

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos

Autor: **Ivan Gonçalves Maia**
Orientadora: **Roseana da Exaltação Trevisan**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos

Autor: Ivan Gonçalves Maia

Orientadora: Roseana da Exaltação Trevisan

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2005
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

M28e Maia, Ivan Gonçalves
 Efeito da camada de nitretos na porosidade em soldas
 de eixos automotivos / Ivan Gonçalves Maia. --
 Campinas, SP: [s.n.], 2005.

 Orientador: Roseana da Exaltação Trevisan
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Soldagem. 2. Aço-Analise-Soldagem. 3. Nitretos.
 4. Porosidade. 5. Metais – Defeitos. 6. Eixos. 7.
 Automóveis – Peças. 8. Automação - Soldagem. I.
 Trevisan, Rosena da Exaltação. II. Universidade
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
 Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Effect of the nitride coat on porosity in automotive axles
welding

Palavras-chave em Inglês: Robotized welding, Porosity, Automotive axle

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Waldek Wladimir Bose Filho, Maria Helena Robert

Data da defesa: 29/07/2005

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos

Autor: **Ivan Gonçalves Maia**

Orientadora: **Roseana da Exaltação Trevisan**

**Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente
UNICAMP**

**Prof. Dr. Waldek Wladimir Bose Filho
USP – São Carlos**

**Profa. Dra. Maria Helena Robert
UNICAMP**

Campinas, 29 de julho de 2005

Dedicatória:

Dedico este trabalho aos meus pais Nelson e Maria Zélia, a toda minha família e amigos.

Agradecimentos

Gostaria de expressar aqui minha profunda gratidão a diversas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que esse trabalho fosse concluído.

Aos meus pais, por serem especiais. Por sempre me terem dado força, apoio e voto de confiança. São eles os principais responsáveis por eu ter chegado até aqui e sem dúvida serão eles os principais responsáveis por qualquer outro grande feito que eu venha a alcançar.

À Professora Roseana da Exaltação Trevisan pela confiança prestada em todos os momentos desta pesquisa, por sua dedicação, compreensão e amizade.

A todos os meus familiares que sempre me deram forças para vencer meus obstáculos e seguir em frente.

À minha namorada Maíra pela motivação, compreensão e companheirismo.

Aos meus bons amigos. Todos os momentos felizes da minha vida sempre foram completos porque vocês estavam ao meu lado, e hoje é um deles.

Ao meu amigo Edson pela ajuda, disposição e verdadeira amizade compartilhada durante todo esse tempo de convívio.

À Benteler pelo auxílio financeiro, pela porta aberta para a realização dos experimentos e por todos os funcionários que não mediram esforços para o sucesso desta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

Ao colega Edmilton Gusken pela contribuição para a realização do ensaio de difração de raios-X.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Fabricação pela colaboração e companheirismo dedicados durante o período que aqui estive.

*Tornar o impossível, possível,
O possível, fácil,
E o fácil, prazeroso.
(Meir Schneider)*

Resumo

MAIA, Ivan Gonçalves, *Efeito da Camada de Nitretos na Porosidade em Soldas de Eixos Automotivos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 73 p. Dissertação (Mestrado)

Visando solucionar o problema da ocorrência de poros em um cordão de solda de um eixo automotivo, o presente trabalho apresenta um estudo da influência de diferentes fatores na ocorrência de porosidade em juntas de aço soldadas pelo processo MIG/MAG robotizado. Basicamente, foi estudada a influência de três fatores na ocorrência dos poros. São eles, a presença de uma camada rica em nitretos na extremidade de um dos tubos que compõe a junta, a limpeza das superfícies a serem soldadas e a vazão do gás de proteção. Após a soldagem dos corpos de prova foram retiradas de cada um deles, três amostras da seção transversal do cordão de solda. A porosidade foi quantificada pela técnica de análise metalográfica por microscopia ótica. Os resultados de porosidade foram apresentados de duas maneiras, uma sem qualquer tipo de restrição quanto aos poros encontrados, e outra em que houve distinção quanto à localização dos poros na seção transversal do cordão de solda. Quando a porosidade foi quantificada de maneira geral, sem qualquer tipo de distinção quanto à localização dos poros, dois fatores influenciaram a ocorrência de poros na junta soldada. São eles, a presença da camada rica em nitretos e a vazão do gás de proteção. No outro caso, levando em consideração a localização dos poros na seção transversal do cordão de solda, foi constatado que para o caso dos poros localizados na raiz da junta, a presença da camada rica em nitretos gerada pelo processo de corte a plasma na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 afetou significativamente a porosidade resultante no cordão de solda. Além dos ensaios experimentais, ensaios práticos foram realizados no próprio chão de fábrica de produção dos eixos. A realização de ensaios práticos visou avaliar a solução proposta para eliminação da ocorrência de porosidade no cordão de solda dos eixos. Os resultados destes ensaios comprovaram que a substituição do gás utilizado para o corte a plasma na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1, de ar comprimido por oxigênio puro, inibiu a formação dos poros.

Palavras-Chave: Soldagem robotizada, Porosidade, Eixo automotivo.

Abstract

MAIA, Ivan Gonçalves. *Effect of the Nitride Coat on Porosity in Automotive Axles Welding*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 73 p. Dissertação (Mestrado).

In order to solve the occurrence of pores in weld beads of an automotive axle, the present work studies the influence of three different factors on the occurrence of porosity in joints welded by robotized GMAW process. The factors analyzed were: the presence of a region enriched by nitrides on the surface of the tube related to the base metal 1, the surface cleanliness of the joint components, and the shielding gas flow. Three samples of the weld bead transversal section were retired in each specimen. The porosity was quantified by metallographic analysis technique using an optical microscope. The results were presented by two different ways. In one of this ways, pores were quantified without any kind of distinction. In the other way, pores were grouped in accordance of their location in the weld bead transversal section. The pores quantified without any kind of distinction were affected by the “presence of the coat” and by the shielding gas flow. The pores located near the joint root were affected only by the “presence of the coat”. In addition to the experimental specimens, practical experiments were made in the axles line production. These practical experiments were developed to evaluate a proposed solution to prevent the occurrence of the pores on the weld bead of the axles. The results of these practical experiments proved that changing the compressed air used in the plasma cut of the extremities of the tube related to the base metal 1 by pure oxygen gas inhibited the pores formation.

Key Words: Robotized welding, Porosity, Automotive axle.

Sumário

Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas.....	vii
Nomenclatura.....	viii
Capítulo 1 Introdução	01
Capítulo 2 Revisão da Literatura	03
2.1 Porosidade em juntas soldadas.....	03
2.1.1 Definição.....	03
2.1.2 Tipos de poros.....	04
2.2 Formação dos poros.....	04
2.3 Influência da solidificação na formação dos poros.....	06
2.4 Influência da presença de gases na atmosfera do arco.....	07
2.4.1 Geral.....	07
2.4.2 Gás de proteção.....	08
2.5 Importância da limpeza das superfícies.....	10
2.6 Porosidade em juntas de aço cortadas a plasma.....	10
2.6.1 Camada de nitretos.....	11
2.6.2 Supersaturação de nitrogênio na poça de fusão.....	12

2.7 Influência dos Parâmetros de Soldagem.....	14
2.7.1 Corrente de soldagem.....	14
2.7.2 Tensão do arco.....	15
2.7.3 Velocidade de soldagem.....	15
2.7.4 Energia nominal de soldagem.....	16
2.7.5 Outros parâmetros de soldagem.....	17
2.8 Resistência Mecânica x Porosidade.....	17
2.9 Técnicas para avaliação de porosidade.....	18
2.9.1 Exemplos de técnicas existentes.....	18
2.9.2 Análise microscópica.....	19
2.10 Processo MIG/MAG Robotizado.....	19
2.10.1 Definições.....	19
2.10.2 Execução da soldagem.....	20
Capítulo 3 Materiais e Métodos	21
3.1 Planejamento experimental.....	21
3.2 Materiais.....	23
3.3 Corte a plasma do metal-base 1.....	25
3.4 Preparação dos corpos de prova em função das variáveis de influencia.....	26
3.4.1 Presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1.....	26
3.4.2 Limpeza das superfícies.....	28
3.4.3 Regulagem da vazão do gás de proteção.....	30
3.5 Soldagem dos corpos de prova.....	30
3.6 Retirada e preparação das amostras.....	32

3.7 Medição de porosidade.....	33
Capítulo 4 Resultados e Discussões Preliminares.....	35
4.1 Monitoramento dos parâmetros de soldagem.....	35
4.2 Divisão do cordão de solda em regiões.....	38
4.3 Medição de porosidade e definição da região crítica.....	39
4.4 Relação entre velocidade de soldagem e porosidade.....	41
4.5 Caracterização, medição e remoção da camada formada após o processo de corte a plasma.....	43
4.5.1 Caracterização da camada.....	44
4.5.2 Medição e remoção da camada.....	46
4.6 Contribuição dos ensaios preliminares.....	48
Capítulo 5 Resultados e Discussões	49
5.1 Primeiro Modo: Quantificação da porosidade encontrada, sem qualquer restrição quanto à dimensão e/ou localização dos poros.....	50
5.1.1 Efeito da presença de camada.....	52
5.1.2 Efeito da limpeza das superfícies.....	54
5.1.3 Efeito da vazão do gás de proteção.....	55
5.1.4 Interações entre as variáveis de influência estudadas.....	56
5.2 Segundo Modo: Quantificação da porosidade encontrada em função da localização dos poros.....	56
5.2.1 Primeiro grupo: Quantificação dos poros localizados próximos à raiz da junta.....	57
5.2.2 Segundo grupo: Quantificação dos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda.....	59
5.2.3 Discussão dos resultados de porosidade em função da localização dos poros.....	61

Capítulo 6 Resultados Práticos	64
Capítulo 7 Conclusões	66
7.1 Conclusões a partir dos resultados preliminares.....	66
7.2 Conclusões a partir dos resultados.....	66
7.3 Conclusões a partir dos resultados práticos.....	67
Capítulo 8 Referências Bibliográficas	68
Anexo 1	71
Anexo 2	72
Anexo 3	73

Lista de Figuras

Figura 2.1: Influência do tipo de gás de corte no número de poros e inclusões resultantes no cordão de solda.....	12
Figura 2.2: Influência da temperatura na solubilidade do nitrogênio no ferro.....	13
Figura 2.3: Efeito da corrente de soldagem sobre a absorção de nitrogênio pela poça de fusão....	15
Figura 3.1: Ilustração do planejamento experimental adotado.....	22
Figura 3.2: Ilustração real da junta, identificando o metal-base 1 e o metal-base 2.....	24
Figura 3.3: Equipamentos utilizados no corte a plasma do metal-base 1.....	25
Figura 3.4: Foto da extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 mostrando as direções normal e longitudinal à superfície do tubo.....	27
Figura 3.5: Equipamento utilizado para remoção da camada formada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1.....	28
Figura 3.6: a) foto do dispositivo de fixação do eixo, b) detalhe da fixação do corpo de prova através de grampos pneumáticos.....	31
Figura 3.7: Robô de soldagem, com a tocha de soldagem em destaque.....	31
Figura 4.1: Gráfico representativo do comportamento da tensão do arco durante a execução dos cordões de solda preliminares.....	36
Figura 4.2: Gráfico representativo do comportamento da corrente de soldagem durante a execução dos cordões de solda preliminares.....	37
Figura 4.3: Ilustração do cordão de solda dividido em regiões.....	38

Figura 4.4: Imagem da extremidade do tubo cortado onde pode-se constatar a formação da camada fundida.....	44
Figura 4.5: Difractograma correspondente à superfície cortada por plasma de ar comprimido.....	45
Figura 4.6: Imagem da extremidade do tubo cortado após remoção da camada.....	48
Figura 5.1: Exemplos de poros de origem mecânica em regiões de incompleta penetração e fusão parcial em duas juntas soldadas.....	54
Figura 5.2: Poros localizados próximos à raiz da junta (aumento 6,7x).....	57
Figura 5.3: Poro disperso pela secção transversal do cordão de solda (aumento 10x).....	60

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Composição química dos metais-base 1 e 2 e metal de adição utilizados.....	24
Tabela 4.1: Delimitação das regiões do cordão de solda e respectivas velocidades de soldagem empregadas.....	39
Tabela 4.2: Média do número de poros por região dos cordões de solda.....	40
Tabela 4.3: Avaliação da incidência de porosidade ao longo do cordão.....	41
Tabela 4.4: Velocidade de soldagem e energia nominal de soldagem por região do cordão de solda	42
Tabela 4.5: Largura da camada fundida.....	47
Tabela 5.1: Quantificação da porosidade sem qualquer restrição quanto à dimensão e/ou localização dos poros.....	51
Tabela 5.2: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade resultante no cordão de solda.....	52
Tabela 5.3: Quantificação dos poros encontrados próximos à raiz da junta.....	58
Tabela 5.4: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade resultante próxima à raiz da junta.....	59
Tabela 5.5: Quantificação dos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda.....	60
Tabela 5.6: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade dispersa pela seção transversal do cordão de solda.....	61

Nomenclatura

Letras latinas

p_g – Pressão interna do gás na bolha

p_m – Pressão hidrostática

p_a – Pressão atmosférica

r – Raio de curvatura da bolha

Letras Gregas

α – Nível de significância

σ – Tensão superficial da interface líquido/gás

$\emptyset$ – Diâmetro

Abreviações

atm – Atmosfera

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

O₂ – Gás oxigênio

CO₂ – Dióxido de carbono

Ar – Argônio

TIG – Tungsten Inert Gas

GMAW – Gas Metal Arc Welding

CO – Monóxido de carbono

MnO – Óxido de manganês

SiO₂ – Óxido de silício

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

Mn – Manganês

Si – Silício
ZTA – Zona Termicamente Afetada
C – Carbono
P – Fósforo
S – Enxofre
Al – Alumínio
Mo – Molibdênio
Cr – Cromo
Cu – Cobre
Ti – Titânio
B –Boro
Ni – Níquel
Nb – Nióbio
DBCP – Distância entre Bico de Contato e Peça

Siglas

AWS – American Welding Society
UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas
USP – Universidade de São Paulo

Capítulo 1

Introdução

Sem dúvida alguma, hoje, o processo de fabricação mais utilizado na produção de eixos automotivos é o processo de soldagem. Um eixo automotivo é composto por vários componentes. Na maioria das vezes, a união desses diversos componentes metálicos só é possível através da utilização de processos de soldagem.

Vários processos de soldagem são utilizados na indústria automobilística. Dentre os processos utilizados, certamente o processo MIG/MAG é um dos que se destacam. O processo MIG/MAG consiste na junção de peças metálicas, por fusão, através de um arco elétrico estabelecido entre as peças a serem soldadas e um eletrodo consumível (arame sólido). Nele, a proteção gasosa da poça de fusão contra a contaminação atmosférica é feita utilizando-se um gás inerte ou um gás ativo, ou ainda uma mistura deles.

A elevada utilização desse processo na indústria automobilística se deve principalmente à sua capacidade de automatização. A principal vantagem de se utilizar processos de soldagem robotizados é o ganho em termos de produtividade. Porém, além do aumento na produtividade, os processos de soldagem robotizados podem ainda garantir uma maior repetibilidade no processo, ou seja, permitem a obtenção de produtos com características bastante semelhantes entre si. Isso é possível porque a robotização elimina uma variável bastante significativa nos processos de soldagem; a habilidade do operador.

Muitas vezes, o que era para ser uma vantagem acaba se transformando em um problema. Geralmente, os processos de soldagem robotizados não permitem flexibilidade durante a execução de um cordão de solda. Uma vez programado, o robô irá executar sua tarefa sem levar em consideração eventuais peculiaridades que possam surgir durante a execução do cordão de solda. Essa é a razão pela qual devemos garantir uma mínima diferença entre as diversas juntas que o robô deverá soldar. Para isso, adequadas técnicas de preparação das superfícies das juntas devem ser desenvolvidas.

A utilização de processos de soldagem robotizados pode trazer problemas ainda maiores quando a programação das variáveis do processo é feita de maneira inadequada. Defeitos de soldagem podem ser freqüentes caso os parâmetros de processo não sejam os mais adequados. Dentre os defeitos de soldagem, a porosidade é um dos mais comuns deles.

A ocorrência de porosidade nos cordões de solda de componentes automotivos é uma realidade que deve ser duramente combatida. Na indústria automobilística, a ocorrência desse tipo de defeito pode comprometer a qualidade do produto; seja no aspecto de resistência da junta, seja no aspecto meramente estético, podendo levar até mesmo ao sucateamento do conjunto soldado.

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar uma solução prática e viável para a resolução do problema de porosidade em uma solda de um eixo automotivo soldado pelo processo MIG/MAG robotizado. Para alcançar esse objetivo tornou-se imprescindível que os experimentos fossem realizados no próprio chão de fábrica, mais especificamente, na própria linha de produção dos eixos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Sem dúvida alguma, o desenvolvimento de um trabalho científico se inicia baseado em uma extensa revisão bibliográfica a respeito do tema escolhido. A importância de uma ampla revisão bibliográfica consiste em sintonizar o pesquisador ou o grupo de pesquisa em tudo o que já foi ou vem sendo desenvolvido a respeito do assunto a ser tratado. Dessa maneira, a fim de estudar os principais assuntos relacionados à ocorrência de porosidade em juntas soldadas, várias bases de dados foram consultadas. A pesquisa bibliográfica deste trabalho foi realizada nos bancos de dados disponíveis em computadores autorizados da Biblioteca da Área de Engenharia (BAE) da UNICAMP, na importante base de dados do Institute for Scientific Information: The Web of Science, em livros considerados referência em temas de soldagem, na Biblioteca Central da USP - São Carlos e também através de uma rede de convênios entre bibliotecas do mundo todo, o Programa de Comutação Bibliográfica (COMUT), promovido pelos órgãos CAPES/SESU/FINEP/IBICT.

2.1 Porosidade em juntas soldadas

2.1.1 Definição

Porosidade é um dos defeitos mais comuns na soldagem de metais. Trata-se de um defeito em forma de cavidade que surge devido ao aprisionamento de gases durante a solidificação do metal de solda. Esse defeito apesar de geralmente encontrado na forma esférica, também pode ser encontrado na forma alongada ou vermiforme.

De modo geral, esses gases aprisionados podem ser provenientes da supersaturação de gases dissolvidos, de reações químicas com liberação de gases ou ainda através do próprio gás de proteção.

Stenbacka e Svensson (1987) atribuem como uma outra causa de porosidade, a formação mecânica de poros. O metal de solda pode se solidificar antes mesmo de preencher todos os espaços da junta, levando à formação de vazios que também podem ser chamados de poros.

A porosidade pode ocorrer tanto na superfície como abaixo da superfície do cordão de solda. Comumente são encontradas próximas à superfície do cordão devido à tendência dos gases tentarem escapar para a atmosfera.

2.1.2 Tipos de poros

De acordo com a AWS (Welding Handbook - Welding Processes, 1991), existem vários tipos de porosidade, entre os quais estão:

- porosidade dispersa, caracterizada por poros bem distribuídos ao longo do cordão de solda.
- porosidade agrupada, caracterizada por um agrupamento localizado de poros.
- porosidade em forma de tubo, caracterizada por poros com comprimento maior que largura e que se apresentam perpendicularmente à face do cordão. Normalmente esse tipo de porosidade alongada se estende da raiz até a face do cordão de solda.
- porosidade alinhada, também denominada porosidade linear, consiste em uma distribuição de poros orientados em linha.
- porosidade alongada, assim como na porosidade em forma de tubo, o comprimento dos poros é maior que suas larguras. Entretanto, se apresentam de forma paralela ao eixo da solda, ou seja, paralelos à face do cordão.

2.2 Formação dos poros

Segundo Ramirez, Han e Liu (1994), a energia necessária para formação de poros é determinada pelas tensões superficiais das interfaces sólido/líquido, gás/sólido e gás/líquido, além do grau de saturação dos gases no líquido.

Os elementos formadores de gás têm solubilidade muito menor no metal sólido que no metal líquido. Conseqüentemente, estes elementos são rejeitados no metal líquido à frente da interface de solidificação formando assim bolhas de gás.

De acordo com Grong (1994) no metal líquido uma bolha de gás será estável quando a sua pressão interna for suficientemente alta para balancear as forças externas (equação 2.1). Essas forças externas são a tensão superficial da interface líquido/gás, σ , a pressão hidrostática, p_m , e a pressão atmosférica, p_a .

$$p_g = p_a + p_m + (2\sigma / r) \quad (2.1)$$

Onde: p_g é a pressão interna do gás na bolha e r é o raio de curvatura da bolha.

Na prática p_a é considerada 1 atm e p_m é desprezada. Somente em situações como soldagem subaquática profunda, o valor de p_m torna-se significativo.

Após a nucleação das bolhas, estas se desenvolvem como resultado da difusão de gases para o seu interior.

Segundo Redchits e Froloc (1996), para o caso do hidrogênio, quando o coeficiente de difusão desse gás cresce, a taxa crescimento das bolhas e a velocidade de ascensão destas para a superfície também cresce. A intensidade do processo de difusão é determinada pelo gradiente de temperatura na poça de fusão e sua vizinhança. Quanto maior esse gradiente, maior a taxa de difusão do hidrogênio.

Segundo Grong (1994), supondo que as bolhas são formadas na interface sólido/líquido durante a solidificação do metal de solda, estas são desprendidas da interface quando a força de flutuação que as empurra para cima excede a tensão superficial que tende a mantê-las aderidas à superfície do substrato.

Caso essa condição seja satisfeita, as bolhas começarão a migrar em direção à superfície do cordão de solda. Dependendo da velocidade de ascensão, estas bolhas poderão atingir a superfície do cordão, escapando para a atmosfera, ou então serem aprisionadas pela frente de solidificação do metal de solda, dando origem assim aos poros.

2.3 Influência da solidificação na formação dos poros

A porosidade é um defeito formado devido ao aprisionamento de gases durante a solidificação do metal de solda. Além do papel de aprisionamento dos gases, a frente de solidificação exerce outras influências na formação dos poros.

Segundo Savage (1976), durante a solidificação de um metal, quando o coeficiente de partição (K) de um dado elemento é menor que 1, ou seja, a solubilidade desse elemento no metal decresce com a temperatura, ocorre a rejeição de soluto pela interface de solidificação para o líquido imediatamente à sua frente. Quando a taxa de solidificação é maior que a taxa de difusão do soluto no líquido, este líquido fica enriquecido de soluto e pode assim atingir um pico de concentração. Quando o soluto rejeitado se refere a elementos formadores de gases, a formação de bolhas pode ser promovida.

Uda et al. (1976 apud Olson, Dixon e Liby, 1989) testaram o efeito da concentração de gases à frente da interface de solidificação na formação dos poros. Para isso eles usaram o sistema ferro-hidrogênio. Os resultados obtidos nesse experimento mostram uma concentração crítica de hidrogênio no metal líquido de 13 cm^3 por 100 g de ferro, ou seja, concentrações iguais ou maiores que essa resultariam na formação de poros. Para as mesmas, cálculos matemáticos indicaram uma concentração crítica de $25,2 \text{ cm}^3$ de hidrogênio por 100 g de ferro. Apesar dos resultados mostrarem uma grande discrepância, nota-se que a concentração de soluto à frente da interface de solidificação exerce uma grande influência na formação dos poros.

Uma menor taxa de solidificação do metal de solda além de permitir maior difusão e conseqüentemente, menor concentração de gases à frente da interface de solidificação, permite ainda que bolhas de gases formadas tenham tempo suficiente para escaparem para a atmosfera antes de serem aprisionadas pelo sólido que está se formando.

Fast (1949, apud Warren e Stout, 1952) verificou o efeito da taxa de solidificação na formação de poros por hidrogênio e nitrogênio. Para o caso do hidrogênio, uma redução na taxa de solidificação resultou em uma significativa queda no nível de porosidade por esse gás. Já para o caso do nitrogênio, apesar da redução na taxa de solidificação, a queda no nível de porosidade

não foi significativa. Este mesmo autor atribuiu isso ao fato do nitrogênio se difundir muito vagarosamente.

Bitinskaya e Kuz'min (1979, apud Olson, Dixon e Liby, 1989) investigando a formação de poros na soldagem TIG e electron-beam, reportaram que a formação de poros é resultado da combinação da influência da contração durante a solidificação e da solubilidade dos gases. Esse efeito combinado dificulta a determinação da influência individual da concentração de gases porque microcavidades de contração facilitam a difusão dos gases no metal de solda que está se solidificando.

2.4 Influência da presença de gases na atmosfera do arco

2.4.1 Geral

Quando um metal é fundido na presença de gases, ele pode absorver quantidades consideráveis desses gases em um curto espaço de tempo. A quantidade de gás dissolvido é uma função exponencial da temperatura do metal fundido, aumentando com o acréscimo dessa temperatura.

A solubilidade de um gás geralmente decresce com a diminuição da temperatura, fazendo com que haja uma supersaturação de gases à medida que o metal de solda vai se solidificando. O gás em excesso é rejeitado e pode se difundir através do líquido até alcançar a superfície e se recombinar com a atmosfera, ou então pode formar bolhas que podem ou não serem aprisionadas pela frente de solidificação.

Segundo Warren e Stout (1952), dos gases comumente encontrados em processos de soldagem, somente o hidrogênio, o nitrogênio e o oxigênio são dissolvidos no aço fundido em quantidades apreciáveis. Segundo eles, os gases inertes como o argônio e o hélio, assim como o monóxido e o dióxido de carbono são praticamente insolúveis. Ainda assim gases como o argônio e o hélio, provenientes do próprio gás de proteção, o monóxido e o dióxido de carbono, entre outros, provenientes de reações químicas na poça de fusão, também podem formar porosidade caso sejam aprisionados pela frente de solidificação.

Todos os três gases solúveis (hidrogênio, oxigênio e nitrogênio) são absorvidos atômicamente. Se presentes na forma molecular ou combinada, eles devem primeiro ser dissociados pelo calor introduzido pelo próprio processo de soldagem ou por reações químicas.

2.4.2 Gás de proteção

Os gases utilizados como gás de proteção no processo GMAW podem ser classificados como inertes (MIG) ou ativos (MAG). Têm como principal função proteger a poça de fusão da atmosfera que envolve o arco, embora muitas vezes outros papéis como, por exemplo, a estabilização do arco, sejam determinantes na escolha do gás de proteção.

Apesar de suas características benéficas, muitas vezes são os próprios gases de proteção os responsáveis por defeitos no processo de soldagem. Entre esses defeitos está a porosidade, e direta ou indiretamente, o gás de proteção pode afetá-la das seguintes formas:

- através da introdução no metal de solda de elementos presentes na própria composição do gás de proteção como, por exemplo, o oxigênio.
- através da contaminação do gás de proteção, por exemplo, pelo ar.
- através de seu próprio aprisionamento no metal de solda (Nogi et al., 1998).

Além disso, uma outra maneira de favorecimento à ocorrência de porosidade, e talvez a mais comum delas, é quando a vazão do gás de proteção não é suficiente para garantir uma proteção adequada.

Por outro lado, uma vazão de gás excessiva também pode trazer problemas de porosidade na junta soldada devido a problemas relacionados com a elevada turbulência na poça de fusão. A presença de turbulência no metal de solda líquido pode aumentar as trocas gasosas entre ao metal líquido e a atmosfera. Além disso, a turbulência pode impedir que o metal de solda se acomode na junta antes de se solidificar. Caso o metal de solda se solidifique e não tenha preenchido todos os vazios presentes na junta, a formação mecânica de poros é favorecida.

Composição do gás de proteção

Devido às dificuldades de estabilização do arco com uma atmosfera de Ar puro, muitas vezes, O_2 e/ou CO_2 são acrescentados na composição do gás de proteção. Para algumas aplicações, muitas vezes utiliza-se CO_2 puro como gás de proteção.

Oyler e Stout (1953) estudando o efeito da adição de O_2 ao gás de proteção, no caso Ar, para soldagem de chapas de aço, verificaram que adições de até 5% de O_2 não acarretaram mudanças na porosidade. Porém teores acima de 5% elevaram significativamente o nível de porosidade no metal de solda.

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás reativo que em elevadas temperaturas, como as presentes na atmosfera do arco, se dissocia em O e CO. Assim, o CO_2 também possui uma característica oxidante.

De forma geral, quando o oxigênio está presente no gás de proteção, torna-se necessário desoxidar a poça de fusão a fim de se prevenir a formação de CO e conseqüentemente da porosidade. Manganês, silício e alumínio podem ser usados como desoxidantes já que promovem a formação de MnO , SiO_2 e Al_2O_3 , respectivamente.

Segundo Kaplan e Hill (1976), a quantidade de Mn e Si requerida depende do teor de carbono no metal de solda e do conteúdo de oxigênio dissolvido. Estes mesmos autores afirmam também que o Mn e o Si em solução não são prejudiciais às propriedades mecânicas do aço; além disso, os produtos da reação de desoxidação desses elementos também não afetam as propriedades mecânicas, a não ser que estejam presentes em excesso.

Kaplan e Hill (1976) ainda afirmam que o alumínio além de atuar como desoxidante, pode reduzir a porosidade através de sua reação com o nitrogênio, formando o nitreto de alumínio, e conseqüentemente reduzindo o conteúdo de nitrogênio na poça de fusão.

Contaminação do gás de proteção pelo ar

Segundo Lucas et al. (2001), a introdução de ar no gás de proteção pode se dar de diversas maneiras, entre elas:

- contaminação na região do arco devido à vazão insuficiente do gás de proteção.
- contaminação inerente a esse gás de proteção durante o suprimento.
- correntes de vento atravessando o gás de proteção.
- linha e conexões da tubulação de gás de proteção inadequadas.

Este mesmo autor afirma que existe uma relação direta entre o conteúdo final de nitrogênio no metal de solda e a contaminação do gás de proteção pelo ar.

Outras formas de contaminação, não sendo pelo ar, podem estar presentes. Por exemplo, presença de respingos, impurezas em geral no bocal além de contaminar o gás de proteção, podem trazer um suprimento insuficiente desse gás.

2.5 Importância da limpeza das superfícies

Uma das formas mais comuns, práticas e efetivas de minimizar a porosidade em juntas soldadas é a preparação adequada das superfícies dos metais-base e do metal de adição. Para se produzir uma solda com baixa porosidade, é essencial que essas superfícies estejam totalmente livres de graxas, óleos, umidade, óxidos, entre outras impurezas.

Segundo Saunders (1997), água e hidrocarbonetos como óleos e graxas, quando presentes na superfície da chapa, ao entrarem em contato com o arco elétrico, são quebrados e liberam hidrogênio, contribuindo assim para o enriquecimento desse gás na poça de fusão.

Para o metal de adição, é indispensável ainda que este esteja livre de cavidades internas contendo gases.

Segundo Barker (1965), quanto menor for o diâmetro do eletrodo, maior deve ser o cuidado com a limpeza de sua superfície.

2.6 Porosidade em juntas de aço cortadas a plasma

Engblom (1988) e Vasil'ev e Kokhlikyan (1976) estudaram a formação de poros na soldagem de juntas cortadas a plasma. Segundo eles, a soldabilidade de juntas cortadas com

plasma é adversamente afetada quando o gás de corte ou gás de plasma utilizado apresenta nitrogênio em sua composição, como é o caso do uso de ar comprimido.

Segundo estes autores o uso de gases contendo nitrogênio causa um aumento no conteúdo desse gás no metal de solda. Esse aumento no conteúdo de nitrogênio está intimamente relacionado com a ocorrência de poros. O uso de oxigênio como gás de corte pode eliminar este problema.

2.6.1 Camada de nitretos

Engblom (1988), enfatizou a ocorrência de poros em juntas cortadas a plasma à formação de uma camada rica em nitretos na superfície de corte. Essa camada rica em nitretos é formada quando o gás de corte utilizado apresenta nitrogênio em sua composição. Devido à presença dessa camada, problemas freqüentemente aparecem através da formação de poros e falta de fusão durante a soldagem.

A figura 2.1 apresenta um gráfico no qual pode-se observar o efeito na porosidade do tipo de gás utilizado no corte a plasma da junta. Segundo Engblom (1988), o número de poros resultantes no cordão de solda é reduzido com a diminuição do conteúdo de nitrogênio na composição do gás de corte. Dos dois tipos de gases mostrados na figura, apenas o ar comprimido apresenta nitrogênio em sua composição.

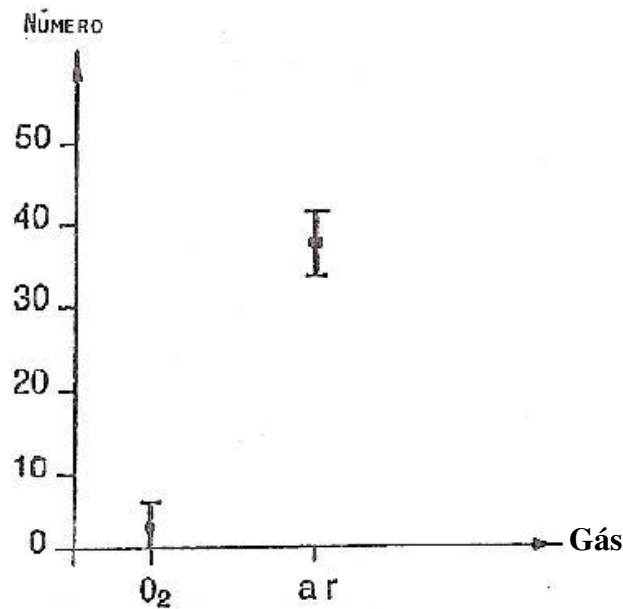


Figura 2.1 – Influência do tipo de gás de corte no número de poros e inclusões em 200mm de cordão de solda.

Fonte: Engblom (1988)

Em seu estudo, Engblom (1988) mostrou que os poros são freqüentemente localizados próximos às áreas de penetração parcial, sendo razoável assumir que a camada de nitretos causa a falta de fusão, que por sua vez, promove a formação “mecânica” de poros.

2.6.2 Supersaturação de nitrogênio na poça de fusão

Vasil'ev e Kokhlikyan (1976) por sua vez, enfatizam a ocorrência de poros à supersaturação de nitrogênio na poça de fusão. Segundo eles, a região da junta que se fundiu durante o processo de corte a plasma mas que se solidificou e permaneceu aderida à extremidade de corte após o resfriamento tem seu conteúdo de nitrogênio aumentado consideravelmente, podendo atingir concentrações de até 0,15%. Isso acontece porque o nitrogênio é absorvido mais facilmente pelo metal líquido em contato com o plasma. A absorção desse gás é maior no metal líquido porque o nitrogênio é um elemento que tem sua solubilidade no ferro aumentada com a elevação da temperatura, ou seja, conforme Savage (1976) o nitrogênio apresenta um coeficiente de distribuição (K) menor que 1. A figura 2.2 demonstra o aumento da solubilidade de nitrogênio no ferro com o aumento da temperatura.

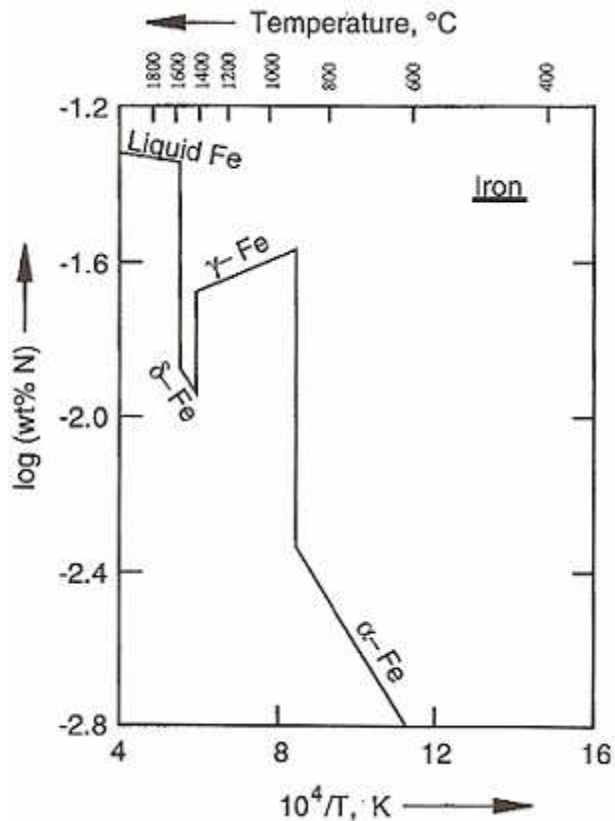


Figura 2.2 – Influência da temperatura na solubilidade do nitrogênio no ferro.

Fonte: Kou (1987)

A região que se fundiu durante o corte a plasma mas que se solidificou e permaneceu aderida à extremidade de corte é denominada por Vasil'ev e Kokhlikyan (1976) como região fundida da extremidade da junta, e estará presente durante o processo de soldagem posterior.

Assim, durante o processo de soldagem de juntas cortadas a plasma, o conteúdo de nitrogênio na poça de fusão é aumentado devido à fusão da região rica em nitrogênio que estava presente na juntas. Com a solidificação do metal de solda, como o nitrogênio apresenta uma diminuição de solubilidade no ferro com a queda da temperatura (vide figura 2.2), esse elemento será rejeitado à frente da interface de solidificação. Com a supersaturação de nitrogênio, bolhas desse gás podem ser formadas e caso estas sejam aprisionadas pela frente de solidificação, ocorrerá a formação de poros no metal de solda.

2.7 Influência dos Parâmetros de Soldagem

De modo geral, na soldagem a arco, os principais parâmetros de soldagem são a tensão do arco, a corrente e a velocidade de soldagem. Por esses parâmetros afetarem a porosidade de diversas maneiras, a influência de cada um deles será descrita a seguir. Além dos principais parâmetros de soldagem, a influência de outros parâmetros na ocorrência de porosidade também será mencionada.

2.7.1 Corrente de soldagem

O uso de correntes muito elevadas leva a um aumento no nível de porosidade. Warren e Stout (1952) atribuem isso ao fato de que valores elevados de corrente de soldagem levam a um aumento na temperatura da poça de fusão, o que aumenta a solubilidade de gases como o nitrogênio, o oxigênio e outros gases na poça de fusão. A figura 2.3 demonstra o efeito da corrente de soldagem sobre a absorção de nitrogênio pela poça de fusão. Como a solubilidade dos elementos formadores de gases é bem menor no metal sólido, com o resfriamento e conseqüente solidificação do metal de solda, esses elementos são rejeitados no metal líquido à frente da interface de solidificação levando à formação de bolhas de gás que podem vir a ser aprisionadas, formando poros. Estes mesmos autores afirmam que existe uma outra possível explicação para o aumento da porosidade com o aumento da corrente de soldagem. Segundo eles, aumentando a corrente de soldagem, aumenta-se a penetração. Quanto maior a penetração maior é a distância que as bolhas de gás têm que atravessar para escapar pela superfície, o que aumenta a probabilidade de serem aprisionadas e assim formar poros.

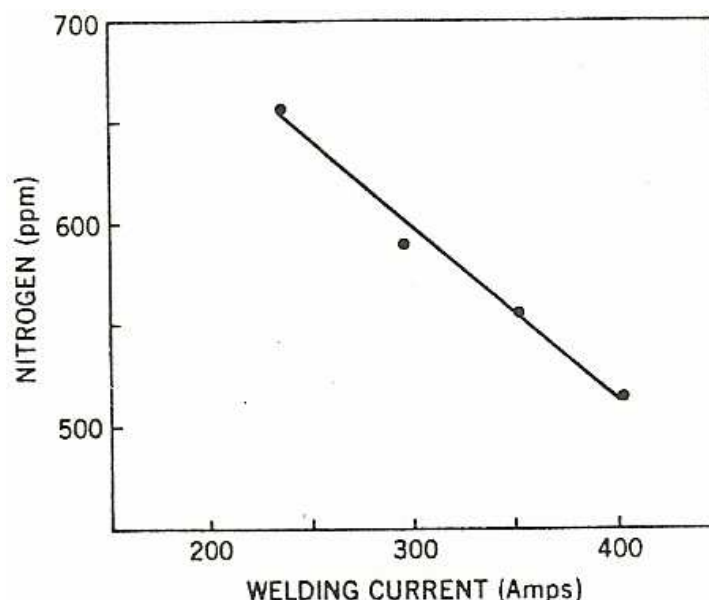


Figura 2.3 – Efeito da corrente de soldagem sobre a absorção de nitrogênio pela poça de fusão.

Fonte: Kaplan e Hill (1976)

2.7.2 Tensão do arco

A influência da tensão do arco sobre a formação de poros pode ser explicada através de variações no comprimento do arco. Marques (1991) afirma que para uma dada corrente, um pequeno aumento na tensão implica em um grande aumento no comprimento do arco.

Woods (1974) através de medições do conteúdo de hidrogênio em soldas de alumínio verificou a tendência de absorção desse gás com o aumento do comprimento do arco. Ele atribuiu isso ao fato de que quanto maior é o comprimento do arco, maior será a área da superfície da poça de fusão. Isso faz com que a zona susceptível à absorção de gases aumente. Se a proteção gasosa não for suficiente para suprir esse aumento, a ocorrência de porosidade será favorecida.

2.7.3 Velocidade de soldagem

Estudando o efeito da velocidade de soldagem na ocorrência de poros, este mesmo autor afirma que com um aumento na velocidade de soldagem obtém-se soldas com menor quantidade de poros. Atribuiu a redução do número de poros ao fato de com velocidades de soldagem maiores reduz-se o tempo disponível para a absorção de gases. Saperstein, Prescott e Monroe

(1964) relacionando velocidade de soldagem com o tamanho e a morfologia dos poros formados no metal de solda, afirmam que com altas velocidades de soldagem os poros tendem a ser refinados, enquanto com baixas velocidades eles tendem a se coalescer, tornando-se mais grosseiros. Os resultados obtidos por eles indicam fortemente que a distribuição e o tamanho dos poros é governado pelo tempo disponível para nucleação e crescimento durante a solidificação do metal de solda.

2.7.4 Energia nominal de soldagem

A taxa de solidificação do metal de solda afeta diretamente a porosidade resultante no cordão de solda. A taxa de solidificação por sua vez, depende da quantidade de calor imposta durante o processo de soldagem. À essa quantidade de calor dá-se o nome energia nominal de soldagem, que representa a energia (calor) fornecida pelo arco por comprimento do cordão de solda. Quanto maior for a energia nominal de soldagem empregada no processo, menor a taxa de solidificação do metal de solda, ou seja, maior é o tempo disponível para os gases escaparem para a atmosfera sem serem aprisionados pela frente de solidificação.

A energia nominal de soldagem ou insumo de calor (IC) é dada pela equação 2.2:

$$IC = U \cdot I / v \quad (2.2)$$

Onde: IC é a energia nominal de soldagem, U é a tensão do arco, I é a corrente de soldagem e v é a velocidade de soldagem.

Dessa forma, aumentos na tensão e na corrente do arco e redução na velocidade de soldagem aumentam a energia nominal de soldagem, ou seja, favorecem o escape dos gases.

Analizando o que foi mencionado para cada parâmetro isoladamente pode parecer contraditório. O fato é que cada um dos parâmetros (tensão, corrente e velocidade de soldagem) afeta a porosidade de uma maneira como aquela apresentada individualmente, porém quando juntos como acontece nos processos de soldagem, existe mais um fator a ser considerado, que é resultados desses três parâmetros; a energia nominal de soldagem.

2.7.5 Outros parâmetros de soldagem

Além desses fatores, outras variáveis do processo também podem afetar a porosidade resultante no metal de solda.

Quites e Scotti (1984) citam a influência do tipo de junta na porosidade. Segundo eles, quanto mais estreita e profunda for a junta, maior a tendência de retenção dos gases, ou seja, maior a dificuldade dos gases escaparem. De maneira geral juntas com geometria que dificulta o escape dos gases favorecem a ocorrência de porosidade.

Ferraresi, Morais e Lima (2003) comparando cordões de solda com e sem abertura de raiz, verificaram que com abertura de raiz a tendência à retenção de gases é menor, ajudando a minimizar a porosidade.

2.8 Resistência Mecânica x Porosidade

Antes de mais nada, a porosidade pode ser considerada um concentrador de tensões e dessa forma tende a reduzir a resistência mecânica da junta soldada quando esta é submetida a esforços mecânicos como, por exemplo, fadiga.

As microestruturas do metal de solda e da ZTA têm pouca influência sobre a resistência à fadiga de uma solda quando comparadas aos grandes efeitos da geometria da junta e dos defeitos de soldagem. Exames de superfícies de fratura mostraram que as falhas geralmente se iniciam nos defeitos de soldagem como porosidade, inclusão, falta de penetração, entre outros (Pollard e Cover, 1972). Estes mesmos autores afirmam que a sensibilidade aos defeitos de solda aumenta com a resistência do aço, ou seja, quanto maior for a resistência do aço, mais significativos são os efeitos dos defeitos de solda.

De forma geral, tanto as propriedades mecânicas estáticas (resistência à tração, limite de escoamento, etc.) como as cíclicas (resistência à fadiga) são reduzidas em proporção à porcentagem da área da seção transversal ocupada por defeitos. A presença de porosidade traz uma redução na espessura efetiva de uma junta soldada.

De acordo com a AWS (Welding Handbook - Welding Processes, 1991), uma pequena quantidade de porosidade esférica, inferior a 3% em volume e dispersa uniformemente, tem pouca influência na resistência da junta. Entretanto, se em grande quantidade ou distribuída de forma alinhada, pode comprometer a vida útil da junta.

Lindh e Peshak (1969) afirmam que a influência da porosidade nas propriedades estáticas de soldas depende da sensibilidade do material a entalhes e da redução na área da seção transversal do cordão de solda devido à presença da porosidade.

2.9 Técnicas para avaliação de porosidade

2.9.1 Exemplos de técnicas existentes

De maneira geral, o nível de porosidade em uma junta soldada pode ser avaliado por ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos. Dentre os ensaios destrutivos estão a análise micro ou macroscópica e a inspeção por gravimetria. Dentre os ensaios não-destrutivos estão o método radiográfico e o ultra-som.

Neste trabalho, o método de avaliação de porosidade adotado foi o método de análise microscópica. Apesar disso, os métodos de avaliação por gravimetria e radiografia serão brevemente descritos.

A técnica de inspeção por gravimetria baseia-se na quantificação volumétrica da porosidade. Este método estima o percentual de vazios internos no cordão de solda por meio de comparações de valores de densidade do cordão de solda.

A técnica radiográfica por sua vez, permite determinar a localização, a distribuição e o tamanho dos vazios. Trata-se de um método que se baseia na utilização de raios-X e raios gama para revelar a presença de descontinuidades internas do material.

Silva e Scotti (2003) em um estudo de comparação entre o método gravimétrico e o método radiográfico de avaliação de porosidade afirmam que o método gravimétrico é mais preciso e que por isso podem-se conseguir com um menor número de ensaios, resultados mais confiáveis.

2.9.2 Análise microscópica

Trata-se de um ensaio onde seções do cordão de solda são cortadas e, após polimento adequado são examinadas por meio de um microscópio.

O nível de porosidade neste método pode ser expresso em termos de fração de área ou em termos de contagem de poros, dependendo da necessidade específica de cada estudo.

Segundo Saperstein, Prescott e Monroe (1964), esse método é bastante útil para determinar uma distribuição espacial e de tamanho da porosidade, além de ser particularmente bom para detecção de poros pequenos incapazes de serem detectados por raios-X.

2.10 Processo MIG/MAG Robotizado

2.10.1 Definições

O processo de soldagem MIG/MAG consiste na junção de peças metálicas através de um arco elétrico estabelecido entre as peças a serem soldadas e um eletrodo consumível (arame sólido). Nele a proteção gasosa da poça de fusão contra a contaminação atmosférica é feita utilizando-se um gás inerte ou um gás ativo, ou ainda uma mistura deles.

Segundo Dixon (1998), o processo de soldagem MIG/MAG robotizado consiste basicamente de 3 componentes: uma unidade mecânica ou sistema de manipulação, um pacote de soldagem e um sistema de controle. De acordo com esse mesmo autor, serão descritos esses 3 principais componentes:

O sistema de manipulação consiste em uma série de juntas articuladas capazes de se mover em diversas direções. Esses mecanismos são movidos por atuadores que podem ser hidráulicos, pneumáticos ou motores elétricos. A versatilidade desse sistema depende do número de graus de liberdade que o robô pode se mover.

O pacote de soldagem consiste em toda a infra-estrutura que possibilita o processo de soldagem, ou seja, máquina de solda, sistema de limpeza da tocha após a realização de cada

solda, sistema de corte do arame-eletrodo, entre outras facilidades que podem ser introduzidas para se automatizar cada vez mais o processo.

O sistema de controle é um recurso que funciona como interface entre o sistema de manipulação e o pacote de soldagem. Ele é requerido para controlar o posicionamento da solda, ou seja, o movimento do sistema de manipulação e controlar todo o pacote de soldagem. Além disso, funciona como interface para sistemas auxiliares, interface com o operador e proporciona a capacidade de armazenamento de programas de soldagem.

2.10.2 Execução da soldagem

A fim de proporcionar o correto posicionamento do arco elétrico na junta, no caso da soldagem robotizada, uma série de sensores foram desenvolvidos para permitir que o robô ache e siga corretamente a junta a ser soldada. Entre esses sensores estão: sensores de energia acústica, sensores capacitivos, sensores indutivos, sensores de infravermelho e sensores eletromagnéticos.

O processo de soldagem dá-se basicamente da seguinte maneira: inicialmente o robô irá posicionar a tocha sobre o ponto inicial do cordão de solda, em seguida, a máquina de solda irá iniciar seu ciclo ou rotina de operações, isto é, pré-vazão do gás de proteção, início do arco, etc. O controlador (sistema de controle) do robô irá verificar se o arco foi aberto e em caso afirmativo iniciará o movimento de soldagem. Concluído o processo de soldagem, a máquina de solda irá finalizar o programa de soldagem e o robô irá voltar à sua posição original.

Deve-se ressaltar que em alguns processos de soldagem automatizados, além do robô, a mesa de fixação da peça a ser soldada também executa o movimento de soldagem.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo, primeiramente é apresentado o planejamento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, são detalhados todos os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados ao longo da realização dos experimentos. A fim de garantir a perfeita reprodução das condições de produção de eixos automotivos, a confecção dos corpos de prova foi completamente realizada no chão de fábrica, isto é, foram utilizadas as mesmas instalações, os mesmos equipamentos e a mesma seqüência de montagem que os utilizados na fabricação de eixos automotivos em escala industrial.

3.1 Planejamento experimental

Neste trabalho estudou-se a influência de três variáveis na porosidade resultante no cordão de solda de um eixo automotivo. Essas variáveis, denominadas variáveis de influência, são: vazão do gás de proteção, limpeza superficial das juntas, presença de camada de nitretos na extremidade de um dos tubos que compõe a junta. Sendo três variáveis de influência, o planejamento experimental adotado foi o planejamento fatorial. Como para cada variável de influência foram estudados dois níveis, esse planejamento é um planejamento fatorial do tipo 2^3 (Montgomery, 1996).

A figura 3.1 mostra de maneira esquemática todo o planejamento experimental adotado. Observa-se desde a variável de resposta até as variáveis de influência com seus respectivos níveis.

Combinando as variáveis de influência e sendo estudados dois níveis para cada variável, temos oito condições de soldagem estabelecidas. Para cada condição de soldagem foram adotadas três réplicas, ou seja, para cada condição foram soldados três corpos de prova. Sendo oito condições de soldagem estudadas e três réplicas para cada condição de soldagem, no total foram soldados 24 corpos de prova. A partir de cada corpo de prova foram retiradas 3 amostras da seção transversal do cordão de solda, totalizando assim 72 amostras onde foram realizadas medições de porosidade.

A fim de evitar o comprometimento dos resultados obtidos, todas as demais variáveis (tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, tipo de chanfro, composição química dos metais-base e do eletrodo, distância entre bico de contato e peça) foram fixadas, ou seja, foram às mesmas em todas as condições de soldagem estudadas.

Deve-se ressaltar que, para todas as análises estatísticas deste trabalho, foi adotado um erro α de até 5%, ou seja, garantiu-se um grau de confiabilidade de 95% nos resultados obtidos.

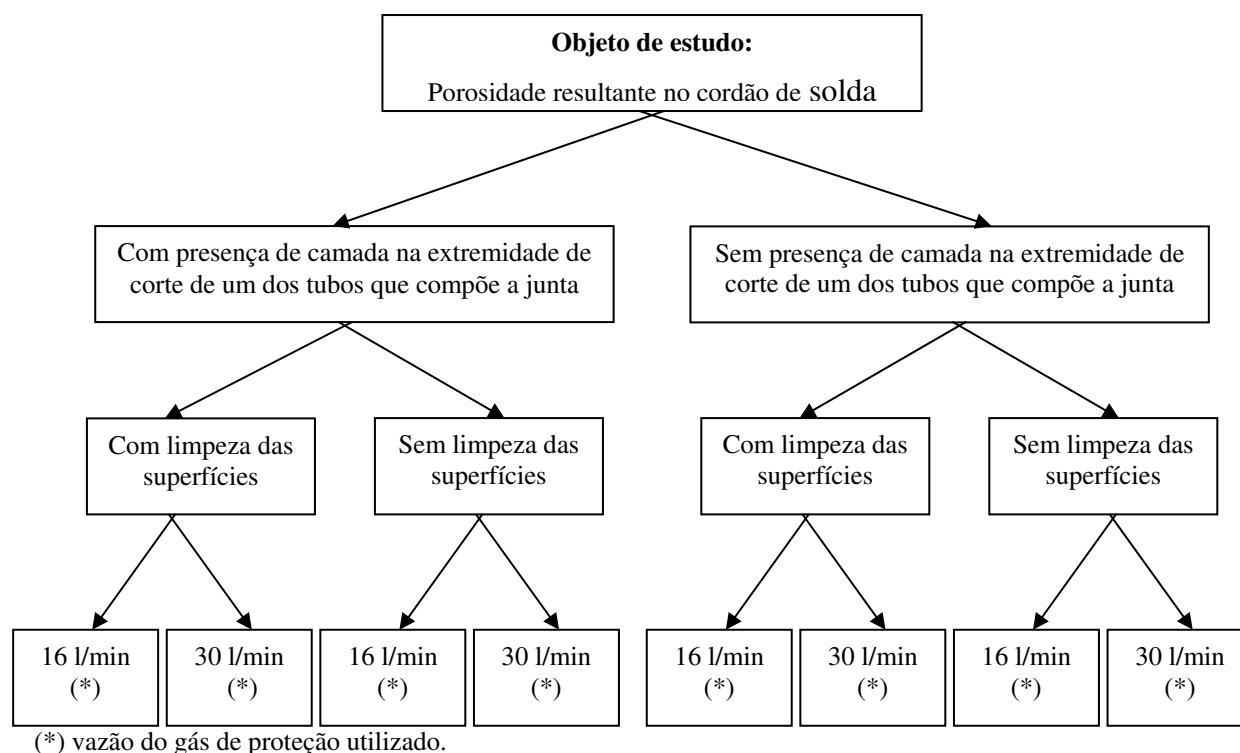


Figura 3.1: Ilustração do planejamento experimental adotado.

Além de ter permitido estudar se as variáveis de influência afetaram a variável de resposta, o uso do planejamento fatorial permitiu verificar se existia ou não interação entre essas variáveis de influência; tudo isso empregando um número reduzido de experimentos. Porém, este planejamento experimental utiliza um modelo estatístico de efeitos fixos, ou seja, os resultados obtidos são válidos apenas para os níveis estudados, não podendo ser transferidos para outros níveis que não os analisados no planejamento (Montgomery, 1996). Tomando como exemplo a variável de influência vazão do gás de proteção, isso quer dizer que os resultados obtidos só podem ser verificados pelas vazões de 16 e 30 l/min. Para o estudo de qualquer outro valor da vazão do gás de proteção, novos ensaios devem ser realizados.

3.2 Materiais

Os cordões de solda analisados foram depositados em uma junta formada entre dois tubos de aço utilizados na fabricação de eixos automotivos.

O metal base 1, também denominado perfil central, trata-se de um tubo com dimensões originais de Ø115 x 2,8 mm. Este tubo foi conformado a frio, posteriormente tratado termicamente e finalmente cortado a plasma, atingindo uma geometria elíptica capaz de abraçar perfeitamente o metal base 2. O metal-base 2, também denominado braço lateral, refere-se a um tubo com dimensões originais de Ø70 x 3,75 mm. Este tubo também foi conformado a frio a fim de garantir o perfeito encaixe com o metal-base 1 e assim formar a junta soldada.

Para a soldagem da junta foi utilizado um arame de metal de adição de 1,2 mm de diâmetro.

A complexa geometria dessa junta pode ser melhor visualizada na figura 3.2.

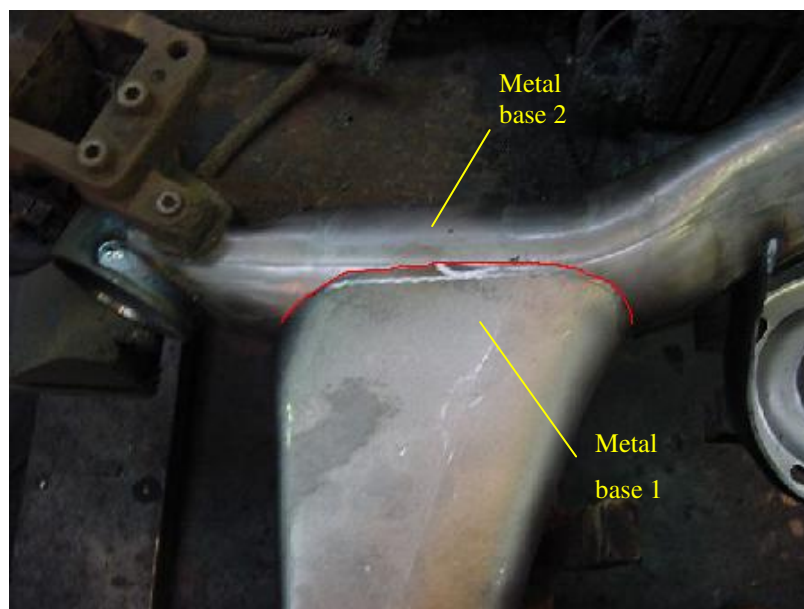


Figura 3.2: Ilustração real da junta, identificando o metal-base 1 e o metal-base 2.

A composição química dos metais-base e metal de adição utilizados é apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Composição química dos metais-base 1 e 2 e metal de adição utilizados.

% em peso	C	Si	Mn	P	S	Al	Mo	Cr	Cu	Ti	B
Metal Base 1	0,28	0,20	1,28	0,020	0,003	0,042	0,17	0,21	0,01	0,037	0,003
Metal Base 2	0,14	0,24	1,32	0,021	0,003	0,049	0,01	Nb: 0,026			
Metal de adição	0,09	0,86	1,40	0,015	0,010	0,001	0,004	0,03	0,025	Ni: 0,01	

Fazendo uma comparação entre as composições químicas dos metais-base 1 e 2 através da tabela 3.1, podemos observar que as diferenças mais relevantes estão no teor de carbono e na quantidade de elementos de liga. O metal-base 1 apresenta o dobro do teor de carbono e uma maior quantidade de elementos de liga que o metal-base 2, como, cromo, titânio, molibdênio, cobre e boro. A maior quantidade de carbono e elementos de liga no metal-base 1 está associada à necessidade de têmpera no processo de fabricação desse material anteriormente ao processo de soldagem.

3.3 Corte a plasma do metal-base 1

Antes do processo de soldagem, o tubo correspondente ao metal-base 1 teve suas extremidades a serem soldadas cortadas por um plasma de ar. A fixação do tubo para o processo de corte se deu através de um dispositivo composto por grampos de acionamento pneumático e uma mesa. Durante o processo, enquanto a peça permaneceu fixa à mesa, o robô realizou o movimento de corte. O ar comprimido utilizado como gás de corte foi fornecido por uma linha de suprimento disponível no próprio chão de fábrica.

O ar comprimido é transformado em plasma através de uma máquina Kjellberg Finsterwalde modelo PA-S25W. Para o fornecimento do plasma e realização do processo de corte, foram utilizados por essa máquina os seguintes parâmetros: uma voltagem de 380 V e uma corrente de 70 A. Outro importante parâmetro desse processo, que é a velocidade de corte, foi fornecido pelo robô. A velocidade utilizada foi de 50 mm/s.

A figura 3.3 mostra a foto da célula do processo de corte a plasma do metal-base1. Nela podem ser vistos todos os equipamentos utilizados.

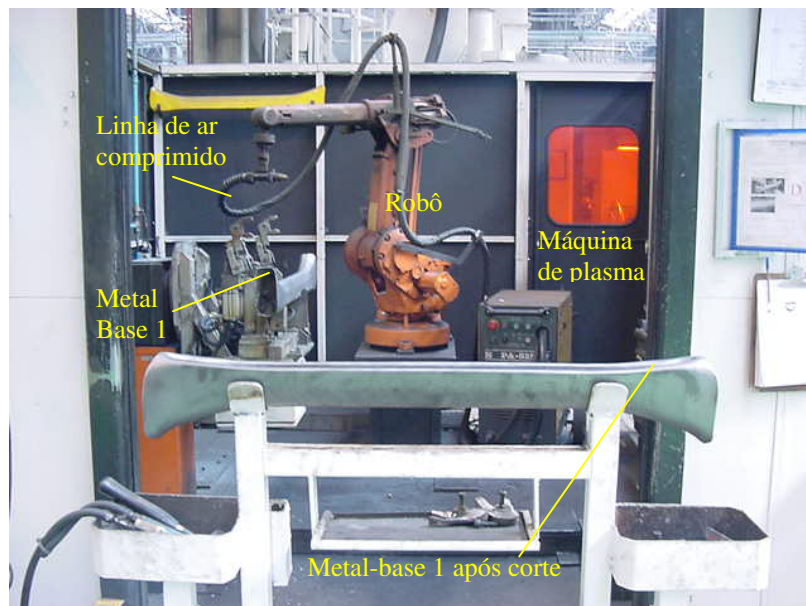


Figura 3.3: Equipamentos utilizados no corte a plasma do metal-base 1.

3.4 Preparação dos corpos de prova em função das variáveis de influencia

A preparação dos corpos de prova para a soldagem variou de acordo com a condição de soldagem à qual estes seriam submetidos. As condições de soldagem, por sua vez, variaram de acordo com as variáveis de influência que estavam sendo estudadas. Tomando como referência a figura 3.1, serão apresentados e descritos a seguir cada passo da preparação dos corpos de prova.

3.4.1 Presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1

O processo de corte a plasma no tubo correspondente ao metal-base 1 traz a formação de uma camada na extremidade desse tubo (extremidade de corte).

Em função da existência dessa camada, nos corpos de prova que seriam soldados sem a presença de camada na extremidade do metal-base 1, foi desenvolvido um procedimento experimental para garantir a remoção dela.

Esse procedimento consistiu nas seguintes fases:

- Preparação das amostras para análise da camada formada.
- Análise, medição e caracterização da camada.
- Remoção da camada para a soldagem dos corpos de prova.
- Teste de eficácia do procedimento de remoção da camada.

Preparação das amostras para análise da camada

Para análise da camada formada após o corte a plasma foram retiradas duas amostras da extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1. As duas amostras retiradas foram: uma normal e uma longitudinal à superfície do tubo. A figura 3.4 ilustra a direção normal e a direção longitudinal em relação à superfície do tubo.



Figura 3.4: Foto da extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 mostrando as direções normal e longitudinal à superfície do tubo.

Para análise metalográfica as amostras foram preparadas até pano de polimento de 1 μ m (diamante) e posteriormente, atacadas com nital 2% para revelação da camada.

Análise, medição e caracterização da camada

Após a revelação da camada nas amostras retiradas, foi realizada a medição e caracterização desta camada.

Para medição da camada foram adquiridas imagens através de uma câmera JVC modelo No. TK-128OU acoplada a um microscópio ótico Neophot 32. O aumento utilizado foi de 32x. A partir das imagens adquiridas e através do software Leica Q500MC foi realizada a medição da camada. Para cada uma das amostras foram realizadas 10 medições.

A caracterização da camada foi realizada através da técnica de difração de raios-X em uma amostra retirada da superfície de corte do tubo. O ensaio de difração de raios-X foi realizado através da utilização do equipamento DMAX 2200 da marca Rigaku Co. O ensaio foi realizado com um tubo de cobre ($\eta_{\text{Cu-K}\alpha} = 1,54\text{\AA}$) e filtro de níquel. Foi utilizada uma tensão de 40KV e corrente elétrica de 20 mA. A faixa de varredura utilizada foi de 20 a 100 (2θ). O passo utilizado foi de 0,1 (2θ) com tempo de 3 segundos.

Remoção da camada para soldagem dos corpos de prova

Para os corpos de prova soldados sem a presença da camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1, esta camada foi removida passando-se manualmente, na extremidade do tubo, um rebolo acoplado a uma pistola de acionamento pneumático. A figura 3.5 mostra o equipamento utilizado para remoção da camada.

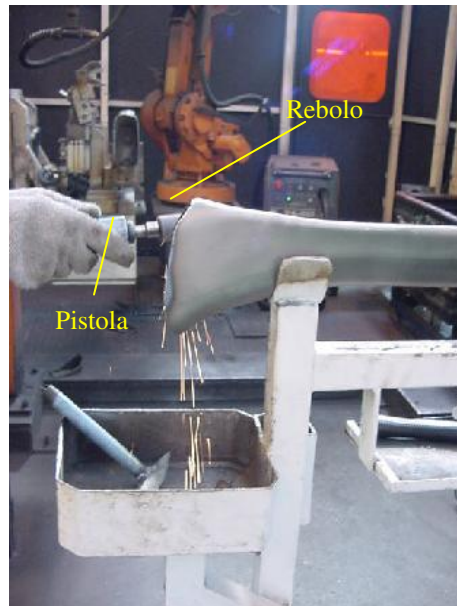


Figura 3.5: Equipamento utilizado para remoção da camada formada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1.

Teste de eficácia do procedimento de remoção da camada

Após o procedimento de remoção da camada, amostras da extremidade do tubo foram retiradas a fim de testar se este procedimento estava sendo eficaz, ou seja, verificar se este procedimento estava realmente garantindo a remoção da camada. As amostras foram retiradas na direção normal à superfície do tubo.

3.4.2 Limpeza das superfícies

Durante o processo de fabricação do eixo, o tubo correspondente ao metal-base 1 e o tubo correspondente ao metal-base 2 acumulam impurezas em suas superfícies antes mesmo do

processo de soldagem. Tais impurezas são inerentes ao próprio processo de produção e podem ser: graxa, óleo, poeira, óxidos, água, entre outras. Como apresentado no item 2.5 da revisão bibliográfica, estas impurezas podem influenciar a porosidade resultante no cordão de solda. Assim, uma das variáveis de influência estudadas foi a condição de limpeza das superfícies a serem soldadas.

Corpos de prova soldados com limpeza das superfícies da junta

Para estes corpos de prova, os componentes da junta (metal-base 1 e metal-base 2) foram limpos de maneira diferente. Essa diferença de limpeza ocorreu em função dos diferentes processos de fabricação aos quais os tubos correspondentes aos metais base 1 e 2 são submetidos antes do processo de soldagem.

O processo de limpeza das superfícies foi realizado imediatamente antes do processo de soldagem dos corpos de prova.

O tubo correspondente ao metal-base 2 (braço lateral) primeiramente foi mergulhado em um tanque contendo desengraxante, e em seguida, passou-se em sua superfície um pano com álcool etílico.

Já o tubo correspondente ao metal-base 1 (perfil central) foi jateado com micro esferas de aço e em seguida também sofreu limpeza superficial com o uso de um pano umedecido com álcool etílico.

Corpos de prova soldados sem limpeza nas superfícies da junta

Para estes corpos de prova, os procedimentos de preparação dos componentes da junta (metal-base 1 e metal-base 2) também foram diferentes.

O tubo correspondente ao metal-base 2 não sofreu qualquer tipo de preparação ou limpeza. Este tubo foi soldado da maneira como veio do processo de fabricação anterior, ou seja, com presença de óleo, graxa ou até mesmo outros tipos de impurezas oriundas de processos de fabricação anteriores.

O tubo correspondente ao metal-base 1 também não sofreu qualquer tipo de limpeza em sua superfície, porém foi submetido a um procedimento usual na produção dos eixos. Foi pulverizado óleo anti-ruído no seu interior. O óleo anti-ruído pulverizado foi o óleo Quietsch-ex, marca Klüber. A pulverização desse óleo é essencial para o bom comportamento do eixo durante o uso. O óleo evita o ruído causado devido ao atrito entre as paredes internas do tubo.

3.4.3 Regulagem da vazão do gás de proteção

A terceira variável de influência estudada foi a vazão do gás de proteção. De acordo com o que foi apresentado no item 2.4.6 da revisão bibliográfica, o gás de proteção pode influenciar a porosidade de diversas maneiras. Uma delas é através da vazão insuficiente do gás de proteção. Uma vazão deficiente pode promover a contaminação da poça de fusão por gases indesejáveis, facilitando assim a formação de poros.

Dessa maneira, duas vazões de gás de proteção foram estudadas, 16 e 30 l/min. A regulagem dessas vazões foi realizada através de um medidor de vazão digital.

Para medição da vazão do gás de proteção, o medidor foi acoplado ao bocal da tocha. Com o acionamento do fluxo do gás de proteção, o gás passa por dentro do medidor que, eletronicamente determina a vazão desse gás.

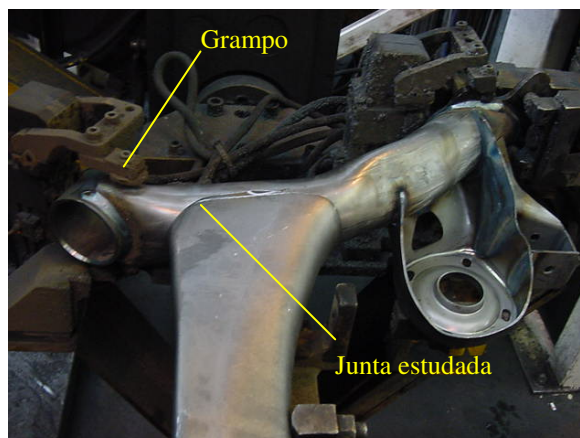
3.5 Soldagem dos corpos de prova

Imediatamente antes do início da soldagem de cada um dos corpos de prova (eixos) foi realizada a fixação deles.

Para fixação dos corpos de prova foi utilizado um dispositivo, marca Thyssen Krupp, composto de uma mesa giratória e grampos com acionamento pneumático, como mostrado na figura 3.6, a e b.



(a)



(b)

Figura 3.6: a) foto do dispositivo de fixação do eixo, b) detalhe da fixação do corpo de prova através de grampos pneumáticos.

Uma vez fixados, os corpos de prova foram soldados pelo processo MIG/MAG robotizado. Para soldagem dos corpos de prova foi utilizada uma máquina de solda Fronius TransPulsSynergic 5000 conectada a um robô ABB IRB 1400. A foto do robô de soldagem é mostrada na figura 3.7. Este robô tem acoplado a seu braço, a tocha utilizada na soldagem dos corpos de prova.

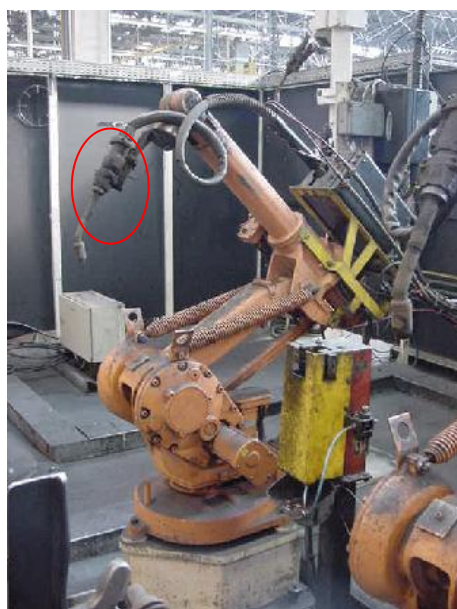


Figura 3.7: Robô de soldagem, com a tocha de soldagem em destaque.

Durante a soldagem dos corpos de prova, tanto a mesa onde o eixo está fixado como o robô de soldagem movimentaram-se, ou seja, existiu um movimento relativo entre eles.

Como gás de proteção, no processo de soldagem dos corpos de prova, foi utilizada uma mistura Ar-13%CO₂.

Durante a soldagem dos corpos de prova preliminares foi realizado o monitoramento da tensão e corrente do arco através de um sistema computadorizado composto de uma placa A/D e do software MIG/MAG, ligado à saída analógica da máquina de solda. A obtenção de dados relativos à velocidade de soldagem empregada no processo foi extraída diretamente de um programa instalado no próprio robô de soldagem.

Para soldagem dos corpos de prova definitivos foram utilizados os mesmos parâmetros de soldagem que foram utilizados para a soldagem dos corpos de prova preliminares. Os valores utilizados para os parâmetros de soldagem tanto nos ensaios preliminares quanto nos definitivos são apresentados nesta dissertação no capítulo de resultados. Os valores da tensão do arco e da corrente de soldagem são apresentados no item 4.1.1. Já os valores de velocidade de soldagem, estes são apresentados na tabela 4.1, item 4.1.2. Com relação à distância entre o bico de contato e a peça (DBCP), foi utilizado o valor de 20 mm.

3.6 Retirada e preparação das amostras

Nos ensaios preliminares, para análise de porosidade, os corpos de prova tiveram seus cordões de solda divididos em 4 regiões (vide tabela 4.1). Assim, a partir de cada região do cordão foram retiradas de maneira aleatória três seções transversais, totalizando assim 12 seções por cordão de solda.

Conforme a norma AWS A5.20-95, para retirada das amostras, foi desprezado 25,4 mm de comprimento de cordão no início e no final de cada cordão de solda.

Nos corpos de prova definitivos, todas as amostras para análise de porosidade foram retiradas a partir de uma região específica do cordão de solda. Esta região foi determinada a partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares e foi denominada região crítica do cordão de solda. Em cada corpo de prova foram retiradas dessa região três seções transversais.

Para retirada das seções, tanto nos ensaios definitivos como nos preliminares, foi utilizada uma serra de fita Ronemak AC-300.

Em seguida, as amostras foram embutidas e preparadas metalograficamente até pano de 1µm para medição da porosidade. Já preparadas, as amostras foram atacadas com nital 2% por aproximadamente 20 s para revelar, nitidamente, a zona fundida da junta soldada e assim garantir que a contagem dos poros ocorresse somente nessa região.

3.7 Medição de porosidade

As amostras preparadas metalograficamente foram atacadas quimicamente e imediatamente analisadas a fim de evitar que as mesmas sofressem oxidação (corrosão) excessiva, e assim comprometessem a precisão dos resultados.

O nível de porosidade foi medido em termos de quantidade de poros por amostra, ou seja, número de poros por seção transversal analisada. Para medição da porosidade foi feita uma varredura completa das seções transversais dos cordões de solda. Para isso foi utilizado um microscópio ótico Olympus BX60M, com aumentos de 100x e 200x. O aumento de 100x foi utilizado para varredura das seções ou amostras, e o aumento de 200x para medição dos poros. Para identificação ou determinação dos defeitos como porosidade, foram utilizados ambos aumentos. Quando com esses aumentos a identificação não era inteiramente confiável, o aumento de 500x foi utilizado.

Durante a análise de porosidade foram contados somente poros maiores que 25 µm. Segundo a norma AWS A5.20-95, o tamanho de um poro é determinado pela sua maior dimensão, incluindo qualquer prolongamento que apresente. A justificativa de se quantificar apenas os poros maiores que 25 µm se deve ao fato de que após análises preliminares observou-se que abaixo de 25 µm praticamente não havia poros e sim uma pequena quantidade de crateras e óxidos resultantes de corrosão em pontos preferenciais da matriz após o ataque químico. A maioria dos óxidos crateras tinham dimensão inferior a 25 µm e dificultavam a análise e identificação da porosidade. Além disso, de acordo com a AWS (Welding Handbook-Welding Process, 1991), poros pequenos em pequenas quantidades e distribuídos de maneira dispersa não comprometem a resistência da junta. Assim, a fim de garantir uma maior precisão dos resultados,

evitando assim contagem errônea de óxidos como poros, foi adotado como tamanho mínimo a ser analisado, 25 μ m.

Capítulo 4

Resultados e discussões preliminares

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos ensaios preliminares, bem como a discussão destes resultados. Apresenta desde os resultados obtidos através do monitoramento dos parâmetros de soldagem empregados durante a soldagem dos corpos de prova, até os resultados obtidos com a caracterização e medição da camada formada após o processo de corte a plasma nas extremidades do tubo correspondente ao metal-base 1. Esses resultados são apresentados de forma clara e são imprescindíveis para o perfeito entendimento do procedimento experimental utilizado na realização dos ensaios definitivos.

4.1 Monitoramento dos parâmetros de soldagem

Este tópico apresenta os resultados obtidos no monitoramento da tensão, da corrente e da velocidade de soldagem durante a execução dos cordões de solda.

Por se tratar de um processo robotizado de soldagem de eixos automotivos produzidos em escala industrial, os parâmetros de soldagem já estavam previamente estabelecidos e otimizados. Dessa maneira, esses parâmetros não fazem parte das variáveis de influência estudadas neste trabalho.

Todavia, sabendo que estes parâmetros estão diretamente relacionados com a ocorrência de poros em juntas soldadas (Warren e Strout, 1952; Woods, 1974 e Saperstein, Prescott e Monroe, 1964), buscou-se inicialmente verificar de que maneira esses parâmetros de soldagem poderiam estar relacionados com a maior ou menor incidência de poros ao longo do cordão de solda.

Como apresentado no item 3.5 desta dissertação, os parâmetros de soldagem, corrente e tensão do arco, foram monitorados através de um sistema computadorizado composto de uma placa A/D e do software MIG/MAG, ligado à saída analógica da máquina de solda.

Após o monitoramento da tensão do arco, constatou-se que este parâmetro apresentou um comportamento uniforme durante a execução dos cordões de solda. Esse fato pode ser melhor compreendido através do gráfico representativo do comportamento da tensão do arco apresentado na figura 4.1. Nele pode-se observar que a tensão do arco permaneceu concentrada na faixa de 22 a 38 V.

Através do próprio software de monitoramento pôde-se determinar a tensão média empregada durante o processo de soldagem. O valor médio apresentado por este parâmetro foi de 29 V.

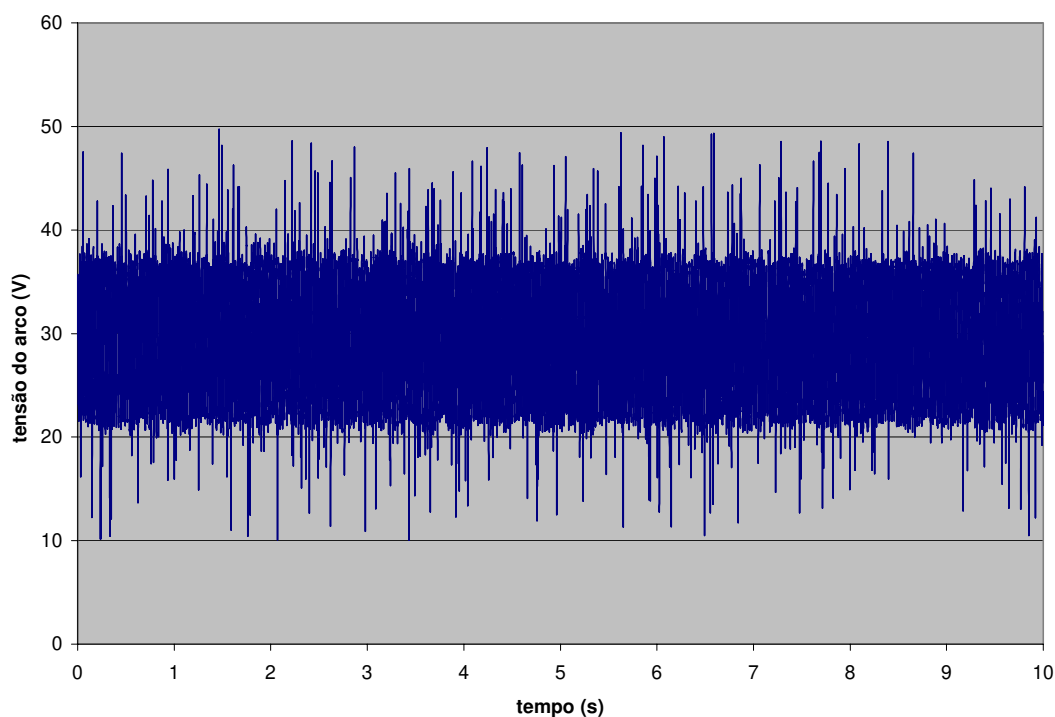


Figura 4.1: Gráfico representativo do comportamento da tensão do arco durante a execução dos cordões de solda preliminares.

A corrente de soldagem também se apresentou uniforme durante a execução dos cordões de solda. Observando a figura 4.2 que mostra um gráfico representativo do comportamento da corrente de soldagem, pode-se constatar que a corrente de soldagem permaneceu concentrada na faixa de 240 a 285 A.

O valor médio da corrente de soldagem também foi obtido através do próprio software de monitoramento. Durante a execução do cordão de solda a corrente de soldagem média foi de 265A.

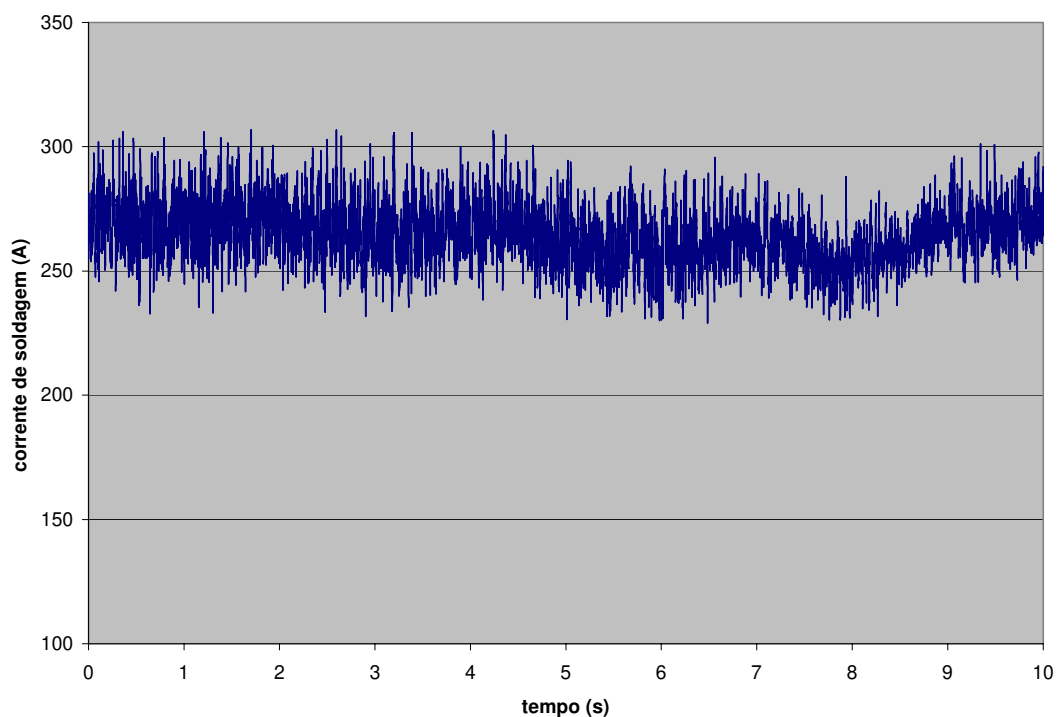


Figura 4.2: Gráfico representativo do comportamento da corrente de soldagem durante a execução dos cordões de solda preliminares.

Dados relativos à velocidade de soldagem foram adquiridos diretamente de um programa instalado no próprio robô de soldagem. Durante a execução dos cordões de solda, a velocidade de soldagem não permaneceu constante. Este parâmetro apresentou 4 valores distintos que vão de 9 a 15 mm/s. Os valores empregados para a velocidade de soldagem são apresentados na tabela 4.1.

4.2 Divisão do cordão de solda em regiões

A fim de identificar a região do cordão de solda com maior incidência de porosidade, decidiu-se dividir o cordão em regiões. Isso porque dessa maneira os resultados de porosidade de cada uma dessas regiões poderiam ser confrontados e a partir daí a região mais crítica com relação à porosidade poderia ser estabelecida.

Após o monitoramento dos parâmetros de soldagem, constatou-se que a tensão do arco e a corrente de soldagem permaneceram uniformes e que a velocidade de soldagem foi o único parâmetro que sofreu variações significativas durante a execução dos cordões de solda.

Dessa maneira, decidiu-se que as regiões do cordão de solda seriam definidas de acordo com a variação da velocidade de soldagem.

Assim, em função da velocidade de soldagem, os cordões de solda foram divididos em 4 regiões ou quadrantes. Estas regiões são mostradas esquematicamente na figura 4.3 e na tabela 4.1.

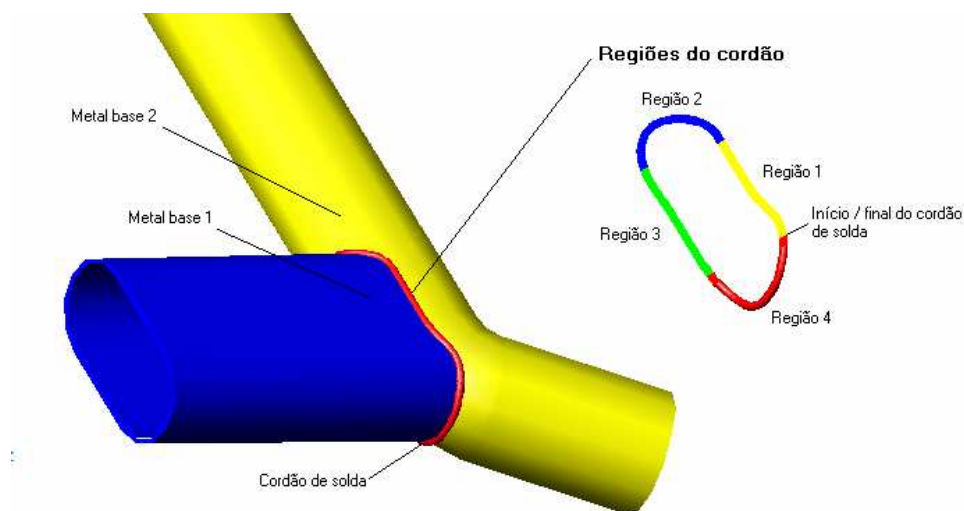


Figura 4.3: Ilustração do cordão de solda dividido em regiões.

A tabela 4.1 apresenta as 4 regiões nas quais os cordões de solda foram divididos. Além disso, apresenta também o comprimento de cada uma das regiões e as velocidades de soldagem empregadas em cada uma delas.

Tabela 4.1: Delimitação das regiões do cordão de solda e respectivas velocidades de soldagem empregadas.

Velocidade de soldagem (mm/s)	Trecho do cordão de solda (mm) ⁽¹⁾	Comprimento da região (mm)	Região
15	0 a 111	111	1
09	111 a 143	32	2
12	143 a 218	75	
10	218 a 232	14	
15	232 a 339	107	3
09	339 a 446	107	4

(1) contado a partir do início do cordão de solda (vide figura 4.3).

(2) comprimento total da região 2, englobando três trechos do cordão.

Como pode ser observado na tabela 4.1, a região 2 (vide figura 4.3) apresentou três valores distintos de velocidade de soldagem. Além disso, pode-se observar também através da tabela 4.1 que dois destes trechos apresentam comprimento bastante reduzido. Trechos muito pequenos dificultariam a retirada de amostras e reduziriam a confiabilidade de que essas amostras estariam realmente sendo retiradas das regiões devidas. Dessa maneira, decidiu-se que a região 2 englobaria três valores distintos de velocidade de soldagem, o primeiro com 9, o segundo com 12 e o terceiro com 10 mm/s). Isso fez da região 2, a única região com variação interna de velocidade de soldagem.

Ainda através da tabela 4.1, pode-se observar que as regiões 1 e 3 apresentam o mesmo valor de velocidade de soldagem. Contudo, através da figura 4.3 pode-se verificar que em relação à geometria do cordão estas regiões são opostas.

4.3 Medição de porosidade e definição da região crítica

Como apresentado no item 3.6 desta dissertação, para os ensaios preliminares foram confeccionados três cordões de solda. Após a divisão de cada um dos três cordões de solda em 4 regiões, foi realizada a medição de porosidade.

Para cada região de cada cordão de solda, foram analisadas três seções transversais. Os resultados apresentados na tabela 4.2 são a média do número de poros encontrados nestas três seções e o número total de poros encontrados por região.

Para realização dos ensaios preliminares foi utilizado um planejamento experimental por níveis, completo, aleatorizado por blocos, de acordo com Montgomery (1996). O uso desse planejamento permitiu analisar a variação dos resultados entre as regiões do cordão de solda sem que eventuais variações entre os próprios corpos de prova comprometessem os resultados.

Tabela 4.2: Média do número de poros por região dos cordões de solda.

	Cordão 1	Cordão 2	Cordão 3	Total
Região 1	1	2	0,67	11
Região 2	2	3,33	2,67	24
Região 3	0,33	1,67	1,33	10
Região 4	1,33	1,33	1	11

Pode-se constatar na tabela 4.2, que não só no total, mas também em todos os cordões de solda, a região 2 foi a região em que houve maior incidência de porosidade. As demais regiões apresentaram valores de porosidade iguais ou bem próximos entre si. A diferença dos valores de porosidade entre os próprios cordões de solda, apesar de elevada, teve sua influência sobre os resultados eliminada através do planejamento experimental adotado. Isso porque esse planejamento tem como princípio bloquear a influência de uma fonte de variabilidade não desejada. Neste caso a fonte de variabilidade bloqueada foi o cordão de solda, ou seja, a diferença de porosidade entre os cordões de solda não teve sua influência considerada.

Para determinar cientificamente, a partir do planejamento experimental adotado, se existe variação na incidência de poros entre as regiões e se existe uma região com maior incidência de poros, considerou-se como critério de análise um erro α de 5%, ou seja, os resultados obtidos garantem uma confiabilidade de 95%.

A partir dos resultados apresentados na tabela 4.2 e utilizando o modelo estatístico do planejamento experimental adotado, conforme Montgomery (1996), foi construída a tabela 4.3. Esta tabela demonstra mais claramente se existe variação na incidência de poros entre as regiões

do cordão de solda. Se F_0 for menor que F_α , então não existe variação na incidência de poros entre as regiões. Por outro lado, se F_0 for maior que F_α , então existe variações na incidência de poros entre as regiões. A partir desta tabela pode-se comprovar também a existência de uma determinada região com maior incidência de poros. O teste para verificar a existência dessa região se baseia na técnica de contrastes (Montgomery, 1996) e segue o mesmo critério do teste utilizado para verificar se existe variação na incidência de poros entre as regiões, ou seja, se F_0 for menor que F_α , não podemos dizer que a região apresenta maior incidência de poros que as demais, se for maior, podemos afirmar cientificamente que a região apresenta maior incidência de poros que as demais.

Tabela 4.3: Avaliação da incidência de porosidade ao longo do cordão.

Estudo	F_0	F_α	Resultado
Existe variação na incidência de poros entre regiões?	9,03	4,76	Sim
A região 2 apresenta mais porosidade que as demais?	17,0	5,99	Sim

Através dos resultados apresentados na tabela 4.3 pode-se afirmar estatisticamente com um grau de confiança de 95% que existe diferença no número de poros entre as regiões e que a região 2 é a região do cordão de solda com maior incidência de porosidade.

4.4 Relação entre velocidade de soldagem e porosidade

Estudando o efeito da velocidade de soldagem sobre a incidência de poros, pode-se dizer que o maior número de poros na região 2 poderia ser explicado pelas baixas velocidades de soldagem aplicadas (vide tabela 4.4). Isso estaria de acordo com Woods (1974) quando a velocidade de soldagem é analisada isoladamente, sem levar em consideração a energia nominal de soldagem. Woods (1974) afirma que com a utilização de velocidades de soldagem maiores reduz-se o tempo disponível para a absorção de gases pela poça de fusão. Com menor absorção de gases, menor a tendência de formação de bolhas de gás que poderiam ser aprisionadas pela frente de solidificação levando à formação de poros. Entretanto, os resultados obtidos contradizem a afirmação de Woods, uma vez que a região 4 apresentou o mais baixo valor de

velocidade de soldagem, 9 mm/s, em toda a sua extensão e mesmo assim não se destacou como uma das regiões críticas.

Apesar da velocidade de soldagem ser o único parâmetro de soldagem que teve sua influência sobre a incidência de poros estudada, o efeito mútuo da corrente de soldagem e da tensão do arco com a velocidade de soldagem também é discutido. Estes três parâmetros de soldagem analisados conjuntamente levam à introdução de um novo termo, a energia nominal de soldagem, que está diretamente relacionada com a taxa de solidificação do metal de solda e consequentemente, com a ocorrência de poros no cordão de solda. A tabela 4.4 apresenta os valores de velocidade de soldagem empregados em cada região do cordão de solda, bem como os respectivos valores de energia nominal de soldagem nessas regiões. Os valores de energia nominal de soldagem foram encontrados considerando os valores médios de tensão e corrente de soldagem que são 29 V e 265 A, respectivamente.

Tabela 4.4: Velocidade de soldagem e energia nominal de soldagem por região do cordão de solda.

Região	Trecho do cordão de solda (mm)	Velocidade de soldagem (mm/s)	Energia nominal de soldagem (J/mm)
1	0 a 111	15	512
2	111 a 143	09	854
	143 a 218	12	640
	218 a 232	10	769
3	232 a 339	15	512
4	339 a 446	09	854

Analisando do ponto de vista da energia nominal de soldagem, de acordo com Saperstein, Prescott e Monroe (1964) e Ramirez, Han e Liu (1994), para uma dada tensão e corrente do arco, quanto menor a velocidade de soldagem, maior é essa energia, e consequentemente menor é a taxa de solidificação do metal de solda, ou seja, maior é o tempo disponível para as bolhas de gás escaparem para a atmosfera, evitando assim a formação de poros. Contrariando essa teoria, a região 2 foi a que desenvolveu o maior número de poros e mesmo assim apresentava valores de energia nominal de soldagem maiores que as regiões 1 e 3.

Dessa maneira, analisando os resultados de porosidade obtidos e relacionando-os aos valores de velocidade de soldagem empregados durante a soldagem dos corpos de prova

preliminares, não se pôde constatar interferência desse parâmetro de soldagem na ocorrência de poros no cordão de solda.

Dentre os parâmetros de soldagem analisados, sendo a velocidade de soldagem o único parâmetro que sofreu variações durante a execução do cordão de solda, este seria o único parâmetro de soldagem que neste estudo poderia justificar a diferença entre a incidência de poros ao longo do cordão de solda.

Da mesma maneira, a variação na incidência de poros ao longo do cordão de solda, ou seja, a existência de uma região com maior concentração de porosidade não pode ser justificada pelos demais parâmetros de soldagem (corrente e tensão do arco), uma vez que estes dois parâmetros foram praticamente constantes durante a execução do cordão de solda todo.

Assim, pôde-se concluir que de maneira geral, os parâmetros de soldagem estudados não apresentavam uma influência significativa na incidência de poros ao longo do cordão de solda e dessa maneira, a maior incidência de poros em uma determinada região do cordão deve estar relacionada a outros fatores. Isso reforçou ainda mais a necessidade de se estudar o efeito das variáveis de influência adotadas (vazão do gás de proteção, limpeza superficial das juntas, presença de camada na extremidade de um dos tubos que compõe a junta) na ocorrência de poros nessa região específica do cordão de solda.

4.5 Caracterização, medição e remoção da camada formada após o processo de corte a plasma

Como foi mencionado, uma das variáveis de influência estudadas foi a presença de uma camada na extremidade de um dos tubos que compõe a junta, camada esta que é resultante do processo de corte a plasma empregado na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1. Este tópico apresenta a caracterização dessa camada e a quantidade de material que deveria ser removida da extremidade do tubo para o caso dos corpos de prova que seriam soldados sem a presença dela.

4.5.1 Caracterização da camada

A fim de caracterizar essa camada, primeiramente, foi realizada uma análise metalográfica na extremidade do tubo cortado. Após essa análise, observou-se que ao ser cortado por um plasma de ar, o tubo passou a apresentar nas extremidades do corte uma camada distinta do metal-base original.

Esta camada corresponde à região que foi fundida com o calor imposto pelo corte a plasma, mas que se solidificou rapidamente e permaneceu aderida à extremidade do tubo. A presença dessa camada na extremidade do tubo cortado pode ser observada através da figura 4.4.

Pôde-se constatar também através da análise metalográfica que essa camada se estende ao longo de toda a extremidade do tubo cortado.

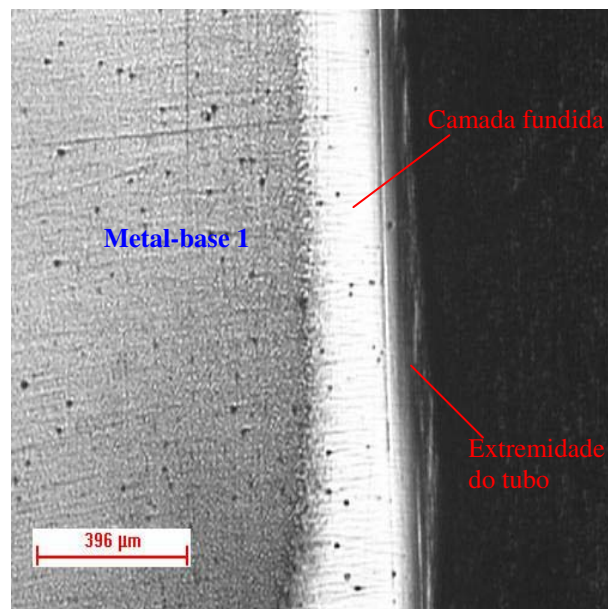


Figura 4.4: Imagem da extremidade do tubo cortado onde pode-se constatar a formação da camada fundida.

Além da análise metalográfica, a fim de caracterizar a camada e determinar quais eram as fases que se formavam na extremidade do tubo após o processo de corte a plasma, foi realizado o ensaio de difração de raios-X.

Engblom (1988) afirmava que após o processo de corte a plasma em um aço, com a utilização de um gás de plasma contendo nitrogênio em sua composição, surgia na superfície de corte uma fina camada rica em nitretos. Apesar desse autor determinar qual era o conteúdo de nitrogênio a várias distâncias da face de corte e comprovar assim a ocorrência do enriquecimento de nitrogênio nessa face, não foi relatada nenhuma caracterização para evidenciar a formação de nitretos e determinar a natureza dos nitretos formados. Dessa maneira, a fim de evidenciar a formação de nitretos e determinar a natureza dos nitretos formados na superfície de corte, foi realizado neste trabalho o ensaio de difração de raios-X nesta superfície.

A figura 4.5 apresenta o difratograma obtido após a realização do ensaio de difração de raios-X na superfície de corte do tubo.

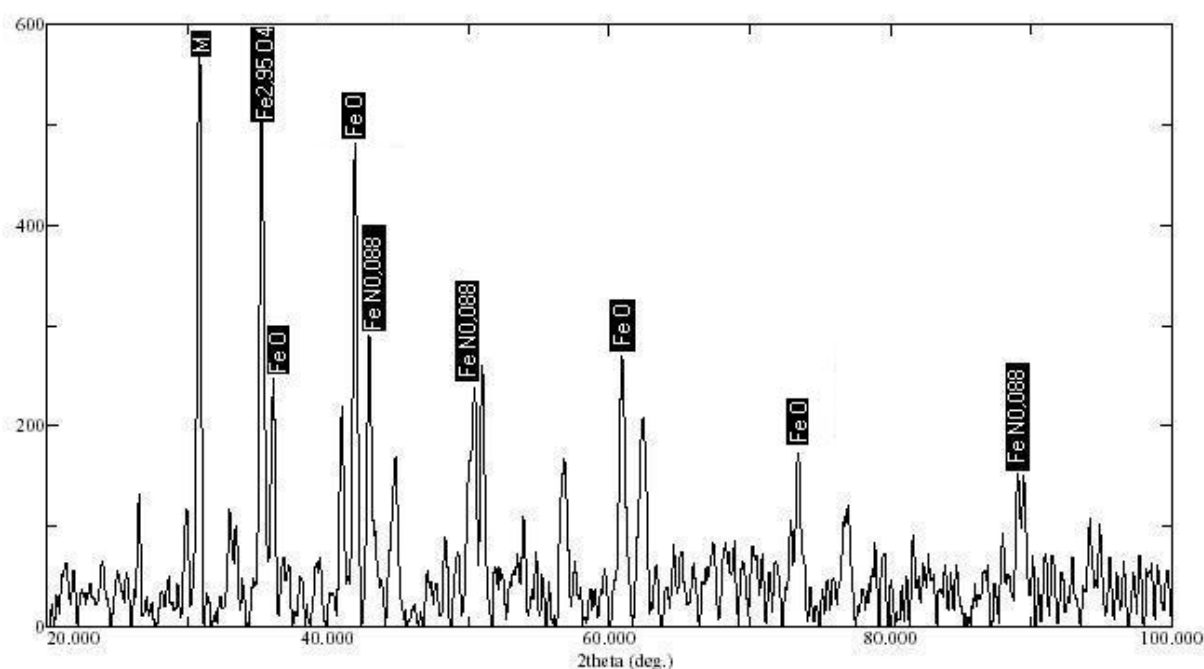


Figura 4.5: Difratograma correspondente à superfície cortada por plasma de ar comprimido.

Através da figura 4.5 pode-se constatar a presença das seguintes estruturas na superfície analisada: dois tipos distintos de óxido de ferro (FeO e $\text{Fe}_{2,95}\text{O}_4$), nitreto de ferro ($\text{FeN}_{0,088}$) e uma estrutura "M". Outras estruturas como o nitreto de manganês, por exemplo, também podem ter sido formadas, porém como para o ensaio de difração de raios-X o teor de Mn no aço estudado

que é de 1,28% pode ser considerado relativamente baixo, a presença dessa estrutura não pôde ser confirmada. Isso porque caso tenha sido formada, a fase “nitreto de manganês” deve se apresentar com uma baixa concentração na camada fundida e dessa maneira, o equipamento de difração de raios-X se torna incapaz de fazer sua medida com exatidão.

A estrutura identificada pela letra “M” corresponde ao substrato utilizado para fixação da amostra no aparato de ensaio. Dessa maneira, a presença dessa estrutura na superfície analisada deve ser desprezada.

A presença de óxido de ferro na superfície analisada já era esperada, uma vez que para evitar a remoção da camada formada na superfície de corte, não foi realizado nenhum tratamento de polimento nessa superfície antes da realização do ensaio de difração de raios-X. Apenas uma limpeza à base de álcool etílico foi realizada na superfície de corte para remoção das impurezas que poderiam estar presentes.

A presença de nitreto de ferro na camada fundida comprovou a afirmação de Engblom (1988) de formação de uma camada rica em nitretos na superfície de corte de um aço cortado com plasma de um gás que contém nitrogênio em sua composição. A formação de nitreto de ferro na superfície de corte provavelmente se deve a reação entre o ferro do aço com o nitrogênio presente no gás de plasma.

Os anexos 1, 2 e 3 trazem respectivamente as cartas correspondentes às estruturas $\text{Fe}_{2,95}\text{O}_4$, $\text{FeN}_{0,088}$ e FeO para efeito de comparação com o difratograma obtido após a realização do ensaio de difração de raios-X.

4.5.2 Medição e remoção da camada

Através das imagens adquiridas com a análise metalográfica realizada anteriormente na superfície de corte do tubo (figura 4.4), foi realizada a medição da camada fundida. A tabela 4.5 apresenta os resultados obtidos através da medição da largura dessa camada. Conforme mencionado no tópico “Análise, medição e caracterização da camada” apresentado no item 3.4.1 desta dissertação, para medição da camada fundida foram utilizadas 2 amostras. Em cada uma dessas amostras foram realizadas 10 medições da largura da camada.

Tabela 4.5: Largura da camada fundida.

Amostra	Largura da camada fundida (μm)		
	Mínima	Máxima	Média
Amostra 1	262,7	323,0	285,6
Amostra 2	237,4	291,3	262,2

Não foi aplicado nenhum tratamento estatístico nos dados recolhidos através da medição dessa camada, uma vez que, o importante não era se saber exatamente a largura da camada, e sim, ter uma idéia de sua dimensão para que assim pudesse ser desenvolvido um procedimento experimental de remoção dessa camada nos corpos de prova a serem soldados sem a presença dela.

Analisando a tabela 4.5 verificamos que a largura da região fundida variou de 237,4 a 323,0 μm . Desse modo, constatou-se que uma remoção da ordem de 1 mm nas extremidades do tubo já seria suficiente para completa remoção da camada formada após o corte a plasma. Foi desenvolvido então um procedimento de remoção dessa camada utilizando equipamentos já disponíveis na própria linha de produção dos eixos automotivos. Este procedimento foi descrito no tópico 3.4.1 dessa dissertação.

A fim de testar se o procedimento desenvolvido para remover a camada estava sendo eficaz, foram recolhidas amostras da superfície de corte a plasma após o procedimento de remoção da camada. Após análise e aquisição de imagens feitas a partir dessas amostras, observou-se que este procedimento estava sendo além de prático, também eficaz, e que poderia ser perfeitamente utilizado para realização dos experimentos definitivos. A eficácia do procedimento desenvolvido pode ser constatada comparando as figuras 4.4 e 4.6. A figura 4.6 apresenta uma imagem da extremidade do tubo cortado após a remoção das camadas. Através desta figura pode-se constatar que a camada fundida originada após o corte a plasma foi realmente removida.

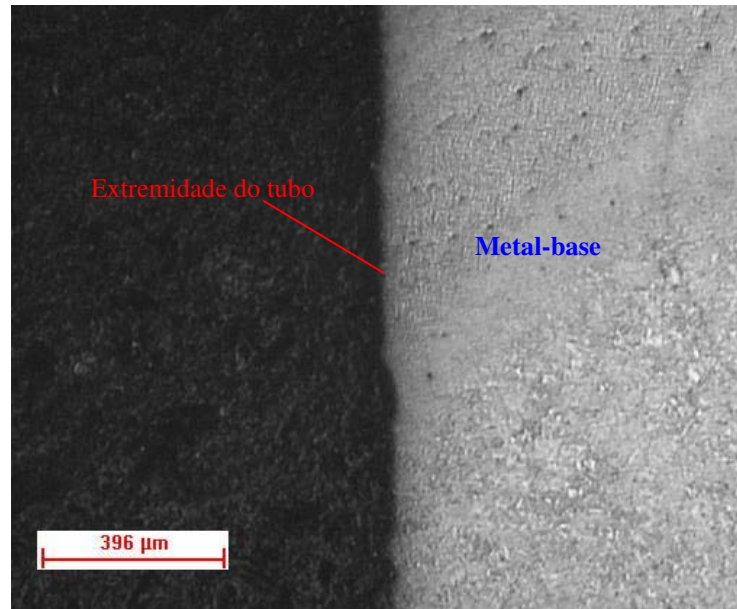


Figura 4.6: Imagem da extremidade do tubo cortado após remoção da camada.

4.6 Contribuição dos ensaios preliminares

Após análise dos resultados obtidos nos ensaios preliminares, constatou-se, entre outras coisas, a presença de uma região no cordão de solda onde a incidência de poros era significativamente maior. Essa região era a região 2 do cordão de solda (vide figura 4.3), que por isso, passou a ser denominada região crítica. Nos ensaios definitivos, todas as amostras para análise de porosidade foram retiradas a partir da região crítica do cordão de solda. Como foi mencionado no item 3.6, a partir de cada corpo de prova foram retiradas, dessa região, três seções transversais.

Os ensaios preliminares permitiram também caracterizar e medir a camada formada após o processo de corte a plasma na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1. Através da caracterização dessa camada, pôde-se evidenciar a formação de nitretos devido ao corte a plasma com ar. Já através da medição da camada, pôde ser desenvolvido um procedimento experimental eficiente para remoção dessa camada nos corpos de prova a serem soldados sem sua presença.

Capítulo 5

Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados com a realização dos ensaios definitivos. Os resultados definitivos foram os resultados obtidos através da medição de porosidade nas amostras pertencentes a cada condição de soldagem estudada. As condições de soldagem estudadas neste trabalho variaram de acordo com as variáveis de influência, e assim permitiram estudar o efeito de cada uma delas na porosidade resultante no cordão de solda. As variáveis de influência estudadas foram: a presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1, a limpeza superficial das juntas e a vazão do gás de proteção.

Medição de Porosidade e análise das variáveis de influência

Após a soldagem dos corpos de prova definitivos foi realizada a análise e medição da porosidade. De acordo com os resultados obtidos nos ensaios preliminares, a análise e medição de porosidade deveria ocorrer somente na região crítica do cordão de solda. Esta região corresponde à região 2 apresentada na figura 4.3. Dessa maneira, os cordões de solda confeccionados foram seccionados e amostras transversais da região crítica desses cordões foram analisadas.

Os resultados definitivos, que foram os obtidos através da medição da porosidade nas amostras recolhidas, serão apresentados de duas maneiras distintas. O primeiro modo apresenta os resultados de porosidade de forma geral, sem qualquer restrição quanto à dimensão ou localização dos poros na seção transversal do cordão de solda. Já o segundo, apresenta os

resultados de porosidade em função da localização dos poros na seção transversal dos cordões de solda analisados. Deve-se ressaltar que para os dois modos, os resultados obtidos são discutidos em função do efeito de cada uma das três variáveis de influência estudadas e da interação entre elas na ocorrência de porosidade.

Conforme foi mencionado no item 3.1, neste trabalho foram estudadas 8 condições de soldagem distintas. Cada condição de soldagem corresponde a uma combinação das variáveis de influência. Como para cada condição de soldagem foram soldados 3 corpos de prova, no total foram confeccionados 24 cordões de solda. A partir de cada cordão de solda foram retiradas, da região crítica, três amostras da seção transversal do cordão.

Cada uma das três seções transversais dos 24 cordões de solda foram analisadas, totalizando assim em 72 análises de porosidade.

A porosidade foi quantificada e para análise dos resultados foi utilizado o modelo estatístico do planejamento experimental adotado (planejamento fatorial 2^3), conforme Montgomery (1996). Para avaliar se uma determinada variável de influência afeta a porosidade resultante no cordão de solda, e verificar se existe interação entre as variáveis de influência estudadas, considerou-se como critério de análise um erro α de 5%, ou seja, os resultados obtidos garantem uma confiabilidade de 95%.

5.1 Primeiro Modo: Quantificação da porosidade encontrada, sem qualquer restrição quanto à localização dos poros

Após a análise das 72 seções transversais, primeiramente, a porosidade foi quantificada sem levar em consideração a localização dos poros na seção transversal do cordão de solda. A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos através desta quantificação. Os valores apresentados nesta tabela se referem à somatória dos poros encontrados nas três seções transversais de cada cordão de solda confeccionado, em função das variáveis de influência estudadas (presença de camada, limpeza das superfícies e vazão do gás de proteção). Em seguida é apresentada a somatória desses valores que corresponde ao total de poros encontrados para cada condição de soldagem estudada.

Tabela 5.1: Quantificação da porosidade sem qualquer restrição quanto à localização dos poros.

Presença de camada		Limpeza das superfícies											
		Sem limpeza						Com limpeza					
		Vazão do gás de proteção						Vazão do gás de proteção					
		16 l/min			30 l/min			16 l/min			30 l/min		
Com camada	Cada cordão	9	8	9	9	6	8	7	6	8	6	6	5
	Total	26			23			21			17		
Sem camada	Cada cordão	1	3	4	1	0	4	1	3	5	1	2	1
	Total	8			5			9			4		

A partir dos resultados apresentados na tabela 5.1, pode-se fazer as seguintes constatações:

- Os corpos de prova soldados sem presença da camada fundida na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 apresentaram uma quantidade menor de poros que os corpos de prova soldados com a camada, independentemente da limpeza das superfícies e da vazão do gás de proteção.
- Os corpos de prova soldados com uma vazão do gás de proteção de 30 l/min também apresentaram redução no número de poros encontrados quando comparado aos corpos de prova soldados com uma vazão de 16 l/min.
- Comparado aos corpos de prova soldados sem limpeza, os corpos de prova soldados com limpeza das superfícies só apresentaram tendência à redução no número de poros no caso dos corpos de prova soldados com camada. Para os corpos de prova soldados sem camada a limpeza das superfícies parece não ter efeito algum sobre a porosidade.
- A variável de influência que trouxe maior efeito ao número de poros encontrados foi a presença de camada.

Inúmeras observações podem ser estabelecidas a partir dos resultados obtidos na tabela 5.1, porém, para um trabalho experimental com critérios científicos é essencial fazer-se uma análise estatística desses resultados. Desta forma, a partir dos resultados apresentados na tabela 5.1 e utilizando o modelo estatístico do planejamento experimental adotado (Planejamento Fatorial 2³), conforme Montgomery (1996), foi construída a tabela 5.2. Através do modelo estatístico desse planejamento, se F_0 for menor que F_{α} , então a variável de influência estudada não afeta a variável

de resposta, que é a porosidade resultante no cordão de solda. Caso F_0 seja maior que F_α , então a variável de influência afeta a variável de resposta. A partir desta tabela pode-se verificar também se houve interação entre as variáveis de influência estudadas. O teste para verificar se houve interação entre as variáveis de influência segue o mesmo critério do teste utilizado para verificar o efeito de cada uma das variáveis de influência separadamente, ou seja, se F_0 for menor que F_α , não existe interação entre as variáveis, se for maior, as variáveis estão se interagindo.

Tabela 5.2: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade resultante no cordão de solda.

Variável de influência estudada	F_0	F_α	Efeito na porosidade resultante
Presença de camada	82,69	4,49	Influencia
Limpeza das superfícies	2,69	4,49	Não influencia
Vazão do gás de proteção	5,00	4,49	Influencia
Interação entre a presença de camada e a limpeza das superfícies	2,69	4,49	Não existe interação
Interação entre a presença de camada e a vazão do gás de proteção	0,02	4,49	Não existe interação
Interação entre a limpeza das superfícies e a vazão do gás de proteção	0,20	4,49	Não existe interação
Interação entre as 3 variáveis de influência estudadas	0,02	4,49	Não existe interação

A partir dos resultados apresentados na tabela 5.2, serão discutidos os efeitos de cada uma das variáveis de influência sobre a porosidade resultante no cordão de solda. Será discutida também a interação entre as variáveis de influência estudadas.

5.1.1 Efeito da presença de camada

Conforme apresentado na tabela 5.2, podemos afirmar estatisticamente que a variável de influencia “presença de camada” afeta a porosidade resultante no cordão de solda.

A influência da presença da camada está de acordo com Vasil'ev e Kokhlikyan (1976), e Engblom (1988). Estes autores afirmam que juntas de aço cortadas com plasma de ar comprimido afetam negativamente a porosidade resultante no cordão de solda.

Após análise das seções transversais dos cordões de solda correspondentes aos corpos de prova soldados com presença de camada, pôde-se constatar a formação mecânica de poros em regiões próximas à raiz da junta. Nessas regiões surgiram cavidades na interface entre metal de solda e metal-base devido ao problema de falta de fusão do metal-base. Como mostrado na figura 5.1, com a fusão apenas parcial do metal-base, surgem quinas na raiz da junta e cavidades na interface entre o metal-base e o metal de solda, ou seja, regiões onde não houve completo coalescimento entre as duas partes. Com a solidificação do metal de solda essas cavidades podem ser aprisionadas levando assim à formação mecânica de poros. Este mecanismo de formação de poros está de acordo com Engblom (1988). Este autor afirma que após o corte a plasma com ar comprimido forma-se na extremidade de corte uma camada rica em nitretos que favorece a formação de regiões com falta de fusão durante a soldagem. Segundo ele, essas regiões de incompleta penetração e falta de fusão na junta favorecem a formação mecânica de poros. Isso ocorre porque talvez o metal de solda não tenha tempo suficiente para preencher todas essas regiões antes de se solidificar, levando assim à formação de vazios, também chamados de poros.

A figura 5.1 mostra exemplos de poros de origem mecânica em regiões de incompleta penetração e fusão parcial na junta soldada.

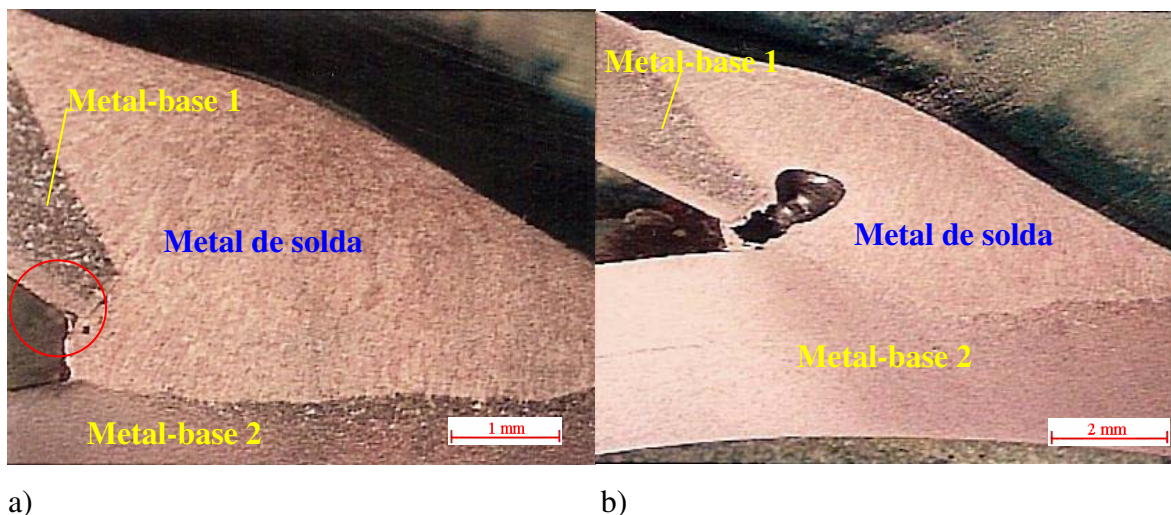


Figura 5.1: Exemplos de poros de origem mecânica em regiões de incompleta penetração e fusão parcial em duas juntas soldadas.

Através da figura 5.1 b pode-se constatar ainda que essas cavidades formadas a partir de regiões com falta de fusão tendem a se alongar conforme a direção de solidificação do metal de solda, formando assim uma espécie de duto rumo à superfície do cordão de solda.

5.1.2 Efeito da limpeza das superfícies

É consenso na literatura a afirmação de que a limpeza das superfícies é essencial para se minimizar a porosidade em um cordão de solda. Como já foi mencionado no item 2.5 desta dissertação, a presença de água e hidrocarbonetos como óleos e graxas, quando presentes na superfície da chapa a ser soldada, ao entrarem em contato com o arco elétrico, são quebrados e liberam hidrogênio, contribuindo assim para o enriquecimento desse gás na poça de fusão. Assim, é de se esperar que juntas soldadas sem um tratamento de limpeza nas superfícies propiciem a formação de uma maior quantidade de poros que juntas soldadas com limpeza delas. Contrariando a teoria, neste trabalho a limpeza das superfícies soldadas não influenciou na porosidade resultante no cordão de solda. Isso pode ser constatado analisando a tabela 5.2. Nela pode-se verificar que o valor de F_0 é inferior ao valor de F_{α} , ou seja, a variável de influência não afeta a variável de resposta.

Pode-se atribuir essa não influência da limpeza das superfícies ao fato de que talvez as peças soldadas sem limpeza não apresentavam um grau de impurezas relevante (significativo), ou então, o método de limpeza empregado não tenha sido eficaz a ponto de diferenciar significativamente as superfícies que sofreram limpeza das que não sofreram limpeza.

5.1.3 Efeito da vazão do gás de proteção

Conforme apresentado na tabela 5.2, podemos afirmar estatisticamente que a vazão do gás de proteção influenciou a porosidade resultante no cordão de solda.

O resultado obtido para o efeito da vazão do gás de proteção está de acordo com a literatura, uma vez que existe consenso de quanto menor a vazão do gás de proteção mais susceptível estará a poça de fusão às contaminações gasosas. Quanto maior é a exposição da poça de fusão a esse tipo de contaminação, maior é a tendência ao desenvolvimento de poros na junta soldada.

Por outro lado, existe consenso também de que uma vazão de gás excessiva pode trazer problemas de porosidade na junta soldada devido à problemas relacionados com a elevada turbulência do metal de solda líquido. A presença de turbulência na poça de fusão pode além de aumentar as trocas gasosas entre o metal líquido e a atmosfera, também impedir que o metal de solda se acomode na junta antes de se solidificar. Caso o metal de solda ao se solidificar não tenha preenchido todos os vazios, a formação mecânica de poros pode ser favorecida. Como houve redução no número de poros encontrados na junta quando a vazão do gás de proteção foi aumentada de 16 para 30 l/min, pode-se dizer que provavelmente a vazão de 30 l/min não tenha proporcionado turbulência na poça de fusão.

Além disso, como com o aumento da vazão houve diminuição no número de poros encontrados, pode-se dizer ainda que, provavelmente, os fenômenos listados no item 2.4.6 desta dissertação (contaminação do gás de proteção pelo ar, introdução de elementos nocivos à porosidade presentes na própria composição do gás de proteção e aprisionamento do próprio gás de proteção no metal de solda) não tenham ocorrido, ou então seus efeitos tenham sido desprezíveis.

5.1.4 Interações entre as variáveis de influência estudadas

Conforme apresentado na tabela 5.2, podemos afirmar estatisticamente a partir dos resultados obtidos que não houve interação significativa entre nenhuma das variáveis de influência estudadas. Nenhuma das variáveis afeta significativamente o comportamento das demais no que diz respeito à porosidade resultante no cordão de solda. Por exemplo, utilizando a tabela 6, pode-se constatar que um aumento na vazão do gás de proteção não altera a tendência de aumento no número de poros nos cordões de solda soldados com presença de camada, e vice-versa. O número de poros para o caso dos corpos de prova soldados com camada não é o mesmo quando vazão do gás se altera de 16 para 30 l/min, mas a tendência de queda no número de poros entre os corpos de prova soldados com e sem camada permanece.

Estatisticamente, uma variável x interage sobre uma variável y quando uma alteração na variável x faz com que a variável y altere seu comportamento, ou seja, o aumento ou diminuição de x faz com que o efeito de y sobre a variável de resposta seja modificado. Isso aconteceria se, por exemplo, um aumento na vazão do gás de proteção fizesse com que a presença de camada passasse de uma tendência de aumento no número de poros para uma tendência de queda nesse número (Montgomery, 1996).

Estatisticamente, através da tabela 5.2, podemos comprovar que nenhuma das variáveis estudadas exerce esse tipo de influência sobre as demais.

5.2 Segundo Modo: Quantificação da porosidade encontrada em função da localização dos poros

Através dos resultados e discussões apresentados no tópico anterior ficou clara a influência de duas variáveis na ocorrência de poros nos cordões de solda. São elas a presença de camada e a vazão do gás de proteção. Por outro lado, além desses resultados obtidos através da quantificação de porosidade, uma outra observação pôde ser feita durante a análise dos cordões de solda. A maioria dos poros encontrados se concentrava na raiz da junta soldada. Além disso, os poros localizados próximos à raiz da junta apresentavam dimensões superiores aos outros poros que estavam dispersos pela seção transversal do cordão de solda. Essa constatação fez com que se despertasse a curiosidade de um estudo mais detalhado da influência das variáveis de influência

na ocorrência localizada de poros na seção transversal do cordão de solda. Dessa maneira, a fim de estudar o efeito das variáveis de influência em função da localização dos poros na seção transversal do cordão de solda, os poros encontrados foram quantificados e distribuídos em dois grupos. O primeiro grupo se refere aos poros concentrados próximos à raiz da junta; já o segundo se refere aos poros dispersos na seção transversal do cordão de solda. Os resultados obtidos para cada um desses dois grupos são apresentados em seus respectivos tópicos. Porém, a fim de facilitar a comparação dos resultados destes dois grupos e dessa maneira entender melhor a influência de cada uma das variáveis de influência na localização dos poros na seção transversal da junta soldada, os resultados apresentados para cada um destes dois grupos foram mais detalhadamente discutidos em um único tópico, tópico este, apresentado logo após a exposição dos resultados de cada um dos dois grupos.

5.2.1 Primeiro grupo: Quantificação dos poros localizados próximos à raiz da junta

A fim de proporcionar uma melhor compreensão do que foi considerado “poro próximo à raiz da junta”, a figura 5.2 demonstra alguns exemplos desse tipo de porosidade.

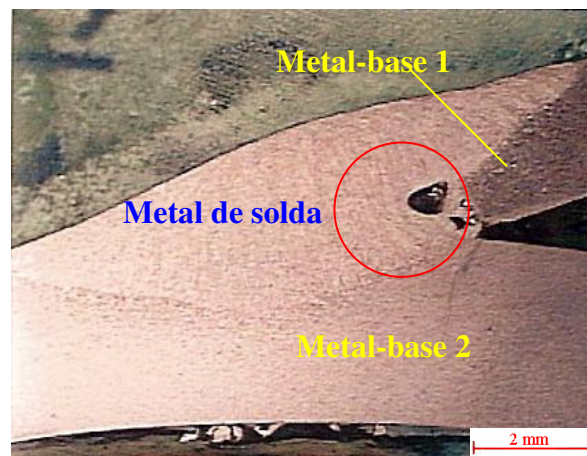


Figura 5.2: Poros localizados próximos à raiz da junta (aumento 6,7x).

A tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos após quantificação dos poros localizados próximos à raiz da junta. Os valores são apresentados da mesma forma que os valores apresentados na tabela 5.1. Para cada combinação das variáveis de influência, isto é, para cada condição de soldagem estudada, são apresentados três valores; valores estes que correspondem à

soma dos poros encontrados nas três seções transversais de cada cordão de solda confeccionado. Logo embaixo, é apresentada a somatória dos poros encontrados nos três cordões de solda confeccionados para cada uma das condições de soldagem estudadas.

Tabela 5.3: Quantificação dos poros encontrados próximos à raiz da junta.

Presença de camada		Limpeza das superfícies											
		Sem limpeza						Com limpeza					
		Vazão do gás de proteção						Vazão do gás de proteção					
		16 l/min			30 l/min			16 l/min			30 l/min		
Com camada	Cada cordão	4	4	5	6	3	5	5	4	5	2	4	4
	Total	13			14			14			10		
Sem camada	Cada cordão	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0
	Total	0			1			2			0		

Através dos resultados apresentados na tabela 5.3 pode-se afirmar que a única variável de influência que exerce um efeito significativo sobre a porosidade resultante no cordão é a presença de camada. Nos corpos de prova soldados sem camada, o número de poros encontrados nas seções transversais dos cordões de solda é drasticamente reduzido. As demais variáveis de influência, limpeza das superfícies e vazão do gás de proteção praticamente não interferem no número de poros encontrados. Aumentar a vazão do gás de 16 para 30l/min implica em uma redução de 29 para 25 no número de poros encontrados. Essa redução é mais ínfima ainda quando verificamos o efeito da limpeza das superfícies. O tratamento de limpeza nas superfícies faz com que o número de poros encontrados caia de 28 para 26.

A fim de afirmar científica e estatisticamente o efeito de cada uma das variáveis de influência, a partir dos dados apresentados na tabela 5.3 e utilizando o modelo estatístico do planejamento experimental adotado (Planejamento Fatorial 2³), conforme Montgomery (1996), foi construída a tabela 5.4. Através desta tabela fica mais fácil e simples determinar o efeito de cada uma das variáveis de influência na porosidade encontrada próxima à raiz da junta. A partir da tabela 5.4 pode-se verificar também se houve interação entre as variáveis de influência estudadas.

Tabela 5.4: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade resultante próxima à raiz da junta.

Variável de influência estudada	F₀	F_α	Efeito na porosidade resultante
Presença de camada	128,43	4,49	Influencia
Limpeza das superfícies	0,23	4,49	Não influencia
Vazão do gás de proteção	0,89	4,49	Não influencia
Interação entre a presença de camadas e a limpeza das superfícies	0,89	4,49	Não existe interação
Interação entre a presença de camadas e a vazão do gás de proteção	0,23	4,49	Não existe interação
Interação entre a limpeza das superfícies e a vazão do gás de proteção	3,57	4,49	Não existe interação
Interação entre as 3 variáveis de influência estudadas	0,23	4,49	Não existe interação

Como pode ser observado na tabela 5.4, o único fator que influenciou a porosidade resultante próxima à raiz da junta foi a presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1. As demais variáveis (limpeza das superfícies e vazão do gás de proteção) não influenciaram a porosidade encontrada na raiz da junta. Além disso, não houve qualquer interação entre as variáveis de influência estudadas.

5.2.2 Segundo grupo: Quantificação dos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda

Para facilitar o entendimento do que foi considerado “poro disperso pela seção transversal do cordão de solda”, a figura 5.3 exemplifica esse tipo de porosidade.

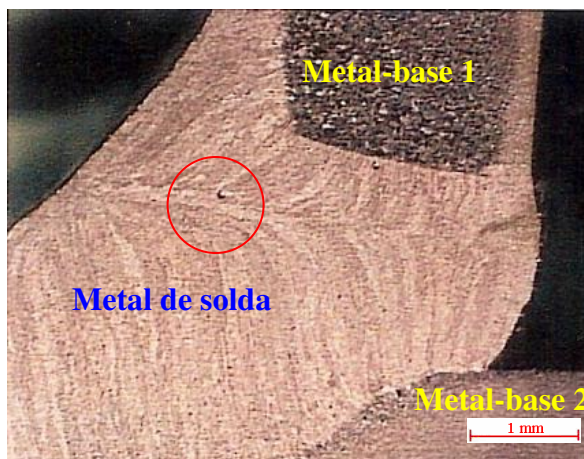


Figura 5.3: Poro disperso pela seção transversal do cordão de solda (aumento 10x).

A tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos após quantificação dos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda. Não faz parte desse grupo, os poros encontrados tanto na raiz da junta, como em regiões de fronteira da linha de fusão entre metais-base e metal de solda. Os valores apresentados nesta tabela se referem à somatória dos poros encontrados nas três seções transversais de cada cordão de solda confeccionado, em função das variáveis de influência estudadas (presença de camada, limpeza das superfícies e vazão do gás de proteção). Em seguida é apresentada a somatória desses valores que corresponde ao total de poros encontrados para cada condição de soldagem estudada.

Tabela 5.5: Quantificação dos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda.

		Limpeza das superfícies											
		Sem limpeza						Com limpeza					
		Vazão do gás de proteção						Vazão do gás de proteção					
		16 l/min			30 l/min			16 l/min			30 l/min		
Presença de camada	Cada cordão	2	2	1	3	0	2	1	2	3	4	2	1
	Total	5			5			6			7		
Sem camada	Cada cordão	1	2	4	1	0	3	1	1	3	0	2	1
	Total	7			4			5			3		

A fim de analisar cientificamente os resultados apresentados na tabela 5.5 foi realizado um tratamento estatístico nesses resultados. O modelo estatístico utilizado corresponde ao Planejamento Fatorial 2^3 , conforme apresentado por Montgomery (1996). Os resultados do estudo estatístico são apresentados na tabela 5.6. Através desta tabela pode-se verificar facilmente o efeito de cada uma das variáveis de influência na quantidade de poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda. Esta tabela permite também verificar se houve interação entre as variáveis de influência.

Tabela 5.6: Avaliação dos efeitos das variáveis de influência e da interação entre essas variáveis na porosidade dispersa pela seção transversal do cordão de solda.

Variável de influência estudada	F₀	F_α	Efeito na porosidade resultante
Presença de camada	0,41	4,49	Não influencia
Limpeza das superfícies	0	4,49	Não influencia
Vazão do gás de proteção	0,41	4,49	Não influencia
Interação entre a presença de camadas e a limpeza das superfícies	0,92	4,49	Não existe interação
Interação entre a presença de camadas e a vazão do gás de proteção	0,92	4,49	Não existe interação
Interação entre a limpeza das superfícies e a vazão do gás de proteção	0,10	4,49	Não existe interação
Interação entre as 3 variáveis de influência estudadas	0	4,49	Não existe interação

Como pode ser observado na tabela 5.6, nenhuma das variáveis de influência trouxe um efeito significativo sobre a porosidade dispersa pela seção transversal do cordão de solda. Além disso, não houve qualquer interação entre as variáveis de influência estudadas.

5.2.3 Discussão dos resultados de porosidade em função da localização dos poros

Conforme apresentado anteriormente, em função de sua localização na seção transversal do cordão de solda, os poros foram quantificados em dois grupos. O primeiro grupo se refere aos

poros concentrados próximos à raiz da junta, já o segundo se refere apenas aos poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda.

Comparando os resultados obtidos nesses dois grupos, constatamos que no caso da porosidade localizada próxima à raiz da junta, o único fator que está influenciando a ocorrência de poros é a presença da camada de nitretos. No caso da porosidade dispersa, nenhuma das variáveis de influência estudadas afeta a porosidade. Além disso, para ambos os casos, não existe interação alguma entre as variáveis de influência.

Provavelmente a presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 não afetou a porosidade dispersa devido ao fato de que essa variável de influência está intimamente ligada à ocorrência específica de porosidade próxima à raiz da junta. Como já foi mencionado, segundo Engblom (1988) o surgimento de uma camada rica em nitretos após o corte a plasma com ar comprimido na extremidade da junta, favorece a formação de regiões de incompleta penetração e falta de fusão na junta durante a soldagem, promovendo assim a formação mecânica de poros. Como essas regiões são geralmente formadas próximas à raiz da junta, como pode ser observado nas figuras 5.1 e 5.2, então pode-se dizer que a presença de camada na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 influencia diretamente somente a porosidade localizada próxima à raiz da junta.

A razão para a qual nenhuma das variáveis de influência tenha afetado a porosidade dispersa, deve-se provavelmente ao fato da susceptibilidade desse cordão de solda à ocorrência de porosidade ser muito baixa. O total de poros dispersos pela matriz soma apenas 42 ocorrências em 72 seções transversais do cordão de solda analisadas; ou seja, representa uma média inferior a 1 poro por seção analisada. Além disso, a distribuição desses poros tende a ser uniforme em todas as condições de soldagem estudadas nesse trabalho. Este fato nos leva a crer que a ocorrência de poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda é ocasional e aleatória, típica de um cordão de solda confeccionado com a utilização de parâmetros de soldagem devidamente otimizados.

Uma outra observação pôde ser feita comparando os resultados de porosidade em função da localização dos poros. Os poros localizados próximos à raiz da junta tendem a serem maiores que os poros encontrados de maneira dispersa pela seção transversal do cordão de solda. Enquanto a

maioria dos poros localizados próximos à raiz da junta têm sua origem a partir de formação mecânica, os poros dispersos pela seção transversal do cordão de solda provavelmente surgem a partir da supersaturação de gases na poça de fusão durante a solidificação do metal de solda.

Essa tendência da formação mecânica acarretar em poros maiores pode ser atribuída ao fato desses poros surgirem a partir das cavidades formadas na interface entre metal-base e metal de solda próximas à raiz da junta. Essas cavidades apresentam geralmente dimensões bem maiores que os poros formados devido à supersaturação de gases na poça de fusão. Enquanto os poros formados mecanicamente apresentam dimensões da ordem de até 2 mm, os poros formados devido à supersaturação de gases não ultrapassam 90 μm de comprimento.

Capítulo 6

Resultados práticos

Os ensaios práticos foram os ensaios realizados com a finalidade de implementar na prática os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Através deles seria possível avaliar na prática a solução proposta para eliminar a ocorrência de porosidade no cordão de solda estudado.

Os resultados experimentais evidenciaram que a presença da camada formada devido ao corte a plasma de ar comprimido na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 tem influência significativa na ocorrência de porosidade, principalmente quando se trata de poros localizados próximos à raiz da junta. Isso porque a utilização de um gás de plasma que contém nitrogênio em sua composição, como é o caso do ar comprimido, promove o enriquecimento de nitretos na camada formada. Segundo Engblom (1988), essa camada rica em nitretos traz problemas de falta de fusão na junta, favorecendo assim a formação mecânica de poros.

A fim de evitar o enriquecimento dessa camada com nitretos e eliminar assim a formação mecânica de poros, o tubo correspondente ao metal-base 1 foi cortado com a utilização de oxigênio puro como gás de plasma. Desta forma as soldas foram realizadas sem presença de nitretos na camada fundida formada na extremidade do corte.

Após a soldagem de 381 eixos no chão de fábrica e em escala industrial, nenhum dos cordões de solda apresentou problemas de porosidade. Com o processo de corte a plasma convencional, com utilização de ar comprimido como gás de plasma, segundo levantamento da própria empresa que fabrica os eixos, cerca de 10% dos eixos apresentavam porosidade visual na

superfície do cordão de solda. Na verdade, esses poros superficiais se estendiam da raiz da junta até a superfície do cordão de solda.

Dessa forma, pôde-se comprovar na prática que a solução proposta a partir dos resultados experimentais foi realmente eficaz, eliminando assim a ocorrência de porosidade nos cordões de solda dos eixos.

Capítulo 7

Conclusões

7.1 Conclusões a partir dos resultados preliminares:

A partir dos resultados obtidos nos ensaios preliminares podemos afirmar que:

- Existia uma região no cordão de solda em que a ocorrência de porosidade era mais acentuada. Essa região era a região 2 do cordão de solda (vide figura 4.3) que, por isso, passou a ser denominada região crítica.
- O processo de corte a plasma com a utilização de ar comprimido como gás de corte a plasma promoveu a formação de uma camada rica em nitretos na extremidade de corte do tubo correspondente ao metal-base 1.

7.2 Conclusões a partir dos resultados:

A partir dos resultados obtidos nos ensaios definitivos podemos afirmar que:

- Quando a porosidade foi quantificada sem distinção quanto à localização dos poros na seção transversal dos cordões de solda, dois fatores influenciaram a ocorrência de poros nos cordões de solda. São eles, a presença de uma camada rica em nitretos na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 e a vazão do gás de proteção.

- Puderam ser identificados dois tipos distintos de porosidade, um próximo à raiz da junta, resultante principalmente da formação mecânica de poros a partir de regiões de falta de fusão na raiz da junta, e outro disperso pela seção transversal do cordão de solda, provavelmente resultante da supersaturação de gases na poça de fusão.
- A formação de uma camada rica em nitretos na junta após o processo de corte a plasma de ar comprimido na extremidade do tubo correspondente ao metal-base 1 influenciou diretamente a ocorrência de porosidade próxima à raiz da junta. A formação dessa camada rica em nitretos favorece o surgimento de regiões de incompleta penetração e falta de fusão na raiz da junta, favorecendo assim a formação mecânica de poros.
- Os poros localizados próximos à raiz da junta apresentaram a tendência de serem mais grosseiros que os poros dispersos na seção transversal do cordão de solda.
- A ocorrência de pequena quantidade de poros dispersos na seção transversal do cordão de solda não foi influenciada significativamente por nenhuma das variáveis estudadas.

7.3 Conclusões a partir dos resultados práticos:

- A partir dos resultados práticos obtidos após a soldagem de eixos automotivos em escala industrial no próprio chão de fábrica pôde-se constatar que a solução proposta de substituição do gás de corte a plasma de ar comprimido por oxigênio puro eliminou a ocorrência de porosidade no cordão de solda dos eixos.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

American Welding Society. **Welding Handbook - Welding Processes**. 8th ed. Miami, v. 2, 1991, p. 109-154.

Barker, R.B. Pigma welding – A method for reducing weld porosity. **Welding Journal**, p. 1s-6s, January 1965.

Dixon, K. Explaining robotic GMAW. **Welding & Metal Fabrication**, p. 7-11, July 1998.

Engblom, G. **Formação de poros na soldagem de juntas cortadas com plasma de ar**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 14., 1988, Gramado.

Ferraresi, V.A.; Morais, F.C.; Lima, A.C. A influência do tipo de junta e parâmetros de soldagem MIG de alumínio na porosidade. **Soldagem & Inspeção**, vol. 8, n. 4, p. 155-161, 2003.

Grong, Ø. **Metallurgical modelling of welding**. London: The Institute of Materials, 1994. 581p.

Kaplan, H.I.; Hill, D.C. Thermodynamics of air-operating flux cored electrodes and an analysis of weld toughness. **Welding Journal**, vol. 55, n. 1, p. 13s-15s, 1976.

Kou, S. **Welding Metallurgy**. Canada: John Wiley & Sons, 1987. 411p.

Lindh, D.V.; Peshak, G.M. The influence of weld defects on performance. **Welding Journal**, vol. 48, n. 2, p. 45s-56s, 1969.

Lucas et. al. Effect of entrapped air in the shielding gas on weld metal properties. **Welding & Metal Fabrication**, p. 7-11, March 2001.

Marques, P.V. **Tecnologia da soldagem**. Belo Horizonte: ESAB, 1991, 352p.

Montgomery, D. C., Runger, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. New Yory, John Wiley e Sons, 1996.

Nogi, K. et al. Behavior od bubbles in weld under microgravity. *Acta Metallurgica*, vol.46, n. 12, p. 4405-4413, 1998.

Oyler, G.W.; Stout, R.D. Porosity in the welding of carbon steel. **Welding Journal**, vol. 32, n.9, p. 454s-460s, 1953.

Pollard, B.; Cover, R.J. Fatigue of steel weldments. **Welding Journal**, vol. 51, n. 11, p. 544s-549s, 1972.

Quites, A. M.; Scotti, A. Seleção de parâmetros de soldagem MAG evitando porosidades. **Metalurgia - ABM**, vol. 40, n. 319, p. 295-300, 1984.

Ramirez, J.E.; Han, B.; Liu, S. Efeffect of welding variables and solidification substructure on weld metal porosity. **Metallurgical and Materials Transactions A**, vol. 25A, n. 10, p. 2285-2294, 1994.

Redchits, V.V.; Froloc, V.A. Calculation and analytical evaluation of the gas pore formation susceptibility of metals and alloys in fusion welding. **Welding International**, vol. 10, n. 1, p. 76-79, 1996.

Saperstein, Z.P; Prescott, G.R; Monroe, E.W. Porosity in aluminum welds. **Welding Journal**, vol.43, n. 10, p. 443s-453s, 1964.

Saunders, H.L. **Welding aluminum: theory and practice**. 3rd ed. The Aluminum Association, 1997.

Savage, W.F.; Nippes, E.F.; Miller, T.W. Microsegregation in 70Cu-30Ni weld metal. **Welding Journal**, vol. 55, n. 6, p. 165s-173s, 1976.

Silva, C.L.M.; Scotti, A. Avaliação de técnicas para determinação de níveis de porosidade em estudos de soldabilidade. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA – CIBEM, 4., 2003, Coimbra.

Stenbacka, N; Svensson, O. Some observations on pore formation in gas metal arc welding. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, vol. 16, n. 4, p. 151-153, 1987.

Trevisan, R.E.; Schwemmer; Olson, D.L. Welding: theory and practices. In: **Materials processing theory and practices: v.8**. Amsterdam: North-Holland, 1989. cap. 3, p. 79-115.

Vasil'ev, K.V.; Kokhlikyan, L.O. Weld porosity in welding on edges prepared by air-plasma cutting, and its prevention. **Welding Production**, vol. 23, n. 4, p. 50-54, 1976.

Warren, D.; Stout, R.D. Porosity in mild steel weld metal. **Welding Journal**, vol. 31, n. 8, p. 381s-386s, 1952.

Woods, R.A. Porosity and hydrogen absorption in aluminum welds. **Welding Journal**, vol. 53, n. 3, p. 97s-108s, 1974.

Anexo 1

PDF # 86-1357

Phase classification

Quality C (calculated)
Name
Mineral Name Magnetite
Formula $\text{Fe}_{2.950}\text{O}_4$
Pearson symbol cF55.60
Corundum factor 4.86

Bibliographic data

Publication

Reference , Calculated from ICSD using POWD-12++ **52**, 450 (1997)

Crystal structure

Published crystallographic data

Space group Fd-3m (227) - cubic
Cell parameters $a=8.415 \text{ \AA}$
Cell volume $595.88 \text{ \AA}^3$
Z 8

Diffraction data

Published diffraction lines

d [Å]	Int.	hkl	Remark
4.8584	105	1 1 1	
2.97515	290	2 2 0	
2.53722	999	3 1 1	
2.4292	74	2 2 2	
2.10375	206	4 0 0	
1.93053	6	3 3 1	
1.7177	83	4 2 2	
1.61947	264	5 1 1	
1.48758	346	4 4 0	
1.42239	8	5 3 1	
1.33053	26	6 2 0	
1.28328	62	5 3 3	
1.26861	26	6 2 2	
1.2146	20	4 4 4	
1.17834	3	5 5 1	
1.1245	25	6 4 2	
1.09554	87	7 3 1	

Experimental

Physical Properties

Calc. density 5.098 g/cm^3

Remarks

Remarks

Sample source or locality

Specimen from Nagatoro, Saitama Prefecture, Japan.

ICSD collection code

082451

Temperature factor

ATF

Remark from ICSD/CSD

REM TEM 523.

Copyright International Centre for Diffraction Data (ICDD)

Anexo 2

PDF # 75-2132

Phase classification

Quality C (calculated)
 Name
 Formula $\text{FeN}_{0.0880}$
 Pearson symbol cF4.35
 Corundum factor 7.48

Bibliographic data

Publication

Reference , Calculated from ICSD using POWD-12++ **208**, 200 (1997)

Crystal structure

Published crystallographic data

Space group Fm-3m (225) - cubic
 Cell parameters $a=3.638 \text{ \AA}$
 Cell volume $48.15 \text{ \AA}^3$
 Z 4

Diffraction data

Published diffraction lines

d [Å]	Int.	hkl	Remark
2.1004	999	1 1 1	
1.819	461	2 0 0	
1.28623	191	2 2 0	
1.0969	167	3 1 1	

Experimental

Physical Properties

Calc. density 7.873 g/cm^3

Remarks

Remarks

ICSD collection code

031904

Remark from ICSD/CSD

REM TEM 291.

Copyright International Centre for Diffraction Data (ICDD)

Anexo 3

