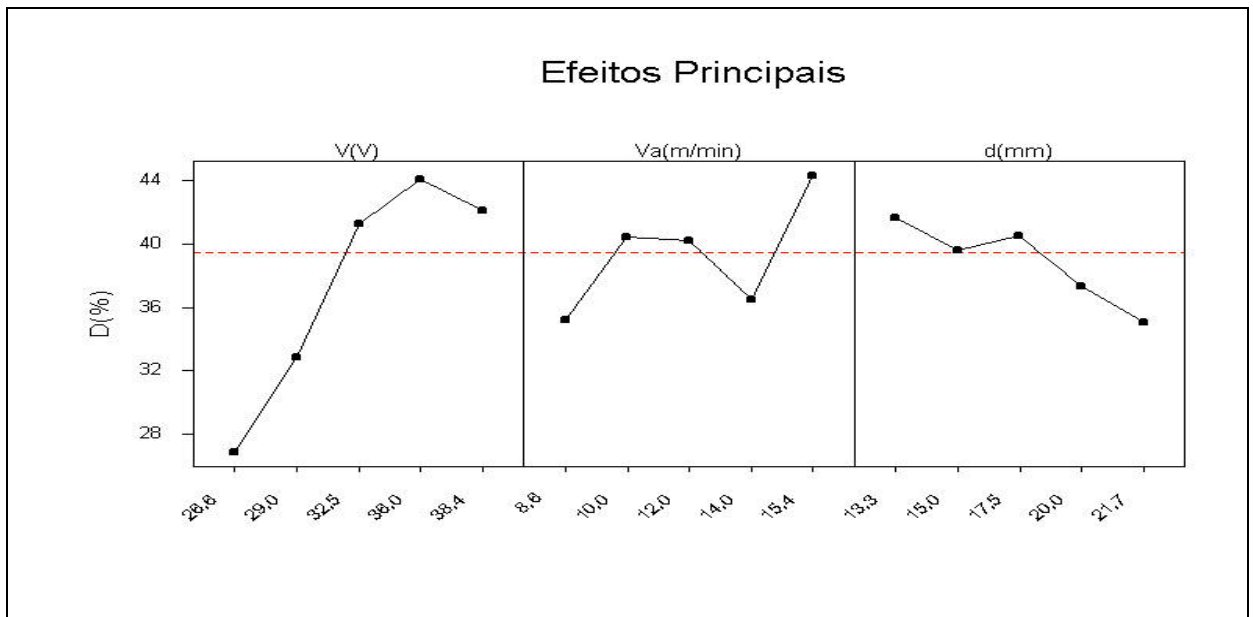


Figura 4.19 – Efeitos principais dos parâmetros na diluição.

Estes resultados também podem ser observados na superfície de resposta da interação $V \cdot Va$, **Figura 4.20**, onde uma diluição máxima é alcançada para a combinação de uma velocidade de alimentação máxima com uma tensão próxima do valor máximo.

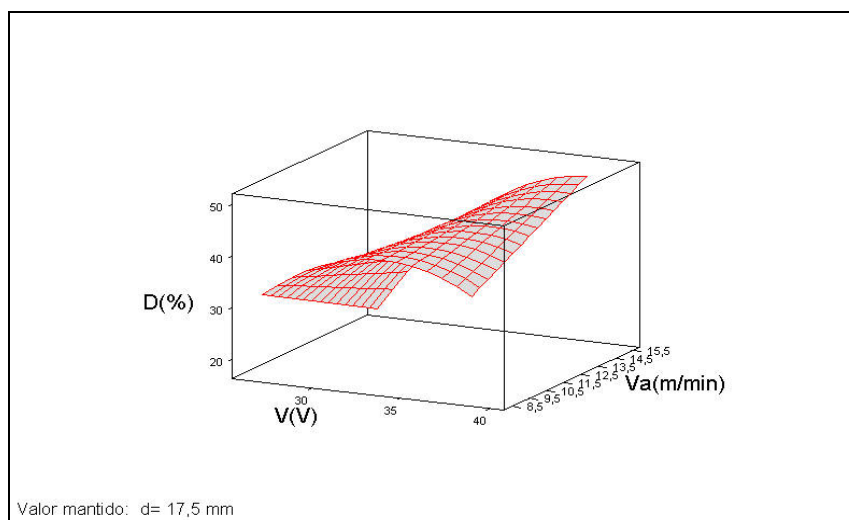


Figura 4.20 – Superfície de resposta $Va \cdot V$ para a diluição.

Para um melhor esclarecimento dessa a interação, a **Figura 4.21** foi analisada. Nesta, pode ser observado que para uma diluição máxima ser alcançada é necessária a combinação de velocidade de alimentação e tensão nos valores máximos. Nota-se também que após o ponto central da tensão, 32,5 V, o comportamento da curva se inverte para valores de 8,6m/min, 10m/min e 12m/min.

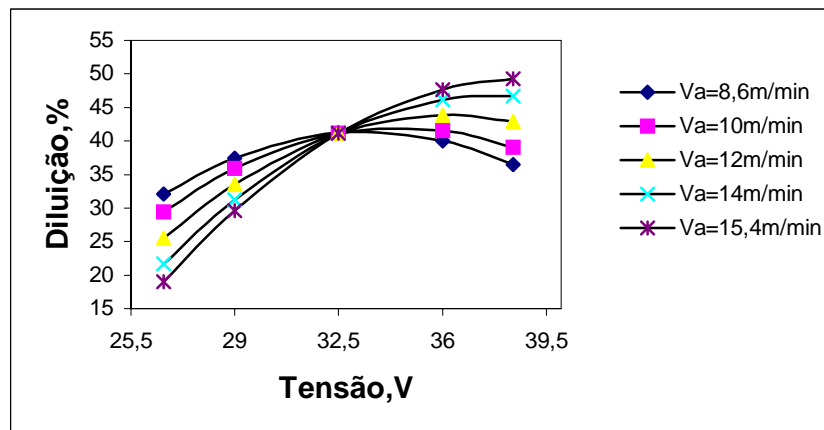


Figura 4.21 – Efeitos da interação V*Va na diluição, d=17,5mm.

Através das análises deste item, pode-se observar que, em geral, a combinação de parâmetros mais indicada para maximizar a diluição foi para valores de tensão de aproximadamente 32,5V, associada a uma velocidade de alimentação e distância bico de contato peça tendendo a valores máximos.

4.3.2 – Otimização geral do processo

Como pode ser visto no item 4.3.1, tem-se uma combinação de condições operacionais adequada para cada resposta estudada, de acordo com a faixa especificada. Quando o interesse for somente uma resposta, a análise realizada no item anterior pode ser suficiente quando um pouco mais aprofundada. Porém, quando o interesse for otimizar uma resposta sem o prejuízo de outra, a combinação de parâmetros estudada para uma resposta isolada não é o bastante para otimizar o processo, visto que a combinação mais indicada para uma resposta não foi a mesma para todas.

O objetivo desse trabalho foi encontrar, além de das condições individuais, condições operacionais adequadas para um conjunto de respostas, ou seja, buscar a melhor condição que atenda a todas as respostas analisadas simultaneamente. Para isso foi utilizada novamente a ferramenta “Response optimizer” do software Minitab. Para gerar a combinação ótima dos

parâmetros analisados, estabeleceu-se primeiramente uma faixa desejada para cada resposta, ou seja, uma faixa onde o resultado estava de acordo com critérios pré-estabelecidos, **Tabela 4.23**, conforme a necessidade. Ou seja, o “Response Optimizer” forneceu a melhor combinação de parâmetros que aproximou do valor máximo as respostas que se queria maximizar (penetração, taxa de deposição, rendimento e diluição) e aproximou do valor mínimo a resposta que se queria minimizar (índice de convexidade). As faixas das respostas pré-estabelecidas utilizadas para esta etapa, estão dispostas na **Tabela 4.23**, onde foram considerados pesos iguais para todas as respostas e como ordem de importância, foi considerado 7 para a penetração, 4 para a taxa de deposição, 3 para o rendimento, 2 para o índice de convexidade e finalmente, 5 para a diluição.

Tabela 4.23 – Faixas de respostas pré-estabelecidas.

Respostas	Faixas utilizadas	
	Mínimo	Máximo
Penetração(mm)	1,9	3,5
Taxa de deposição(kg/h)	3,8	5,5
Rendimento(%)	80	90
Índice de convexidade(%)	22	30
Diluição(%)	35	45

Através das respostas obtidas no experimento e das faixas desejadas dessas respostas, foi encontrada a melhor combinação de parâmetros que satisfaz a todas as condições de maximização e minimização, simultaneamente. Essa combinação pode ser verificada na **Tabela 4.24**, onde a Solução Global 1, representa o conjunto de parâmetros em sua forma exequível conforme precisão dos equipamentos.

Tabela 4.24 – Solução global final.

Resultado	Desejabilidade	V(V)	Va(m/min)	d(mm)
Solução Global	0,93532	37,9	14,3145	13,2955
Solução Global 1	0,93484	37,9	14,3	13,3

Essa combinação de parâmetros forneceu um conjunto de respostas otimizado, apresentado na **Tabela 4.25**.

Tabela 4.25 – Resultado final da combinação ótima de parâmetros.

Respostas	p	TD	η	IC	D
Resultados	3,53	5,79	86,24	21,61	49,77

Uma combinação ótima de parâmetros é um dado interessante, porém com aplicação limitada. A solução encontrada para expandir os resultados alcançados, foi a utilização da ferramenta “Overlaid Contour Plot”. Através desse recurso, foi possível verificar linhas de contorno para cada resposta, baseadas nos valores de mínimos e máximos estabelecidos, vistos na **Tabela 4.23**. Com a intersecção das linhas de contornos de todas as respostas, foi construída uma região em função de dois parâmetros sendo fixado um terceiro. Essa ferramenta oferece flexibilidade para mudanças das variáveis analisadas, como também, a possibilidade de variar as faixas estabelecidas para todas as respostas, dando a oportunidade de uma exploração mais profunda dos resultados obtidos.

A utilização dessa região é de grande utilidade do ponto de vista operacional, pois oferece a oportunidade de se fazer várias combinações de parâmetros, mantendo as respostas dentro das faixas estabelecidas previamente. Ou seja, todas as combinações de parâmetros que pertencem a essa região, resultam em respostas compatíveis com as desejadas. Essa região pode ser utilizada de acordo com vários interesses específicos, sejam eles geométricos, produtivos, econômicos e etc.

Nas **Figuras 4.22 e 4.23**, tem-se as regiões individuais de cada resposta, representadas pelas linhas contínuas (mínimo) e tracejadas (máximo), sendo a região branca, a intersecção de todas essas regiões, para valores fixos de 13,4mm e 20mm da distância bico de contato peça, respectivamente. Os pontos representados pela união das retas, indicados nas figuras, indicam as combinações de parâmetros cuja confirmação foi realizada no item seguinte.

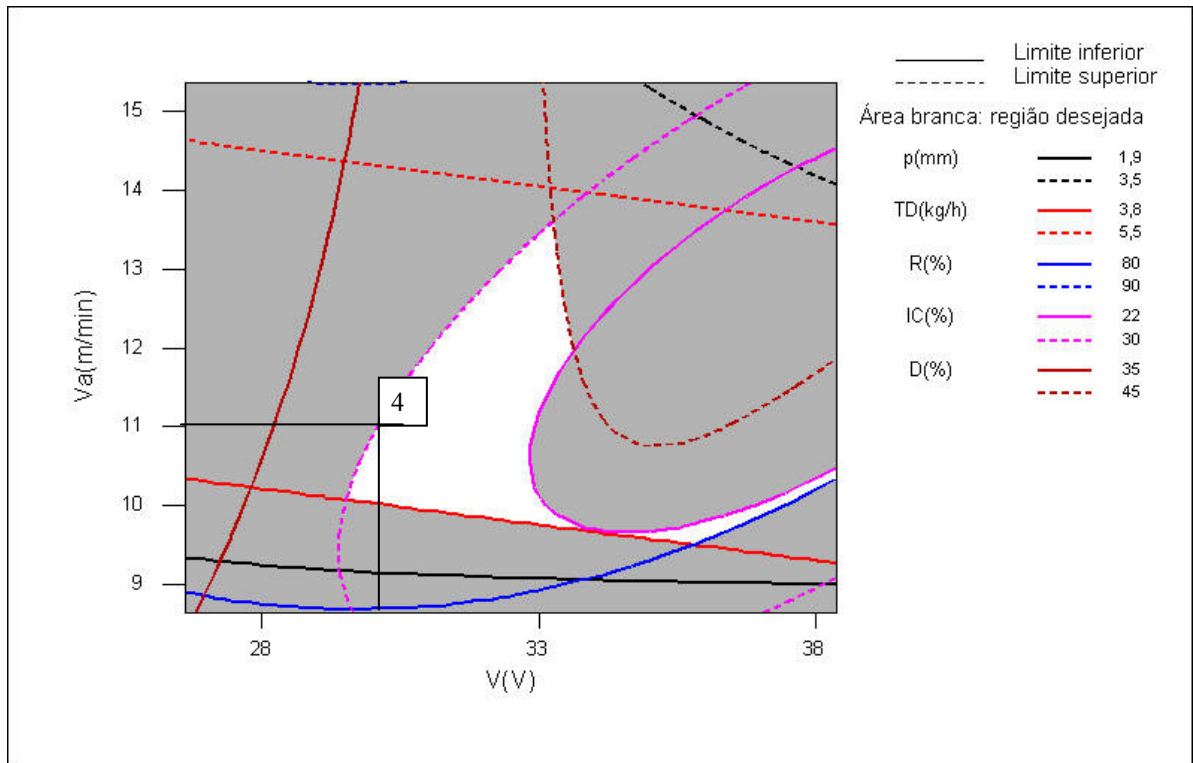


Figura 4.22 – Linhas de contorno das respostas combinadas, d=13,4mm.

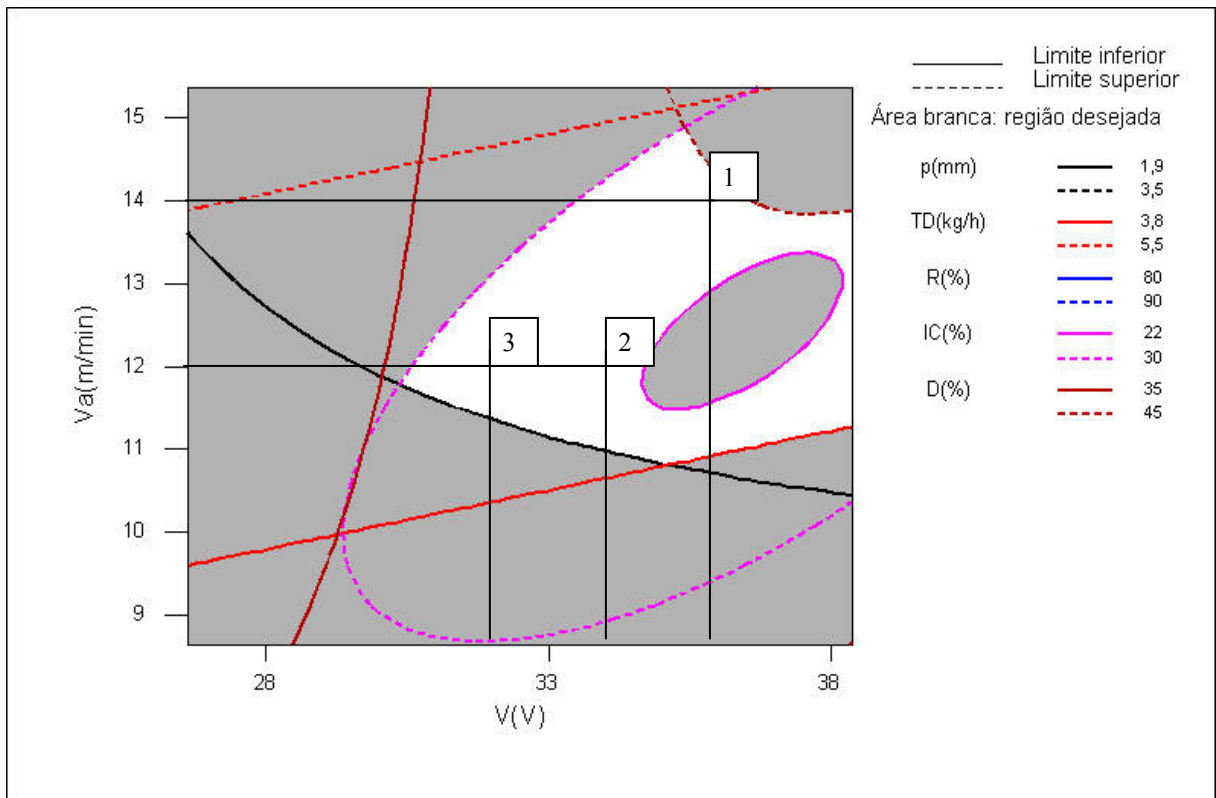


Figura 4.23 – Linhas de contorno das respostas combinadas, d=20mm.

4.3.3 – Confirmação dos resultados obtidos

Para confirmação da credibilidade da região operacional encontrada, foram realizados experimentos com combinações de parâmetros pertencentes às regiões dos gráficos mostrados nas **Figuras 4.22 e 4.23**, comparando os resultados encontrados com os resultados previstos, simulados no “Response Optimizer”, onde as faixas, os pesos e a ordem de importância foram as mesmas do item anterior. As combinações escolhidas para os experimentos são mostradas pela **Tabela 4.26**.

Tabela 4.26 – Ensaios de confirmação para a região encontrada.

Ensaio	Parâmetros de entrada		
	V	Va	d
*	(V)	(m/min)	(mm)
1	36	14	20
2	34	12	20
3	32	12	20
4	30	11	13,4

Após a realização dos ensaios, o procedimento para leitura e cálculo das respostas foi análogo às fases anteriores. Os resultados obtidos nos ensaios de confirmação, resultados esperados através do software utilizado e seus respectivos erros estão dispostos na **Tabela 4.27**.

Tabela 4.27 – Resultados obtidos, esperados e erros dos ensaios de confirmação.

Ensaio	p	p1	Erro	TD	TD1	Erro	η	η 1	Erro	IC	IC1	Erro	D	D1	Erro
1	2,72	2,8	2,86	5,07	5,01	1,20	85	86	1,16	24,4	24,6	0,81	39,8	44,6	10,75
2	2,12	2,14	0,93	4,56	4,34	5,07	85,7	85,1	0,80	23,4	22,7	3,44	39,4	41,4	4,97
3	2,08	2,03	2,46	4,69	4,44	5,63	86,1	85,5	0,77	26,6	26,1	1,84	38,7	38,9	0,57
4	2,18	2,21	1,36	4,26	4,18	1,91	84,1	83,5	0,74	31,3	30,3	3,00	36,4	39,5	7,88

Observação: índice 1 corresponde aos valores esperados.

Como pode ser observado, os resultados obtidos foram próximos dos resultados simulados através da ferramenta “Response Optimizer” do software Minitab. Não se obteve valores mais precisos, devido provavelmente à incertezas do sistema de medições e dos

equipamentos utilizados. Através dos testes de confirmação pode-se comprovar a confiabilidade da região encontrada e conseqüentemente a confiabilidade da ferramenta utilizada, bem como dos modelos matemáticos propostos.

4.4 – Considerações finais

Considerando os resultados obtidos, vale ressaltar que todas as análises foram feitas sem comprometimento com alguns aspectos, tais como metalúrgico, econômico e de propriedades mecânicas do resultado final. Para a viabilização da substituição de arames sólidos por arames tubulares, como em qualquer outro tipo de mudança, não basta fazer uma análise isolada, e sim uma análise geral de todas as características envolvidas no processo em questão, para então ser implementada a mudança.

Para uma análise completa do presente trabalho, onde um conjunto de parâmetros de entrada supostamente próximos do ótimo foi encontrado, seria necessário fazer uma análise metalúrgica, econômica e de propriedades mecânicas dos cordões de solda realizados com esses parâmetros, pertencentes à região encontrada, para ter confiança de que as combinações encontradas estejam de acordo com os padrões financeiros e de qualidade desejados, viabilizando assim sua utilização.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões gerais

Considerando-se os objetivos deste trabalho de análise e otimização de parâmetros na soldagem com eletrodo tubular, conclui-se que;

1 – Os parâmetros que mais influenciam na soldagem com eletrodos tubulares são velocidade de alimentação do arame, tensão e distância bico de contato peça, quando fixados o tipo de gás de proteção e ângulo de inclinação da tocha.

2 – A velocidade de alimentação do arame é claramente o parâmetro com significância mais intensa.

3 – A velocidade de soldagem é o parâmetro que tem menor influência no resultado final da solda.

4 – A escolha pela utilização do CO₂ como gás de proteção, mesmo este tendo menos vantagens que a utilização de uma mistura deste com argônio, promoveu um resultado final satisfatório.

5 – O modelamento matemático proposto para as respostas analisadas em função dos parâmetros mais significativos, permitem um melhor controle do processo, como também a obtenção de melhorias para o mesmo.

6 – A região operacional encontrada, validada pelos ensaios de confirmação, é de grande utilidade no ambiente industrial, pois fornece resultados convenientes para várias combinações de fatores, que são fixados de acordo com as necessidades requeridas.

5.2 - Recomendações para trabalhos futuros

Com este trabalho observou-se que este assunto é muito extenso, podendo ser explorado de diversas formas. Pode-se citar algumas linhas de trabalhos futuros, tais como:

- Comparação dos resultados obtidos com os parâmetros selecionados, tanto para eletrodos tubulares como para eletrodos sólidos;
- Análise da influência parâmetros na soldagem com eletrodos autoprotégidos;
- Utilização de modelos matemáticos, para outros processos de soldagens similares;
- Utilização de outras ferramentas estatísticas para efeitos comparativos dos resultados;
- Análise detalhada da microestrutura da ZTA e zona fundida, para soldagem com eletrodos tubulares com proteção gasosa, com e sem pré aquecimento;
- Comparação entre a soldagem com eletrodos sólidos e tubulares, através de ensaios mecânicos.
- Análise econômica dos resultados obtidos comparativamente com a soldagem com eletrodos sólidos.
- Análise mais detalhada da transferência denominada “falso spray”.
- Análise de ocorrência de defeitos na soldagem com eletrodos tubulares rutilicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AWS, Welding Handbook, “Flux Cored Arc Welding.” 8th ed., Miami-USA. American Welding Society, v.2, 1991, pp.158.

AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY, “Specification for carbon Steel Electrodes for Flux cored Arc Welding”, ANSI/AWS A5.20-79, 1979.

ARAUJO, W.R., “Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do Finger”, UFMG, fevereiro, 2004.

BAUNÉ, E.; BONNET, C. and LIU S., “Reconsidering the basicity of a FCAW Consumable- Part 1 – Solidified slag composition of a FCAW Consumable as basicity indicator”, Welding Journal , march, 2000, pp. 57s-64s.

BOSWORTH, M.R., “Effective heat input in pulsed current gas metal arc welding- solid wire electrodes”, Welding Journal, may 1991, pp. 111s-117s.

BONISZEWSKI, T., “Self-Shielded Arc Welding. Cambridge England: Woodhead”, Publishing Ltd in Association With The Welding Institute, 1992.

BRACARENSE, A.Q., “Processo de soldagem por arame tubular- FCAW”, Universidade Federal de Minas Gerais, maio, 2000.

DILLENECK, V.R. & CASTACNO, L., “The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel”, Welding Journal, pp 45-49, september, 1987.

FERREE, S. E., “New and improved cored wire for welding high-strength steels”, Proceedings of the welding Technology Institute of Australia, 40 th National Conference, 1992, vol. 1, Paper 11.

FRENCH I. E. and BOSWOTH M. R., “A comparison of Pulsed and Conventional Welding with Basic Flux Cored and metal Cored Welding Wires”, *Welding journal*, june 1995, pp. 197s-205s.

FORTES, C., “Apostila Arames tubulares”, ESAB BR, maio, 2004.

HOUDCROFT P. and JOHN R., “Welding and Cutting” – Woodhead – Faulkner Ltd. Cambridge, England, 1988.

JONES R.L., “An Evaluation of The Production Welding Aspects of Flux-cores Wires”, The Welding Institute, Cambridge, pp. 1-9, a982.

LOVERY, J., “Gases de proteção para soldagem a arco. Soldas e eletrodos”, dezembro, 1977, pp. 9-17.

MCKEOWN, D., “Synergic control- Another gimmick or practical solution”, *Joining and Materials*, june 1989, pp.271-273.

MEYER, D.W., “Preventing Delayed Craks in Ship Welds”, V.S. Coost Guard Headquarters, Washington, 1976, pp. 70.

MISHLER, H.W., “Preventing Delayed Craks in Ship Welds”, U.S. Coost Guard Headquarters, Washington, 1976, pp. 70.

MODENESI, P.J., “Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais”, *Apostila Didática*, Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, 100p., 2000.

MONTEIRO, M. C., “Estudo da Influência da Corrente de Soldagem com Arame Tubular na Quantidade de Hidrogênio Difusível no Metal de Solda”, XXV Encontro Nacional de tecnologia de Soldagem – 8 a 10 de setembro de 1999.

MONTGOMERY, D.C., “Design and analysis of experiments”, New York, Georgia Institute of Technology, 1984.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S., BRUNS R.E., “Planejamento e Otimização de Experimentos”, Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995.

NORRISH, J., “Advanced Welding Processes”, Bristol, IOP, 375 p., 1992.

PIXLEY, M., “Power Sources for pulsed MIG Welding”, *Joining and Materials*, june, 1989, pp. 268-271.

OLIVEIRA, I.M., “Uma Investigação da Influência dos Parâmetros de Pulso em Soldagem com Arame Tubular com Proteção Gasosa”, Universidade Federal de Itajubá, agosto, 2005.

RODGERS, R. J., and LOCHHEAD, J. C., “The use of gas-shielded FCAW for offshore fabrication”, *Welding Journal*, february 1989, pp. 26-32.

SALES, J. C., “Estudo da geometria do cordão de solda usando CO₂ e uma mistura de Ar e CO₂ na soldagem com arame tubular AWS E71T-1”, COBEM, 2001.

SAITO, M.S., “Análise da Influência dos Parâmetros de Pulso sobre a Geometria do Cordão de Solda e Rendimento de Deposição obtidos pelo Processo de Soldagem com Arame Tubular Utilizando Arco Pulsado”, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, março, 2001.

SUBRAMANIAN, S.; WHITE, D. R.; JONES, J.E.; LYONS, D. W., “Droplet Transfer in Pulsed Gas Metal Arc Welding of Aluminum”, *Welding Journal*, november, 1998, pp.459-465.

STARLING, C..M.D.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q., “Estudo da Transferência de Metal de um Arame Tubular Rutílico”, *Soldagem & Inspeção*, Ano 9, N°4, Dezembro, 2004.

STENBACKA, N. & PERSON, K. A., “Shielding gases for metal arc welding”, *Welding Journal*, November, 1989, pp.41-47.

WAINER, E. et al., “Soldagem – Processos e metalurgia”, São Paulo. Ed. Edgard Blucher, Ltda, 1992.

WEI, Q ; Q. HV, GUO, F and XIONG, D.J., “A study of Weld Pore Sensitivity of Self-Shielded Flux Cored”, Welding Journal, June 2002, pp. 90s-93s.

WIDGERY, D. J., “Flux Cored Wire: an update welding and Metal Fabrication”, april, 1988, pp. 88-124.

WIDGERY, D., “Tubular Wire Welding”, First published, England, Woodhead Publishing Limited, 1994, pp. 1-25.