

DENIS MARCEL PIRES NAGASIMA

ANÁLISE DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE ROTORES PELTON
VOLTADA PARA A AUTOMAÇÃO

São Paulo
2007

DENIS MARCEL PIRES NAGASIMA

ANÁLISE DO PROCESSO DE SOLDAGEM DE ROTORES PELTON
VOLTADA PARA A AUTOMAÇÃO

Monografia apresentada a EPUSP
referente à disciplina PMR2550 –
trabalho de conclusão de curso II

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Izabel Fernanda Machado

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Nagasima, Denis Marcel Pires
Análise do processo de soldagem de rotores Pelton voltada
para a automação/
D.M.P. Nagasima. -- São Paulo, 2007.
p. 118

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1.Soldagem (Automação) 2.Robótica I.Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

AGRADECIMENTOS

A professora Izabel Fernanda Machado pela orientação e apoio durante a execução deste trabalho.

Aos colegas Sr. Marcos Vasquez, Antonio Carlos Silveira e Rafael Segantin Lacerda pela colaboração durante todo o trabalho.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. ARCO ELÉTRICO	15
2.2. TRANSFERÊNCIA METÁLICA	18
2.3. PROCESSOS DE SOLDAGEM POR ARCO	21
2.3.1. SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO (SMAW)	21
2.3.2. SOLDAGEM MIG/MAG (GMAW)	22
2.3.3. SOLDAGEM TIG	27
2.3.4. SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO	29
2.4. TIPOS DE JUNÇÕES	31
2.5. POSIÇÕES DE SOLDAGEM	33
2.6. TRAJETÓRIA DE SOLDAGEM	35
2.7. PARÂMETROS DE SOLDAGEM	36
2.8. QUALIDADE DA SOLDAGEM	37
2.9. FLUXO DE CALOR EM SOLDAGEM	38
2.10. TENSÕES RESIDUAIS E DISTORÇÕES	40
2.11. SENSORES DE POSICIONAMENTO	41
2.12. DIREÇÃO DO EFETUADOR	43
2.13. ROTAÇÃO EM TORNO DE UM EIXO ARBITRÁRIO	46
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1. MATERIAIS	47
3.2. EQUIPAMENTOS	50
3.3. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO UTILIZADO	53
3.4. MÉTODO	55
3.4.1. AVALIAÇÃO DE GRADIENTES TÉRMICOS	55
3.4.2. ELABORAÇÃO DO PROGRAMA	58
3.4.3. VERIFICAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS	60

3.4.4. <i>TESTE DE POSICIONAMENTO</i>	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1. SIMULAÇÕES	63
4.2. TESTES DE POSICIONAMENTO	66
5. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
ANEXO A (PROGRAMA PARA TESTE DE POSICIONAMENTO)	72
ANEXO B (PROGRAMA PARA GERAR PROGRAMAS PARA O ROBÔ – FORM1)	81
ANEXO C (PROGRAMA PARA GERAR PROGRAMAS PARA O ROBÔ – FORM2)	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
AWS	AMERICAN WELDING SOCIETY
EN	NORMAS EUROPÉIAS
GMAW	GAS METAL ARC WELDING
GS	GENERAL STANDARD
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
MAG	METAL ACTIVE GAS
MIG	METAL INERT GAS
SMAW	SHIELDED METAL ARC WELDING
TIG	TUNGSTEN INERT GAS
VN	NORMAS INTERNAS DO GRUPO VOITH
VSPA	VOITH SIEMENS DE SÃO PAULO

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - COMPORTAMENTO DA TENSÃO E CORRENTE NA MÁQUINA DE SOLDA DURANTE A ABERTURA DE ARCO.....	17
FIGURA 2.2 - FOTO DE UM ARCO ELÉTRICO (MONTONESI, 2007)	17
FIGURA 2.3 - REGIÕES DE UM ARCO ELÉTRICO (BRANDI, WAINER E MELLO, 1992)	18
FIGURA 2.4 - TRANSFERÊNCIA GLOBULAR (BRANDI, WAINER E MELLO, 1992)	18
FIGURA 2.5 - TRANSFERÊNCIA POR PULVERIZAÇÃO (BRANDI, WAINER E MELLO, 1992)	19
FIGURA 2.6 - TRANSFERÊNCIA POR CURTO CIRCUITO (BRANDI, WAINER E MELLO, 1992)	20
FIGURA 2.7 - SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO (SOARES, 2007).....	21
FIGURA 2.8 - SOLDAGEM MIG/MAG (GIMENEZ E RAMALHO, 2007)	24
FIGURA 2.9 - EQUIPAMENTO PARA SOLDAGEM MIG/MAG (BRANDI, WAINER E MELLO, 1992)	25
FIGURA 2.10 - SOLDAGEM TIG (ABRÃO, 2007).....	28
FIGURA 2.11 - SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO (MODONESI, 08/2007).....	30
FIGURA 2.12 - JUNTAS DE TOPO (MODONESI, 2007)	32
FIGURA 2.13 - JUNTAS DE ÂNGULO (MODONESI, 2007)	32
FIGURA 2.14 - JUNTAS DE CANTO (MODONESI, 2007).....	32
FIGURA 2.15 - SOLDA NA POSIÇÃO PLANA (BUZZONI, 1962).....	33
FIGURA 2.16 - SOLDA NA POSIÇÃO HORIZONTAL (BUZZONI, 1962)	34
FIGURA 2.17 - SOLDA NA POSIÇÃO VERTICAL (MODONESI, 2007)	34
FIGURA 2.18 - SOLDA NA POSIÇÃO SOBRE A CABEÇA (MODONESI, 2007)	34
FIGURA 2.19 - MOVIMENTO DE ABERTURA DE ARCO (MODONESI, 2007)	35
FIGURA 2.20 - MOVIMENTOS DE TECER (BUZZONI, 1962)	35
FIGURA 2.21 - CÁLCULO POR FLUXO DE CALOR (ABB, 2007)	36
FIGURA 2.22 - TENSÕES RESIDUAIS (ADAPTADO DE KOU, 2003).....	40
FIGURA 2.23 - COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE SOLDA (ADAPTADO DE KOU, 2003)	41

FIGURA 2. 24 - MEDIDOR TRIDIMENSIONAL DA ROMER (ROMER, 2007).....	41
FIGURA 2. 25 - REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE COORDENADAS (FU, GONZALES E LEE, 1987)	44
FIGURA 3. 1 - ROBÔ UP20M DA MOTOMAN (MOTOMAN UP20, 2007).....	50
FIGURA 3. 2 - VOLUME DE TRABALHO DO UP20M (MOTOMAN, 2007)	52
FIGURA 3. 3 - BLOCO PRINCIPAL DA TURBINA.....	53
FIGURA 3. 4 - MEIA CONCHA DO ROTOR	53
FIGURA 3. 5 - INÍCIO DO PROCESSO	54
FIGURA 3. 6 - FIM DO PROCESSO.....	55
FIGURA 3. 7 – GEOMETRIA CONSIDERADA PARA SIMULAÇÃO	55
FIGURA 3. 8 - CORRENTE DE SOLDAGEM	57
FIGURA 3. 9 - TENSÃO DE SOLDAGEM.....	57
FIGURA 3. 10 - PONTOS DE APLICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR.....	58
FIGURA 3. 11 - PROGRAMA PARA GERAR PROGRAMAS PARA O ROBÔ	59
FIGURA 3. 12- CHANFRO DE SOLDA.....	60
FIGURA 3. 13 - CONTROLADOR XRC 2001	61
FIGURA 3. 14 - PONTOS PARA DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS	62
FIGURA 3. 15 - MALHA UTILIZADA	63
FIGURA 3. 16 - PERFIL DE TEMPERATURAS PARA POSIÇÃO 1	64
FIGURA 3. 17 - GRADIENTE TÉRMICO PARA POSIÇÃO 1	64
FIGURA 3. 18 - PERFIL DE TEMPERATURA PARA POSIÇÃO 2	65
FIGURA 3. 19 - GRADIENTE TÉRMICO PARA POSIÇÃO 2	65
FIGURA 4. 1 - PRIMEIRO TESTE DE POSICIONAMENTO.....	66
FIGURA 4. 2 - SEGUNDO TESTE	67

LISTA DE TABELAS

TABELA 2. 1 - CORRENTE MÍNIMA DE AEROSSOL (ESAB,2007)	19
TABELA 2. 2 - VALORES RECOMENDADOS PELA ESAB (ESAB, 2007)	20
TABELA 2.3 - RESUMO SOBRE SMAW (NETO, 2007)	22
TABELA 2.4 - RESUMO SOBRE MIG/MAG (NETO, 2007)	27
TABELA 2.5 - RESUMO DE SOLDAGEM TIG (NETO, 2007)	29
TABELA 2.6 – RESUMO SOBRE SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO (NETO, 2007)	31
TABELA 2.7 – COMPARAÇÃO DAS CLASSES DE SOLDA (OLIVEIRA, 2005)	37
TABELA 2.8 - CLASSES DE SOLDAGEM (OLIVEIRA, 2005)	38
TABELA 3. 1- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ASTM A 743 CA 6 NM	47
TABELA 3. 2 - - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ASTM A 743 CA 6 NM.....	47
TABELA 3. 3 - CARACTERÍSTICAS DO ARAME 309 T (NCS, 2007)	48
TABELA 3. 4 -- CARACTERÍSTICAS DO ARAME 410 (ABS, 2007)	48
TABELA 3. 5 - CARACTERÍSTICAS DO ARAME 309L (ABS, 2007)	49
TABELA 3. 6 - DADOS TÉCNICOS DO ROBÔ (MOTOMAN UP20, 2007)	51
TABELA 3. 7 - PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AISI 309.....	56

RESUMO

O presente trabalho visa estabelecer um método para soldagem utilizando um robô, para realizar este trabalho foi necessário aliar tantos conhecimentos básicos sobre soldagem bem como os conceitos de robótica, sendo assim inicialmente foi realizado um estudo voltado para essas duas frentes.

Com base em tal estudo, foi tomado como base um rotor do tipo Pelton para o desenvolvimento do trabalho. Com isso, inicialmente foi realizado uma simulação com o objetivo de entender melhor a distribuição dos gradientes térmicos que ocorrem durante o processo de soldagem um rotor Pelton, identificando possíveis pontos críticos do processo, onde poderão ocorrer trincas se os devidos cuidados não forem tomados, como por exemplo, pré-aquecimento da peça antes do processo de soldagem.

Continuando o estudo baseado em um rotor Pelton, foi necessário o desenvolvimento de uma ferramenta para gerar pontos de uma trajetória definida por *splines*, para assim dar continuidade ao trabalho, pois os chanfros de rotores do gênero não são definidos por uma reta nem circunferência. No entanto, a trajetória pode ser aproximada por várias retas. Além disso, foi necessária a implementação da direção do bocal de solda dentro da ferramenta desenvolvida, pois esta direção é essencial ao processo.

Os principais resultados deste trabalho foram a avaliação de gradientes térmicos e a definição de uma trajetória de soldagem.

Palavras-chave: soldagem (automação), robótica, engenharia mecatrônica.

ABSTRACT

The present work establishes a path for welding using a robot, to do so was necessary to align welding concepts and robotics. Then, initially a study was carried out in these two areas.

This study was based on a Pelton runner that was taken as a base for this work's development. So, a simulation was carried out with the main objective to understand and visualize the thermal gradients during the welding process of a Pelton runner, identifying possible critical points to the welding process, wherein could appear cracks if the right cares were not taken, for instance, pre-heating of the welding part.

Continuing the study based on a Pelton runner, it was necessary a software tool development to generate paths which defined by splines for keeping the work going, because the chamfer of the runner were not define by lines ou circles, but can be approximate by a group of lines. However, it was necessary to calculate the directions of the manipulator inside the software tool developed, because this direction is very important for this type of process.

The main results of this work were the evaluation of thermal gradients and the definition of the welding path.

Key-words: welding (automation), robotics, mechatronics engineering.

1. Introdução

Os processos de soldagem são amplamente utilizados pela indústria, dentre as diversas aplicações e produtos que se utilizam deste processo podem-se citar: aviões, navios, construções, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, rotores para hidrelétricas e indústria automobilística. Sendo assim, pode-se dizer que o processo de soldagem é importante para uma grande gama de indústrias e conseqüentemente produtos.

Esse trabalho atêm-se em uma em particular, ou seja, a produção de produtos para a chamada “hidro-geração” de energia elétrica, mais especificamente o objetivo é propor um método de soldagem automático *MIG* em rotores do tipo Pelton para aumentar a produtividade e diminuir custos. Assim sendo, para alcançar tal objetivo, o projeto passou por duas etapas importantes, uma consistiu no levantamento bibliográfico para entender os principais processos de soldagem a arco elétrico e o funcionamento de um robô. Esse levantamento possibilitou realizar simulações para entender melhor a distribuição de gradientes térmicos numa peça, os quais são muito importantes do ponto de vista de processo e produto obtido. Existem pontos críticos devido a esses gradientes, os quais devem ser identificados para a determinação da melhor trajetória durante a soldagem. Outro aspecto importante é o da definição do uso de pré-aquecimento da peça de forma a minimizar as tensões residuais.

Numa segunda etapa, foi necessário o desenvolvimento de uma ferramenta para o desenvolvimento de programas para soldagem utilizando um robô. Para isso foram utilizados objetos do *NXOpen*[®] do *NX*[®]. Onde tal programa obtém pontos e vetores normais e tangentes a uma curva, e assim intercala-os para realizar uma trajetória para a soldagem, gerando então um programa na linguagem de programação dos robôs da *Motoman*[®] (Motoman, 1999). Finalmente para realizar a soldagem de uma peça é necessário verificar pontos e ângulos onde não ocorra interferência com o bocal de solda, e em paralelo verificando se tais ângulos conseguem direcionar o arco para as paredes do chanfro, garantindo assim sua soldagem. Com essa ferramenta, pode-se gerar um programa para soldagem da peça, para assim efetuar

um teste de posicionamento e verificar que não haja interferências e em seguida realizar o processo.

2. Revisão da literatura

O processo de soldagem segundo Quites e Dutra (1979) pode ser definido como: “a operação que visa a união de duas ou mais peças, assegurando na junta, a continuidade das propriedades químicas e físicas”. Sendo que os processos de soldagem em geral devem preencher os seguintes requisitos segundo Houldcroft (1979) apud Brandi, Wainer e Mello (1992):

- Gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- Remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- Evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- Propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Para tentar atender a tais requisitos existem diversos tipos de soldagem, que podem ser divididos quanto à fonte de calor utilizada (química, elétrica e radiante) ou tipo de união (fusão e estado sólido).

É importante entender como funciona o processo de transferência metálica por arco elétrico, para uma melhor avaliação dos resultados obtidos em um processo de soldagem.

2.1. Arco elétrico

O arco elétrico de soldagem, segundo Montonesi (2005), “é uma descarga elétrica entre eletrodos em um gás ou vapor (gerado pelos eletrodos) que tem uma queda de tensão, junto ao catodo, da ordem do potencial de excitação ou ionização do gás ou vapor (isto é da ordem de 10V) e na qual a corrente pode ter praticamente qualquer valor superior a um mínimo de cerca de 100 mA”. A partir dessa definição, segundo Brandi, Wainer e Mello (1992), existem três fenômenos acontecendo simultaneamente que são importantes para o conhecimento do arco elétrico: calor, ionização e emissão.

O estudo de tais fenômenos, como se pode ver em Montonesi (2007) e de forma indireta em Brandi, Wainer e Mello (1992), é difícil de ser realizado, sendo em geral possível através de métodos indiretos, devidos as condições agressivas do arco, ou seja, corrente elétrica da ordem de 10^1 a 10^2 Ampères, temperaturas da ordem de 10^2 a 10^3 graus Celsius, irradiação ultra-violeta, etc. Além também de que certos métodos de medição podem influir diretamente nas características do arco, produzindo em consequência resultados errôneos. Tais características impossibilitam o uso de muitos métodos diretos para medição dos fenômenos envolvidos. Dentre os métodos de medição indireta comumente utilizados pode-se citar: espectroscopia ótica, análise elétrica e calorimetria, por exemplo. Maiores detalhes podem ser encontrados em Montonesi (2007).

O calor se dá pela ocorrência de choques provocados pela movimentação das cargas elétricas no arco de um eletrodo permanente. Conforme se pode ver em Caetano (2006), a velocidade de movimentação dos elétrons é muito maior que a dos íons presentes no gás, sendo assim a energia em sua forma térmica é devida basicamente ao movimento dos elétrons, similarmente ao efeito Joule que ocorre em condutores.

A ionização ocorre quando um elétron recebe energia suficiente para ser retirado da órbita de um átomo tornando-se assim um elétron livre, tal fenômeno ocorre na soldagem quando o eletrodo entra em contato com o metal base, fazendo um curto circuito que gera calor suficiente para iniciar o processo de ionização, o que gera elétrons livres e íons positivos no gás, formando conseqüentemente um meio condutor que mantém o arco. Esse processo onde há a ionização por colisão entre partículas aquecidas é conhecido como ionização térmica. (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

Após a ionização do gás, o eletrodo pode ser afastado do metal base, pois o arco se manterá devido ao gás ter-se tornado um meio condutor e sendo o curto circuito interrompido e a corrente estabiliza no valor de trabalho, tal processo pode ser ilustrado pela figura 2.1.

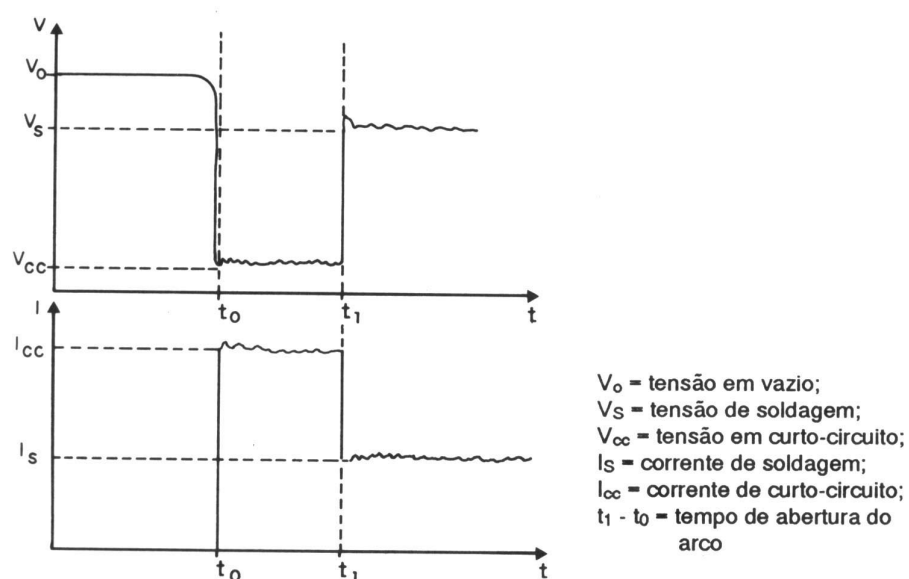


Figura 2.1 - Comportamento da tensão e corrente na Máquina de solda durante a abertura de arco

(Brandi, Wainer e Mello, 1992)

O arco elétrico operando entre um eletrodo plano e um cilíndrico, cuja área do segundo é muito menor que a do primeiro, possui um formato quase cônico, como se pode observar pela figura 2.2, podendo ser dividido em três regiões características, como mostra a figura 2.3: região anódica, coluna de plasma e região catódica.

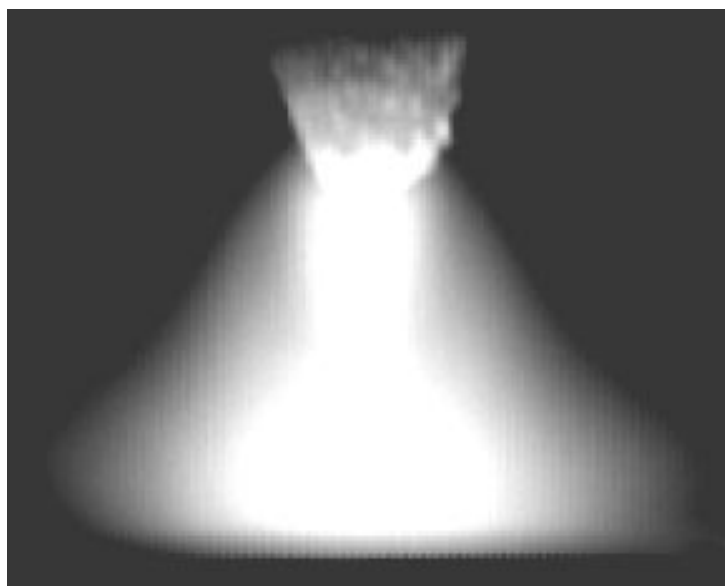


Figura 2.2 - Foto de um arco elétrico (Montonesi, 2007)

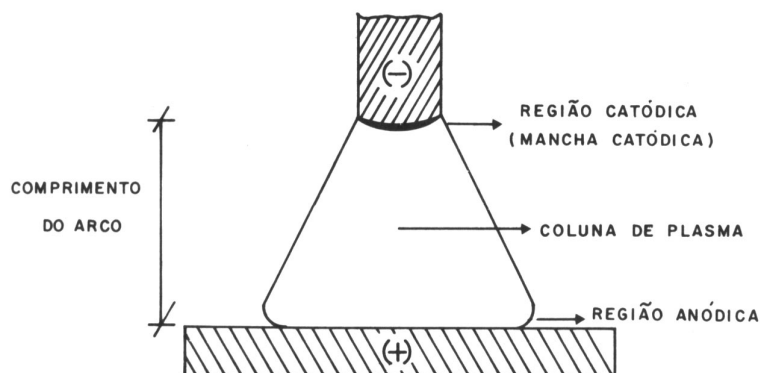


Figura 2.3 - Regiões de um arco elétrico (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

Na região catódica tem-se uma queda de tensão varia de 10^{-3} a 10^{-5} V/cm, na coluna de região da coluna de plasma estima-se uma queda de tensão de 3 a 50 V/cm e na região anódica tem-se uma queda de tensão da ordem de 10^{-2} V/cm.

2.2. Transferência metálica

Apesar de existirem diversas classificações quanto aos tipos de transferência metálica, há basicamente quatro modos pelos quais o processo de soldagem pode depositar solda numa junta:

- 1) Por transferência globular – ocorre quando a corrente está um pouco acima da mínima da corrente mínima de aerossol na tabela 2.1. O metal se transfere ao eletrodo para a peça como glóbulos cada um maior em diâmetro que o eletrodo, como mostra a figura 2.4. Os glóbulos se transferem para a poça sem muita direção e o aparecimento de salpico é bem evidente.

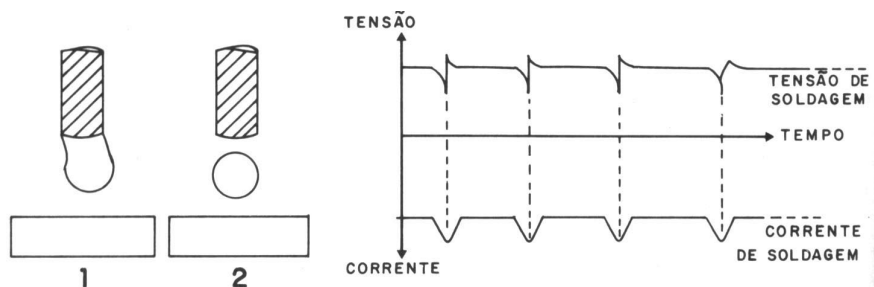


Figura 2.4 - Transferência globular (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

- 2) Por transferência por aerossol ou por pulverização axial - ocorre com correntes altas. O metal de adição fundido se transfere através do arco como gotículas finas, como mostra a figura 2.5. Com a transferência por aerossol a taxa de deposição pode chegar até a 10 kg/h. Entretanto, essa taxa de deposição restringe o método de deposição e dá origem a outro problema que é a possibilidade de ocorrência de falta de fusão, devido ao jato metálico ser dirigido para regiões que não tenham sido suficientemente aquecidas.

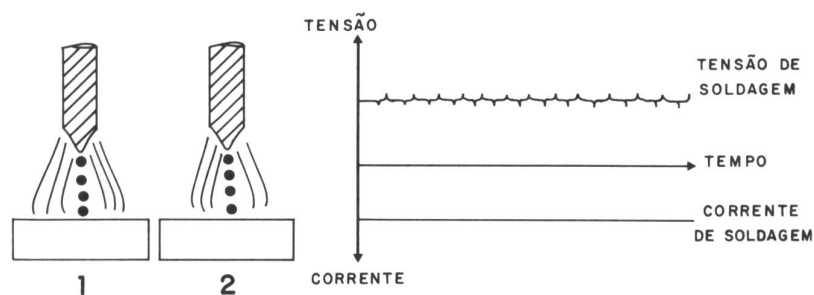


Figura 2.5 - Transferência por pulverização (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

Tabela 2. 1 - Corrente Mínima de Aerossol (ESAB,2007)

Tipo de Arame	Diâmetro do arame		Gás de Proteção	Corrente mínima de aerossol (A)
	pol (")	mm		
Aço Carbono	0,030	0,76	98% Ar / 2% O ₂	150
	0,035	0,89		165
	0,045	1,10		220
	0,052	1,30		240
	0,062	1,60		275
Aço Inoxidável	0,035	0,89	98% Ar / 19% O ₂	170
	0,045	1,10		225
	0,062	1,60		285
Alumínio	0,030	0,76	Argônio	95
	0,046	1,19		135
	0,062	1,60		180
Cobre Desoxidado	0,035	0,89	Argônio	180
	0,045	1,10		210
	0,062	1,60		310
Bronze ao silício	0,035	0,89	Argônio	165
	0,045	1,10		205
	0,062	1,60		270

- 3) Por transferência por curto circuito - pode requerer uma fonte de energia especial. A fusão inicia-se globularmente e a gota vai aumentando de tamanho até tocar a poça de fusão, produzindo um curto circuito e extinguindo o arco, como mostra a figura 2.6. Sob a ação de determinadas forças, a gota é transferida para a peça. Este processo permite soldagem em todas as posições e é um processo de energia relativamente baixa, o que restringe seu uso para espessuras maiores. De modo a se conseguir uma boa estabilidade do arco elétrico no processo, a ESAB recomenda alguns valores para a faixa de corrente, presentes na tabela 2.1.

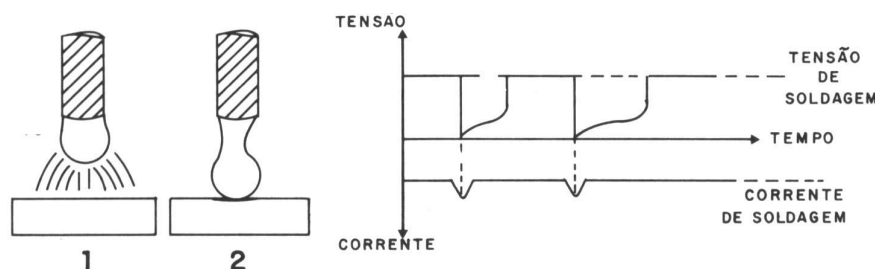


Figura 2.6 - Transferência por curto circuito (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

Tabela 2. 2 - Valores recomendados pela ESAB (ESAB, 2007)

Diâmetro do Arame		Corrente de soldagem (A)	
pol (")	mm	Mínima	Máxima
0,030	0,76	50	150
0,035	0,89	75	175
0,045	1,10	100	225

- 4) Por soldagem a arco pulsante – realizado utilizando-se de uma corrente pulsada. A transferência do metal de adição é pelo jato de gotículas, similar ao de pulverização, durante esses pulsos. Esta característica da corrente de soldagem faz com que a energia de soldagem seja menor, o que torna possível a soldagem na posição vertical pelo uso de arames de diâmetro grande.

2.3. Processos de soldagem por arco

2.3.1. Soldagem com eletrodo revestido (SMAW)

Soldagem com eletrodo revestido (SMAW) é a união de metais pelo aquecimento oriundo de um arco elétrico entre um eletrodo revestido e o metal de base, na junta a ser soldada.

O metal fundido do eletrodo é transferido através do arco até a poça de fusão do metal de base, formando assim o metal de solda depositado.

Uma escória, que é formada do revestimento do eletrodo e das impurezas do metal de base, flutua para a superfície e cobre o depósito, protegendo esse depósito da contaminação atmosférica e também controlando a taxa de resfriamento. O metal de adição vem da alma metálica do eletrodo (arame) e do revestimento que em alguns casos é constituído de pó de ferro e elementos de liga, Figura 2.7.

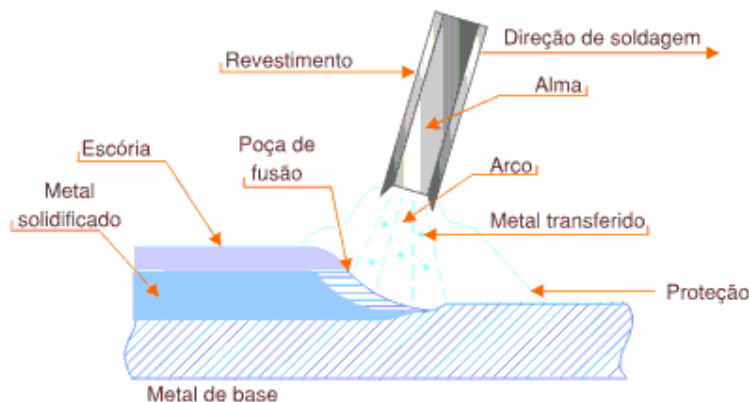


Figura 2.7 - Soldagem com eletrodo revestido (Soares, 2007)

Tabela 2.3 - Resumo sobre SMAW (Neto, 2007)

Soldagem com eletrodo revestido	
Tipo de operação: Manual	Equipamento: Gerador, transformador, retificador
CARACTERÍSTICAS: Taxa de deposição: 1 a 5 kg/h Espessuras soldadas: >2 mm a 200 mm Posições: Todas (depende do revestimento) Tipos de juntas: Todas Diluição: de 25 a 35% Faixa de corrente: 60 a 300 A	CONSUMÍVEIS - Eletrodos de 1,6 a 6 mm de diâmetro. - Revestimentos de 1 a 5 mm de espessura.
APLICAÇÕES TÍPICAS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E PETROQUÍMICA Soldagem da maioria dos metais e ligas empregadas em caldeiraria, tubulação, estruturas e revestimentos.	
VANTAGENS - Baixo custo - Versatilidade - Operação em locais de difícil acesso	LIMITAÇÕES - Lento devido à baixa taxa de deposição e necessidade de remoção da escória - Requer habilidade manual do soldador
SEGURANÇA: O arco elétrico emite radiações visíveis e ultravioletas. Risco de choques elétricos, queimaduras e projeções. Gases (atmosfera protetora)	

2.3.2. Soldagem MIG/MAG (GMAW)

A soldagem MIG/MAG usa o calor de um arco elétrico entre um eletrodo nu alimentado de maneira contínua e o metal de base. O calor funde o final do eletrodo e a superfície do metal de base para formar a solda. A proteção do arco e da poça de solda fundida vem inteiramente de um gás alimentado externamente, o qual pode ser inerte, ativo ou uma mistura destes. Portanto dependendo do gás podemos ter os seguintes processos:

- Processo MIG (METAL INERT GAS): injeção de gás inerte.

O gás pode ser:

- argônio
- hélio
- argônio + 1% de O₂
- argônio + 3% de O₂

O argônio é um gás mais facilmente ionizado se comparado ao CO₂ e O₂ e sendo assim arco que passa por ele se torna mais estável, em consequência tem-se um

arco a uma maior distância, Quites e Dutra (1979) citam o fato de o arco ser maior como a provável consequência de a penetração da solda usando argônio ser menor que a usando outros gases de proteção, pois há maior perda de energia por irradiação.

Para o processo de soldagem do tipo MIG a Lincoln (1973) recomenda o uso dos seguintes tipos de transferência metálica para aços inoxidáveis: aerossol, curto circuito e pulsado.

Outro gás também utilizado é o hélio, no entanto, o mesmo não apresenta um arco tão estável quanto o argônio, apresentando maior condutividade térmica e variação de tensão. No caso da soldagem de alumínio, por exemplo, o processo utilizando hélio puro não proporciona a mesma ação de limpeza do que o argônio puro, no entanto, provoca maior fluidez na poça de fusão e maior molhabilidade do cordão de solda, sendo vantajoso no processo de junção de alumínio, magnésio e ligas de cobre (ESAB, 2007).

- Processo MAG (METAL ACTIVE GAS): injeção de gás ativo ou mistura de gases que perdem a característica de inertes, quando parte do metal de base é oxidado. Os gases utilizados são:

- CO_2
- CO_2 + 5 a 10% de O_2
- argônio + 15 a 30% de CO_2
- argônio + 5 a 15% de O_2
- argônio + 25 a 30% de N_2

A Figura 2.8 mostra como o processo de soldagem MIG/MAG funciona.

Escórias formadas nos processos de soldagem com eletrodo revestido e soldagem a arco submerso, não se formam no processo de soldagem MIG/MAG, porque nesse processo não se usa fluxo. Entretanto, um filme vítreo (que tem o aspecto de vidro) de sílica se forma de eletrodos de alto silício, o qual deve ser tratado como escória.

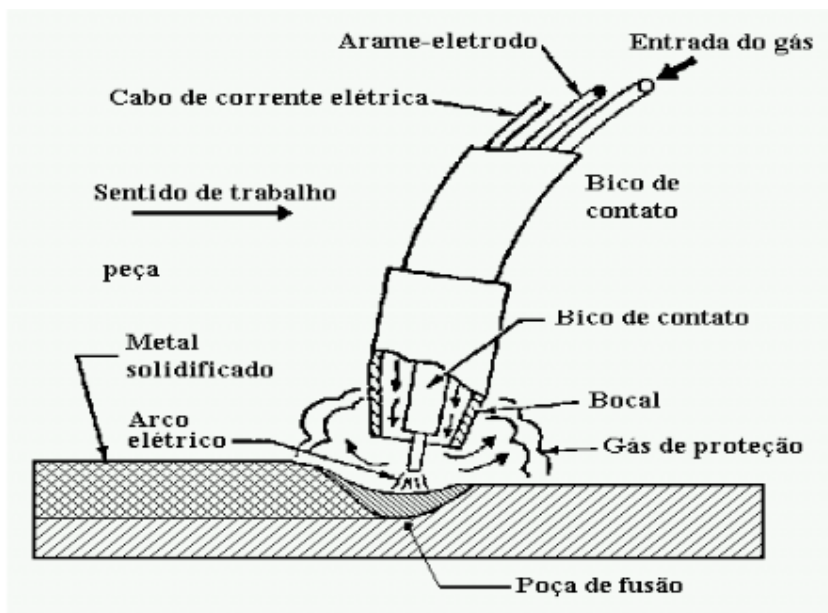


Figura 2.8 - Soldagem MIG/MAG (Gimenez e Ramalho, 2007)

A soldagem MIG/MAG é um processo bastante versátil. As maiores vantagens são:

- taxa de deposição maior que a de soldagem com eletrodo revestido;
- menos gás e fumaça na soldagem;
- larga capacidade de aplicação;
- solda uma faixa ampla de espessura e materiais.

A soldagem MIG/MAG pode ser semi-automática ou automática. No processo semi-automático o eletrodo é alimentado automaticamente através de uma pistola, sendo que o soldador controla a inclinação e a distância da pistola da peça, bem como a velocidade de deslocamento e manipulação do arco. Já no processo automático, a movimentação é controlada por um robô.

O equipamento de soldagem MIG/MAG consiste de uma pistola de soldagem, um suprimento de energia, um suprimento de gás de proteção, e um sistema de acionamento de arame, como mostra a figura 2.9.

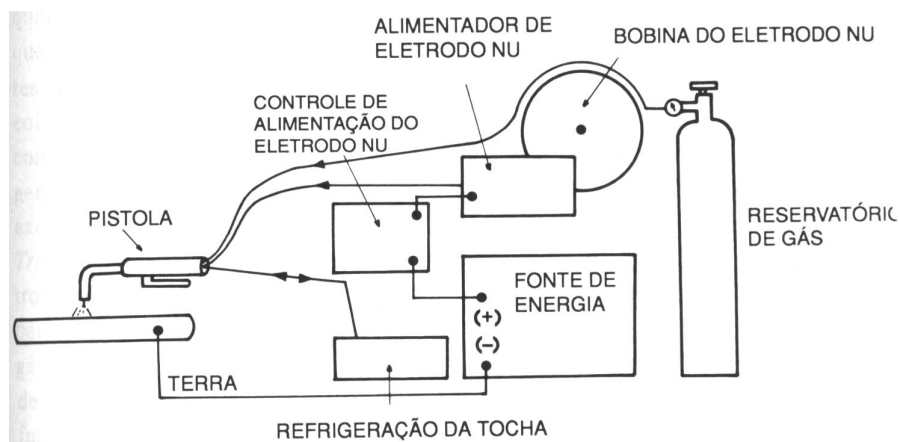


Figura 2. 9 - Equipamento para soldagem MIG/MAG (Brandi, Wainer e Mello, 1992)

A pistola contém um tubo de contato para transmitir a corrente de soldagem para o eletrodo e um bico de gás para direcionar o gás protetor. O alimentador de arame é composto de um motor pequeno de corrente contínua e de uma roda motriz.

O escoamento do gás protetor é regulado por um fluxímetro e regulador-reductor de pressão. Estes possibilitam fornecimento constante de gás para o bico da pistola.

A maioria das aplicações da soldagem MIG/MAG requer energia com corrente contínua e polaridade inversa. Nesta situação tem-se um arco mais estável, salpico baixo, e cordão de solda de boas características. O uso de corrente contínua com polaridade direta não é freqüente, e de corrente alternada não é nunca utilizado para este processo.

A finalidade principal do gás protetor em soldagem MIG/MAG é proteger a solda da contaminação atmosférica. O gás protetor também influi no tipo de transferência, na profundidade de penetração, e no formato do cordão.

Argônio e hélio são gases de proteção usados para soldagem da maioria dos metais não ferrosos. O CO_2 é largamente usado para a soldagem de aços doces (de 0,15 a 0,3%C). Quando da seleção de um gás protetor, o fator mais importante para se ter em mente é que quanto mais denso for o gás, mais eficiente é sua proteção ao arco.

Os eletrodos para soldagem MIG/MAG são similares ou idênticos na composição àqueles dos outros processos de soldagem que utilizam eletrodos nus, sendo que, para o caso específico da soldagem MAG, contém elementos desoxidantes tais como silício e manganês em percentuais determinados.

Como uma regra, as composições do eletrodo e do metal de base devem ser similares quando possível, sendo que, especificamente para o processo MAG, deve ser levado em conta o acréscimo de elementos desoxidantes. Para se ter maiores informações sobre os eletrodos consultar as especificações AWS A5.9, A5.10 e A5.18.

A soldagem MIG/MAG produz soldas de alta qualidade com procedimentos de soldagem apropriados. Como não é utilizado um fluxo, a possibilidade da inclusão de escória semelhante ao processo eletrodo revestido ou arco submerso é mínima, podendo, por outro lado, ocorrer inclusão de uma escória vítrea característica do processo se a limpeza interpasse não for feita de maneira adequada. Hidrogênio na solda é praticamente inexistente.

A soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem para todas as posições, dependendo do eletrodo e do gás ou gases usados. Para soldar a maioria dos metais a ser utilizado inclusive para deposição de revestimentos superficiais. Tem capacidade para soldar espessuras maiores de 0,5 mm por transferência por curto circuito. A taxa de deposição pode chegar a 15 kg/h dependendo do eletrodo, modo de transferência, gás usados.

Tabela 2.4 - Resumo sobre MIG/MAG (Neto, 2007)

Soldagem MIG/MAG	
Tipo de operação; Semi-automática ou automática	EQUIPAMENTOS: Retificador, gerador, pistola, cilindro de gás, unidade de alimentação de arame, unidade de deslocamento (automático)
CARACTERÍSTICAS: -Taxa de deposição: 1 a 15kg/h -Espessuras soldadas: Curto-circuito $\geq 0,5$ mm Pulver.Axial ≥ 6 mm POSIÇÕES: Todas TIPOS DE JUNTAS: Todas DILUIÇÃO: 10 a 30% FAIXA DE CORRENTE: 60 a 500A	CONSUMÍVEIS: Arame: 0,5 a 1,6mm Gases: Argônio Hélio CO ₂ Misturas: Ar + CO ₂
APICAÇÕES TÍPICAS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E PETROQUÍMICA: Soldagem de tubulações e internos de vasos de pressão Soldagem de estruturas metálicas	
VANTAGENS: - Alta taxa de deposição - Baixo teor de hidrogênio combinado com alta energia	LIMITAÇÕES: - Limitado à posição plana, exceto na transferência por curto-circuito ou por arco pulsante. - Risco de ocorrência de falta de fusão.
SEGURANÇA: Grande emissão de radiação ultravioleta e projeções metálicas.	

2.3.3. Soldagem TIG

Soldagem TIG é a união de metais pelo aquecimento destes com um arco entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça.

A proteção durante a soldagem é conseguida com um gás inerte ou mistura de gases inertes, que também tem a função de transmitir a corrente elétrica quando ionizados durante o processo. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição, se ele não é transferido através do arco, mas é fundido pelo arco. O eletrodo que conduz a corrente é um arame de tungstênio puro ou liga deste material.

A Figura 2.10 mostra esquematicamente este processo.

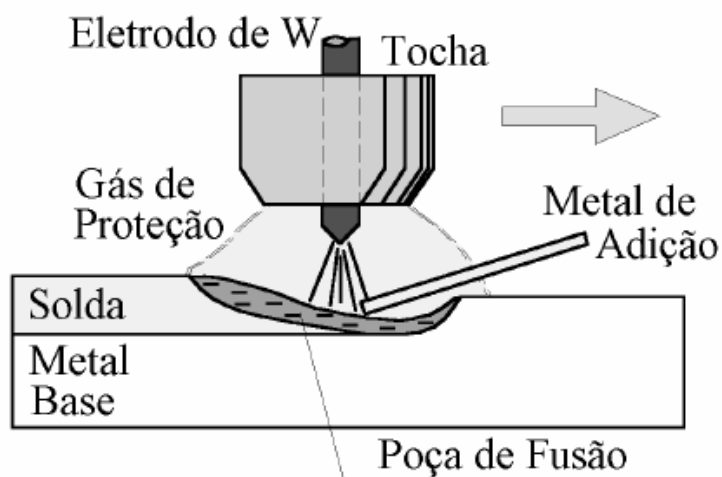


Figura 2.10 - Soldagem TIG (Abrão, 2007)

A área do arco é protegida da contaminação atmosférica pelo gás protetor, que flui do bico da pistola. O gás remove o ar, eliminando nitrogênio, oxigênio e hidrogênio de contato com o metal fundido e com o eletrodo de tungstênio aquecido. Há pouco ou nenhum salpico e fumaça. A camada da solda é suave e uniforme, requerendo pouco ou nenhum acabamento posterior.

A soldagem TIG pode ser usada para executar soldas de alta qualidade na maioria dos metais e ligas. Não há nenhuma escória e o processo pode ser usado em todas as posições. Este processo é o mais lento dos processos manuais.

Tabela 2.5 - Resumo de soldagem TIG (Neto, 2007)

Soldagem TIG	
TIPO DE OPERAÇÃO Manual ou Automática	EQUIPAMENTOS: Retificador, transformador, pistola.
CARACTERÍSTICAS: -Taxa deposição: 0,2 a 1,3kg/h -Espess. soldadas: 0,1 a 50mm -Posições: todas -Tipos de Juntas: todas -Diluição Com M.Adição=2 a 20% Sem M.Adição=100% -Faixa de corrente: 10 a 400A	Cilindros de Gases - equipamen-tos de deslocamento automático.
	CONSUMÍVEIS Varetas Gases
APLICAÇÕES TÍPICAS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E PETROQUÍMICA: .Soldagem do 1 ° passe de tubulações de aços liga, aços inoxidáveis e ligas de níquel. .Soldagem de equipamentos de Al, Ti e ligas de Ni .Soldagem de tubos ao espelho de permutadores de calor .Soldagem de internos de reatores de uréia em aço inoxidável e Ti	
VANTAGENS -Produz as soldas de melhor qualidade	LIMITAÇÕES -Baixa taxa de deposição -Requer soldadores muito bem treinados.
SEGURANÇA: Emissão intensa de radiação ultravioleta	

2.3.4. Soldagem a arco submerso

A soldagem a arco submerso (SAW) une metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico (ou arcos), entre um eletrodo nu (ou vários eletrodos) e o metal de base. O arco está submerso e coberto por uma camada de material granular fusível que é conhecido por fluxo; portanto o regime de fusão é misto: por efeito Joule e por arco elétrico. Dispositivos automáticos asseguram a alimentação do eletrodo (ou dos eletrodos) a uma velocidade convenientemente de tal forma que a sua ou suas extremidades mergulhem constantemente no banho de fluxo em fusão. A movimentação do arame em relação à peça faz progredir passo a passo o banho de fusão que se encontra sempre coberto e protegido por uma escória que é formada pelo fluxo e impurezas.

Uma vantagem da soldagem a arco sobmerso é sua alta penetração. Também a taxa de deposição alta reduz a energia total de soldagem da junta. Soldas que

necessitavam de vários passes no processo de soldagem com eletrodo revestido, podem ser depositadas num só passe pelo processo a arco submerso. A Figura 2.11 mostra este processo.

Neste processo o soldador ou o operador de solda não necessita usar capacete ou máscara de proteção, mas visto que ele não pode ver através do fluxo, ele tem dificuldades de acertar a direção do arco quando se perde o curso.

Devido ao arco estar oculto da vista e requerer um sistema de locação de curso, o processo de soldagem a arco submerso tem flexibilidades limitadas. Mas, isto é compensado por diversas vantagens, tais como:

- 1) alta qualidade de solda e resistência;
- 2) taxa de deposição e velocidade de deslocamento extremamente altas;
- 3) nenhum arco de soldagem visível, minimizando requisitos de proteção;
- 4) pouca fumaça;
- 5) facilmente automatizável, reduzindo a necessidade de operadores habilidosos.

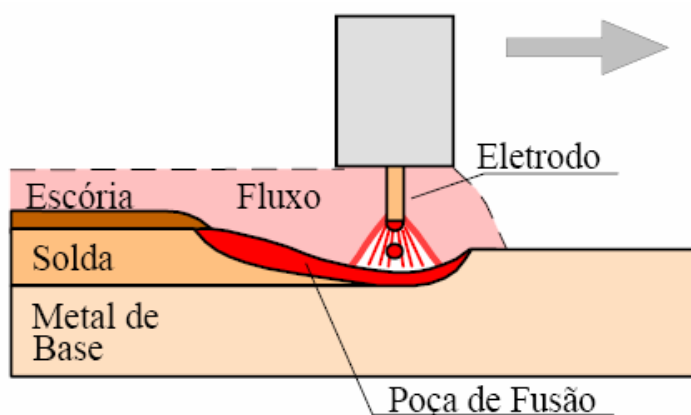


Figura 2. 11 - Soldagem a arco submerso (Modonesi. 08/2007)

O processo de soldagem a arco submerso também solda uma faixa ampla de espessuras, e a maioria dos aços, ferríticos e austeníticos.

Uma utilidade no processo de soldagem a arco submerso está na soldagem de chapas espessas de aços, por exemplo, vasos de pressão, tanques, tubos de diâmetros grandes e vigas.

Tabela 2.6 – Resumo sobre soldagem a arco submerso (Neto, 2007)

Soldagem a arco submerso	
TIPO DE OPERAÇÃO: Automática	EQUIPAMENTO: Gerador, transfor-
CARACTERÍSTICAS: .Taxa de deposição: Arame=6 a 15 kg/h Fita =8 a 20 kg/h ESPESSURAS SOLDADAS: >5mm POSIÇÕES: Plana e horizontal TIPOS USUAIS DE JUNTA: de topo e em ângulo DILUIÇÃO: Arame=40 a 50% Fita = 15 a 20% FAIXA DE CORRENTE: 350 a 2000A	mador, retificador -Silo de fluxo - Aspirador Cabeça de Soldagem: Constituída de painel, alimentação de arame e alimentação elétrica
	CONSUMÍVEIS: Arame Fita Fluxo
APLICAÇÕES TÍPICAS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E PETROQUÍMICA: Soldagem dos aços carbono e de baixa liga na fabricação de vasos de pressão, tubos com costura e tanques de armazenamento. Revestimentos resistentes à abrasão e corrosão.	
VANTAGENS: -Taxa de deposição elevada -Bom acabamento -Soldas com bom grau de compacidade	LIMITAÇÕES: -Requer ajuste preciso das peças -Limitado para posições plana e horizontal. -A tenacidade ao entalhe das soldas pode ser baixa.
SEGURANÇA: Poucos problemas. O arco é encoberto pelo fluxo	

2.4. Tipos de junções

Existem diversos tipos de junções, como se pode ver em Lincoln (1973), existem normas classificando os tipos de junções e aplicabilidade de cada uma. Com isso, segundo as normas VN1477-3, VN1477-4 e VN1477-5, que são elaboradas de acordo com as normas ISO2553, ISO5817 e ISO9692, pode-se notar basicamente que os tipos de junções são separadas em três grupos:

- Junções de topo (ver figura 2.12);

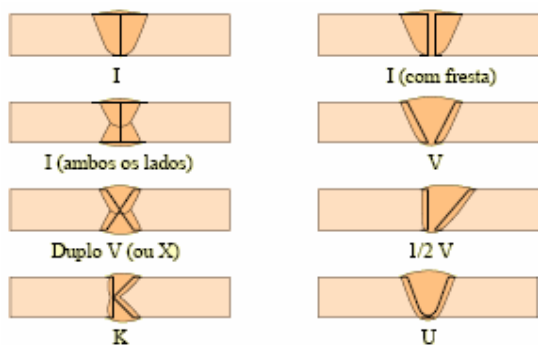


Figura 2.12 - Juntas de topo (Modonesi, 2007)

- Junções de ângulo (ver figura 2.13);

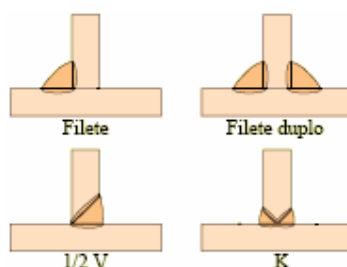


Figura 2.13 - Juntas de ângulo (Modonesi, 2007)

- Junções de canto (ver figura 2.14).



Figura 2.14 - Juntas de canto (Modonesi, 2007)

Sendo que as normas citadas contêm a simbologia aplicada a cada tipo de junção, representação em corte das junções, técnica de processamento utilizada, se deve ser efetuado o tratamento da raiz, melhor grupo de avaliação possível para o tipo da união, as espessuras de chapa e dimensões de chanfro recomendadas.

Tais dados são mais pertinentes ao projeto da junta em si, mas ao mesmo tempo são úteis em relação à proposição do projeto, primeiramente com relação ao conhecimento das geometrias a serem soldadas e em segundo sobre onde se deve fazer uso do processo de solda a arco elétrico.

Conforme as normas citadas neste item, as dimensões e espessuras de chapa que não se enquadrarem dentro do especificado, não são recomendadas para o uso

de soldagem por arco elétrico, o que segundo foi dito anteriormente torna interessante para o escopo do trabalho a ser realizado, pois ajuda a enquadrar para quais casos é possível usar a soldagem do tipo MIG.

2.5. Posições de soldagem

Para a soldagem manual existem basicamente quatro posições básicas de soldagem: horizontal, vertical, sobre a cabeça e plana.

A solda na posição plana (figura 2.15), também conhecida como à feição, está segundo Buzzoni (1962) compreendida entre os limites máximos de variação do ângulo de ataque: 15° para a esquerda, 30° para frente e 30° em direção ao soldador.

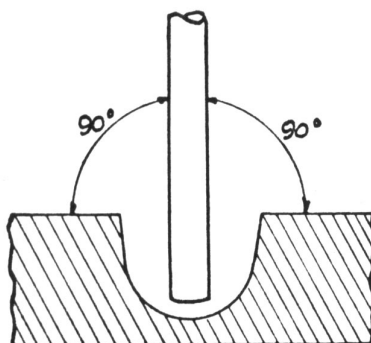


Figura 2.15 - Solda na posição plana (Buzzoni, 1962)

A solda na posição horizontal (figura 2.16) está segundo Buzzoni (1962) compreendida entre os seguintes limites máximos de ângulo: 15° para a esquerda, 10° para a frente e 15° em direção ao soldador.

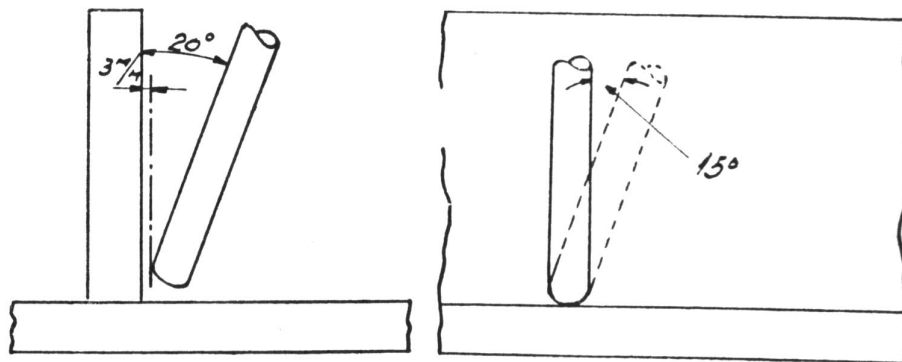


Figura 2.16 - Solda na posição horizontal (Buzzoni, 1962)

A solda na posição vertical (figura 2.17) está segundo Buzzoni (1962) compreendida entre os seguintes limites máximos de ângulo: 10° para cima, 75° para baixo e 15° para cada um dos lados.

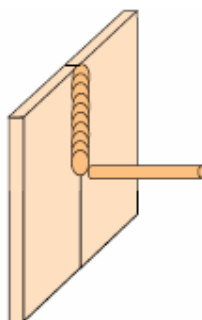


Figura 2.17 - Solda na posição vertical (Modonesi, 2007)

A solda na posição sobre a cabeça (figura 2.18) está segundo Buzzoni (1962) compreendida entre os seguintes limites máximos de ângulo: 80° para a direita, 80° para a esquerda, 80° para a frente e 170° para a direção do soldador.

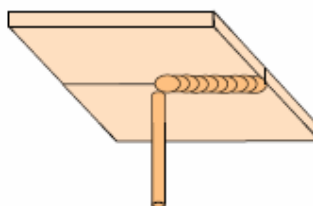


Figura 2.18 - Solda na posição sobre a cabeça (Modonesi, 2007)

2.6. Trajetória de soldagem

A solda é efetuada com os seguintes movimentos do eletrodo: movimento de abertura de arco (figura 2.19), movimento de compensação de consumo do eletrodo (não necessário no processo MIG/MAG, pois a alimentação é automática), movimento de avanço ao longo da peça, movimento lateral para tecer. Os três primeiros movimentos dispensam explicações, pois a própria definição os explica. O movimento lateral para tecer (figura 2.20) é usado por permitir depositar mais metal de solda num simples passo, não somente as soldas em “V” como também nos cordões de solda de acabamento.

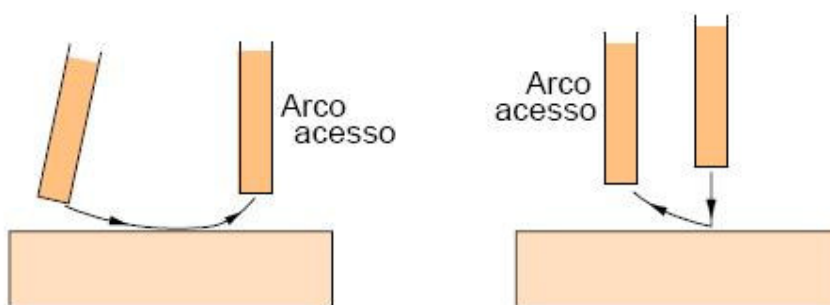


Figura 2.19 - Movimento de abertura de arco (Modonesi, 2007)



Figura 2. 20 - Movimentos de tecer (Buzzoni, 1962)

Existem diversos movimentos laterais, porém o mais importante é a sua uniformidade, pois, do contrário, teríamos uma fusão pobre e um depósito de solda considerado perigoso.

2.7. Parâmetros de soldagem

No processo MIG/MAG a tensão de alimentação é mantida constante, sendo controlada por um sistema presente no equipamento. Este sistema além de controlar a tensão, liga a alimentação de gás e de fluido de resfriamento do equipamento, como se pode ver no guia de soldagem MIG/MAG da Lincoln.

O cálculo dos parâmetros de soldagem pode ser realizado escolhendo-se o diâmetro do arame a ser utilizado, o fluxo de calor (que pode ser definido pela avaliação dos gradientes térmicos, de modo que os mesmos não provoquem trincas na solda) e a velocidade de alimentação (para o tipo de transferência metálica conveniente), assim sendo, pela fórmula na figura 2.21 a tensão é encontrada. Isto depende dos parâmetros de solda que se tem e deseja-se encontrar.

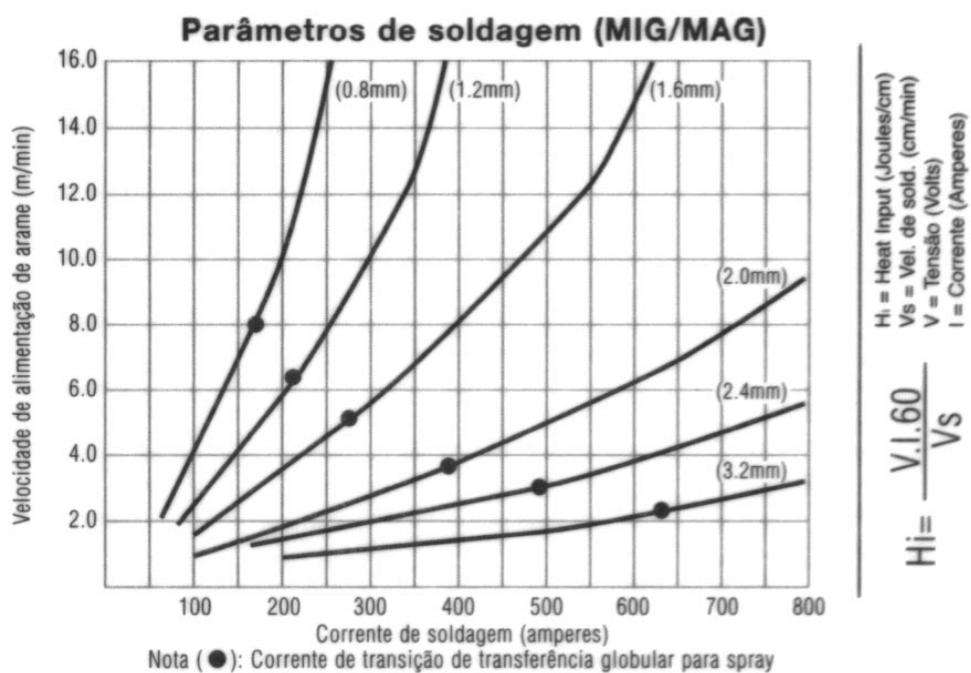


Figura 2.21 - Cálculo por fluxo de calor (ABB, 2007)

Outra forma de se definir os parâmetros de soldagem é possível baseando-se em juntas e materiais constantes em procedimentos já pré-estabelecidos, usualmente encontrados nos chamados *Handbooks* ou *Procedure Handbooks* como o Lincoln (1973).

2.8. Qualidade da soldagem

Pelo que se pode ver nas normas, a qualidade da solda é definida pelos testes os quais ela passa e é aprovada. Os testes realizados em solda são basicamente os seguintes:

- Teste visual (VT): neste teste são verificadas trincas, crateras, porosidade e grupo de poros, cavidades, inclusões sólidas, má acomodação do filete, mordedura, excesso de metal, convexidade, espessura da garganta do filete de solda, penetração, curvatura, assimetria, desalinhamento, concavidade, altura, aberturas de arco, respingos e falta de penetração, seguindo os critérios das normas EN 12062, EN 970, ASME seção V e seção VII divisão I.
- Líquido penetrante (PT): é verificado o tamanho e linearidade das indicações deixadas pelo líquido, seguindo os critérios das normas EN 12062, EN 571-1 e ASME seção V.
- Ensaio magnético (MT): é verificado o tamanho e linearidade das indicações deixadas pelas partículas magnéticas, seguindo os critérios das normas EN 12062, EN 1290, ASME seção V e VIII divisão I.
- Ensaio ultra-sônico (UT): avaliado a partir dos comprimentos das indicações por ultra-som, seguindo os critérios das normas EN 12062, EN 1714 e ASME seção V e VIII divisão I.
- Ensaio radiográfico (RT): mesmo modo que o ultra-sônico, seguindo os critérios das normas EN 12062, EN 1435 e ASME seção V e VIII divisão I.

A tabela 2.7 relaciona os tipos de testes com a qualidade da solda e a tabela 2.8 faz uma comparação entre as normas.

Tabela 2.7 – Comparação das classes de solda (Oliveira, 2005)

Comparação das Classes de Solda				
VN 1477/16	EN 25817	EN 1289	ASME VIII	GS 4990-37147p
A = Alto	B = Alto	1	1,0	A = Alto
B = Médio	C = Intermediário	2	0,85	B = Intermediário
C = Baixo	D = Moderado	3	0,70	C = Moderado
D = Baixíssimo	-	-	0,60	D = Baixa solicitação

Tabela 2.8 - Classes de soldagem (Oliveira, 2005)

Exemplos de aplicação – Solda de topo, solda de canto, solda T com penetração total, Classes A e B, Solda T com penetração parcial, Classe B e solda de Selagem, classe D.				
Ensaio \ GRUPO	A	B	C	D
VT	100 %	100 %	100 %	100 %
PT/ MT	100 %	50 %	10 %	-
UT	100 %	50 %	-	-
RT (*) Vide notas	100 %	-	-	-
RT (*) Vide notas	-	50%	-	-

2.9. Fluxo de calor em soldagem

No processo de soldagem pode-se definir uma eficiência para a fonte de calor utilizada, tal medida se torna importante, pois a energia fornecida pela fonte ao sistema não é totalmente utilizada, tendo-se assim diversas perdas como, por exemplo, perdas para o meio e perdas por convecção devido ao gás de proteção. Sendo assim a eficiência da fonte de calor é definida como:

$$\eta = \frac{Q \cdot t_{SOLDA}}{Q_{nominal} \cdot t_{SOLDA}} = \frac{Q}{Q_{nominal}} \quad (1)$$

Onde: Q é o fluxo de calor fornecido a peça e Qnominal é a potência fornecida pela fonte.

A potência da fonte é facilmente determinada pela tensão e corrente fornecidas, já o fluxo de calor fornecido a peça é obtido através de medição de um calorímetro sobre a peça.

Sendo assim, tendo-se o fluxo de calor para a peça é possível ter uma noção da distribuição de temperaturas ao longo da peça. Para isso ser possível deve-se simplificar o modelo obtendo-se assim um resultado analítico, um modelo mais elaborado que possa ser simulado. Um modelo analítico bem conhecido e utilizado pela indústria é o de Rosenthals apud Kou, 2003, que apresenta as seguintes hipóteses:

- Regime permanente;
- Fonte de calor pontual;

- Calor de fusão desprezível;
- Propriedades térmicas constantes;
- Sem perdas de calor da superfície da peça;
- Sem convecção na poça de solda.

No entanto, os modelos analíticos presentes em Kou, 2003 são para placas planas, sendo bem diferente de uma geometria de uma turbina Pelton, mas a idéia das hipóteses e de construção de um modelo podem ser usadas para a construção de um modelo voltado turbinas do tipo Pelton, talvez não um modelo analítico, pois a geometria é complexa e em consequência as condições de contorno também serão. As hipóteses de Rosenthal são bem simplificadoras para obtenção de um modelo analítico, as perdas de calor podem ser consideradas no rendimento do arco elétrico. Uma das perdas que ocorrem principalmente no processo MIG/MAG é a de transmissão de calor por irradiação, pois nota-se que a profundidade do arco elétrico varia em função do gás utilizado, no caso onde essa profundidade é menor (usando Ar puro) o arco é mais estável podendo ser mais longo em comparação ao restante dos gases, isso provoca maior irradiação (Quites e Dutra, 1979).

Em consequência das hipóteses de Rosenthal é usada a equação geral da condução de calor (Incropera e DeWitt, 2003), conseguindo assim para uma placa plana um modelo analítico de distribuição de temperaturas e consequentemente, um modelo para tentar avaliar gradientes térmicos que são importantes para entender como se solidificará a poça de fusão. Já se for levado em conta os fenômenos de convecção temos um equacionamento parecido com o de uma aleta, no entanto, como dito devido a geometria ser complexa, as condições de contorno das equações ficam complicadas dificultando a obtenção de um modelo analítico.

2.10. Tensões residuais e distorções

Como pode ser visto em Kou, 2003, as tensões residuais são causadas porque a expansão e contração do material de solda e material base são restringidas pelo material longe da área de soldagem, conseqüentemente após o resfriamento do material continuam existindo tensões internas no material. Tal processo pode ser ilustrado pela figura 2.22.

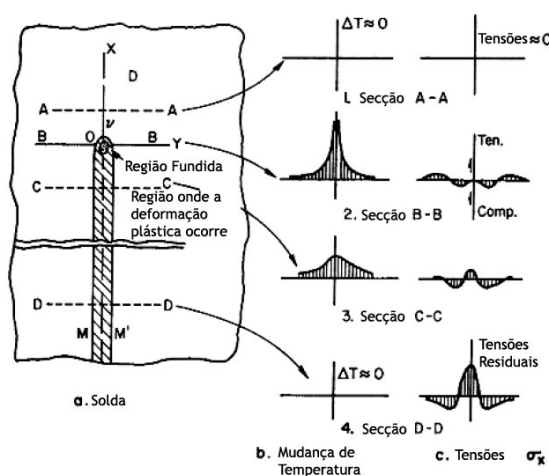


Figura 2. 22 - Tensões residuais (Adaptado de Kou, 2003)

Na secção A que não é submetida a um gradiente de temperaturas, não há deformação da peça e conseqüentemente não há tensões, na secção B já existem tensões devido à dilatação do material, que vai mudando conforme o material solidifica e ao mesmo tempo contrai como pode ser visto nas secções C e D. Para contornar esse problema pode ser realizado um alívio de tensões na peça, reduzindo as tensões internas até valores próximos de zero como pode ser visto em Kou, 2003.

As distorções são causadas também pela contração, fazendo com que a peça tenda a distorcer. Uma maneira diminuir os efeitos de distorção é soldar a peças dos dois lados alternando os cordões assim como se pode ver na figura 2.23.



Figura 2. 23 - Comparação entre métodos de solda (Adaptado de Kou, 2003)

2.11. Sensores de posicionamento

Apesar de um robô possuir movimentos com uma certa precisão, as peças as quais ele deve trabalhar não são ideais, ou seja, possuem tolerâncias as quais se ignoradas levam a colisões durante um processo. Sendo assim é interessante realizar uma aferição das medidas, no caso de um processo de soldagem, as medidas das peças e dos chanfros envolvidos. Tal tarefa pode ser desempenhada por uma máquina de medição tridimensional como a fabricada pela Romer (figura 2.24), no entanto, há um outro detalhe que deve ser levado em consideração, pois, durante um processo de união de peças utilizando calor como fonte de energia há deformações térmicas ocorrendo nas peças, o que também pode levar a colisões.



Figura 2. 24 - Medidor tridimensional da Romer (Romer, 2007)

Com isso, alguns tipos de sensores foram desenvolvidos com a finalidade de medir as peças durante um processo de soldagem por arco elétrico, tarefa essa que não é fácil, pois o campo magnético é diretamente proporcional a corrente, conforme é explicitado pela fórmula de *Bio-Savart*, com isso, como a corrente de soldagem é da ordem de centenas de Ampères tem-se um campo eletro-magnético alto, o que por consequência gera grandes distorções na aquisição de sinais elétricos próximos ao ponto de medição.

Na tentativa de solucionar esse problema de interferência no sinal e assim realizar uma medição para ter como realimentação no controle do posicionamento do efetuador vem sendo desenvolvidos basicamente três tipos de sensores:

- Sensor usando arco elétrico: As curvas de distância do eletrodo ao metal base em função da corrente e tensão de um arco elétrico podem ser obtidas e aproximadas, assim podendo se tornar boas estimativas para um controle de posicionamento, no entanto, tais parâmetros podem mudar para cada caso, dependendo do gás de proteção utilizado, eletrodo e tipo de transferência metálica utilizada. Sendo assim, é um método que deve ser desenvolvido especificamente para cada caso.
- Câmera: câmeras podem ser utilizadas para o reconhecimento e medição das geometrias envolvidas no processo, no entanto, para isso são necessários algoritmos que acabam muitas vezes só reconhecendo os contornos, a iluminação dos objetos influi (durante o processo já não poderia ser usado), a identificação em 3 dimensões necessitam de softwares custosos e caros necessitando de um computador dedicado para processamento dos dados e a identificação só é possível quando as partes são separadas umas das outras (Franchin, 2007).
- Laser: existem diversas técnicas para o uso de lasers, técnicas que se baseiam em diferenças de fase de um feixe projetado e triangularizado sobre a superfície e outro direto, varredura da superfície com laser e medição utilizando câmera e triangularização com transdutores de posição. Na primeira, há um problema de parte que não são atingidas devido a triangularização usada. Na segunda, as peças são varridas as poucos e o contorno formado pelo laser é medido com uma câmera, isso pode levar e ser ter alto custo devido a câmera. No terceiro, o feixe é projetado sobre a

superfície e medido pelo sensor que produz um sinal proporcional a distância, no entanto, ao ligar-se o arco deve-se colocar filtros óticos no sensor de modo a filtrar a radiação proveniente do arco para não afetar as medidas (Smati et al., 1987).

Existem ainda outros tipos de sensores que podem ser usados, sendo os acima mais comentados na literatura, de qualquer modo para um sensor poder ser aplicado com êxito num processo de soldagem, deve-se levar em consideração os fenômenos que geram interferências no sinal, ou seja, os sensores não podem estar muito próximos ao arco e aos condutores de fornecimento de energia do mesmo, sensores óticos devem ter filtros para minimizar os erros de medição causados pela radiação eminente do arco e deve-se levar em consideração fatores como fumaça oriunda do processo. Outro fator importante a ser levado em consideração é o custo de um sistema desses que pode tornar a aplicação ao processo inviável.

2.12. Direção do Efetuador

Existem diversas maneiras de se representar a direção do efetuador, dentre elas pode-se citar o uso dos cosenos diretores ou o uso de um vetor que representa a direção. No caso dos robôs da Motoman, há uma representação em termos de rotação que segundo Fu, Gonzáles e Lee, 1987, é um tipo de representação que pode ser utilizado, no entanto, há diversos tipos de representação desses ângulos de rotação, como. *rolamento, arfagem e guinada* (“roll-pitch-yaw” - XYZ) e ângulos de Euler.

Como exemplo, é apresentado no livro como se calcula os ângulos de rotação para a representação de Euler, no entanto, tal método que foi desenvolvido por Paul et al, 1981 apud Fu, Gonzales e Lee, 1987 pode ser aplicado para outras representações.

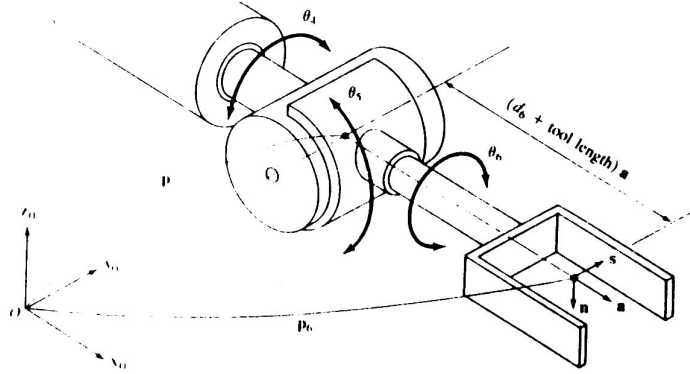


Figura 2. 25 - Representação dos Sistemas de Coordenadas (Fu, Gonzales e Lee, 1987)

Dado o sistema de coordenadas do efetuador em relação a base, como representado na figura 2.25, tem-se a seguinte matriz de rotação:

$$R_0^6 = \begin{bmatrix} n & s & a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_X & s_X & a_X \\ n_Y & s_Y & a_Y \\ n_Z & s_Z & a_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

As matrizes que representam as rotações possuem três ângulos representativos, supondo que a matriz seja a representação das rotações em x (Phi) depois em y (Teta) depois em z (Psi), tem-se segundo Paul et al. apud Fu, Gonzáles e Lee, 1987:

$$R_{Z,\psi}^{-1} \cdot R_0^6 = R_{X,\phi} \cdot R_{Y,\theta} \quad (3)$$

Assim sendo, comparando os termos dos dois lados é possível encontrar as soluções do problema, caso isso não seja possível voltando-se uma rotação, deve-se incluir outra.

Com relação aos robôs da Motoman, não há documentação especificando o que ele chama de Rx, Ry e Rz, sendo assim para encontrar tais parâmetros se faz necessário o uso de testes e para isso há basicamente seis composições de rotações: Rx,Ry e Rz; Rx, Rz e Ry; Ry, Rx e Rz; Ry, Rz e Rx; Rz, Rx e Ry; Rz, Ry e Rx.

Para esse tipo de representação o que é mais comumente utilizado e ao mesmo tempo conhecido, são as rotações em X depois em Y depois em Z. Seguindo a resolução proposta por Paul et al. Apud Fu, Gonzáles e Lee, 1987, tem-se:

$$R = R_{Z,\phi} \cdot R_{Y,\theta} \cdot R_{X,\varphi} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} n_X & s_X & a_X \\ n_Y & s_Y & a_Y \\ n_Z & s_Z & a_Z \end{bmatrix} = R_{Z,\phi} \cdot R_{Y,\theta} \cdot R_{X,\varphi} \quad (5)$$

$$R_{Z,\phi}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} n_X & s_X & a_X \\ n_Y & s_Y & a_Y \\ n_Z & s_Z & a_Z \end{bmatrix} = R_{Y,\theta} \cdot R_{X,\varphi} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} n_X & s_X & a_X \\ n_Y & s_Y & a_Y \\ n_Z & s_Z & a_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} n_X \cdot \cos \phi + n_Y \cdot \sin \phi & s_X \cdot \cos \phi + s_Y \cdot \sin \phi & a_X \cdot \cos \phi + a_Y \cdot \sin \phi \\ -n_X \cdot \sin \phi + n_Y \cdot \cos \phi & -s_X \cdot \sin \phi + s_Y \cdot \cos \phi & -a_X \cdot \sin \phi + a_Y \cdot \cos \phi \\ n_Z & s_Z & a_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cdot \sin \varphi & \sin \theta \cdot \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cdot \sin \varphi & \cos \theta \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (8)$$

Comparando as matrizes:

$$\tan \phi = \frac{n_Y}{n_X} \quad (9)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{-n_z}{n_x \cdot \cos \phi + n_y \cdot \sin \phi} \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_x \cdot \sin \phi - a_y \cdot \cos \phi}{-s_x \cdot \sin \phi + s_y \cdot \cos \phi} \quad (11)$$

2.13. Rotação em torno de um eixo arbitrário

Os ângulos de *rolamento*, *arfagem* e *guinada* (“roll-pitch-yaw”), como visto anteriormente, definem a direção do efetuator, no entanto, pode ser necessário utilizar uma rotação em torno de um eixo arbitrário de modo a reposicionar o sistema que representa a ponta da ferramenta, de modo que a ferramenta fique na posição desejada, evitando assim interferência com a peça.

Com isso, para realizar essa operação pode-se ver (Barros, 2006) que para facilitar a operação de rotacionar em um ângulo θ , um sistema em torno de um eixo (n_x, n_y, n_z) , deve-se rotacionar o sistema até o eixo arbitrário coincida com um dos eixos x , y ou z e após a rotação voltar o eixo para a posição original. Tal sequência de operações resulta na matriz dada abaixo.

$$\mathbf{R}_{n,\theta} = \begin{bmatrix} n_x^2(1 - C\theta) + C\theta & n_x n_y(1 - C\theta) - n_z S\theta & n_x n_z(1 - C\theta) + n_y S\theta \\ n_x n_y(1 - C\theta) + n_z S\theta & n_y^2(1 - C\theta) + C\theta & n_y n_z(1 - C\theta) - n_x S\theta \\ n_x n_z(1 - C\theta) - n_y S\theta & n_y n_z(1 - C\theta) + n_x S\theta & n_z^2(1 - C\theta) + C\theta \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. Materiais e Métodos

3.1. Materiais

As peças de uma turbina do tipo Pelton são feitas utilizando o aço martensítico ASTM A743 CA 6 NM, sendo que sua composição química consta resumida na tabela 3.1 e suas propriedades mecânicas na tabela 3.2.

Tabela 3. 1- Composição Química do ASTM A 743 CA 6 NM

C%	Mn%	Si%	Cr%	Ni%	Mo%	P%	S%	Cu%	W%	V%	$\sum \%Re_s$
$\leq 0,06$	$\leq 1,00$	$\leq 1,00$	11,5- 14,0	3,5- 4,5	0,4- 1,0	$\leq 0,04$	$\leq 0,03$	$\leq 0,50$	$\leq 0,10$	$\leq 0,05$	$\leq 0,50$

Tabela 3. 2 - - Propriedades mecânicas do ASTM A 743 CA 6 NM

Tensão de Ruptura (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alogamento (%)	Coefficiente de Poisson (%)
≥ 755	≥ 550	≥ 15	≥ 35

Os tipos de arame utilizados para a soldagem do aço em questão poder ser os 309T (tabela 3.3), 309L (tabela 3.4) e o 410 (tabela 3.5), que também podem ser utilizados quando a soldagem é automática. No caso do 309T há o problema do revestimento que deve ser retirado, dificultando o trabalho do robô, no entanto o mesmo produz bons resultados, já os outros tipos não apresentam o revestimento.

Tabela 3. 3 - Características do arame 309 T (NCS, 2007)

NCS	AWS/ASME	Composição Química / Propriedades Mecânicas
NCS 9 T 3	AWS ER 309 T 3	C < 0,15 Cr - 22,00 a 25,00 Ni - 12,00 a 14,00 R > 552 N/mm ² A > 30 %
Características: Arame Tubular "Auto Protegido" (dispensa uso de gás), tipo CrNi 23/12 austenítico - ferrítico, resistente à trincas, à corrosão e a temperaturas até 1000°C , indicado para união de Aço Inox ao Aço Carbono ou Revestimento neste. Também para uniões de Aços dissimilares e de Alta Resistência em geral. De estrutura cristalina super refinada, é muito resistente ao Desgaste metal contra metal. Também recomendado como Almofada para Revestimento Duros. Aplicações: Uniões de Aço Carbono ao Inoxidável, Revestimento resistentes à Temperatura, Corrosão / ou Desgaste intermetálico sobre Aço Carbono, Almofadas para Revestimentos Duros.		

Tabela 3. 4 -- Características do arame 410 (ABS, 2007)

Arame Tubular	Metal Deposit.	Prop. Mecânicas	Diâm. (mm)	Corrente /Tensão	Depos. (kg/h)	Gás de Proteção/ Tipo de Corrente
Tubrod 410 NiMo MC EC410Ni Mo (Aproxim) ASME SFA – 5.9 EN 12073 T13 4MM2	C 0,03 Si 0,60 Mn 0,72 Cr 11,45 Ni 4,31 Mo 0,58	L.R. 875 MPa L.E.>800 MPa A 19% ChV: 54 J (0°C) 50J (-20°C) T.T 580/600°C 2 horas	1,20	150A,28V 250A,29V 350A,32V	1,80 3,63 5,75	96% Ar + 4% O ₂ CC+ Ou 98% Ar + 2% O ₂ CC+
			1,60	190A,27V 300A,30V	2,50 5,40	

Tabela 3. 5 - Características do arame 309L (ABS, 2007)

Arame Tubular	Metal Deposit.	Prop. Mecânicas	Diâm. (mm)	Corrente /Tensão	Depos. (kg/h)	Gás de Proteção/ Tipo de Corrente
Tubright 309L	100%CO ₂ C 0,04 Si 0,90 Mn 1,53 Cr 23,00 Ni 13,80	100%CO ₂ L.R. 610MPa L.E. 430MPa A35%	1,20	170A,26V 270A,30V	2,20 4,35	100% CO ₂ Ou 75% Ar + 25% CO ₂
	Ar + 25%CO ₂ C 0,04 Si 0,90 MN 1,60 Cr 22,90 Ni 13,9	Ar + 25%CO ₂ L.R. 620MPa L.E. 500MPa A36%	1,60			

3.2. Equipamentos

O robô utilizado para soldagem de geometrias simples, como chapas com geometria da junta retilíneas ou circulares, é o UP20M da Motoman (figura 3.1) que possui como uma das características principais a função “*weaving*” ou trançado (para efetuar uma maior deposição passo) a qual necessita da amplitude e frequência da onda que é determinada por três pontos básicos, no entanto, tal função só funciona quando o robô trabalha com retas.



Figura 3. 1 - Robô UP20M da Motoman (Motoman UP20, 2007)

Algumas das características técnicas do robô são apresentadas na tabela 3.6, as quais são importantes em serem conhecidas, pois definem as limitações espaciais e dinâmicas do robô em questão. A carga e a velocidade máximas estão bem acima do que o necessário, pois o único carregamento que um robô de solda terá é o da ferramenta utilizada para a soldagem e a velocidade necessária para o processo bem menor que o máximo que pode ser atingido. No entanto, o que é importante

para o processo de soldagem de um rotor com relação ao robô é o alcance máximo do mesmo, devido às dimensões das peças a serem soldadas.

Tabela 3. 6 - Dados Técnicos do Robô (Motoman UP20, 2007)

Motoman UP20M	
Estrutura	Vertical jointed-arm type
Eixos Controlados	6
Carga Máxima	20 kg
Alcance Vertical	5585 mm
Alcance Horizontal	3106 mm
Repetibilidade	± 0.15 mm
Massa Aproximada	495 kg
Alcance de Movimento do Robô	
Eixo - S	$\pm 180^\circ$
Eixo - L	$+135^\circ, 90^\circ$
Eixo - U	$+251^\circ, 160^\circ$
Eixo - R	$\pm 190^\circ$
Eixo - B	$\pm 140^\circ$
Eixo - T	$\pm 360^\circ$
Velocidades Máximas do Robô	
Eixo - S	170 %s - 2.97 rad/s
Eixo - L	170 %s - 2.97 rad/s
Eixo - U	170 %s - 2.97 rad/s
Eixo - R	335 %s - 5.85 rad/s
Eixo - B	335 %s - 5.85 rad/s
Eixo - T	510 %s - 8.9 rad/s

Para se ter uma avaliação melhor do volume de trabalho do robô segue abaixo uma figura retirada do manual, figura 3.2.

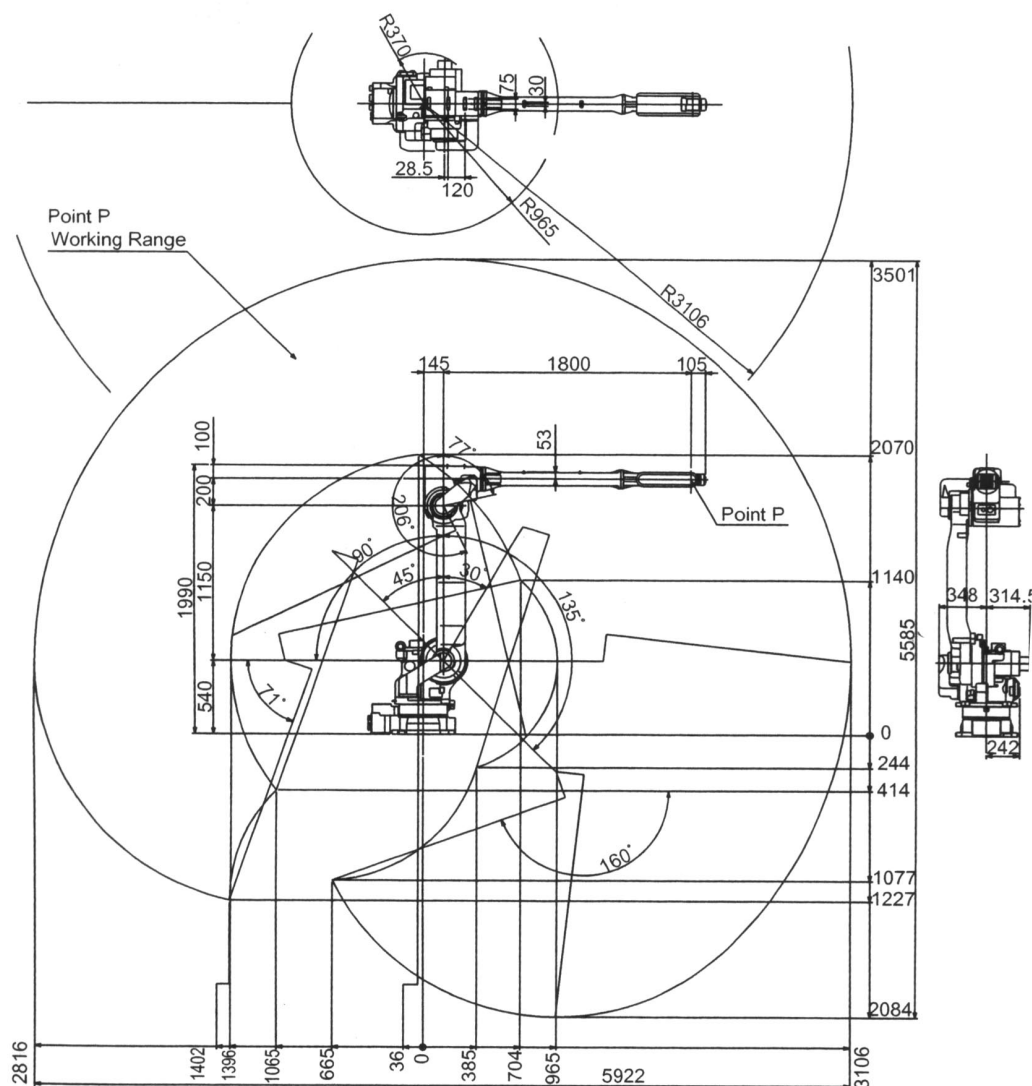


Figura 3. 2 - Volume de trabalho do UP20M (Motoman, 2007)

Com relação a programação, para o posicionamento do efetuador são necessárias seis variáveis para o posicionamento do efetuador, três para o ponto no espaço e três para a orientação do efetuador, já as funções presentes no robô são bem próximas da linguagem *assembly*, sendo que para a aplicação de condicionais deve ser usado o comando JUMP, por exemplo.

O robô possui também funções básicas de interpolação como de retas, círculos, parabólica e por pontos. É possível também realizar operações aritméticas com as variáveis e algumas operações com funções trigonométricas.

3.3. O processo de fabricação utilizado

De modo a facilitar o processo de fabricação dos rotores do tipo Pelton, sua concha é dividida em duas partes como se pode ver pelas figuras 3.3 e 3.4, que posteriormente são soldadas manualmente.



Figura 3. 3 - Bloco principal da turbina



Figura 3. 4 - Meia concha do rotor

Como pode ser visto na figura 3.4, a concha possui chanfro de um lado somente, anteriormente tal chanfro era realizado dos dois lados e assim como visto

anteriormente isso reduz as distorções provocadas pelo processo. No entanto, devido as geometrias envolvidas, torna difícil o acesso ao soldador, sendo assim mais conveniente tanto para o soldador como futuramente para o robô, utilizar chanfro somente do lado que o acesso é mais fácil.

Os parâmetros de soldagem relevantes ao processo para o soldador são a temperatura de pré-aquecimento da peça, a qual é importante, pois a mesma diminui bastante o gradiente térmico (Kou, 2003). Além das tensões e correntes que deverão ser usadas no processo, tais parâmetros são definidos pelo tecnólogo responsável.

Com o conhecimento dos parâmetros de solda, o soldador inicia o processo soldando o meio da concha como mostra a figura 3.5 com uma corrente acima do definido, para aumentar a deposição e o material de adição poder escorrer até o fundo da peça, isso se deve a geometria do chanfro que não permite acesso do bico de solda até o fundo do chanfro na região.

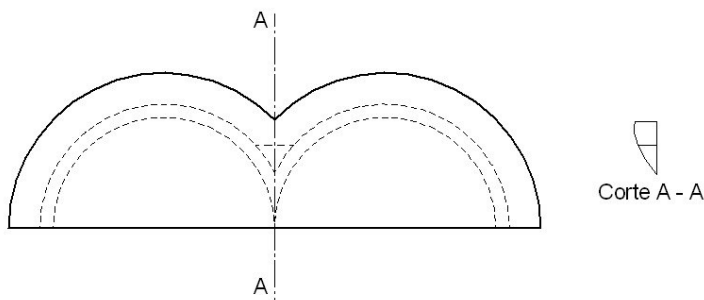


Figura 3. 5 - Início do processo

Após atingir um nível que o bico de solda consegue alcançar a peça, o soldador começa a passar vários cordões de solda até que o preenchimento do chanfro seja efetuado como mostra a figura 3.6.

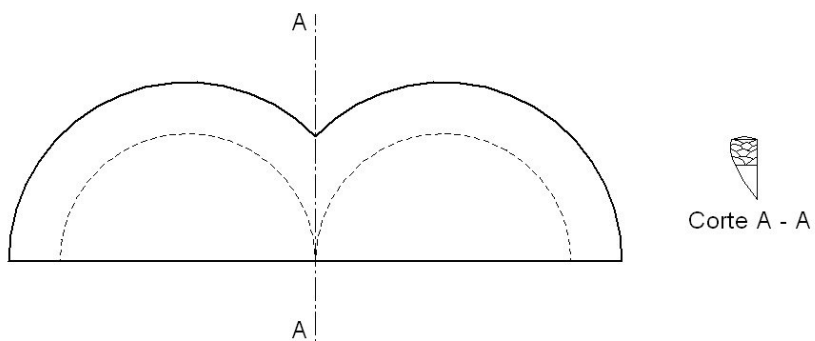


Figura 3. 6 - Fim do processo

3.4. Método

3.4.1. Avaliação de gradientes térmicos

Para avaliar regiões críticas, onde o gradiente térmico é mais alto, durante o processo de soldagem de um rotor o tipo Pelton o problema foi simplificado de modo a dar uma noção do gradiente térmico e do perfil de temperaturas durante o processo. Assim sendo foi adotado um modelo em elementos finitos utilizando o ANSYS® em duas dimensões onde a geometria usada foi a da secção onde é executada a solda de um rotor Pelton, como mostra a figura 3.7.

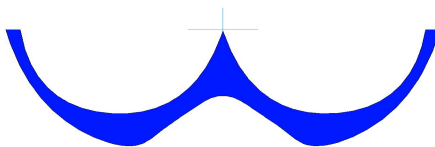


Figura 3. 7 – Geometria Considerada para Simulação

As propriedades térmicas do ASTM A743 não foram encontradas, sendo assim as propriedades consideradas (tabela 3.8) foram a do AISI 309 que possui uma composição química próxima a do A743. Tais propriedades para efeito de simplificação foram consideradas constantes.

Tabela 3. 7 - Propriedades térmicas do AISI 309 (Matweb, 2007)

Calor Específico	0.5E-3	J/kg.°C
Coefficiente de Condução	15.6	W/m.K
Temperatura de Fusão	1455	°C

As condições de contorno utilizadas foram o fluxo de calor praticamente pontual e troca de calor por convecção. O fluxo de calor foi estimado como uma média de potência fornecida a partir de dados de parâmetros de soldagem de um rotor Pelton utilizando aquisição de dados da máquina de solda pelo programa *PowerWave* da *Lincoln Electric*[®]. O programa *PowerWave*[®] envia um *e-mail* com os dados dos parâmetros de soldagem utilizados a cada período configurado ou uma quantidade de material depositado pré-configurado e os dados são enviados cada vez que um desses itens ocorre, sendo assim há pontos onde a máquina se encontrava fora de uso. Esses dados também são enviados, por essa razão há pontos com corrente nula. Nos gráficos apresentados nas figuras 3.8 e 3.9 são mostrados os dados da máquina durante a soldagem de um rotor Pelton completo, a partir do gráfico da corrente (figura 3.8) pode-se ver um pico de corrente utilizado, que é qualitativamente compatível com o início do processo descrito brevemente na seção 3.3, onde a parte central da peça é preenchida com uma alta corrente, e depois uma tendência em manter a corrente numa certa faixa, que equivale ao restante do processo.

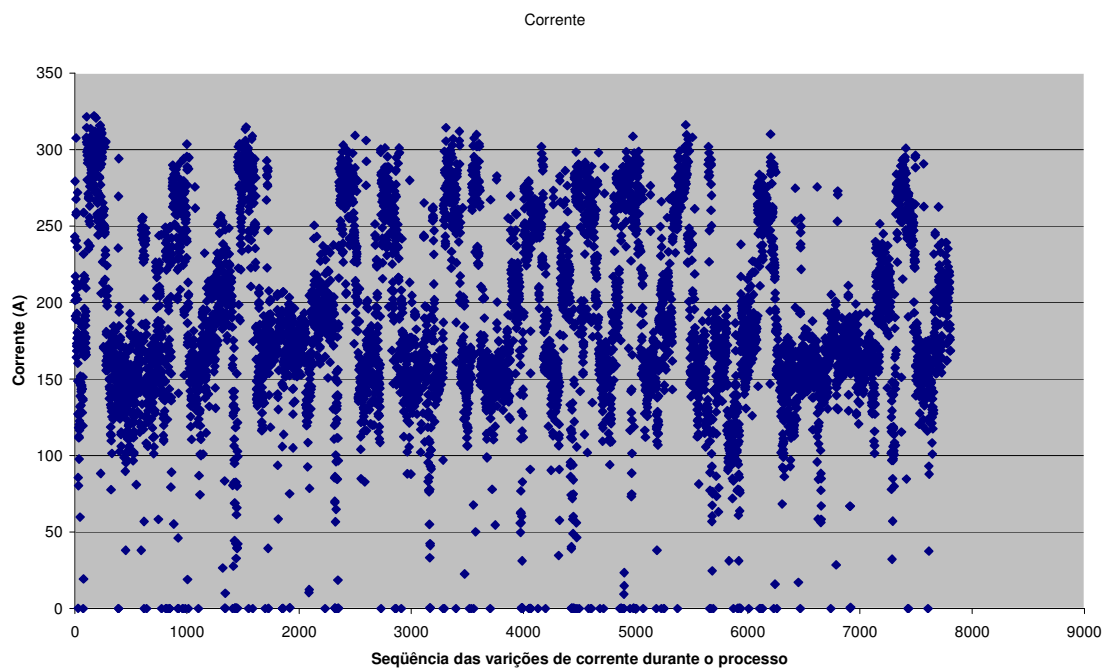


Figura 3. 8 - Corrente de Soldagem

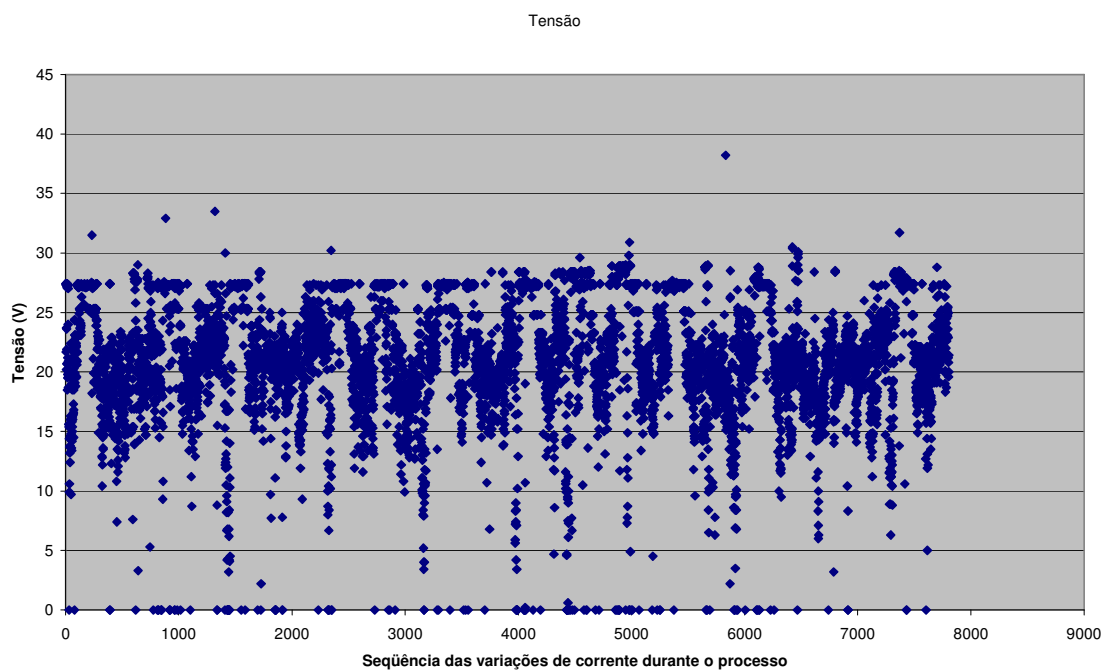


Figura 3. 9 - Tensão de Soldagem

Assim sendo, como uma base para a simulação, foi calculada a média dos valores de corrente e tensão, tendo-se assim obtidos os seguintes valores: 187,4 A e 21,4 V, resultando em uma potência fornecida de 4018,5W.

O valor do coeficiente de convecção foi estimado baseado na correlação de uma placa plana com escoamento laminar para um número de Prandtl > 0.6 (Incropera e DeWitt, 2003), sendo que a velocidade do ar admitida foi de 116,7 km/dia (Souza, Soler e Fernandes, 1998). Com isso chegou-se a um coeficiente de transferência de calor por convecção de 4,4 W/m.K.

Foram realizadas duas simulações levando em consideração os itens descritos nessa seção, cada simulação considerando o fluxo de calor em um ponto indicado na figura 3.10.

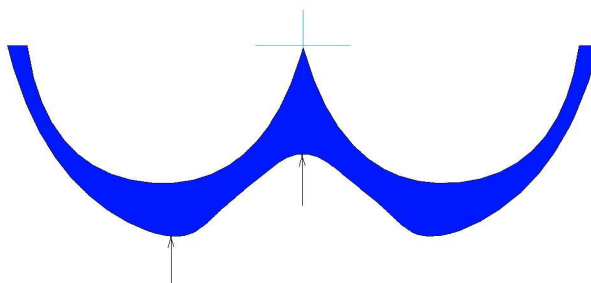


Figura 3. 10 - Pontos de aplicação do fluxo de calor

3.4.2. Elaboração do programa

A geometria da peça que se pretende soldar é formada por *b-splines*, sendo então uma geometria complexa. Apesar de o robô da *Motoman* possuir uma função de interpolação chamada *MOVVS*, que move o robô através de pontos usando uma *spline*, no entanto, já foi utilizada tal função para uso na trajetória e não se obtiveram os resultados esperados, pois a curva da trajetória não seguiu corretamente. Devido a isso, como idéia inicial para auxiliar na elaboração de programas para o robô foi

utilizado o software NX 4.0® da UGS® que possui uma programação de CAM. No entanto, mais voltada para a programação CNC de máquinas de usinagem, não tendo funções específicas para a soldagem. Apesar disso como é um software voltado para modelagem e usinagem, o mesmo apresenta funções que permitem desenhar curvas e superfícies complexas e assim sendo podem ser usadas para definir trajetórias fornecendo os pontos de uma curva definida. Outro item importante para a soldagem é a direção do efetuador, que no caso é definida através dos ângulos de *rolamento*, *arfagem* e *guinada* (“roll-pitch-yaw”), como pode ser visto no item 2.12. Para tanto dentro do software programado a definição da direção do manipulador é executada através do vetor normal a uma superfície e seus vetores tangentes, como pode ser visto na figura 3.11.

Sendo assim, a partir de um programa previamente existente em linguagem C#, que dividia uma curva em pontos e encontrava seu vetor normal, foi desenvolvido outro que transformasse esses pontos em um programa e ao mesmo tempo convertesse o vetor normal à superfície em ângulos utilizando as equações 9, 10 e 11. Além disso, foi implementada a matriz de rotação em torno de um eixo arbitrário, no caso o eixo escolhido foi o do vetor normal, pois tal rotação permite posicionar corretamente a ferramenta. O código fonte do programa realizado consta nos anexos B e C.

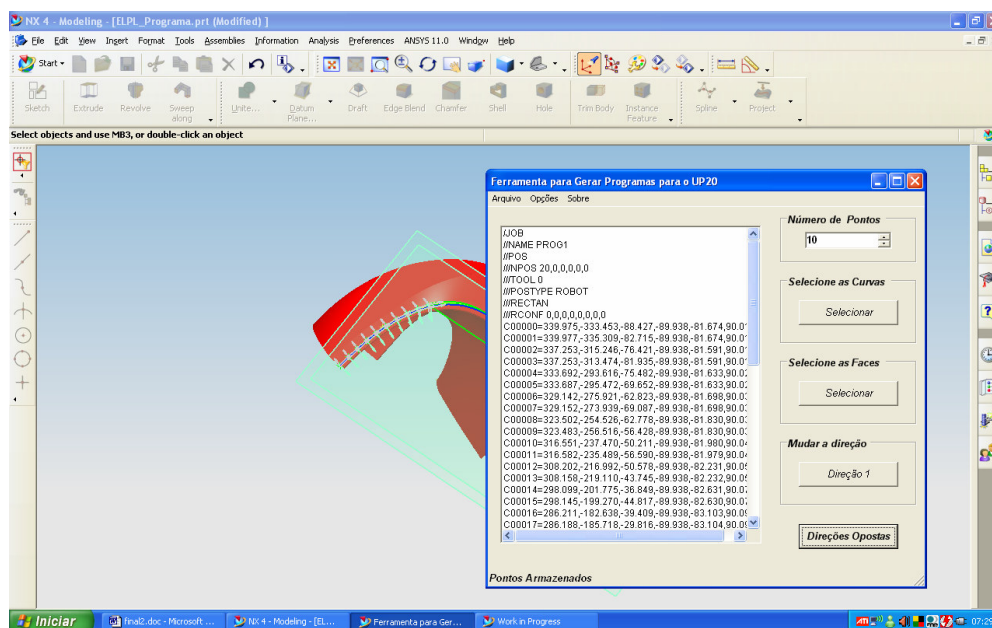


Figura 3. 11 - Programa para gerar programas para o robô

3.4.3. Verificação de interferências

O desenho do chanfro de solda é realizado a partir do modelo completo do rotor, com isso, é realizado um corte com base em secções pré-estabelecidas. Tendo essas secções disponíveis para estudo é possível determinar ângulos que evitem colisões do bocal de solda durante a trajetória. Tais ângulos não são somente importantes para evitar colisões, mas ao mesmo tempo para garantir fusão nas paredes do chanfro. Com isso, foi feita uma verificação no desenho do chanfro em duas dimensões (figura 3.12) para se determinar os ângulos que evitariam colisões e ao mesmo tempo discutido com o Sr. Marcos Vasques¹ se tais ângulos podem garantir os resultados esperados.

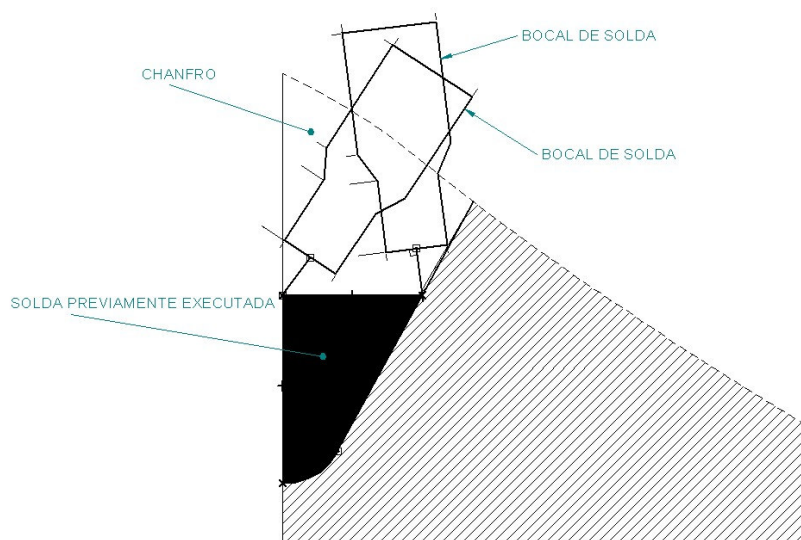


Figura 3. 12- Chanfro de solda

3.4.4. Teste de posicionamento

Numa primeira etapa os programas gerados pelo software programado em C#, brevemente comentado na secção anterior, foram testados no robô para verificação de posicionamento, tanto da ponta do arame de solda como da sua direção. Sendo

¹ Tecnólogo de Soldagem, formado pela Fatec-SP.

assim, para este teste inicial foi utilizado o robô o UP-20 da marca Motoman, brevemente descrito no item 3.2, sendo seu controlador o XRC 2001 (figura 3.12).

As conchas do rotor tipo Pelton são previamente usinadas antes da montagem para solda, deixando-se em torno de 3 mm de sobre-metal nas faces, no entanto, no chanfro as medidas são usinadas dentro do nominal que foi previamente desenhado.

Sendo assim, foi utilizado o chamado de sistema de coordenadas do usuário, onde pode-se definir um sistema de coordenadas qualquer, dando-se o ponto de origem do sistema mais o ponto que indica a direção de x e um ponto para direção de y, sendo o eixo z definido pelo programa interno do robô baseando-se na regra da mão direita.

O sistema de coordenadas foi definido com base nas faces do chanfro de solda, como pode-se ver na figura 3.3, existe uma parte reta de um lado da concha, onde tomando-se a média dos pontos A e B ilustrados na figura 3.13, onde pela média aritmética dos pontos A e B pode-se definir a origem (ponto C), e o ponto B sendo a direção em X e o ponto D definido pelo cruzamento de duas semi-circunferências quaisquer de mesmo raio, como o ponto que define a direção de Y.

A partir desse sistema de coordenadas foi gerado um programa, com auxílio do software descrito no item 3.4.2. A origem do programa elaborado pode ser vista na figura 3.11 e a listagem do mesmo encontra-se no anexo A.



Figura 3. 13 - Controlador XRC 2001

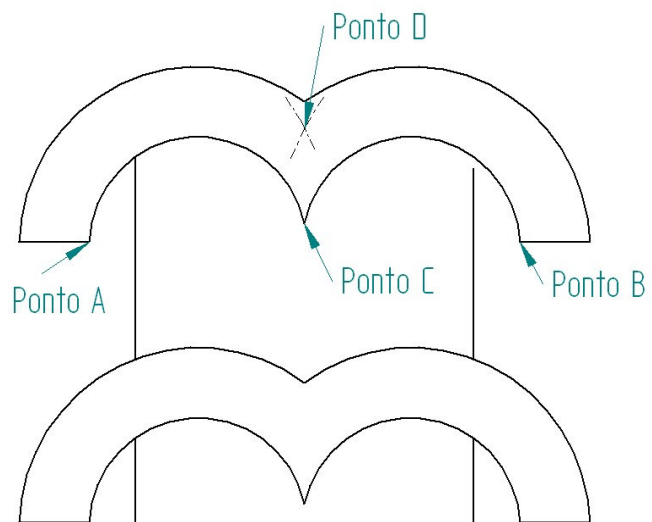


Figura 3. 14 - Pontos para definição do sistema de coordenadas

4. Resultados e Discussões

4.1. Simulações

As simulações foram realizadas com base no descrito na seção 3.1 para o regime permanente utilizando o método dos elementos finitos auxiliado pelo programa ANSYS®. Para ambas as simulações foi utilizada uma malha conforme pode ser vista na figura 3.14.

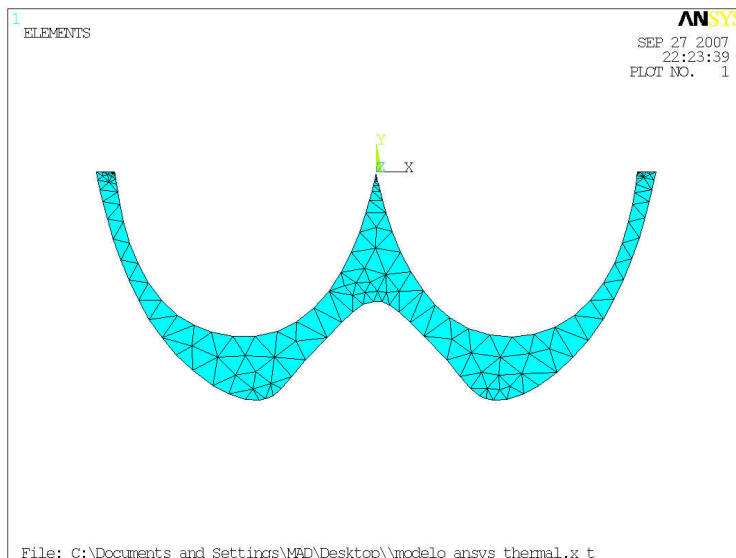


Figura 3. 15 - Malha utilizada

Como dito anteriormente o objetivo é tentar verificar regiões críticas e para tanto deve ser ter uma idéia dos gradientes térmicos presentes durante o processo, sendo assim para a posição 1, que está localizada no ponto inferior e que pode ser visualizada na figura 3.15 onde tem-se a maior temperatura presente, tem-se o perfil de temperaturas dado pela figura 3.15 e o gradiente térmico dado pela figura 3.16.

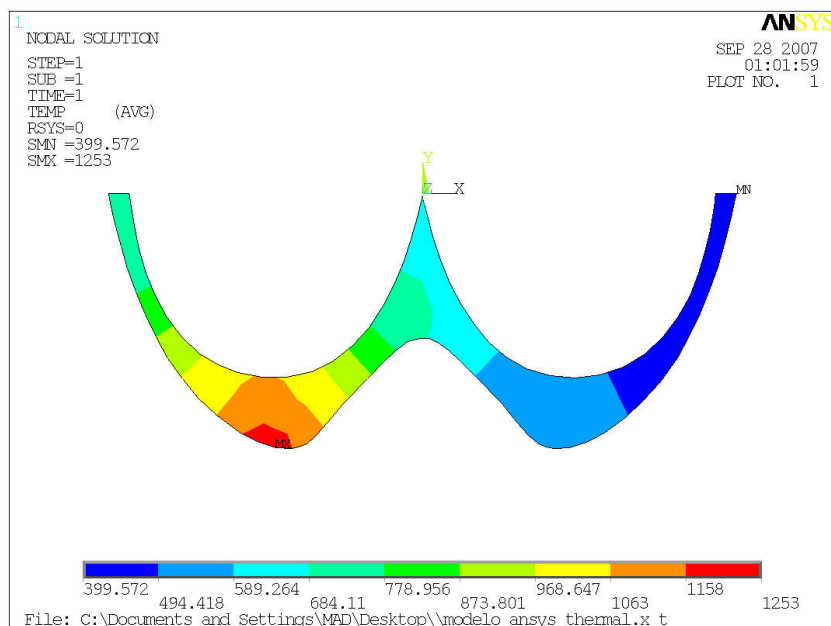


Figura 3. 16 - Perfil de temperaturas para posição 1

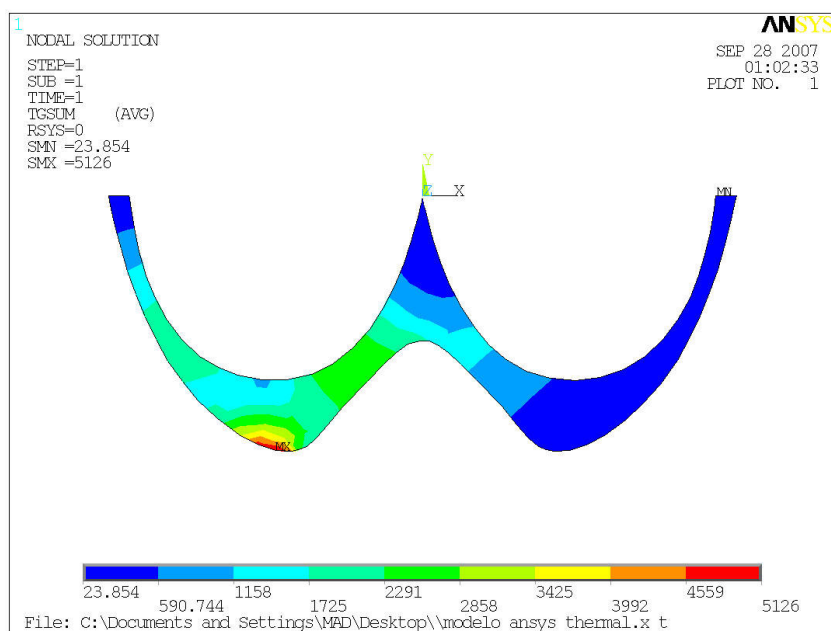


Figura 3. 17 - Gradiente térmico para posição 1

Para a posição 2, localizada na parte central da peça e que pode ser melhor visualizada no ponto de maior temperatura, tem-se o perfil de temperaturas dado pela figura 3.17 e o gradiente térmico dado pela figura 3.18.

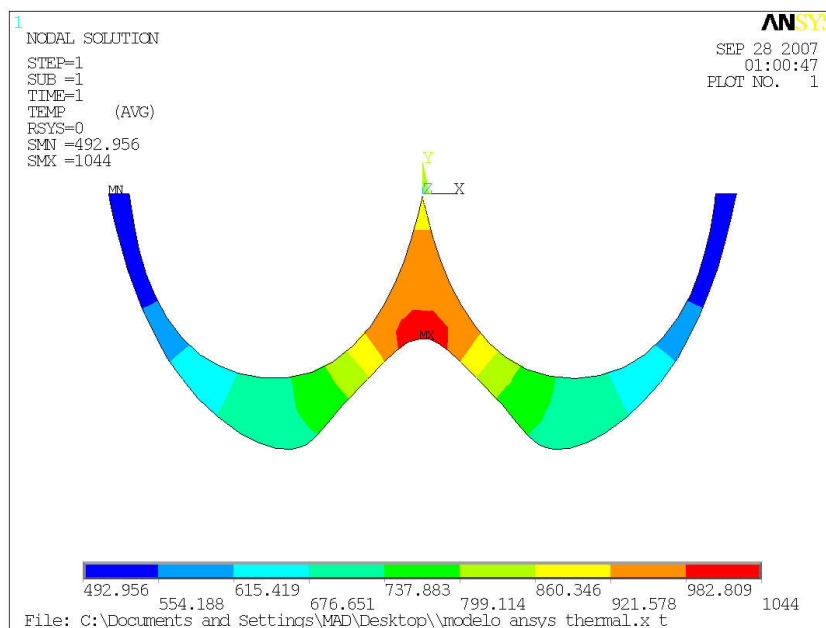


Figura 3. 18 - Perfil de temperatura para posição 2

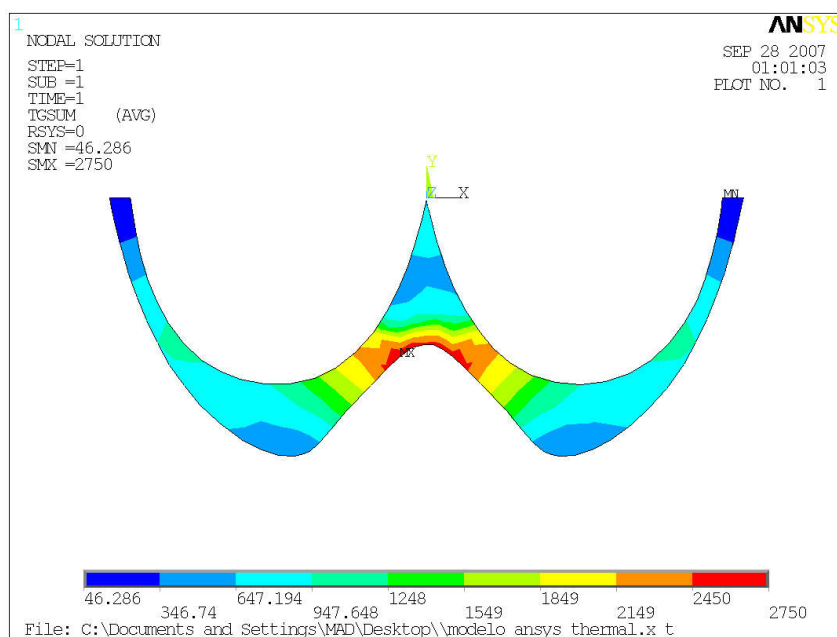


Figura 3. 19 - Gradiente térmico para posição 2

Comparando-se as duas posições pode-se que a região dada pela posição 1 é mais crítica durante o processo, pois apresenta um gradiente térmico maior. O gradiente térmico dá a taxa de resfriamento da poça de fusão e quanto maior, mais crítico se torna principalmente com relação ao modo de formação das tensões residuais que se dá pelo resfriamento (Kuo, 2003), tendo assim uma maior suscetibilidade a trincas.

4.2. Testes de posicionamento

Os testes de posicionamento seguiram como descrito no item 3.4.3, sendo que no primeiro teste, onde foi utilizada somente uma concha e o sistema definido com distância medidas com uma escala, a posição dos pontos teve um desvio da ordem de 10 mm, provavelmente em função da definição do sistema de coordenadas, onde inicialmente foi definido com o uso de uma trena. Tal teste pode ser ilustrado pela figura 4.1.



Figura 4. 1 - Primeiro teste de posicionamento

O problema encontrado durante esse teste foi a definição da direção do efetuador que inicialmente foi realizada fixando-se a rotação em y e depois

encontrando as rotações em x e z utilizando a matriz de rotação em x depois em y depois em z, com isso houve variações inesperadas na direção do efetuador durante os testes. Tal teste foi necessário para se fazer uma avaliação inicial do posicionamento verificando se o programa utilizado estava correto.

O segundo teste (figura 4.2) foi realizado na concha montada, e o sistema de coordenadas foi definido baseando-se na face usinada como descrito anteriormente. Para o posicionamento dos pontos, os resultados foram melhores, e os ângulos continuaram variando fora do esperado. No entanto, além disso, pôde-se ver que há grande irregularidade na soldagem manual, o que ao realizar um programa para soldagem se a mesma tiver um cordão anterior feito a mão, dificulta a definição da trajetória, sendo nesse caso o uso de um sensor para verificar o posicionar, ou uma medição previamente realizada.

Com relação aos ângulos, foram anotados dois pontos com diferentes direções para comparativo, ambos aproximadamente normais à superfície da concha, em seguida, usando estes ângulos de rotação, foram feitos testes no NX, que permite a rotação do sistema de coordenadas ao redor dos eixos coordenados, e chegou-se a conclusão que os robôs da *Motoman* utilizam a matriz de *rolamento, arfagem e guinada* (“*roll-pitch-yaw*”), descrita no item 2.12. A partir disso foi utilizada a solução de Paul et. Al apud Fu, Gonzáles e Lee, 1987, o que provavelmente deve resolver a da definição da direção da ferramenta.



Figura 4. 2 - Segundo teste

5. Conclusões

As principais conclusões desse trabalho são:

- 1) O trabalho realizado permite visualizar qualitativamente as variações de gradientes térmicos envolvidos durante o processo de soldagem, sendo que através das duas simulações realizadas pode-se se ver uma diferença de até três vezes o valor máximo do gradiente térmico de uma região para outra. Isso permite concluir que o aquecimento da peça é necessário para evitar trincas no cordão de solda durante o processo, além de que talvez seja melhor tratar a geometria em questão, por regiões, variando-se os parâmetros de soldagem para cada região.
- 2) Com relação ao robô, através dos testes de posicionamento e da aquisição de pontos em conjunto com os testes no programa NX pôde-se concluir que a direção do efetuator para o controlador XRC2001 é definida em termos de rotação em x seguida por rotação em y e finalmente por rotação em z, também conhecidos como em termos de ângulos de *rolamento, arfagem e guinada* (“*roll-pitch-yaw*”). Além de que, há grandes variações em um cordão de solda feito manualmente, sendo assim se faz necessário o uso de uma medição do cordão de solda anterior ao programa ou uso de sensores de posicionamento para o robô. Foi desenvolvido um programa para teste da trajetória do eletrodo que é apresentado no anexo A

Como sugestão para trabalhos futuros: testar o programa desenvolvido e se fazer uma análise dos gradientes térmicos formados durante a soldagem utilizando este programa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, A. Slides da aula prática de Soldagem TIG. Disponível em: <<ftp://150.164.43.101/ema097solda/6-GTAW1.pdf>>: Acessado: 20 de Agosto de 2007.
- ABS. Catálogo de arames tubulares. Disponível em: <http://www.esab.com.br/literatura/pdf/1900280%20rev%2010_Catalogo%20Arame%20Tubular_pt.pdf>. Acessado dia 05 de Agosto de 2007.
- Barros, E. A. Transformação de coordenadas: Parâmetros de representação. Material didático da disciplina PMR2560 – Elementos de Robótica. Agosto, 2006.
- Buzzoni, H. A. Manual de solda elétrica. 5ª ed. São Paulo, 1962. Lep.
- Caetano, T. C. Análise de Aspectos da Formação do Canal Ionizado das Descargas Elétricas Atmosféricas. Junho, 2007. Disponível em: <<http://mtc-m15.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m15%4080/2006/08.15.14.05/doc/Tiago%20Costa%20Caetano.pdf>> . Acessado dia 16 de Setembro de 2007.
- Cook, G.E.; Andersen, K.; Fernandez, K. R.; Shepard, M.E. e Wells, A.M. Electric Arc for Robot Positioning Control in: Robotic Welding / edited Lane, J.D. Berlin, 1987. Springer-Verlag.
- ESAB. Apostila de Soldagem MIG/MAG. ESAB. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/por/Instrucao/biblioteca/upload/1901104rev0_ApostilaSoldagemMIGMAG.pdf> : Acessado dia 15 de Setembro de 2007.
- Franchin, M.N. Capítulo 9: Sensores. Disponível em: <<http://www.dee.feb.unesp.br/~marcelo/robotica/Robot9.htm>>. Acessado em: 13 de junho de 2007.
- Fu, K. S.; Gonzales, R. C.; Lee, C. S. Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence. McGraw-Hill, 1987.
- Gimenez, L.; Ramalho, J. P. MIG MAG. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/s_mig_mag.php>: Acessado: 20 de Agosto de 2007.

- Incropera, F. P.; DeWitt, D.P. Transferência de calor e massa. 5ª ed. Rio de Janeiro, 2003. LTC.
- Kou, S. Welding Metallurgy. Second Edition. United States, 2003. Wiley – Interscience.
- Lincoln Electric. MIG/MAG Welding Guide. Disponível em: <http://www.lincolnbrasil.com.br/lincolnbrasil/site/literatura/guia_soldagem_migmag.pdf>. Acessado dia 14 de Abril de 2007.
- Lincoln Electric. The Procedure Handbook of Arc Welding. Ohio, 1973. Lincoln Electric.
- Matweb. 309 Stainless Steel tested at 150°C. Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=12715&ckck=1>>. Acessado dia: 10 de Agosto de 2007.
- Modonesi, P. J. Introdução a Física do Arco Elétrico: Soldagem I. Disponível em: <http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/arco_graduacao.pdf>. Acessado dia 14 de Abril de 2007.
- Modonesi, P. J. Introdução a Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais. Disponível em: <www.demet.ufmg.br/labs/soldagem/textos/fisica_da_soldagem.pdf>. Acessado dia 16 de Setembro de 2007.
- Modonesi, P. J. Apostila de Prática de Soldagem SAW. Disponível em: <http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/pratica_saw.pdf>. Acessado: 20 de Agosto de 2007.
- Motoman UP20. Disponível em: <http://www.motoman.co.uk/UP20.htm>: acessado: 20 de Agosto de 2007.
- Motoman Robotics AB. Motoman XRC: Operators Manual: Command Syntax. Revisado dia: 06 de maio de 1999.
- Neto, M. C. Curso in company: Básico de ensaios não destrutivos (Voith Siemens 2006) Processos de fabricação. São Paulo, 2007. Abende.

- NCS. Nicrosol Soldas Especiais: Dados de produtos. Disponível em: <http://www.nicrosol.com.br/produtos_detalhes.asp?codcategoria=7>. Acessado dia: 13/06/2007.

- Oliveira, S. GS 4990-37147p: Procedimento Geral. Qualidade de solda. Voith Siemens Hydro. Rev. 2. São Paulo, 2005.

- Quites, A. M.; Dutra, J. C. Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis, 1979. EDEME.

- Romer. Romer Product Catalog. Disponível em: <http://us.romer.com/product-catalog/?Itemid=66>: acessado: 20 de Agosto de 2007.

- Smati, Z; Yapp, D.; Smith, C.J. Laser Guidance System for Robots Control in: Robotic Welding / edited Lane, J.D. Berlin, 1987. Springer-Verlag.

- Soares, M. A. Solda Elétrica. Revista Mecatrônica Fácil. Editora Saber. Disponível em: <<http://mecatronicafacil.com.br/artigos/soldagem2/arco05.htm>>: Acessado: 20 de Agosto de 2007.

- Souza, A.; Soler, L. S.; Fernandes, W. A. Probabilidade da velocidade média mensal do vento no Passo do Lontra/Pantanal Sul Mato-Grossense: um estudo preliminar. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.6, n.2 p. 235-238, 1998.

- VN 1477-3: Diretrizes de soldagem – Junções de topo – Resumo das formas das soldas. São Paulo, 2002.

- VN 1477-4: Diretrizes de soldagem – Junções de ângulo – Resumo das formas das soldas. São Paulo, 2002.

- VN 1477-5: Diretrizes de soldagem – Junções de canto – Resumo das formas das soldas. São Paulo, 2002.

- Wainer, E.; Brandi, S. D.; Mello, E. D. H. Soldagem: processos e metalurgia. 2ª ed. São Paulo, 1992. Editora Edgard Blücher.

ANEXO A (PROGRAMA PARA TESTE DE POSICIONAMENTO)

```
/JOB
//NAME PROG1
//POS
///NPOS 128,0,0,0,0,0
///USER 13
///TOOL 0
///POSTYPE USER
///RECTAN
///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0
C00000=337.987,-333.665,-88.495,-178.466,70.000,6.075
C00001=337.988,-334.902,-84.687,-178.466,72.000,6.075
C00002=337.647,-332.044,-83.813,-178.141,72.000,6.322
C00003=337.646,-330.825,-87.573,-178.141,70.000,6.322
C00004=337.292,-327.987,-86.650,-177.903,70.000,6.581
C00005=337.293,-329.191,-82.929,-177.902,72.000,6.582
C00006=336.923,-326.342,-82.035,-177.795,72.000,6.862
C00007=336.923,-325.151,-85.729,-177.795,70.000,6.861
C00008=336.538,-322.317,-84.808,-177.873,70.000,7.153
C00009=336.538,-323.499,-81.132,-177.873,72.000,7.154
C00010=336.136,-320.660,-80.221,-178.160,72.000,7.452
C00011=336.137,-319.485,-83.887,-178.158,70.000,7.450
C00012=335.720,-316.655,-82.968,-178.647,70.000,7.750
C00013=335.719,-317.827,-79.302,-178.651,72.000,7.752
C00014=335.285,-314.998,-78.376,-179.328,72.000,8.059
C00015=335.286,-313.827,-82.049,-179.323,70.000,8.057
C00016=334.836,-311.001,-81.131,-179.858,70.000,8.371
C00017=334.833,-312.174,-77.443,-179.851,72.000,8.373
C00018=334.365,-309.354,-76.504,-178.958,72.000,8.696
C00019=334.368,-308.178,-80.213,-178.967,70.000,8.693
C00020=333.883,-305.358,-79.297,-178.099,70.000,9.023
```


C00021=333.879,-306.540,-75.560,-178.090,72.000,9.027
C00022=333.374,-303.731,-74.611,-177.360,72.000,9.366
C00023=333.379,-302.541,-78.381,-177.367,70.000,9.362
C00024=332.857,-299.726,-77.467,-176.890,70.000,9.709
C00025=332.851,-300.925,-73.659,-176.886,72.000,9.713
C00026=332.309,-298.125,-72.704,-176.771,72.000,10.068
C00027=332.315,-296.915,-76.553,-176.769,70.000,10.064
C00028=331.755,-294.108,-75.641,-177.076,70.000,10.426
C00029=331.748,-295.329,-71.747,-177.084,72.000,10.431
C00030=331.167,-292.537,-70.790,-177.841,72.000,10.802
C00031=331.174,-291.304,-74.730,-177.826,70.000,10.796
C00032=330.574,-288.504,-73.820,-178.968,70.000,11.174
C00033=330.565,-289.749,-69.833,-178.989,72.000,11.180
C00034=329.943,-286.966,-68.878,-179.601,72.000,11.566
C00035=329.952,-285.708,-72.911,-179.626,70.000,11.559
C00036=329.311,-282.916,-72.004,-178.150,70.000,11.952
C00037=329.300,-284.186,-67.925,-178.124,72.000,11.959
C00038=328.636,-281.409,-66.977,-176.822,72.000,12.361
C00039=328.647,-280.129,-71.098,-176.844,70.000,12.353
C00040=327.962,-277.346,-70.194,-175.961,70.000,12.762
C00041=327.950,-278.636,-66.035,-175.949,72.000,12.771
C00042=327.242,-275.866,-65.100,-175.719,72.000,13.188
C00043=327.255,-274.569,-69.291,-175.716,70.000,13.179
C00044=326.526,-271.796,-68.390,-176.234,70.000,13.603
C00045=326.511,-273.099,-64.173,-176.254,72.000,13.612
C00046=325.758,-270.335,-63.255,-177.551,72.000,14.045
C00047=325.774,-269.029,-67.491,-177.513,70.000,14.035
C00048=324.999,-266.268,-66.594,-179.406,70.000,14.477
C00049=324.981,-267.574,-62.348,-179.457,72.000,14.488
C00050=324.181,-264.817,-61.451,-178.350,72.000,14.942
C00051=324.200,-263.514,-65.698,-178.405,70.000,14.930
C00052=323.377,-260.765,-64.805,-176.371,70.000,15.394
C00053=323.356,-262.064,-60.561,-176.325,72.000,15.406
C00054=322.507,-259.317,-59.677,-174.961,72.000,15.880

C00055=322.529,-258.023,-63.914,-174.986,70.000,15.867
C00056=321.656,-255.289,-63.025,-174.660,70.000,16.350
C00057=321.633,-256.577,-58.798,-174.669,72.000,16.364
C00058=320.733,-253.844,-57.921,-175.665,72.000,16.860
C00059=320.758,-252.562,-62.139,-175.617,70.000,16.846
C00060=319.834,-249.843,-61.255,-177.799,70.000,17.354
C00061=319.807,-251.119,-57.045,-177.881,72.000,17.369
C00062=318.854,-248.403,-56.170,-179.120,72.000,17.891
C00063=318.882,-247.132,-60.374,-179.219,70.000,17.874
C00064=317.904,-244.430,-59.496,-176.200,70.000,18.407
C00065=317.873,-245.698,-55.295,-176.111,72.000,18.425
C00066=316.865,-243.003,-54.418,-174.014,72.000,18.971
C00067=316.898,-241.737,-58.621,-174.061,70.000,18.953
C00068=315.863,-239.054,-57.749,-173.578,70.000,19.511
C00069=315.828,-240.319,-53.539,-173.597,72.000,19.530
C00070=314.763,-237.648,-52.657,-175.231,72.000,20.105
C00071=314.800,-236.381,-56.880,-175.138,70.000,20.084
C00072=313.707,-233.719,-56.015,-178.516,70.000,20.671
C00073=313.668,-234.990,-51.771,-178.664,72.000,20.693
C00074=312.543,-232.346,-50.880,-177.111,72.000,21.296
C00075=312.584,-231.069,-55.153,-177.267,70.000,21.273
C00076=311.431,-228.430,-54.295,-173.729,70.000,21.890
C00077=311.387,-229.717,-49.985,-173.627,72.000,21.914
C00078=310.200,-227.104,-49.085,-172.370,72.000,22.549
C00079=310.246,-225.804,-53.442,-172.364,70.000,22.523
C00080=309.029,-223.191,-52.592,-174.039,70.000,23.175
C00081=308.980,-224.508,-48.178,-174.173,72.000,23.201
C00082=307.729,-221.930,-47.264,-178.735,72.000,23.872
C00083=307.779,-220.592,-51.747,-178.509,70.000,23.844
C00084=306.497,-218.008,-50.907,-175.907,70.000,24.531
C00085=306.443,-219.371,-46.343,-175.687,72.000,24.561
C00086=305.124,-216.832,-45.414,-171.761,72.000,25.268
C00087=305.180,-215.439,-50.072,-171.861,70.000,25.238
C00088=303.828,-212.887,-49.243,-171.614,70.000,25.963

C00089=303.771,-214.315,-44.475,-171.707,72.000,25.995
C00090=302.382,-211.822,-43.525,-176.122,72.000,26.740
C00091=302.441,-210.352,-48.419,-175.855,70.000,26.708
C00092=301.018,-207.835,-47.600,-177.114,70.000,27.472
C00093=300.958,-209.352,-42.565,-176.806,72.000,27.505
C00094=299.498,-206.909,-41.593,-171.071,72.000,28.289
C00095=299.558,-205.337,-46.788,-171.231,70.000,28.255
C00096=298.062,-202.859,-45.983,-170.289,70.000,29.057
C00097=298.001,-204.491,-40.611,-170.387,72.000,29.091
C00098=296.467,-202.102,-39.619,-175.850,72.000,29.910
C00099=296.527,-200.402,-45.184,-175.532,70.000,29.877
C00100=294.955,-197.967,-44.392,-175.664,70.000,30.714
C00101=294.895,-199.740,-38.619,-175.330,72.000,30.747
C00102=293.286,-197.406,-37.612,-169.137,72.000,31.603
C00103=293.343,-195.555,-43.608,-169.252,70.000,31.571
C00104=291.693,-193.167,-42.831,-170.150,70.000,32.451
C00105=291.638,-195.102,-36.600,-170.332,72.000,32.481
C00106=289.952,-192.827,-35.586,-179.150,72.000,33.382
C00107=290.003,-190.804,-42.063,-178.800,70.000,33.353
C00108=288.273,-188.468,-41.303,-170.767,70.000,34.277
C00109=288.226,-190.582,-34.572,-170.538,72.000,34.304
C00110=286.460,-188.367,-33.560,-167.403,72.000,35.247
C00111=286.503,-186.159,-40.553,-167.350,70.000,35.223
C00112=284.692,-183.879,-39.811,-174.657,70.000,36.188
C00113=284.654,-186.182,-32.553,-174.920,72.000,36.209
C00114=282.807,-184.028,-31.554,-172.073,72.000,37.194
C00115=282.839,-181.629,-39.080,-172.292,70.000,37.175
C00116=280.945,-179.411,-38.358,-165.688,70.000,38.185
C00117=280.919,-181.906,-30.565,-165.686,72.000,38.200
C00118=278.989,-179.815,-29.588,-172.642,72.000,39.225
C00119=279.009,-177.225,-37.647,-172.487,70.000,39.213
C00120=277.032,-175.073,-36.948,-172.247,70.000,40.253
C00121=277.018,-177.757,-28.626,-172.124,72.000,40.262
C00122=275.005,-175.731,-27.680,-164.080,72.000,41.317

C00123=275.014,-172.957,-36.259,-164.083,70.000,41.311
C00124=272.954,-170.876,-35.583,-172.190,70.000,42.395
C00125=272.951,-173.739,-26.751,-172.232,72.000,42.398
C00126=270.855,-171.783,-25.842,-169.756,72.000,43.503
C00127=270.852,-168.834,-34.918,-169.756,70.000,43.503
//INST
///DATE 2007/10/24 19:00
///ATTR SC,RW,RJ
////FRAME USER 13
///GROUP1 RB1
NOP
MOVL C00000 V=8.0
MOVL C00001 V=8.0
MOVL C00002 V=8.0
MOVL C00003 V=8.0
MOVL C00004 V=8.0
MOVL C00005 V=8.0
MOVL C00006 V=8.0
MOVL C00007 V=8.0
MOVL C00008 V=8.0
MOVL C00009 V=8.0
MOVL C00010 V=8.0
MOVL C00011 V=8.0
MOVL C00012 V=8.0
MOVL C00013 V=8.0
MOVL C00014 V=8.0
MOVL C00015 V=8.0
MOVL C00016 V=8.0
MOVL C00017 V=8.0
MOVL C00018 V=8.0
MOVL C00019 V=8.0
MOVL C00020 V=8.0
MOVL C00021 V=8.0
MOVL C00022 V=8.0

MOVL C00023 V=8.0
MOVL C00024 V=8.0
MOVL C00025 V=8.0
MOVL C00026 V=8.0
MOVL C00027 V=8.0
MOVL C00028 V=8.0
MOVL C00029 V=8.0
MOVL C00030 V=8.0
MOVL C00031 V=8.0
MOVL C00032 V=8.0
MOVL C00033 V=8.0
MOVL C00034 V=8.0
MOVL C00035 V=8.0
MOVL C00036 V=8.0
MOVL C00037 V=8.0
MOVL C00038 V=8.0
MOVL C00039 V=8.0
MOVL C00040 V=8.0
MOVL C00041 V=8.0
MOVL C00042 V=8.0
MOVL C00043 V=8.0
MOVL C00044 V=8.0
MOVL C00045 V=8.0
MOVL C00046 V=8.0
MOVL C00047 V=8.0
MOVL C00048 V=8.0
MOVL C00049 V=8.0
MOVL C00050 V=8.0
MOVL C00051 V=8.0
MOVL C00052 V=8.0
MOVL C00053 V=8.0
MOVL C00054 V=8.0
MOVL C00055 V=8.0
MOVL C00056 V=8.0

MOVL C00057 V=8.0
MOVL C00058 V=8.0
MOVL C00059 V=8.0
MOVL C00060 V=8.0
MOVL C00061 V=8.0
MOVL C00062 V=8.0
MOVL C00063 V=8.0
MOVL C00064 V=8.0
MOVL C00065 V=8.0
MOVL C00066 V=8.0
MOVL C00067 V=8.0
MOVL C00068 V=8.0
MOVL C00069 V=8.0
MOVL C00070 V=8.0
MOVL C00071 V=8.0
MOVL C00072 V=8.0
MOVL C00073 V=8.0
MOVL C00074 V=8.0
MOVL C00075 V=8.0
MOVL C00076 V=8.0
MOVL C00077 V=8.0
MOVL C00078 V=8.0
MOVL C00079 V=8.0
MOVL C00080 V=8.0
MOVL C00081 V=8.0
MOVL C00082 V=8.0
MOVL C00083 V=8.0
MOVL C00084 V=8.0
MOVL C00085 V=8.0
MOVL C00086 V=8.0
MOVL C00087 V=8.0
MOVL C00088 V=8.0
MOVL C00089 V=8.0
MOVL C00090 V=8.0

MOVL C00091 V=8.0
MOVL C00092 V=8.0
MOVL C00093 V=8.0
MOVL C00094 V=8.0
MOVL C00095 V=8.0
MOVL C00096 V=8.0
MOVL C00097 V=8.0
MOVL C00098 V=8.0
MOVL C00099 V=8.0
MOVL C00100 V=8.0
MOVL C00101 V=8.0
MOVL C00102 V=8.0
MOVL C00103 V=8.0
MOVL C00104 V=8.0
MOVL C00105 V=8.0
MOVL C00106 V=8.0
MOVL C00107 V=8.0
MOVL C00108 V=8.0
MOVL C00109 V=8.0
MOVL C00110 V=8.0
MOVL C00111 V=8.0
MOVL C00112 V=8.0
MOVL C00113 V=8.0
MOVL C00114 V=8.0
MOVL C00115 V=8.0
MOVL C00116 V=8.0
MOVL C00117 V=8.0
MOVL C00118 V=8.0
MOVL C00119 V=8.0
MOVL C00120 V=8.0
MOVL C00121 V=8.0
MOVL C00122 V=8.0
MOVL C00123 V=8.0
MOVL C00124 V=8.0

```
MOVL C00125 V=8.0  
MOVL C00126 V=8.0  
MOVL C00127 V=8.0  
END
```


ANEXO B (PROGRAMA PARA GERAR PROGRAMAS PARA O ROBÔ – FORM1)

```

using System;
using System.Drawing;
using System.IO;
using System.Windows.Forms;
using NXOpen;
using NXOpen.UF;
using NXOpen.Utilities;
using NXOpenUI;
using System.Collections;

namespace vetor
{
    /// <summary>
    /// Description of MainForm.
    /// </summary>
    public class MainForm : System.Windows.Forms.Form
    {
        //1 é coordenadas do ROBOT e 2 USER
        private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox1;
        private System.Windows.Forms.ListBox listBox1;
        private System.Windows.Forms.Button button2;
        private System.Windows.Forms.Button button1;
        private System.Windows.Forms.NumericUpDown numericUpDown1;
        private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox3;
        private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox2;
        private System.Windows.Forms.MainMenu mainMenu1;
        private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem1;
        private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem2;
        private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem3;
    }
}

```

```

private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem5;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem6;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem7;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem8;
private System.Windows.Forms.GroupBox groupBox4;
private System.Windows.Forms.Button button3;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem4;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem9;
private System.Windows.Forms.MenuItem menuItem10;
private System.Windows.Forms.SaveFileDialog saveFileDialog1;
private System.Windows.Forms.Button button4;
private System.Windows.Forms.StatusBar statusBar1;
public MainForm()
{
    //
    // The InitializeComponent() call is required for Windows Forms
designer support.
    //
    InitializeComponent();

    //
    // TODO: Add constructor code after the InitializeComponent()
call.
    //
}
Form2 formu2 = new Form2();

[STAThread]
public static void Main(string[] args)
{
    Application.Run(new MainForm());
}
//inicializa objectos do NX para a sessão ativa

```

```

Session  Ses  = Session.Session();
UFSession Ufs  = UFSession.UFSession();
UI      TheUi = NXOpen.UI.GetUI();

```

```
//vetor de dados
```

```
ArrayList dados = new ArrayList();
```

```
#region Windows Forms Designer generated code
```

```
/// <summary>
```

```
/// This method is required for Windows Forms designer support.
```

```
/// Do not change the method contents inside the source code editor.
```

The Forms designer might

```
/// not be able to load this method if it was changed manually.
```

```
/// </summary>
```

```
private void InitializeComponent()
```

```
{
```

```
    this.statusBar1 = new System.Windows.Forms.StatusBar();
```

```
    this.groupBox2 = new System.Windows.Forms.GroupBox();
```

```
    this.button2 = new System.Windows.Forms.Button();
```

```
    this.groupBox3 = new System.Windows.Forms.GroupBox();
```

```
    this.numericUpDown1 = new
```

```
System.Windows.Forms.NumericUpDown();
```

```
    this.button1 = new System.Windows.Forms.Button();
```

```
    this.listBox1 = new System.Windows.Forms.ListBox();
```

```
    this.groupBox1 = new System.Windows.Forms.GroupBox();
```

```
    this.mainMenu1 = new System.Windows.Forms.MainMenu();
```

```
    this.menuItem1 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem8 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem5 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem6 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem7 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem2 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem4 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```
    this.menuItem9 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
```

```

        this.menuItem10 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
        this.menuItem3 = new System.Windows.Forms.MenuItem();
        this.groupBox4 = new System.Windows.Forms.GroupBox();
        this.button3 = new System.Windows.Forms.Button();
        this.saveFileDialog1 = new
System.Windows.Forms.SaveFileDialog();
        this.button4 = new System.Windows.Forms.Button();
        this.groupBox2.SuspendLayout();
        this.groupBox3.SuspendLayout();

        ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.numericUpDown1)).BeginInit();

        this.groupBox1.SuspendLayout();
        this.groupBox4.SuspendLayout();
        this.SuspendLayout();
        //
        // statusBar1
        //
        this.statusBar1.Location = new System.Drawing.Point(0, 464);
        this.statusBar1.Name = "statusBar1";
        this.statusBar1.Size = new System.Drawing.Size(562, 24);
        this.statusBar1.TabIndex = 6;
        //
        // groupBox2
        //
        this.groupBox2.Controls.Add(this.button2);
        this.groupBox2.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
((System.Drawing.FontStyle)((System.Drawing.FontStyle.Bold |
System.Drawing.FontStyle.Italic))), System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.groupBox2.Location = new System.Drawing.Point(376, 192);
        this.groupBox2.Name = "groupBox2";
        this.groupBox2.Size = new System.Drawing.Size(176, 88);
        this.groupBox2.TabIndex = 4;

```

```

        this.groupBox2.TabStop = false;
        this.groupBox2.Text = "Selecione as Faces";
        //
        // button2
        //
        this.button2.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.button2.Location = new System.Drawing.Point(24, 32);
        this.button2.Name = "button2";
        this.button2.Size = new System.Drawing.Size(128, 32);
        this.button2.TabIndex = 1;
        this.button2.Text = "Selecionar";
        this.button2.Click += new
System.EventHandler(this.Button2Click);
        //
        // groupBox3
        //
        this.groupBox3.Controls.Add(this.numericUpDown1);
        this.groupBox3.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
((System.Drawing.FontStyle)((System.Drawing.FontStyle.Bold |
System.Drawing.FontStyle.Italic))), System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.groupBox3.Location = new System.Drawing.Point(376, 8);
        this.groupBox3.Name = "groupBox3";
        this.groupBox3.Size = new System.Drawing.Size(176, 64);
        this.groupBox3.TabIndex = 7;
        this.groupBox3.TabStop = false;
        this.groupBox3.Text = "Número de Pontos";
        //
        // numericUpDown1
        //

```

```

        this.numericUpDown1.Font = new System.Drawing.Font("Arial",
9.75F, System.Drawing.FontStyle.Bold, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.numericUpDown1.Location = new System.Drawing.Point(32,
24);

        this.numericUpDown1.Name = "numericUpDown1";
        this.numericUpDown1.Size = new System.Drawing.Size(112,
22);

        this.numericUpDown1.TabIndex = 5;
        //
        // button1
        //
        this.button1.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.button1.Location = new System.Drawing.Point(24, 32);
        this.button1.Name = "button1";
        this.button1.Size = new System.Drawing.Size(128, 32);
        this.button1.TabIndex = 0;
        this.button1.Text = "Seleccionar";
        this.button1.Click += new
System.EventHandler(this.Button1_Click);
        //
        // listBox1
        //
        this.listBox1.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9F,
System.Drawing.FontStyle.Regular, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.listBox1.HorizontalScrollbar = true;
        this.listBox1.ItemHeight = 15;
        this.listBox1.Location = new System.Drawing.Point(16, 24);
        this.listBox1.Name = "listBox1";
        this.listBox1.Size = new System.Drawing.Size(336, 409);
        this.listBox1.TabIndex = 8;

```

```

//
// groupBox1
//
this.groupBox1.Controls.Add(this.button1);
this.groupBox1.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
((System.Drawing.FontStyle)((System.Drawing.FontStyle.Bold |
System.Drawing.FontStyle.Italic))), System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
this.groupBox1.Location = new System.Drawing.Point(376, 88);
this.groupBox1.Name = "groupBox1";
this.groupBox1.RightToLeft =
System.Windows.Forms.RightToLeft.No;
this.groupBox1.Size = new System.Drawing.Size(176, 88);
this.groupBox1.TabIndex = 3;
this.groupBox1.TabStop = false;
this.groupBox1.Text = "Selecione as Curvas";
//
// mainMenu1
//
this.mainMenu1.MenuItems.AddRange(new
System.Windows.Forms.MenuItem[] {

this.menuitem1,

this.menuitem2,

this.menuitem3});

//
// menuItem1
//
this.menuitem1.Index = 0;
this.menuitem1.MenuItems.AddRange(new
System.Windows.Forms.MenuItem[] {

```

```

        this.menuItem8,

        this.menuItem5,

        this.menuItem6,

        this.menuItem7});

    this.menuItem1.Text = "Arquivo";
    //
    // menuItem8
    //
    this.menuItem8.Index = 0;
    this.menuItem8.Text = "Salvar";
    this.menuItem8.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem8_Click);
    //
    // menuItem5
    //
    this.menuItem5.Index = 1;
    this.menuItem5.Text = "Gerar Programa";
    this.menuItem5.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem5_Click);
    //
    // menuItem6
    //
    this.menuItem6.Index = 2;
    this.menuItem6.Text = "Imprimir";
    //
    // menuItem7
    //
    this.menuItem7.Index = 3;
    this.menuItem7.Text = "Sair";

```



```

        this.menuItem7.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem7_Click_1);
        //
        // menuItem2
        //
        this.menuItem2.Index = 1;
        this.menuItem2.MenuItems.AddRange(new
System.Windows.Forms.MenuItem[] {

            this.menuItem4,

            this.menuItem9,

            this.menuItem10});

        this.menuItem2.Text = "Opções";
        this.menuItem2.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem2_Click);
        //
        // menuItem4
        //
        this.menuItem4.Index = 0;
        this.menuItem4.Text = "Configuração";
        this.menuItem4.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem4_Click);
        //
        // menuItem9
        //
        this.menuItem9.Index = 1;
        this.menuItem9.Text = "Limpar Lista";
        this.menuItem9.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem9_Click);
        //
        // menuItem10
        //

```

```

        this.menuItem10.Index = 2;
        this.menuItem10.Text = "Limpar Variáveis";
        this.menuItem10.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem10_Click);
        //
        // menuItem3
        //
        this.menuItem3.Index = 2;
        this.menuItem3.Text = "Sobre";
        this.menuItem3.Click += new
System.EventHandler(this.menuItem3_Click);
        //
        // groupBox4
        //
        this.groupBox4.Controls.Add(this.button3);
        this.groupBox4.Location = new System.Drawing.Point(376, 296);
        this.groupBox4.Name = "groupBox4";
        this.groupBox4.Size = new System.Drawing.Size(176, 88);
        this.groupBox4.TabIndex = 9;
        this.groupBox4.TabStop = false;
        this.groupBox4.Text = "Mudar a direção";
        //
        // button3
        //
        this.button3.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
System.Drawing.FontStyle.Italic, System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
        this.button3.Location = new System.Drawing.Point(24, 32);
        this.button3.Name = "button3";
        this.button3.Size = new System.Drawing.Size(128, 32);
        this.button3.TabIndex = 0;
        this.button3.Text = "Direção 1";
        this.button3.Click += new
System.EventHandler(this.button3_Click_1);

```

```

//
// saveFileDialog1
//
this.saveFileDialog1.Filter = "Motoman UP20 (*.jbi)|*.jbi";
this.saveFileDialog1.FileOk += new
System.ComponentModel.CancelEventHandler(this.saveFileDialog1_FileOk);
//
// button4
//
this.button4.Location = new System.Drawing.Point(400, 408);
this.button4.Name = "button4";
this.button4.Size = new System.Drawing.Size(128, 32);
this.button4.TabIndex = 10;
this.button4.Text = "Mesma Direção";
this.button4.Click += new
System.EventHandler(this.button4_Click);
//
// MainForm
//
this.AutoScaleBaseSize = new System.Drawing.Size(7, 15);
this.ClientSize = new System.Drawing.Size(562, 488);
this.Controls.Add(this.button4);
this.Controls.Add(this.groupBox4);
this.Controls.Add(this.groupBox3);
this.Controls.Add(this.statusBar1);
this.Controls.Add(this.groupBox2);
this.Controls.Add(this.groupBox1);
this.Controls.Add(this.listBox1);
this.Font = new System.Drawing.Font("Arial", 9.75F,
((System.Drawing.FontStyle)((System.Drawing.FontStyle.Bold |
System.Drawing.FontStyle.Italic))), System.Drawing.GraphicsUnit.Point,
((System.Byte)(0)));
this.FormBorderStyle =
System.Windows.Forms.FormBorderStyle.FixedDialog;

```

```

        this.Menu = this.mainMenu1;
        this.Name = "MainForm";
        this.Text = "Ferramenta para Gerar Programas para o UP20";
        this.TopMost = true;
        this.Load += new System.EventHandler(this.MainForm_Load);
        this.groupBox2.ResumeLayout(false);
        this.groupBox3.ResumeLayout(false);

        ((System.ComponentModel.ISupportInitialize)(this.numericUpDown1)).EndInit(
    );

        this.groupBox1.ResumeLayout(false);
        this.groupBox4.ResumeLayout(false);
        this.ResumeLayout(false);

    }
    #endregion

    //variavel para mudar a sequencia de pontos
    int extdir = 1;
    //variavel para mudar o sentido de uma sequencia
    int mdir = 1;
    //vetor que guarda os pontos extraidos mais os angulos de roll, pitch e
yaw
    double[,] ptmtrx = new double[6,128];
    int pt = 0;

    void Button1Click(object sender, EventArgs e)
    {
        string message = "Selecione o Objeto";
        string title = "Selecionar Objeto";
        bool keepHighlighted = false;
        //permite selecionar objectos do tipo curva somente
        Selection.SelectionType[] typeArray = new
Selection.SelectionType[1];

```

```

typeArray[0] = Selection.SelectionType.Curves;
NXObject[] objectArray;
TheUi.SelectionManager.SelectObjects
    (message, title, Selection.SelectionScope.WorkPart,
    keepHighlighted, typeArray, out objectArray);
//guarda o numero de pontos que se quer dividir uma curva
int numero_pontos =
System.Convert.ToInt32(numericUpDown1.Text);

//varre a matriz inteira de objetos
for (int i = 0; i < objectArray.Length; i = i + 1)
{
    //cria cada ponto
    for (int j = 0; j < numero_pontos; j = j + 1)
    {
        //pega o comprimento da curva
        NXOpen.Curve compr_curva =
(NXOpen.Curve)NXOpen.Utilities.NXObjectManager.Get(objectArray[i].Tag);
        double comprimento = compr_curva.GetLength();

        //divide a curva em pontos equidistantes e obtem
suas coordenadas para o sistema de referencia global
        Tag curve_id = objectArray[i].Tag;
        double parm = 0;
        double[] point = new double[3];
        double[] tangent = new double[3];
        double[] p_norm = new double[3];
        double[] b_norm = new double[3];
        double torsion = new double();
        double rad_of_cur = new double();
        Ufs.Modl.AskCurveProps(curve_id, parm, point,
tangent, p_norm, b_norm, out torsion, out rad_of_cur);
    }
}

```

```

double value = (comprimento / (numero_pontos-1))
* j;

Scalar escalar;
escalar =
Ses.Parts.Work.Scalars.CreateScalar(value, Scalar.DimensionalityType.Length,
SmartObject.UpdateOption.WithinModeling);

Point3d coordenadas = new Point3d(point[0],
point[1], point[2]);

NXOpen.Point ponto_base =
Ses.Parts.Work.Points.CreatePoint(coordenadas);

Tag curve = objectArray[i].Tag;
Tag base_point = ponto_base.Tag;
Tag t = escalar.Tag;
UFSO.PointAlongCurveOption option =
UFSO.PointAlongCurveOption.PointAlongCurveDistance;
bool flip = false;
Tag point_feature_id;
Ufs.Point.CreateAlongCurve(curve, base_point, t,
option, flip, out point_feature_id);

Tag point_feature_id_new = point_feature_id;
Tag tagpoint_id;
Ufs.Point.AskPointOutput(point_feature_id_new,
out tagpoint_id);

NXOpen.Point ponto =
(NXOpen.Point)NXOpen.Utilities.NXObjectManager.Get(tagpoint_id);
double[] ponto_final = new double[3];
ponto_final[0] = ponto.Coordinates.X;

```

```

        ponto_final[1] = ponto.Coordinates.Y;
        ponto_final[2] = ponto.Coordinates.Z;
        dados.Add(ponto_final);
    }

}

}

void Button2Click(object sender, EventArgs e)
{
    //cria como variavel local e zera rx, ry e rz
    double Rx = 0;
    double Ry = 0;
    double Rz = 0;
    //seleciona a superficie desejada
    string message = "Selecione o Objeto";
    string title = "Selecionar Objeto";
    bool keepHighlighted = false;
    Selection.SelectionType[] typeArray = new
Selection.SelectionType[1];
    typeArray[0] = Selection.SelectionType.Faces;
    NXObject[] objectArray;
    TheUi.SelectionManager.SelectObjects
        (message, title, Selection.SelectionScope.WorkPart,
        keepHighlighted, typeArray, out objectArray);
    //varre todos os ponto para encontrar os vetores tangentes e normais
    for (int i = 0; i < dados.Count; i = i + 1)
    {
        double[] ponto_final_array = (double[])dados[i];

        Tag face_id = objectArray[0].Tag;
        double[] ref_pnt = ponto_final_array;
        double[] param = new double[2];
        double[] face_pnt = new double[3];
    }
}

```

```

        Ufs.Modl.AskFaceParm(face_id, ref_pnt, param,
face_pnt);

        //dado o ponto encontra os vetores tangentes e normal a
superficie e sua curva pertencente
        Tag face_id_new = objectArray[0].Tag;
        double[] param_new = param;
        double[] point = new double[3];
        double[] u1 = new double[3];
        double[] v1 = new double[3];
        double[] u2 = new double[3];
        double[] v2 = new double[3];
        double[] unit_norm = new double[3];
        double[] radii = new double[2];

        Ufs.Modl.AskFaceProps(face_id_new, param_new, point,
u1, v1, u2, v2, unit_norm, radii);

        //reposiciona os vetores tangentes nos quadrantes
        if(unit_norm[2] > 0)
        {
            unit_norm[0] = -unit_norm[0];
            unit_norm[1] = -unit_norm[1];
            unit_norm[2] = -unit_norm[2];
            if(u1[0] > 0)
            {
                u1[0] = -u1[0];
                u1[1] = -u1[1];
                u1[2] = -u1[2];
            }
            if(v1[0] < 0)
            {
                v1[0] = -v1[0];
                v1[1] = -v1[1];
            }
        }
    }
}

```



```

        v1[2] = -v1[2];
    }
}
else
{
    if(u1[0] > 0)
    {
        u1[0] = -u1[0];
        u1[1] = -u1[1];
        u1[2] = -u1[2];
    }
    if(v1[0] > 0)
    {
        v1[0] = -v1[0];
        v1[1] = -v1[1];
        v1[2] = -v1[2];
    }
}

//rotaciona vetores tangentes sobre o eixo do vetor normal
double tt = -135*Math.PI/180;
string teste;

//matriz de rotação sobre um eixo arbitrário
double r11 = unit_norm[0]*unit_norm[0]*(1-
Math.Cos(tt))+Math.Cos(tt);
teste = string.Format("r11={0:f}",r11);
listBox1.Items.Add(teste);
double r12 = unit_norm[0]*unit_norm[1]*(1-Math.Cos(tt))-
unit_norm[2]*Math.Sin(tt);
teste = string.Format("r12={0:f}",r12);
listBox1.Items.Add(teste);

```

```

        double r13 = unit_norm[0]*unit_norm[2]*(1-
Math.Cos(tt))+unit_norm[1]*Math.Sin(tt);
        teste = string.Format("r13={0:f}",r13);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r21 = unit_norm[1]*unit_norm[0]*(1-
Math.Cos(tt))+unit_norm[2]*Math.Sin(tt);
        teste = string.Format("r21={0:f}",r21);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r22 = unit_norm[1]*unit_norm[1]*(1-
Math.Cos(tt))+Math.Cos(tt);
        teste = string.Format("r22={0:f}",r22);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r23 = unit_norm[1]*unit_norm[2]*(1-Math.Cos(tt))-
unit_norm[0]*Math.Sin(tt);
        teste = string.Format("r23={0:f}",r23);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r31 = unit_norm[2]*unit_norm[0]*(1-Math.Cos(tt))-
unit_norm[1]*Math.Sin(tt);
        teste = string.Format("r31={0:f}",r31);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r32 = unit_norm[2]*unit_norm[1]*(1-
Math.Cos(tt))+unit_norm[0]*Math.Sin(tt);
        teste = string.Format("r32={0:f}",r32);
        listBox1.Items.Add(teste);
        double r33 = unit_norm[2]*unit_norm[2]*(1-
Math.Cos(tt))+Math.Cos(tt);
        teste = string.Format("r33={0:f}",r33);
        listBox1.Items.Add(teste);

        double[] v1l = new double[3];
        double[] u1l = new double[3];

        //calcula os novos vetores tangentes
        v1l[0] = r11*v1[0]+r21*v1[1]+r31*v1[2];

```

```
v1l[1] = r12*v1[0]+r22*v1[1]+r32*v1[2];
v1l[2] = r13*v1[0]+r23*v1[1]+r33*v1[2];
```

```
u1l[0] = r11*u1[0]+r21*u1[1]+r31*u1[2];
u1l[1] = r12*u1[0]+r22*u1[1]+r32*u1[2];
u1l[2] = r13*u1[0]+r23*u1[1]+r33*u1[2];
```

//a partir e do vetor, defini um datum axis sobre o ponto
com a direção do vetor

```
Point3d coordenadas = new Point3d(point[0], point[1],
point[2]);
```

```
NXOpen.Point ponto_vec =
Ses.Parts.Work.Points.CreatePoint(coordenadas);
Vector3d vetor = new Vector3d(unit_norm[0],
unit_norm[1], unit_norm[2]);
```

```
Direction direcao;
direcao =
Ses.Parts.Work.Directions.CreateDirection(coordenadas, vetor,
SmartObject.UpdateOption.WithinModeling);
```

//teste dos vetores tangentes

```
Vector3d vetor1 = new Vector3d(u1l[0], u1l[1], u1l[2]);
Direction direcao1;
direcao1 =
Ses.Parts.Work.Directions.CreateDirection(coordenadas, vetor1,
SmartObject.UpdateOption.WithinModeling);
```

```
Vector3d vetor2 = new Vector3d(v1l[0], v1l[1], v1l[2]);
Direction direcao2;
direcao2 =
Ses.Parts.Work.Directions.CreateDirection(coordenadas, vetor2,
SmartObject.UpdateOption.WithinModeling);
```

```
NXOpen.Features.Feature nullFeatures_Feature = null;
NXOpen.Features.DatumAxisBuilder datumAxisBuilder1;
```

```

        datumAxisBuilder1 =
Ses.Parts.Work.Features.CreateDatumAxisBuilder(nullFeatures_Feature);

        datumAxisBuilder1.SetPointAndDirection(ponto_vec,
direcao);

NXOpen.Features.Feature feature1;
feature1 = datumAxisBuilder1.CommitFeature();

datumAxisBuilder1.Destroy();

//teste dos vetores tangentes
NXOpen.Features.Feature nullFeatures_Feature1 = null;
NXOpen.Features.DatumAxisBuilder datumAxisBuilder2;
datumAxisBuilder2 =
Ses.Parts.Work.Features.CreateDatumAxisBuilder(nullFeatures_Feature1);

        datumAxisBuilder2.SetPointAndDirection(ponto_vec,
direcao1);

NXOpen.Features.Feature feature2;
feature2 = datumAxisBuilder2.CommitFeature();

datumAxisBuilder2.Destroy();

NXOpen.Features.Feature nullFeatures_Feature2 = null;
NXOpen.Features.DatumAxisBuilder datumAxisBuilder3;
datumAxisBuilder3 =
Ses.Parts.Work.Features.CreateDatumAxisBuilder(nullFeatures_Feature2);

        datumAxisBuilder3.SetPointAndDirection(ponto_vec,
direcao2);

NXOpen.Features.Feature feature3;

```

```

feature3 = datumAxisBuilder3.CommitFeature();

datumAxisBuilder3.Destroy();

//calculo dos angulos de roll pitch yaw
double phi = Math.Atan2(v1I[1],v1I[0]);
double teta = Math.Atan2(-
v1I[2],v1I[0]*Math.Cos(phi)+v1I[1]*Math.Sin(phi));
double psi = Math.Atan2(unit_norm[0]*Math.Sin(phi)-
unit_norm[1]*Math.Cos(phi),-u1I[0]*Math.Sin(phi)+u1I[1]*Math.Cos(phi));

//conversão dos angulos de rad para graus
Rx = 180/Math.PI*psi;
Ry = 180/Math.PI*teta;
Rz = 180/Math.PI*phi;

ptmtrx[0,pt] = point[0];
ptmtrx[1,pt] = point[1];
ptmtrx[2,pt] = point[2];
ptmtrx[3,pt] = Rx;
ptmtrx[4,pt] = Ry;
ptmtrx[5,pt] = Rz;

pt = pt + 1;
}

statusBar1.Text = "Pontos Armazenados";

}
public static int GetUnloadOption(string dummy)
{
    return UFConstants.UF_UNLOAD_IMMEDIATELY;
}
private void MainForm_Load(object sender, System.EventArgs e)

```

```

{

}

//autoria do programa
private void menuItem3_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    MessageBox.Show("Desenvolvido por:\nDenis Marcel Pires
Nagasima\nBaseado no programa de Cálculo de Pontos e Vetores
Normais:\nAutoria do Sr. Antonio Carlos Silveira");
}

private void menuItem2_Click(object sender, System.EventArgs e)
{

}

private void menuItem7_Click_1(object sender, System.EventArgs e)
{
    Close();
}

private void menuItem5_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    double[,] poschange = new double[6,128];
    int j = 0;
    //muda a sequencia dos pontos de uma das curvas
    if(mdir == 1)
    {
        poschange[0,0] = ptmtrx[0,0];
        poschange[1,0] = ptmtrx[1,0];
        poschange[2,0] = ptmtrx[2,0];
        poschange[3,0] = ptmtrx[3,0];
        poschange[4,0] = ptmtrx[4,0];
        poschange[5,0] = ptmtrx[5,0];

        j = 3;
    }
}

```

```

for(int i = 1; i < pt/2; i = i + 2)
{
    poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
    poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
    poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
    poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
    poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
    poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
    j = j + 4;
}

```

```

j = 4;

```

```

for(int i = 2; i < pt/2; i = i + 2)
{
    poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
    poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
    poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
    poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
    poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
    poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
    j = j + 4;
}

```

```

j = 1;

```

```

for(int i = pt/2; i < pt; i = i + 2)
{
    poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
    poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
    poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
    poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
    poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];

```

```

        poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
        j = j + 4;
    }

    j = 2;

    for(int i = pt/2+1; i < pt; i = i + 2)
    {
        poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
        poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
        poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
        poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
        poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
        poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
        j = j + 4;
    }
}
else
{
    poschange[0,0] = ptmtrx[0,0];
    poschange[1,0] = ptmtrx[1,0];
    poschange[2,0] = ptmtrx[2,0];
    poschange[3,0] = ptmtrx[3,0];
    poschange[4,0] = ptmtrx[4,0];
    poschange[5,0] = ptmtrx[5,0];

    j = 3;

    for(int i = 1; i < pt/2; i = i + 2)
    {
        poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
        poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
        poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
        poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];

```



```

        poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
        poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
        j = j + 4;
    }

```

```

j = 4;

```

```

for(int i = 2; i < pt/2; i = i + 2)
{
    poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
    poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
    poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
    poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
    poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
    poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
    j = j + 4;
}

```

```

j = 1;

```

```

for(int i = pt - 1; i >= pt/2; i = i - 2)
{
    poschange[0,j] = ptmtrx[0,i];
    poschange[1,j] = ptmtrx[1,i];
    poschange[2,j] = ptmtrx[2,i];
    poschange[3,j] = ptmtrx[3,i];
    poschange[4,j] = ptmtrx[4,i];
    poschange[5,j] = ptmtrx[5,i];
    j = j + 4;
}

```

```

j = 2;

```

```

for(int i = pt - 2; i >= pt/2; i = i - 2)

```

```

        {
            poschange[0,i] = ptmtrx[0,i];
            poschange[1,i] = ptmtrx[1,i];
            poschange[2,i] = ptmtrx[2,i];
            poschange[3,i] = ptmtrx[3,i];
            poschange[4,i] = ptmtrx[4,i];
            poschange[5,i] = ptmtrx[5,i];
            j = j + 4;
        }
    }

    //coloca os pontos sobre o template
    listBox1.Items.Add("/JOB");
    listBox1.Items.Add("//NAME PROG1");
    listBox1.Items.Add("//POS");
    string med = string.Format("///NPOS {0:d},0,0,0,0,0",pt);
    listBox1.Items.Add(med);
    //escolhe o tipo de sistema de coordenadas
    if (formu2.comboBox11.Equals("USER"))
    {
        med = string.Format("///USER {0:D}",
Convert.ToInt16(formu2.textBox11));
        listBox1.Items.Add(med);
    }
    listBox1.Items.Add("///TOOL 0");
    if (formu2.comboBox11.Equals("USER"))
    {
        med = string.Format("///POSTYPE USER");
        listBox1.Items.Add(med);
    }
    else
    {
        listBox1.Items.Add("///POSTYPE ROBOT");
    }
    listBox1.Items.Add("///RECTAN");

```

```

listBox1.Items.Add("///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0");
//coloca os pontos no programa
if(extdir == 1)
{
    for(int i = 0; i < pt; i = i + 1)
    {
        if(i <= 9)
        {
            string pontos_str =
string.Format("C0000{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"

                ,i,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],
poschange[5,i]);

            listBox1.Items.Add(pontos_str);
        }
        if((i > 9)&(i <= 99))
        {
            string pontos_str =
string.Format("C000{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"

                ,i,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],
poschange[5,i]);

            listBox1.Items.Add(pontos_str);
        }
        if((i > 99)&(i < 128))
        {
            string pontos_str =
string.Format("C00{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"

                ,i,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],
poschange[5,i]);

            listBox1.Items.Add(pontos_str);
        }
    }
}

```

```

    }
    else
    {
        for(int i = pt - 1; i >= 0 ; i = i - 1)
        {
            int l = pt - i - 1;
            if(l <= 9)
            {
                string pontos_str =
string.Format("C0000{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"
                ,pt-i-
1,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],posch
ange[5,i]);

                listBox1.Items.Add(pontos_str);
            }
            if((l > 9)&(l <= 99))
            {
                string pontos_str =
string.Format("C000{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"
                ,pt-i-
1,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],posch
ange[5,i]);

                listBox1.Items.Add(pontos_str);
            }
            if((l > 99)&(l < 128))
            {
                string pontos_str =
string.Format("C00{0:d}={1:F3},{2:F3},{3:F3},{4:F3},{5:F3},{6:F3}"
                ,pt-i-
1,poschange[0,i],poschange[1,i],poschange[2,i],poschange[3,i],poschange[4,i],posch
ange[5,i]);

                listBox1.Items.Add(pontos_str);
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    // segunda parte
    listBox1.Items.Add("//INST");
    listBox1.Items.Add("///DATE 2007/10/24 19:00");
    listBox1.Items.Add("///ATTR SC,RW,RJ");
    if(formu2.comboBox11.Equals("USER"))
    {
        med = string.Format("///FRAME USER {0:D}",
Convert.ToInt16(formu2.textBox11));
        listBox1.Items.Add(med);
    }
    else
    {
        listBox1.Items.Add("///FRAME ROBOT");
    }
    listBox1.Items.Add("///GROUP1 RB1");
    listBox1.Items.Add("NOP");
    //define a interpolacao por reta
    for(int i = 0; i < pt; i = i + 1)
    {
        if (i < 10)
        {
            string intmed = string.Format("MOVL C0000{0:d}
V=8.0",i);

            listBox1.Items.Add(intmed);
        }
        if ((i >= 10)&(i < 100))
        {
            string intmed = string.Format("MOVL C000{0:d}
V=8.0",i);

            listBox1.Items.Add(intmed);
        }
    }

```

```

        if ((i >= 100)&(i < 129))
        {
            string intmed = string.Format("MOVL C00{0:d}
V=8.0",i);

            listBox1.Items.Add(intmed);

        }
    }
    listBox1.Items.Add("END");
}

private void menuItem8_Click(object sender, System.EventArgs e)
{

    saveFileDialog1.ShowDialog();

}

private void button3_Click(object sender, System.EventArgs e)
{

    int coord = 0;
    int user = 0;
    if(formu2.comboBox11.Equals("USER"))
    {

        coord = 2;
        user = Convert.ToInt16(formu2.textBox11);

    }
    if(formu2.comboBox11.Equals("ROBOT"))
    {

        coord = 1;

    }
    string teste = string.Format("coord={0:D}",coord);
listBox1.Items.Add(teste);
    teste = string.Format("user={0:D}",user);

```

```
        listBox1.Items.Add(teste);
        statusBar1.Text = "Programa Gerado";
    }

    private void button3_Click_1(object sender, System.EventArgs e)
    {
        if(extdir == 1)
        {
            extdir = 2;
            button3.Text = "Direção 2";
        }
        else
        {
            extdir = 1;
            button3.Text = "Direção 1";
        }
    }

    private void menuItem4_Click(object sender, System.EventArgs e)
    {
        MainForm.ActiveForm.TopMost = false;
        formu2.Show();
    }

    private void menuItem9_Click(object sender, System.EventArgs e)
    {
        listBox1.Items.Clear();
    }

    private void menuItem10_Click(object sender, System.EventArgs e)
    {
        pt = 0;
        ptmtrx = null;
    }
}
```

```
private void saveFileDialog1_FileOk(object sender,
System.ComponentModel.CancelEventArgs e)
{
    TextWriter tw = new StreamWriter(saveFileDialog1.FileName);
    int maxcount = listBox1.Items.Count;
    for(int i = 0; i < maxcount; i = i + 1)
    {
        tw.WriteLine(listBox1.Items[i]);
    }
    tw.Close();
}

private void button4_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    if(mdir == 1)
    {
        mdir = 2;
        button4.Text = "Direções Opostas";
    }
    else
    {
        mdir = 1;
        button4.Text = "Mesma Direção";
    }
}

}
```


ANEXO C (PROGRAMA PARA GERAR PROGRAMAS PARA O ROBÔ – FORM2)

```
using System;
using System.Drawing;
using System.Collections;
using System.ComponentModel;
using System.Windows.Forms;

namespace vetor
{
    /// <summary>
    /// Summary description for Form2.
    /// </summary>
    public class Form2 : System.Windows.Forms.Form
    {
        private System.Windows.Forms.ComboBox comboBox1;
        private System.Windows.Forms.Button button1;
        private System.Windows.Forms.Button button2;
        private System.Windows.Forms.Label label1;
        private System.Windows.Forms.TextBox textBox1;
        private System.Windows.Forms.Label label2;
        /// <summary>
        /// Required designer variable.
        /// </summary>
        private System.ComponentModel.Container components = null;

        public Form2()
        {
            //
            // Required for Windows Form Designer support
            //
        }
    }
}
```

```

        InitializeComponent();

        //
        // TODO: Add any constructor code after InitializeComponent call
        //
    }

    /// <summary>
    /// Clean up any resources being used.
    /// </summary>
    protected override void Dispose( bool disposing )
    {
        if( disposing )
        {
            if(components != null)
            {
                components.Dispose();
            }
        }
        base.Dispose( disposing );
    }

    #region Windows Form Designer generated code
    /// <summary>
    /// Required method for Designer support - do not modify
    /// the contents of this method with the code editor.
    /// </summary>
    private void InitializeComponent()
    {
        this.comboBox1 = new System.Windows.Forms.ComboBox();
        this.button1 = new System.Windows.Forms.Button();
        this.button2 = new System.Windows.Forms.Button();
        this.label1 = new System.Windows.Forms.Label();
        this.textBox1 = new System.Windows.Forms.TextBox();
    }

```

```

        this.label2 = new System.Windows.Forms.Label();
        this.SuspendLayout();
        //
        // comboBox1
        //
        this.comboBox1.Items.AddRange(new object[] {

"ROBOT",

"USER"});
        this.comboBox1.Location = new System.Drawing.Point(152, 40);
        this.comboBox1.Name = "comboBox1";
        this.comboBox1.Size = new System.Drawing.Size(121, 21);
        this.comboBox1.TabIndex = 0;
        this.comboBox1.SelectedIndexChanged += new
System.EventHandler(this.comboBox1_SelectedIndexChanged);
        //
        // button1
        //
        this.button1.Location = new System.Drawing.Point(40, 120);
        this.button1.Name = "button1";
        this.button1.TabIndex = 1;
        this.button1.Text = "Aplicar";
        this.button1.Click += new
System.EventHandler(this.button1_Click);
        //
        // button2
        //
        this.button2.Location = new System.Drawing.Point(168, 120);
        this.button2.Name = "button2";
        this.button2.TabIndex = 2;
        this.button2.Text = "Fechar";
        this.button2.Click += new
System.EventHandler(this.button2_Click);

```

```
//  
// label1  
//  
this.label1.Location = new System.Drawing.Point(8, 40);  
this.label1.Name = "label1";  
this.label1.Size = new System.Drawing.Size(136, 23);  
this.label1.TabIndex = 3;  
this.label1.Text = "Sistema de Coordenadas:";  
//  
// textBox1  
//  
this.textBox1.Location = new System.Drawing.Point(152, 80);  
this.textBox1.Name = "textBox1";  
this.textBox1.Size = new System.Drawing.Size(80, 20);  
this.textBox1.TabIndex = 4;  
this.textBox1.Text = "";  
this.textBox1.Visible = false;  
//  
// label2  
//  
this.label2.Location = new System.Drawing.Point(96, 80);  
this.label2.Name = "label2";  
this.label2.Size = new System.Drawing.Size(40, 23);  
this.label2.TabIndex = 5;  
this.label2.Text = "USER";  
this.label2.Visible = false;  
//  
// Form2  
//  
this.AutoScaleBaseSize = new System.Drawing.Size(5, 13);  
this.ClientSize = new System.Drawing.Size(292, 174);  
this.Controls.Add(this.label2);  
this.Controls.Add(this.textBox1);  
this.Controls.Add(this.label1);
```

```

        this.Controls.Add(this.button2);
        this.Controls.Add(this.button1);
        this.Controls.Add(this.comboBox1);
        this.Name = "Form2";
        this.Text = "Opções";
        this.Load += new System.EventHandler(this.Form2_Load);
        this.ResumeLayout(false);

    }
    #endregion

    private void Form2_Load(object sender, System.EventArgs e)
    {
        comboBox1.Text = "ROBOT";
    }

    private void comboBox1_SelectedIndexChanged(object sender,
System.EventArgs e)
    {
        if(comboBox1.Text.Equals("USER"))
        {
            textBox1.Visible = true;
            label2.Visible = true;
        }
    }

    private void button2_Click(object sender, System.EventArgs e)
    {
        Form2.ActiveForm.Visible = false;
    }
    public string comboBox1
    {
        get
        {

```

```
        return this.comboBox1.Text;
    }
    set
    {
        this.comboBox1.Text = value;
    }
}
public string textBox1
{
    get
    {
        return this.textBox1.Text;
    }
    set
    {
        this.textBox1.Text = value;
    }
}
private void button1_Click(object sender, System.EventArgs e)
{
    Form2.ActiveForm.Visible = false;
}
}
```