

2 - Revisão Bibliográfica

Esta revisão bibliográfica busca abordar os principais aspectos do processo de fabricação dos tubos da classe API 5L X80, os fundamentos de soldagem destacando o processo de soldagem com arame tubular, e suas principais variáveis operativas.

2.1. Desenvolvimento de aços de alta resistência

Muitos fatores têm contribuído para o desenvolvimento dos aços microligados, estes fatores incluem o desenvolvimento dos princípios tecnológicos e científicos sob os quais estes aços estão embasados e a necessidade de incrementar a resistência destes aços e outras demandas para uma variedade de aplicações.

A relação entre estes fatores e a capacidade da indústria de fabricação do aço para responder a solicitações são mostrados na figura 1 onde os benefícios na economia de peso estão essencialmente relacionados ao valor, economia de matéria prima e energia tem tido seu impacto na redução do peso. Altos níveis de resistência são obtidos devido à adição de elementos de liga e da otimização dos processos de fabricação como o resfriamento acelerado. Atualmente a tendência é o desenvolvimento de métodos para produção de aços com baixo teor de carbono e alta resistência.

O desenvolvimento dos aços microligados coincide com o desenvolvimento de pesquisas e um melhor conhecimento da relação microestrutura-propriedades. As propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas à microestrutura, e alterações da microestrutura causa variações nas propriedades mecânicas ^[1].

Adições de molibdênio, níquel e cobre têm sido testadas com sucesso, em conjunto com os processos de resfriamento acelerado, objetivando o desenvolvimento de tubos da classe API 5L X100. O desenvolvimento de aços do tipo API 5L X120, foi obtido com uma tecnologia significativamente superior à requerida para os aços X80 empregando novos processos de resfriamento

acelerado desenvolvidos conjuntamente entre Nippon Steels e Exxon-Mobil visando obter microestruturas bainíticas como mostrado por Asahi et al. [2].

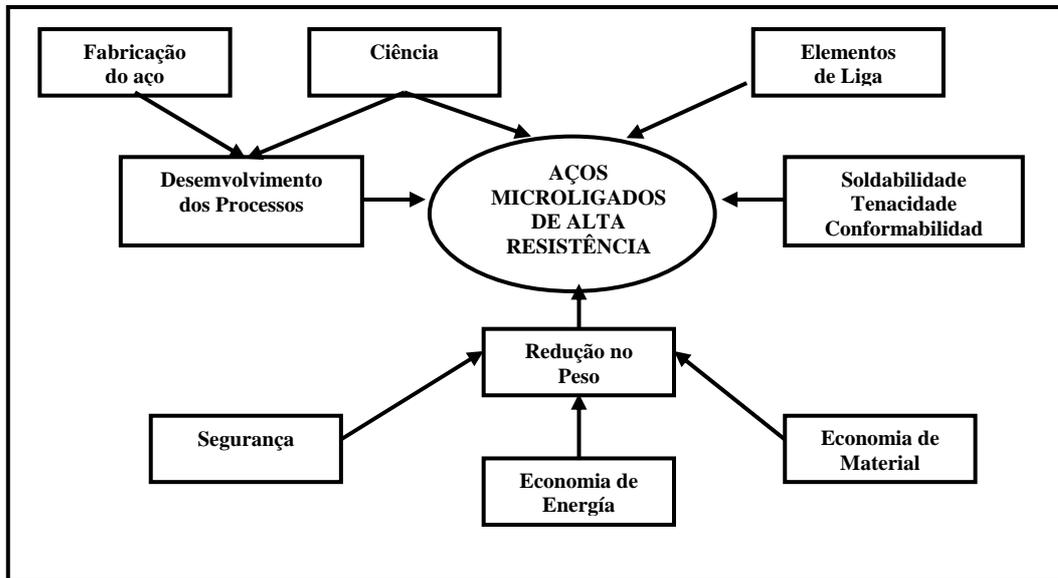


Figura 1 – Fatores que contribuem ao desenvolvimento dos aços microligados [1].

2.1.1. Vantagens da utilização dos aços de alta resistência

Kalwa et al [3] reportaram que a primeira linha dutoviária que empregou aço X80 foi o Ruhrgas Wemeto – Schluchtern na Alemanha com 250 km de extensão em 1992. O peso total de aço X80 utilizado na obra foi de 145 000 toneladas, permitindo uma redução de 20 000 toneladas comparados com dutos tipo X70. Isto ocorre por redução da espessura da parede do tubo de 20,8 mm do X70 para 18,3 mm do X80.

A principal vantagem da utilização de dutos com graus elevados de resistência mecânica é a redução do custo total de material. Esta redução se baseia na premissa de que ao aumentar o limite de escoamento do material, a espessura de parede requerida para resistir às pressões internas (ou externas no caso de águas profundas) é reduzida, além disso, espessuras de parede finas requerem uma quantidade menor de metal de solda, reduzindo os custos de consumíveis de soldagem.

Alternativamente, se grandes espessuras de parede forem mantidas, os dutos fabricados com estes aços podem receber maiores pressões de trabalho. Com maiores pressões, é possível diminuir o número de estações de compressores ao longo da linha, mantendo o mesmo ritmo de produção [4].

Algumas desvantagens são: o número limitado de fornecedores deste tipo de material, os processos de soldagem restritos e de controle complexo o que pode aumentar o tempo de instalação.

2.1.2. Tipos de Aços de Alta Resistência

Na tabela 1 é apresentada a classificação dos aços mais utilizados para a fabricação de tubos.

Tabela 1 – Classificação dos tubos de acordo com as principais normas internacionais de fabricação ^[5].

Classificação do aço			LE (mínimo) (N/mm ²)	LR (mínimo) (N/mm ²)	Alongamento (%)
API 5L	EN 10208-2	DIN 17172			
A			207	331	28
	L210		210	320	26
		StE 2107	210	320	26
B			241	413	23
	L245MB		245	415	22
		StE 2407	240	370	24
X42			289	313	23
	L290MB		290	415	21
		StE 2907 (TM)	290	420	23
X46			317	434	22
	L320MB		320	460	21
		StE 3207(TM)	320	460	21
X52			358	455	21
	L360MB		360	460	20
		StE 3807(TM)	380	510	20
X56			386	489	20
	L385MB		385	530	19
		StE 3807(TM)	385	530	19
X60			413	517	19
	L415MB		415	520	18
		StE 3207(TM)	415	550	18
X65			448	530	18
	L450MB		450	535	18
		StE 4407(TM)	445	560	18
X70			482	565	18
	L485MB		485	570	18
		StE 4807(TM)	480	600	18
X80			550	620	18
	L555MB		555	625	18
		StE 5507(TM)	550	690	18

Geralmente os materiais selecionados para construção de tubulações atendem aos requisitos das normas API 5L ou DIN 17172, ou EN 10208-2. Essas normas classificam os diferentes tubos em subgrupos, de acordo com a resistência mecânica facilitando a seleção do material e adequando para cada tipo de aplicação.

2.2. Processos de fabricação de aços de alta resistência

Segundo Fedele ^[5] até os anos 70, os aços de alta resistência eram produzidos pelo processo de laminação a quente, seguida de uma normalização visando obter uma microestrutura composta de finas lamelas de ferrita, perlita e grãos maiores de ferrita (ASTM 7-8). Nos anos 70, este processo foi modificado para operações de conformação termomecânica, permitindo a produção de aços X-70, com reduzidos teores de carbono, e adições dos elementos de liga, nióbio e vanádio. A microestrutura passou a apresentar maior uniformidade e com grãos mais refinados de ferrita ASTM (10-11).

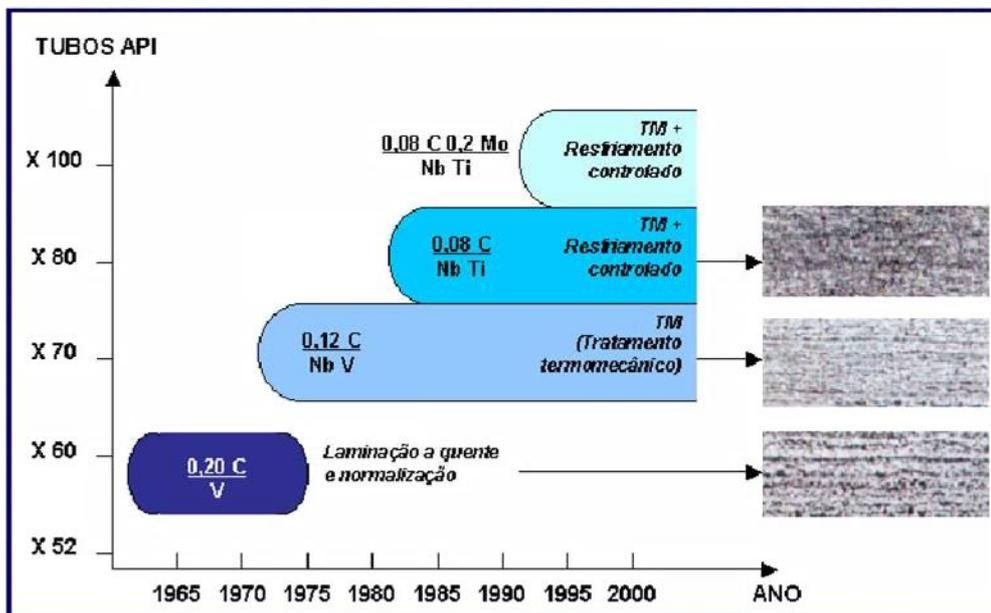


Figura 2 – Desenvolvimento dos aços para tubos API ^[4].

Esta tecnologia foi aperfeiçoada nos anos 80, com a introdução do processo de resfriamento acelerado, juntamente com o conceito de laminação a quente. Foi então possível, produzir um aço X80 com teores de carbono ainda mais reduzidos

melhorando sua soldabilidade. Neste caso a microestrutura apresentava-se mais refinada, do tipo ferrítica-bainítica.

Para atingir níveis de resistência ainda maiores como 827 MPa (X120), é necessário produzir um aço utilizando uma composição química diferenciada e processos de laminação controlada onde o refinamento de grão é conseguido através do processamento termomecânico de laminação controlada, seguido por um resfriamento acelerado, tendo como principais produtos de transformação a bainita inferior e ripas de martensita, como foi mostrado por Fairchild et al ^[6]. O refino de grão configura-se como o principal fator de ganho de resistência mecânica dos aços de grau X80 e superiores disponíveis atualmente no mercado.

2.2.1. Descrição do processo de fabricação do X80 nacional

No Brasil são fabricados industrialmente aços até tipo X70. No entanto, devido às limitações dos equipamentos de fabricação para atingir uma velocidade de resfriamento necessária para a produção de aços com grãos tão finos, foi fabricado o aço da classe API X80 com composição química diferenciada para que se atingisse os requisitos mínimos deste grau. Para tal foram adicionados elementos de liga tais como o nióbio, cromo, vanádio e molibdênio. Estes elementos têm o objetivo de aumentar a resistência mecânica por precipitação, inibir o crescimento de grão austenítico durante o reaquecimento das chapas, retardar a recuperação e recristalização dos grãos austeníticos deformados, além de atrasar a transformação da austenita em ferrita ^[1]. Outros elementos como alumínio tem sido empregados para produzir combinações e melhorar a resistência e tenacidade.

O aço empregado neste estudo foi fabricado pela USIMINAS, pelo Processo Termo-Mecânico Controlado, ou TMCP (Thermomechanic Controlled Process), que é mostrado de forma esquemática na figura 3. O TMCP ocorre em três fases principais:

- A. Laminação na fase de recristalização da austenita.
- B. Laminação na fase de não recristalização da austenita.
- C. Acabamento na fase austenita mais ferrita.

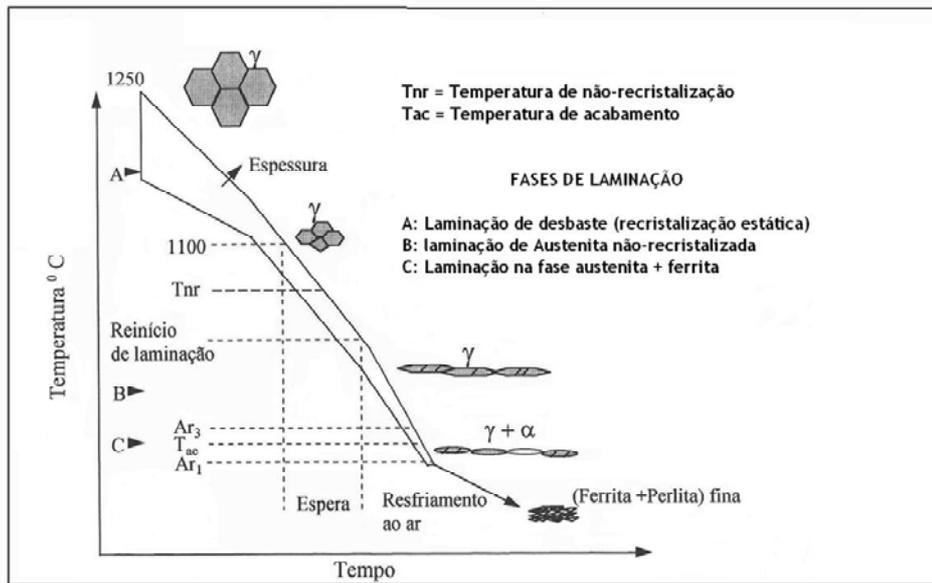


Figura 3 – Processo Termo Mecânico Controlado (TMCP) [7].

A laminação inicia-se a 1250° C, na fase A, micro-estruturalmente, a cada passe da chapa pelo laminador, a austenita se deforma, alongando-se. Como as temperaturas são muito altas, rapidamente novos grãos de austenita poligonal nucleiam e crescem nos contornos da austenita deformada, tendo um tamanho menor que os grãos originais. Ocorrem passes sucessivos, até que se inicie a recristalização estática, ou seja, os novos grãos de austenita após deformação e recristalização, têm o mesmo tamanho dos antigos. Isto ocorre quando o material tem grãos em torno de 20 a 40 μm .

A fase B do TMCP ocorre na faixa de temperaturas de não recristalização da austenita (T_{nr})- abaixo de 1050 °C. Ou seja, a cada passe de laminação, a austenita se deforma, mas não ocorre recristalização nos contornos de grão. Assim aumenta a relação área/volume (S_v) da austenita. Nesta etapa, consegue-se uma redução de grão em torno de 60 a 80%.

A fase C se inicia abaixo da temperatura de acabamento (T_{ac}), próximo à temperatura de transformação austenita + ferrita (A_{r3}). Inicia-se o resfriamento da chapa em água e, ao atingir A_{r3} , a ferrita nucleia nos contornos da austenita deformada. Quanto maior tiver sido a redução dos grãos austeníticos em B, maior será S_v e, portanto, haverá mais sítios de nucleação de ferrita, gerando uma granulometria mais fina. Após a formação dos grãos ferríticos, retira-se o resfriamento à água e a chapa resfria ao ar [7].

A microestrutura resultante deste processo é predominantemente Ferrita + Bainita, com dispersão fina do micro-constituente AM (martensita com austenita retida) podendo conter uma pequena quantidade de perlita. O tamanho de grão médio é da ordem de 10 μm .

Blas e Balancin ^[8] determinaram que as condições de transformação de fases são fortemente influenciadas pelo estado da austenita prévia e a evolução dos grãos austeníticos durante o processo de resfriamento. Desta maneira, a microestrutura final e as propriedades mecânicas são determinadas pelo estado da austenita prévia e pelas condições de resfriamento.

Okatsu et al ^[9] estudando aços bifásicos (ferrita + bainita alongada), obtiveram um modelamento onde o efeito concentrador de tensões dentro da fase ferrítica gerado pelo contorno alongado da bainita, concluindo ser esta a razão pela qual os aços com este tipo de microestrutura tem uma elevada resistência mecânica e tenacidade.

2.2.2. Processo de conformação dos tubos

Este processo é denominado U-O-E e se inicia com uma inspeção das chapas com a finalidade de detectar possíveis macro-defeitos e prevenir a formação de trincas longitudinais, logo as bordas da chapa são previamente usinadas na geometria longitudinal.

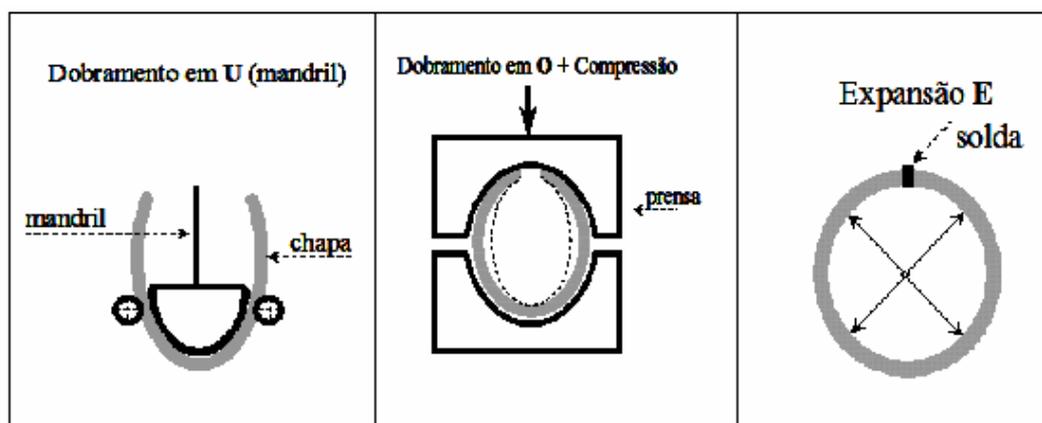


Figura 4 – Processo de conformação dos tubos.

O processo U-O-E está esquematizado na figura 4. A primeira etapa de trabalho consiste no dobramento da chapa em formato de “U”, em seguida o “U” é conformado em “O”, depois do trabalho mecânico é necessário uma inspeção. A etapa seguinte é o ponteamento das faces do “O” a fim de evitar a distorção decorrente de contrações e dilatações térmicas para que não ocorram mudanças no diâmetro durante a soldagem final.

Outra etapa importante é a soldagem de uma chapinha em cada extremidade do tubo, onde a solda se iniciará e terminará. Isto é importante, pois o início e o final da solda são as regiões mais susceptíveis à ocorrência de defeitos, em seguida as soldas internas e externas são realizadas por arco submerso. Para garantir a ausência de defeitos na junta soldada, são realizados ensaios de ultrason e radiografia. Em seguida, o tubo é submetido a uma expansão interna “E”, que tem a finalidade de ajustar o seu diâmetro às tolerâncias da norma API 5L, logo o tubo passa por inspeções e teste hidrostático. Novos ensaios não destrutivos são realizados na junta soldada. Finalmente a inspeção dimensional e a pesagem do tubo são realizadas; Comumente, os tubos fabricados pelo processo U-O-E são chamados de tubos de chapa grossa ou tubos SAW ^[10].

2.2.3. Efeito do processo de fabricação sobre as propriedades da chapa

A transformação de uma geometria plana (chapa) em uma cilíndrica (tubo) pode ser feita de forma contínua ou intermitente, a conformação contínua, utilizando uma seqüência de cilindros de conformação é utilizada quando a espessura da chapa é inferior a 12,7 mm, já a conformação intermitente é aplicada quando a chapa tem espessura superior, sendo esta última técnica empregada nos processos de conformação U-O-E. Este trabalho é realizado à frio, onde as camadas internas da chapa são deformadas em compressão enquanto as externas em tração, logo durante a expansão, camadas externas e internas são deformadas em tração. Os efeitos resultantes desta seqüência de deformações dependem da microestrutura do material.

Segundo Sage ^[11], em aços com microestrutura ferrita-perlita, os efeitos provocados pela conformação do tubo causam geralmente um escoamento descontínuo, e por essa razão o material é susceptível a perda de resistência

durante a fabricação do tubo devido ao efeito Bauschinger. O efeito Bauschinger caracteriza-se quando a tensão necessária para reverter a direção do deslizamento num certo plano de deslizamento é menor do que a necessária para continuar o deslizamento na direção original, ou seja corresponde a uma direcionalidade de encruamento ^[12]. Para fins práticos, a diferença na resistência ao escoamento entre a chapa e o tubo acabado é igual ao aumento de resistência devido ao encruamento menos o efeito Bauschinger, porém uma vez que a quantidade de encruamento é muito pequeno nos aços ferríticos-perlíticos, o efeito da conversão chapa – tubo é uma redução na resistência do tubo. No entanto, nos aços de microestrutura de ferrita-acicular, as áreas duras de segunda fase introduzem uma alta densidade de discordâncias na ferrita circunvizinha, por isso o coeficiente de encruamento é alto e a deformação ocorre acima da resistência ao escoamento da chapa, resultando uma curva contínua tensão – deformação. Assim, os processos de fabricação atuam nas propriedades do tubo, em alguns aços abaixa a resistência do tubo comparado com a da chapa e em outros aumenta, mas em quase todos os aços a tenacidade é reduzida pelo encruamento que estes materiais sofrem ^[11].

2.3. Soldabilidade de aços de alta resistência e baixa liga

O já citado aumento na demanda de energia trouxe a necessidade de tubulações que pudessem operar em condições muito severas como altas pressões, baixas temperaturas e meios agressivos, conseqüentemente, existem também a necessidade que a junta soldada (metal de solda e ZTA) tenha propriedades mecânicas compatíveis com o metal de base.

O processo de fabricação dos aços de alta resistência e baixa liga, envolve laminação controlada e adição de elementos de liga cujo principal objetivo é a obtenção de um tamanho de grão fino. O resultado deste processamento pode ser parcialmente destruído durante o processo de soldagem. A soldagem longitudinal realizada durante a fabricação do tubo, geralmente tem as propriedades mecânicas garantidas pelo ajuste adequado dos parâmetros de soldagem que se torna de mais fácil controle por ser uma solda de fábrica mecanizada. No entanto durante a construção e montagem do duto é necessário determinar cuidadosamente os parâmetros de soldagem que venham a afetar a performance do duto em operação.

A soldabilidade, no presente caso pode ser definida como uma medida da resistência inerente do aço (tubo) para aceitar um passe de raiz sob dadas condições de aporte de calor sem que ocorra trinca ou que produza uma estrutura susceptível à trinca quando sob condições de tensões resultantes da manipulação da tubulação. No entanto é conhecido que o processo de soldagem introduz algum tipo de defeito nas estruturas soldadas, mesmo que não sejam detectáveis pelos métodos disponíveis de ensaios destrutivos ^[13].

Em geral um aço apresenta boa soldabilidade se depois de soldado possui boa tenacidade e o metal de solda não se torne frágil. Os fatores mais importantes que influenciam na soldabilidade são:

- As transformações produzidas na ZTA.
- A composição química do metal base e do consumível.
- As tensões residuais geradas durante a soldagem.
- O procedimento de soldagem empregado.

É por tanto apropriado caracterizar a soldabilidade de aços para tubos como a resistência da junta soldada a iniciação da propagação de uma trinca a partir de um defeito pré-existente, levando a fratura sob condições de operação ^[13].

2.3.1. Carbono Equivalente (CE)

Um dos critérios mais empregados que relaciona o grau de soldabilidade é a utilização do índice chamado carbono equivalente (CE).

Como o carbono é o elemento que mais influencia na temperabilidade e na dureza final do aço, têm se considerado denominar o Carbono Equivalente como um índice que permite correlacionar a composição química do aço com sua tendência a apresentar estruturas frágeis quando este é submetido a um processo de soldagem; porém atualmente existe uma tendência de reduzir a quantidade de carbono nos aços como o mostrado por Barnes ^[14], onde essa redução tem um efeito benéfico nas propriedades da junta soldada principalmente na tenacidade.

Muitas fórmulas foram propostas e encontram-se na literatura, e principalmente elas foram obtidas sob o ponto de vista da temperabilidade do aço (tendência a formar martensita). Duas fórmulas foram sugeridas para o cálculo da temperatura de preaquecimento neste tipo de aços para tubulações, proposta pelo International Institute of Welding (IIW).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%) \quad (1)$$

Esta fórmula pode ser empregada para aços com conteúdo de carbono superior a 0,18% ou em condições de soldagem que requeiram um esfriamento lento $\Delta t_{8/5} > 12$ segundos.

Outra fórmula muito empregada foi proposta por Ito e Bessyo, e é conhecida como a fórmula do tipo P_{cm} , esta fórmula é empregada pelo código estrutural AWS D1.1:2004 ^[14] para a determinação da temperatura mínima de preaquecimento esta fórmula também é um método para avaliação do potencial do aço para formar trincas por hidrogênio.

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

Todos os elementos de liga nas duas equações de acima são expressos em porcentagem de peso.

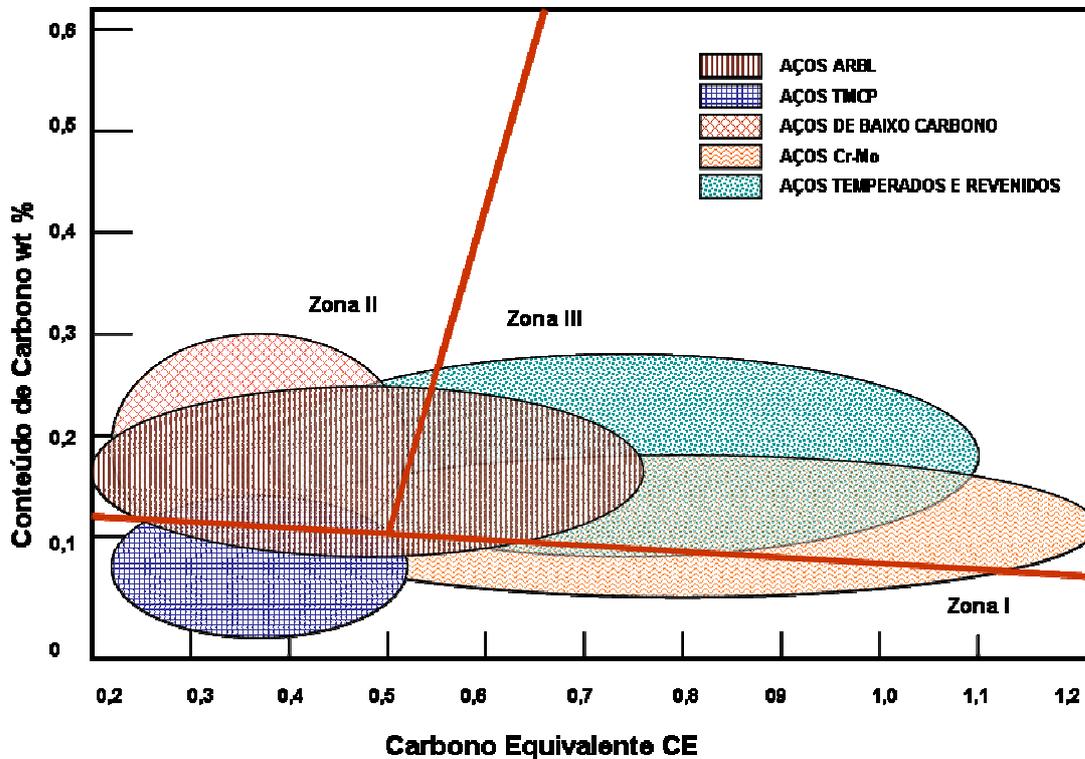
Liu ^[16] apresentou o diagrama mostrado na figura 5, para determinar a soldabilidade de diferentes tipos de aços com diferentes teores de elementos de liga relacionando o CE com a porcentagem de carbono, uma vez que o carbono é o elemento determinante claramente na susceptibilidade a formação de trincas.

Podem ser observadas na figura 5, três regiões ou zonas. Na zona I encontram-se os aços com conteúdo menor de 0,1% de C e sem restrição nenhuma de CE, então a dureza da martensita não é muito alta, porém admite certo nível de tenacidade e risco a ocorrência de trincas é quase improvável, podendo ocorrer na presença de uma porcentagem alta de hidrogeno dentro do cordão de solda.

Na zona II encontram-se aços de baixa liga, mas com um conteúdo de carbono maior que 0,1 %, estes aços requerem alguns cuidados como temperatura de preaquecimento apropriada e tratamentos térmicos após a soldagem.

Na zona III, encontram se os aços com a maior dificuldade para realizar a soldagem devido a seu alto teor de carbono e conseqüentemente alto CE, porém eles têm uma alta tendência de desenvolver trincas a frio. Para realizar soldas com sucesso nestes aços deve-se ter um bom controle dos procedimentos de soldagem,

por exemplo, nas temperaturas de preaquecimento e pós-soldagem, controle da temperatura entre passes e os parâmetros próprios de soldagem. Alguns aços contendo Cr e Mo, aços de alta resistência e baixa liga, e alguns aços produzidos



por processamento termomecânico encontram-se neste grupo.

Figura 5 – Mapa de soldabilidade dos aços em função do CE e do conteúdo de C ^[16].

2.3.2. Aporte de calor e ciclo térmico

No processo de soldagem por arco elétrico, a energia produzida no arco é utilizada como fonte de calor para executar a solda. O aporte de calor desenvolvido pelo arco elétrico é expresso em quilojoules por milímetro (KJ/mm), sendo, portanto o parâmetro que incide diretamente sobre o ciclo térmico, e pode ser calculado pelo uso da seguinte fórmula ^[17]:

$$H = \frac{V \times I}{v} \times E \quad \text{eq. (3)}$$

Onde:

H , é o Aporte de Calor (J/mm);

V , é a voltagem (volts);

- I , é a Corrente (amperes);
 v , é a velocidade de soldagem (mm/seg).
 E , é a eficiência do processo empregado (%)

O ciclo térmico aplicado num determinado ponto do material durante um processo de soldagem é caracterizado por um aquecimento até à temperatura de pico, seguido rapidamente de um resfriamento cuja taxa decresce com o tempo [18]. O ciclo térmico influi diretamente nas características microestruturais da ZTA, isto é nas taxas de aquecimento e esfriamento.

2.3.3. Zona afetada pelo calor

A soldagem afeta uma região do metal de base adjacente à poça de fusão, a qual é submetida a um rápido ciclo térmico de aquecimento e resfriamento o qual pode vir a alterar a microestrutura e as propriedades mecânicas em relação à zona fundida e o metal de base não alterado, a essa região dá-se o nome de zona termicamente afetada (ZTA) ou zona afetada pelo calor (ZAC) [19].

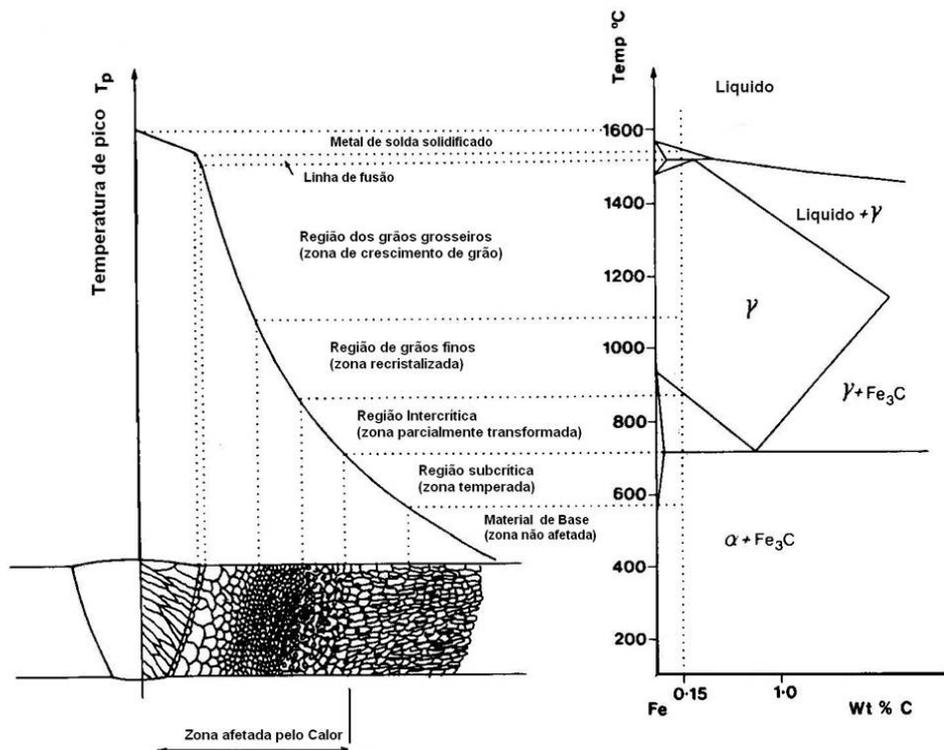


Figura 6 – Diagrama esquemático de várias sub-zonas da ZTA de um aço com 0.15% C [19].

Segundo Lundim ^[20] a extensão da ZTA depende da geometria da junta, espessura da chapa, propriedades térmicas do material, temperatura de preaquecimento e principalmente do processo e respectivos parâmetros de soldagem.

A ZTA é facilmente visível nos aços por meio de uma macrografia, sua extensão vai desde a região onde o aço atinge a temperatura de fusão até a distância na qual se atinge a temperatura crítica inferior a A_{c1} (723 °C).

A ZTA é normalmente subdividida em quatro regiões:

- **Região de Grãos Grosseiros (RGG)**, Esta região atinge temperaturas de pico entre 1100°C e 1400°C produzindo um crescimento de grão austenítico, porém uma deterioração da tenacidade devido ao maior tamanho de grão. Dependendo da taxa de resfriamento as fases observadas nesta região incluem ferrita poligonal, ferrita de Widmanstatten, ferrita bainítica, e martensita em ripas. Além disso, as fases enriquecidas em carbono ou fases secundárias podem transformar-se em perlita, carbonetos ou constituinte AM. ^[21].
- **Região de Grão Finos (RGF)**, Esta região é submetida a temperaturas mais baixas, não havendo crescimento de grão austenítico. A grande área de contorno de grão tende a promover a nucleação de ferrita, sendo que a austenita enriquecida remanescente no centro do grão pode transformar-se em perlita. ^[21].
- **Região Intercrítica (RI)**, Durante o resfriamento, a austenita enriquecida em carbono e manganês, poderá transformar-se em uma grande variedade de microestruturas como perlita, bainita superior, martensita auto-revenida ou martensita de alto carbono, dependendo da taxa de resfriamento $\Delta T_{8/5}$.
- **Região Subcrítica (RS)**, Embora não pareça ocorrer mudança nas morfologias dos microconstituintes, o efeito combinado do aquecimento e da tensão residual pode causar envelhecimentos dinâmicos, levando a uma fragilização da estrutura.

Tem-se verificado que a fragilidade da ZTA pode ocorrer nas RGG, RI e RS, dependendo do tipo do aço e processo de soldagem. Caso a RI seja mais frágil, torna-se difícil localizar a sua fragilidade, pois devido ao pequeno tamanho de grão dessa região é difícil distingui-la da RS. Entretanto para os aços de tubulações, a RGG é aquela que sempre tem apresentado a maior fragilidade dentre as demais regiões da ZTA ^[10].

2.3.3.1. Efeito de vários passes de solda na ZTA

Na soldagem multipasse a situação é mais complexa que a solda de um único passe, devido à transformação parcial da microestrutura da ZTA inicial pelo passe subsequente, isto é cada cordão de solda é tratado termicamente pelo cordão seguinte, tendo como resultado uma ampla gama de microestruturas as quais dependem da distância que se encontra aquela região até a zona fundida ^[14]. A região de grãos grosseiros (RGG) dependendo de sua localização experimenta um ou mais ciclos térmicos, podendo passar a ser, dependendo da temperatura de reaquecimento, região de grãos finos, região intercrítica e região subcrítica ^[22], na figura 7 mostra-se o efeito das transformações produzidas pela seqüência de passes.

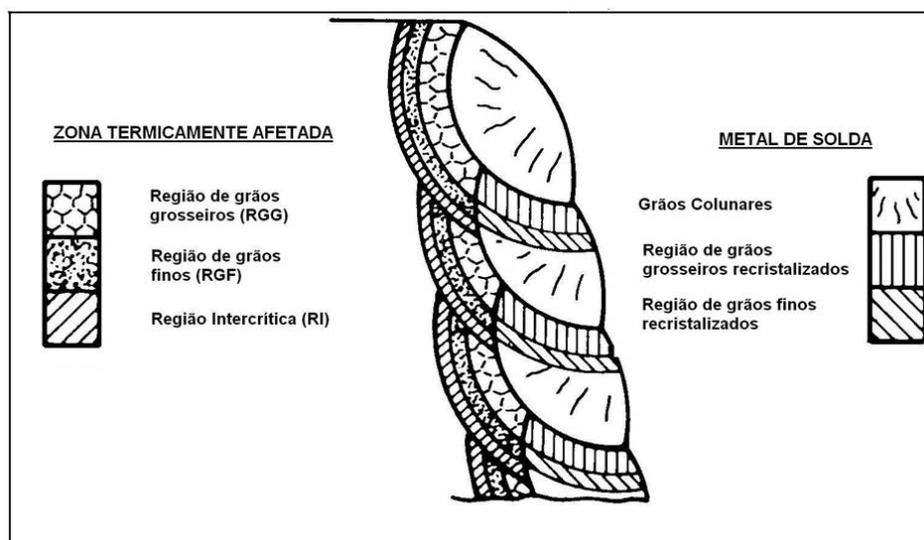


Figura 7 – Regiões da ZTA em soldas multipasse ^[19].

O reaquecimento também refina a microestrutura nas partes adjacentes da zona termicamente afetada. Koso et al ^[23] fizeram um estudo com um aço tipo ARBL temperado e revenido, utilizando técnicas de simulação de ciclos térmicos e verificaram que a região de grãos grosseiros reaquecida inter-críticamente apresentou ilhas de martensita indicando uma baixa tenacidade.

Uma região crítica na qual a tenacidade é desejável é o topo da solda, visto que a última camada a ser depositada em uma solda multipasse pode não receber o beneficiamento do tratamento da recristalização. É preciso um planejamento cuidadoso do cordão final (ou dos cordões finais) para assegurar que ocorra o refino dos grãos onde for necessário ^[17].

2.3.3.2. Efeito da Composição Química e dos parâmetros de soldagem sobre a microestrutura do metal de solda

A microestrutura do metal de solda é função da taxa de resfriamento e da composição química, desse modo, o procedimento de soldagem pode influenciar de forma determinante a microestrutura obtida. Segundo Castello et al ^[24], é possível obter microestruturas diferentes para um mesmo eletrodo, mudando a posição de soldagem de vertical ascendente para vertical descendente, mantendo-se os demais parâmetros de soldagem fixos.

Segundo Siqueira et al ^[25], independentemente do tipo de processo de soldagem, as propriedades mecânicas dos metais de solda estão diretamente relacionadas a sua microestrutura, mais precisamente com os percentuais dos diferentes tipos de microconstituintes presentes nesta região da junta soldada. Os principais microconstituintes de metais de solda de aços ferríticos são: a Ferrita Acicular (FA), constituído por grãos extremamente finos, que associa uma alta resistência mecânica com boa tenacidade, a Ferrita Primária (FP), de grãos relativamente grosseiros que pode ser nucleada nos contornos de grão da austenita ou no seu interior e se caracteriza por possuir uma baixa dureza e resistência mecânica, e Ferrita com Segunda Fase (FS).

Um estudo feito por Dos Santos e Trevisan ^[26] em juntas de aço API 5L X70 empregando arame tubular autoprottegido, mostraram que os cordões de solda apresentaram uma solidificação caracterizada por grãos colunares, típica de processos de soldagem por fusão. A decomposição da austenita primária forma

grãos colunares grosseiros, delimitados nas bordas por ferrita em forma de veios no contorno de grão, conhecida como Ferrita de Contorno de Grão (FCG). Também mostraram que a composição principal intragranular é formada por Ferrita Acicular (FA), nucleada principalmente em inclusões, característica da soldagem de aços de alta resistência e baixa liga.

2.3.3.3. Formação do microconstituente AM e sua influência na tenacidade

O constituinte AM consiste de martensita de alto carbono e austenita retida, e costuma aparecer durante a soldagem de aços de alta resistência, sendo quase impossível eliminar sua formação especialmente quando o aço é soldado com altos aportes de calor. Sua formação também está relacionada com a presença de elementos de liga como C, Si, Mn, Mo, Ni, e com altas taxas de resfriamento após a soldagem [21].

Em soldas multipasse, ou seja, quando a ZTA de um primeiro passe sofre um segundo ciclo térmico e a temperatura de pico é menor que Ac_1 , a microestrutura chega a ser a mesma do primeiro ciclo térmico.

Quando a temperatura de pico é menor que Ac_1 e Ac_3 , ou seja, provocará uma nova região intercrítica, o constituinte A-M forma-se preferencialmente ao longo dos limites de grão da austenita, a qual foi transformada desde uma região rica em carbono, e foi re-austenizada durante o segundo ciclo térmico.

Quando a temperatura de pico do segundo ciclo térmico atinge temperaturas superiores a Ac_3 , a austenita forma-se nas regiões ricas em carbono, para logo o carbono se difundir uniformemente na matriz. Durante o resfriamento, a austenita se transforma em ferrita bainítica e ferrita poligonal, com baixo conteúdo de carbono, ficando uma austenita com alto conteúdo de carbono, a qual gerará o constituinte AM. Estes fenômenos ocorrem na região de grãos finos e grãos grosseiros da ZTA [27].

A presença do microconstituente AM (austenita – martensita) na junta soldada também traz algum efeito nas propriedades mecânicas da mesma; assim Matsuda et al [28] simularam condições de resfriamento $\Delta t_{8/5}$ para aços de alta resistência e baixa liga, concluindo que um incremento da fração na percentagem da área de constituinte AM massivo (aprox. > 2,2%) reduz rapidamente a

tenacidade. Estudos feitos por Ikawa et al ^[29] em aços ARBL e por Thompson e Krauss ^[30], atribuem uma queda da tenacidade nos materiais estudados com o aumento da fração volumétrica do microconstituente AM.

2.4. Transferência do metal de adição

A forma pela qual o metal de adição fundido transfere-se para a poça de fusão influencia o nível de respingos e fumos gerados, a capacidade de soldar fora da posição plana, o formato do cordão e a própria estabilidade do processo.

Na figura 8 se apresenta as diversas formas de transferência do metal proposto pelo IIW (Instituto Internacional de Soldagem).

Diversas formas de transferência são observadas para os diferentes processos e condições operacionais. O modo de transferência de uma dada condição de soldagem depende de fatores como os parâmetros elétricos do arco, o diâmetro e composição do metal de adição, tipo e composição do meio de proteção, comprimento do eletrodo, entre outros. A seguir são apresentados os principais modos de transferência do metal de solda ^[31].

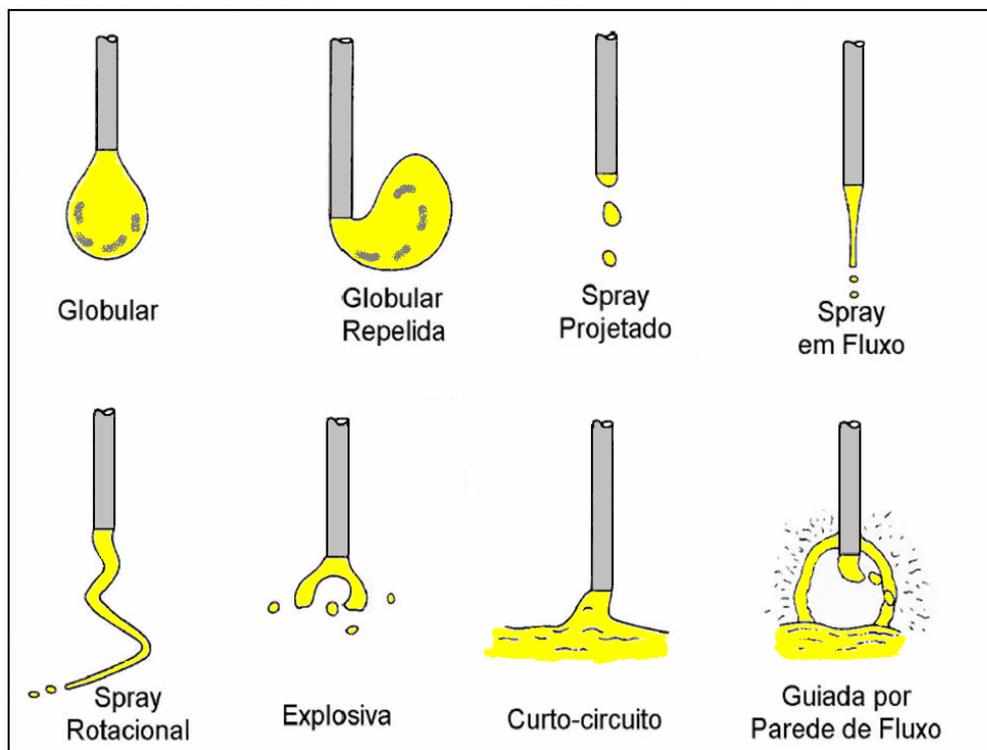


Figura 8 – Modos de transferência de acordo com a classificação do IIW ^[31].

2.5. Soldagem de tubulações

Segundo Widgery ^[32], tem-se notícia de que a soldagem de tubulações iniciou-se em 1929 assumindo, porém característica produtiva somente a partir de 1933 que foi aplicada em produção. A soldagem circunferencial de tubos representa um papel fundamental na montagem de dutos. Entretanto, mesmo considerando toda a experiência já adquirida, a tecnologia de soldagem de tubulações encontra-se em constante desenvolvimento, atualizando-se para atender aos requisitos de soldabilidade de novos materiais e às crescentes necessidades de aumento da produtividade.

Os principais processos utilizados na soldagem de tubulações e aceitos pela norma API 1104, são: processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding), soldagem com eletrodo revestido; processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), conhecido como processo TIG; processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), comumente conhecido como soldagem MIG/MAG e o processo FCAW (Flux Cored Arc Welding), que é a soldagem com arame tubular.

O método tradicional de soldagem circunferencial de tubos, utilizados principalmente para a distribuição de gás e óleo, é realizada com o processo SMAW utilizando eletrodos revestidos principalmente por sua versatilidade. No entanto, com a adoção de aços de alta resistência, a reduzida tenacidade e os elevados teores de hidrogênio no metal depositado por eletrodos revestidos celulósicos, os quais podem chegar à níveis de 50 ml/100g, torna este tipo de consumível pouco atraente, uma vez que esta combinação poderá levar a formação de trincas na zona termicamente afetada ^[24].

Porém, para reduzir estes problemas os pesquisadores estão desenvolvendo novos processos de soldagem semi-automáticos ou totalmente automáticos com arames tubulares de alma metálica ou não metálica. A tabela 2 apresenta uma comparação entre os três principais processos de soldagem que podem ser empregados na montagem de dutos ^[33], e na qual pode-se observar que o processo de soldagem com arame tubular possui custo menor de metal depositado e eficiência intermediária entre os outros dois processos, além de oferecer uma fácil automação.

Tabela 2 – Comparação de 3 processos de soldagem empregados em tubulações ^[33].

PARÂMETROS	SMAW	FCAW-S	GMAW
Ø do Consumível (mm)	3.25	1.2	1.2
Fator de Operação %	25-35	45-55	45-55
Corrente (Amp)	120	210	125
Eficiência %	65	86	96
Polaridade	DC +	DC +	DC +
Taxa de deposição (Kg/hr)	0.29	2.68	1.89
Classe AWS	E7018	E71T-1	ER 70 S-6
Custo do consumível (R/Kg)	6.60	9.0	5.94
Custo efetivo do consumível (R/Kg)	10.15	10.47	6.06
Custo do gás (R/m ³ ou R/kg)	---	---	12
Custo do metal depositado (R/kg)	91.03	14.17	18.10
Automação	Difícil	Fácil	Fácil

Segundo Pereira da Costa ^[34] nas linhas dutoviaras em construção na China, algumas com término previsto em 2005, o processo com arame tubular autorotegido foi dominante nas maiores extensões, combinado com eletrodo revestido para o passe de raiz. Foram aproximadamente 600.000 juntas em tubos API X65 e X70 soldadas com arame tubular autoprotetido, algumas destas obras utilizaram tubos API X80 soldadas também com arames tubulares. As altas taxas de deposição, somadas a alimentação automática, ausência do gás de proteção e eliminação do tempo utilizado para trocar do eletrodo, no caso de eletrodo revestido, têm resultado em significativo aumento da produção e economia.

2.6. Processo de soldagem com eletrodo revestido

A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding – SMAW*), também conhecida como soldagem manual a arco elétrico, é o processo mais empregado entre os vários processos de soldagem. A soldagem é realizada com o calor de um arco elétrico mantido entre a extremidade de um eletrodo metálico revestido e a peça de trabalho. O calor produzido pelo arco funde o metal (alma do eletrodo) e o revestimento ^[35]. O metal é depositado por meio das gotas ejetadas pelo metal fundido e recebe proteção, além disso, uma camada de escoria é formada pela queima de alguns componentes do revestimento, onde a escoria protege o metal de solda da atmosfera durante a

solidificação ^[36]. As outras funções do revestimento são; proporcionar estabilidade ao arco, controlar a forma do cordão de solda, adicionar elementos de liga ao metal de solda, formar escoria como agente fluxante e direcionar o arco elétrico.

O equipamento utilizado neste processo consiste de uma fonte de energia, cabos de ligação, um porta-eletrodo, um grampo (conector de aterramento) e o eletrodo consumível. O suprimento de energia pode ser tanto corrente alternada (transformadores), como corrente contínua (geradores ou retificadores), com eletrodo negativo (polaridade direta), ou corrente contínua com eletrodo positivo (polaridade inversa), dependendo das exigências de serviço, por exemplo:

- Corrente contínua – Polaridade direta (CC): eletrodo ligado ao pólo negativo. Com essa configuração produz-se uma maior taxa de fusão do eletrodo, associada a uma menor profundidade de penetração.
- Corrente Contínua – Polaridade inversa (CC⁺): eletrodo positivo e a peça negativa. Com essa configuração, maiores penetrações e menores taxas de fusão do eletrodo são obtidas.
- Corrente Alternada (CA): a polaridade alterna a cada inversão da corrente. Com este tipo de configuração, a geometria do cordão será intermediária a aquela obtida em CC⁺ e CC⁻ ^[37].

2.6.1. Vantagens e desvantagens do processo com eletrodo revestidos

São várias as vantagens do processo de soldagem por eletrodos revestidos. É o processo de soldagem mais simples disponível, e necessita apenas de uma fonte de energia de corrente constante, dois cabos elétricos e o eletrodo. É também o processo de soldagem mais flexível, no sentido que pode ser empregado em qualquer posição de soldagem para quase todas as espessuras dos aços carbono.

As desvantagens são as baixas taxas de deposição em comparação a outros processos, tornando-o menos eficiente. Além disso, o uso de eletrodos revestidos para aços carbono requer mais treinamento e habilidades dos soldadores do que os processos de soldagem semi-automáticos e automáticos ^[37].

2.7. Processo de soldagem com arame tubular

Arares tubulares com gás de proteção foram desenvolvidos no início da década de 50, e tornaram-se comercialmente disponíveis em 1957, já em 1972 foram desenvolvidos arames tubulares de pequeno diâmetro, constituídos no seu interior de um fluxo não metálico para a soldagem em todas as posições o que tornou a aceitação para o emprego destes em aplicações específicas na indústria [38]. O processo de soldagem com arame tubular (FCAW), é um processo de soldagem onde a coalescência entre metais é obtida através de arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo do arame podendo ser ou não, complementada por um gás de proteção.

Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação. Este processo combina as características do processo com eletrodo revestido, o processo de arco submerso e o processo GMAW.

A técnica de soldagem com arame tubular diferencia-se do processo GMAW no tipo de eletrodo que como seu nome indica, neste caso, o arame tem um buraco na sua seção recheio de um fluxo, o qual ao fundir-se pela ação do arco elétrico, deposita o metal fundido protegido com uma fina capa de escória. Este fato lhe permite compartilhar um alto ciclo de trabalho e taxa de deposição característica da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem com arame tubular, é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo [39].

O Processo FCAW possibilita também a soldagem nas quatro posições. A qualidade da solda produzida por este processo depende do tipo de eletrodo utilizado, do método (com proteção gasosa ou autoprotégido), das condições do metal de base, do projeto da junta e do procedimento de soldagem.

Segundo Moura de Oliveira e Bracarense [40] o processo FCAW agrega três virtudes fundamentais do pensamento industrial moderno:

- Produtividade relacionada à utilização de arames contínuos.
- Alta qualidade devido aos benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame.

- Baixos custos de soldagem.

A soldagem FCAW possui duas variantes: o autoprottegido e com proteção gasosa adicional. Ambos os métodos formam escória que cobre e protege o metal até solidificar, em ambos os casos também a proteção do arco pode suportar o vento e os agentes atmosféricos com maior eficiência que outros processos com proteção gasosa. A escolha do tipo de processo (autoprottegido ou com proteção gasosa) depende das propriedades mecânicas desejadas, do tipo de arame disponível e do tipo junta. Geralmente utiliza-se o autoprottegido nas mesmas aplicações em que se optaria por utilizar a soldagem com eletrodo revestido, e o processo com arame tubular com proteção gasosa, utiliza-se mais nas aplicações em que se utilizaria o processo MIG-MAG.

2.7.1. Processo de fabricação dos consumíveis tubulares

No processo de fabricação de arames tubulares uma fita ou fio máquina passa por um conjunto de rolos de conformação até sua seção transversal possuir o perfil "U", a seguir o fluxo interno é alimentado e outro conjunto de rolos de conformação fecha sua seção. Posteriormente, o arame tem seu diâmetro reduzido até atingir a dimensão desejada. Esta redução pode ser feita através de trens de laminação ou trefilação. A figura 9 apresenta, esquematicamente, o processo de fabricação de arames tubulares utilizando fita.

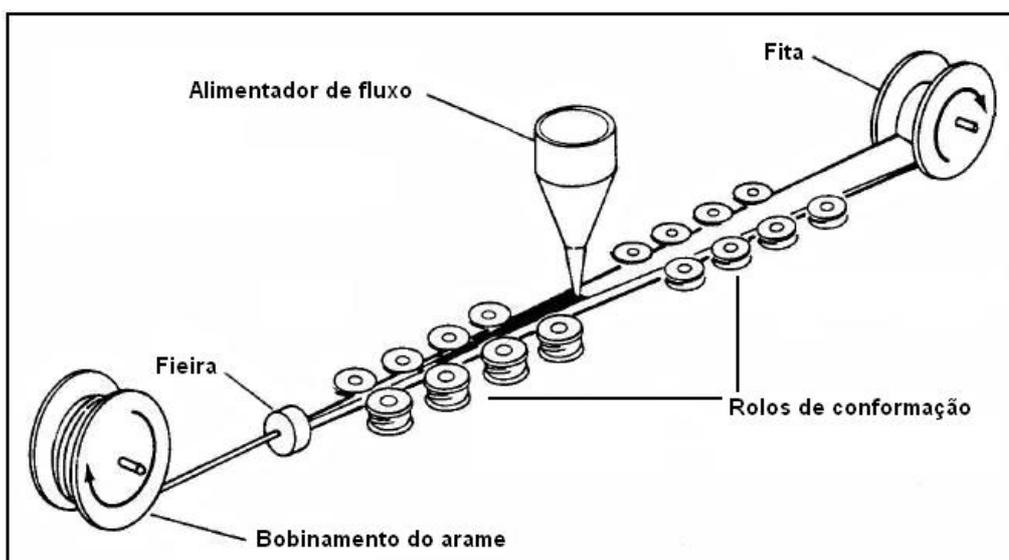


Figura 9 – Processo de fabricação dos arames tubulares (esquemático) ^[38].

2.7.2. Secções transversais dos arames

Os arames tubulares podem ter diferentes tipos de seção. As mais usuais são com fechamento de topo e sobreposto (overlap), na figura 10 apresenta-se os tipos de seções dos arames tubulares.

O percentual de fluxo no interior do arame pode variar de 15 a 50% do seu peso. Este percentual vai depender, entre outros fatores, das funções a serem desempenhadas pelo fluxo. Geralmente os arames que possuem fechamento por sobreposição têm percentuais de fluxo variando entre 30% e 50%, e os que tem fechamento por topo os percentuais de fluxo variam entre 18% e 33% dependendo do diâmetro do arame tubular, porém apresentam a parede metálica da fita mais fina oferecendo a vantagem de apresentar densidades de corrente maiores e portanto maiores taxas de deposição ^[38].

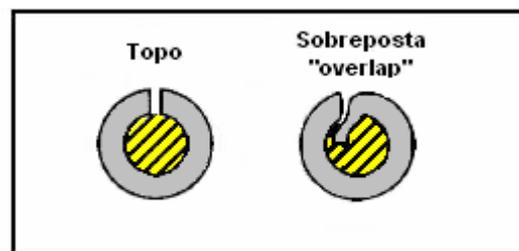


Figura 10 – Secções de arames tubulares ^[38].

Com relação à composição do fluxo interno os arames podem ser básicos, rútilicos e com pó metálico (metal cored). Os básicos produzem soldas com excelentes propriedades mecânicas e baixos teores de hidrogênio, os rútilicos proporcionam uma soldagem "suave" e um cordão com excelente aspecto visual e os do tipo metal cored, que possuem alto percentual de pó de ferro em sua composição, proporcionam altas taxas de deposição e rendimento ^[41].

Os arames tubulares são praticamente imunes à umidade e não requerem nenhum tipo especial de armazenamento, este é um fator especialmente importante na soldagem no campo, onde o controle da umidade no lugar onde se realiza a solda é uma tarefa difícil. Soldas produzidas com arames tubulares tirados diretamente do pacote possuem menor quantidade de hidrogênio que os eletrodos revestidos, mesmo que armazenados cuidadosamente.

2.7.3. Funções dos componentes do fluxo

A composição do fluxo pode ser variada dependendo das aplicações específicas, de uma forma geral as funções dos componentes do fluxo são:

- Desoxidante e formador de nitretos — como o nitrogênio e o oxigênio podem causar porosidade e fragilidade, são adicionados desoxidantes como o manganês e o silício. No caso de arames tubulares autoprotetidos, são adicionados formadores de nitretos como o alumínio. Ambos auxiliam na purificação do metal de solda.
- Formadores de escória — compostos formadores de escória como óxidos de cálcio, potássio, silício, ou sódio, são adicionados para proteger a poça de fusão da atmosfera. A escória ajuda a melhorar o perfil do cordão de solda, e escórias de rápida solidificação ajudam a suportar a poça de fusão na soldagem fora de posição. A escória também reduz a taxa de resfriamento, ação especialmente importante quando se soldam aços de baixa liga.
- Estabilizadores do arco — elementos como o potássio e o sódio auxiliam na obtenção de um arco suave e reduzem a quantidade de respingos.
- Elementos de liga — elementos de liga como o molibdênio, cromo, carbono, manganês, níquel e vanádio são empregados para aumentar a resistência, ductilidade, dureza e a tenacidade.
- Geradores de gases — minerais como a fluorita e o calcário são normalmente usados para formar uma atmosfera protetora nos arames tubulares autoprotetidos^[40].

2.7.4. Modos de transferência na soldagem com arame tubular

Neste processo, o fluxo fica localizado no interior da parte metálica do arame. Sendo a parte metálica responsável pela condução da maior parte da corrente elétrica até o arco, o qual ocorre externamente ao fluxo. Deste modo, as condições para a fusão do fluxo são menos favoráveis do que em outros processos (eletrodo revestido e arco submerso).

Arames com o núcleo de pó metálico e que contém muito poucas adições não metálicas (*metal cored*), comportam-se de forma similar aos arames não tubulares. Contudo a presença, de adições capazes de estabilizar o arco, possibilitam a operação com transferência não repulsiva com eletrodo negativo. Arames tubulares *rutílicos* operam normalmente a altas correntes com uma transferência spray projetada não axial. Arames tubulares *básicos* operam com a transferência globular não axial para correntes elevadas e curto circuito para menores correntes. Nos arames tubulares *auto-protegidos*, as transferências por curto circuito e globular repelida são típicas. Na figura 11, apresenta-se de modo esquemático as formas de transferência típicas para cada tipo de arame tubular ^[31].

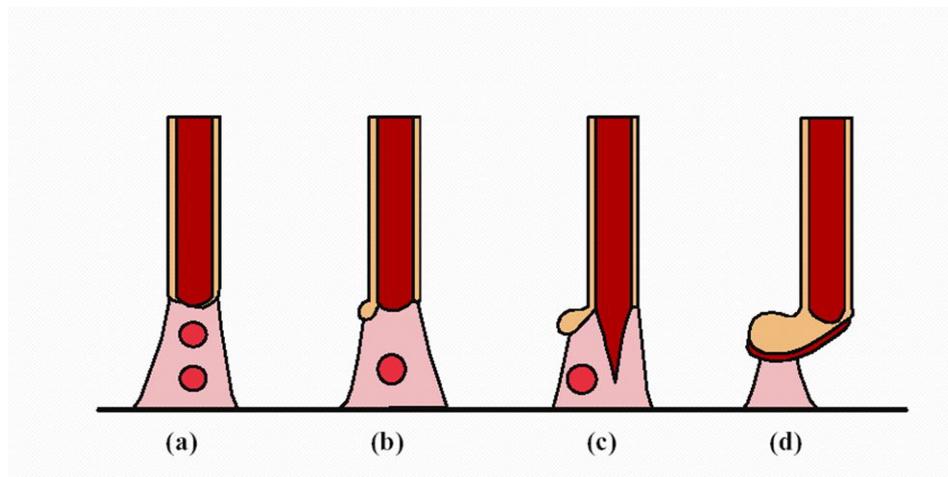


Figura 11 – Formas típicas de transferência na soldagem com arames tubulares. Arames: (a) metal cored (b) rutílico, (c) básico e (d) auto-protegido ^[31].

2.7.5. Parâmetros de soldagem do processo FCAW

A seguir são apresentados os principais parâmetros de soldagem empregando arame tubular.

2.7.5.1. Corrente de soldagem

A corrente de soldagem é proporcional a velocidade de alimentação do arame para um determinado diâmetro, composição e extensão do eletrodo. Se as outras variáveis forem mantidas constantes, para um determinado diâmetro de eletrodo, o aumento da corrente de soldagem irá provocar: aumento da taxa de deposição do eletrodo, aumento da penetração e um cordão de solda convexo com aparência ruim para aumentos excessivos de corrente.

Têm-se também registros da influência da corrente, na quantidade de hidrogênio depositado num cordão de solda com arame tubular, como o comprovaram De Souza Costa e Bracarense ^[42], eles determinaram que quanto maior a corrente, maior o teor de hidrogênio difusível no metal de solda depositado ocorrendo numa taxa de aproximadamente 70%, ou seja, a cada aumento de 100% na corrente de soldagem, ocorrerá um aumento em torno de 70% no teor de hidrogênio no metal de solda.

Por outro lado, uma corrente insuficiente irá produzir transferência do tipo spray, respingos excessivos e porosidade no metal solda devido a absorção de hidrogênio (quando soldado com arame tubular autoprottegido).

Para uma velocidade de alimentação fixa, a corrente vai variar em função do comprimento do eletrodo, aumentado a extensão do eletrodo, a corrente de soldagem tende a diminuir e vice-versa.

2.7.5.2. Tensão de soldagem

A tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados. A aparência, penetração e propriedades do cordão de solda obtido através do processo FCAW podem ser afetadas pela tensão do arco. Altas tensões (comprimento de arco maior) podem resultar em respingos excessivos e contorno irregular do cordão de solda.

Em eletrodos autoprottegidos, o aumento da tensão pode provocar aumento na absorção de hidrogênio, em eletrodos de aço baixo carbono podem causar porosidade. Tensões baixas (arco menor) resultarão em uma superfície estreita, excesso de respingos e redução de penetração.

Em muitas aplicações, uma boa forma do cordão de solda é obtida pelo uso de tensões de arco elevadas sem causar porosidade ^[41].

2.7.5.3. Extensão do eletrodo

Chamado também de “*stickout*” descreve a distância entre o bico de contato da tocha e a peça. Um aumento na extensão do eletrodo tende a aumentar a temperatura do eletrodo devido ao efeito Joule. A temperatura do eletrodo afetará a taxa de deposição e a penetração. Além disso, um aumento da extensão do eletrodo vai diminuir a corrente de soldagem e vice-versa.

Uma extensão menor do eletrodo permite obter uma maior penetração do que com uma extensão maior. Os fabricantes recomendam a extensão de 19 a 38 mm para eletrodos com proteção gasosa e 19 a 95 mm com eletrodos autoprotetidos, dependendo da aplicação ^[41].

2.7.5.4. Vazão do gás de proteção

Na soldagem com proteção gasosa, a vazão do gás é uma variável que afeta diretamente na qualidade do metal depositado. Vazão inadequada propiciará pouca proteção da poça de fusão e conseqüentemente ocorrência de poros e oxidação. Vazão excessiva de gás resultará em turbulência e aumento do metal depositado.

A escolha correta da vazão do gás dependerá do tipo e diâmetro do bocal da tocha, distância do bocal até a peça de trabalho e correntes de ar durante a soldagem.

2.7.5.5. Velocidade de alimentação do arame

Se as outras variáveis mencionadas foram mantidas constantes, incrementando a velocidade de alimentação do arame, irá provocar que também se incremente o metal fundido e, porém a taxa de deposição.

Uma velocidade excessiva de alimentação do arame produz cordões convexos que resultam em aparência de baixa qualidade e perda do metal de solda, já uma baixa velocidade de alimentação do arame irá promover o tipo de transferência globular e pouca penetração ^[41].

2.7.5.6. Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem influencia na penetração e contorno do cordão, para altas velocidades de soldagem a penetração é baixa. Excessivas velocidades de soldagem incrementam a convexidade do cordão de solda e causa bordas irregulares.

Baixas velocidades e altas correntes podem resultar na ocorrência de inclusões de escória e fusão do metal de base. Murta et al ^[43] fizeram um estudo em arames tubulares com proteção gasosa e mostraram que a velocidade de fusão

é função da corrente de soldagem, porém a taxa de deposição também tem a mesma influência com respeito à corrente, como é mostrado na figura 12.

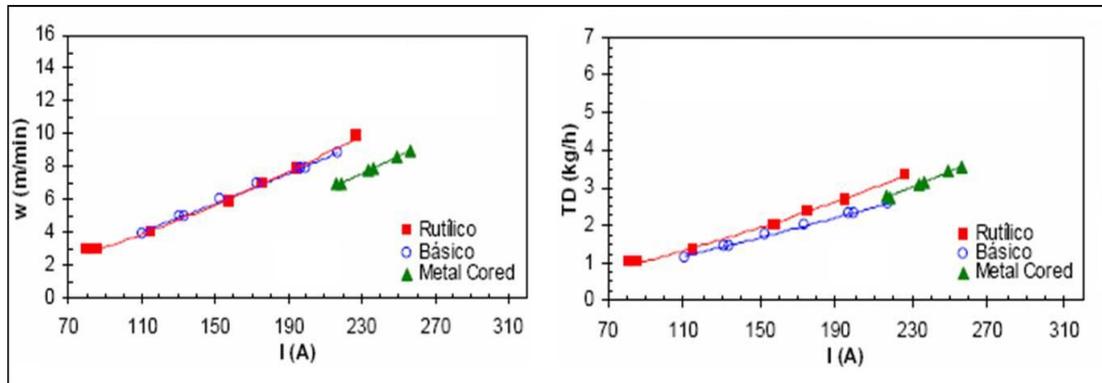


Figura 12 – Efeito da Corrente de Soldagem na Velocidade de soldagem e na Taxa de Deposição empregando FCAW-G (100%CO₂)^[43].

Nas considerações anteriores se faz referência à taxa de deposição e a eficiência, mas é preciso observar que estas variáveis mostram duas coisas distintas: a *taxa de deposição* é a quantidade de eletrodo (em peso) depositado por unidade de tempo e depende de parâmetros de soldagem como: diâmetro do eletrodo, composição, extensão do eletrodo e corrente de soldagem. No entanto a *eficiência* é a quantidade de metal depositado por quantidade de eletrodo consumido.

2.8. Processo de soldagem FCAW auto-protegido

Neste processo a proteção é obtida pelos ingredientes que compõem o fluxo, que se vaporizam e se deslocam para escória que cobre a poça para protegê-la durante a soldagem.

O arame tubular emerge de um tubo guia eletricamente isolado e o contato elétrico fica mais distante da extremidade do arame. Este tipo de processo é conhecido pelos seguintes nomes:

- FCAW-S, self-shielded flux cored arc welding, arame tubular autoprottegido (ANSI/AWS A3.0).
- Soldagem por arco com arame tubular sem proteção gasosa (UNE-EM ISSO 4063).

Os arames tubulares autoprotégidos utilizam uma maior extensão de eletrodo (stick-out) do que os arames tubulares com proteção gasosa. Essa extensão varia de 19 a 95 mm, dependendo da aplicação. Aumentando a extensão do eletrodo se aumenta a resistência à passagem de corrente por efeito Joule, este preaquecendo o eletrodo e diminuindo a tensão requerida do arco. Em alguns casos a corrente de soldagem diminui e reduz o calor disponível para fundir o metal de base, resultando assim uma solda estreita e rasa. Grandes extensões de eletrodos não podem ser igualmente aplicadas para os métodos de proteção a gás, por causa de efeitos desfavoráveis na proteção [44].

Normalmente, o processo com eletrodo autoprotégido é usado para trabalhos em campo, porque eles permitem trabalhar com correntes de ar mais intensas. Na figura 13 apresenta-se o esquema do processo de soldagem FCAW-S.

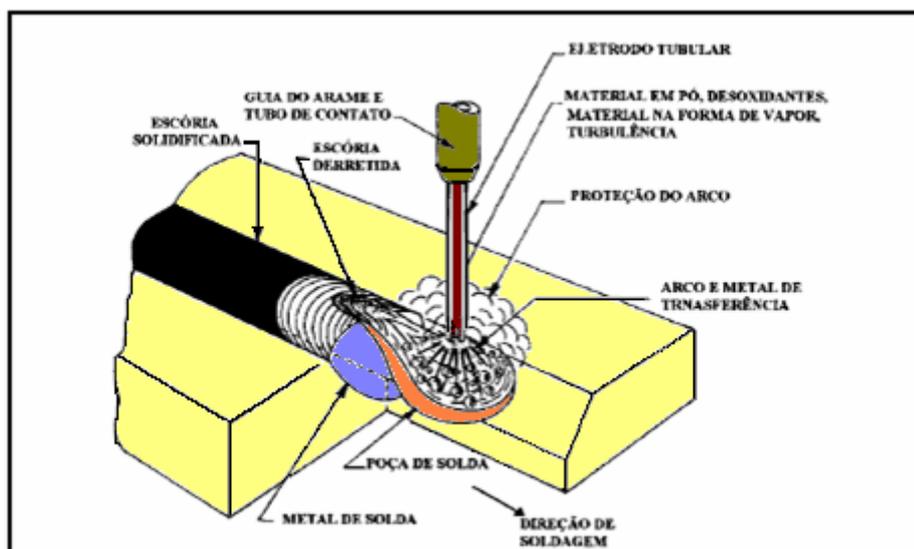


Figura 13 – Soldagem com arame tubular autoprotégido [39].

As características de desenvolvimento deste processo incluem também características operacionais tais como a posição de soldagem, taxa de deposição, penetração, camada de escória e respingos. A capacidade para soldar fora de posição é influenciada pelo tamanho da gota, volume de escória, diâmetro do eletrodo e tipo de corrente.

Todos os arames tubulares autoprotetidos são capazes de realizar soldagem na posição plana com uma alta taxa de deposição, obtendo-se soldas com muito mais produtividade. Os diâmetros de 1,6 mm e 2,0 mm são os mais comuns para a soldagem fora de posição, embora o diâmetro de 2,4 mm possa ser empregado em alguns casos. Extensões de eletrodo entre 12,5 mm e 25 mm são as recomendadas para esses arames. A composição do fluxo e a capacidade de transporte de corrente do arame têm influência na taxa de deposição. A camada de escória depende do fluxo do arame. O tipo de escória produzida pode ser quebradiça e porosa ou densa e sólida protegendo ao metal fundido dos contaminantes atmosféricos no processo de solidificação.

Os eletrodos autoprotetidos que produzem um baixo volume de escória são apropriados para soldagem vertical e sobre-cabeça; também são ideais para a soldagem de alta velocidade em chapas de aço onde a escória pode ser facilmente removida. A quantidade de respingos e o tamanho deles variam com as características do arco; os eletrodos que têm uma transferência tipo spray produzem respingos mais finos que aqueles que têm transferência globular. As características do arco elétrico no processo FCAW autoprotetido, são as principais responsáveis pela penetração, algumas variações do tipo de corrente e o stick-out também podem afetar a penetração.

2.8.1. Equipamento utilizado na soldagem FCAW autoprotetido

Para a soldagem com arame tubular autoprotetido pode-se utilizar o equipamento de solda GMAW já que ambos processos são similares, uma diferença no caso do processo FCAW autoprotetido destaca-se a ausência do gás de proteção.

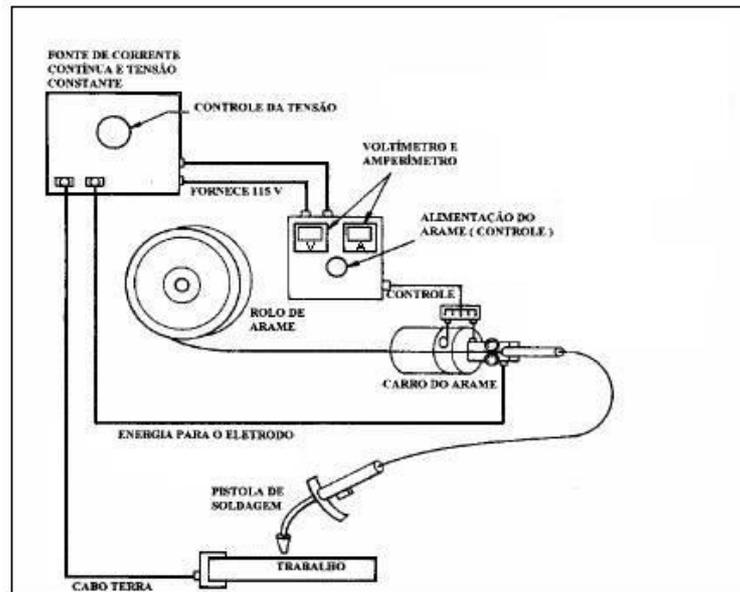


Figura 14 – Equipamento para a soldagem com arame tubular ^[39].

O equipamento utilizado geralmente está composto conforme mostrado na figura 14. O equipamento para a soldagem FCAW-G (com proteção gasosa) é similar, só que neste caso precisa de um gás protetor.

Algumas considerações a serem feitas na operação e na seleção do equipamento para a soldagem FCAW autoprotetido são:

- Fontes de energia com corrente contínua e tensão constante, são utilizadas geralmente para a soldagem semi-automática FCAW e utiliza correntes menores do que 600A. Equipamentos com ciclo de trabalho de no mínimo 60%, atendem perfeitamente a maioria das aplicações e processos semi-automáticos.
- O alimentador do arame pode estar localizado perto da tocha quando soldamos com um processo automático ou pode estar um pouco mais afastado quando se solda com um processo semi-automático.
- Pistola de soldagem pode ser de dois tipos: para soldagem automática e semi-automática. Estas pistolas carregam o bocal por onde sai o arame, e que tem influência direta na extensão do eletrodo, na figura 15 apresenta-se um bocal utilizado no processo de soldagem FCAW autoprotetido ^[41].

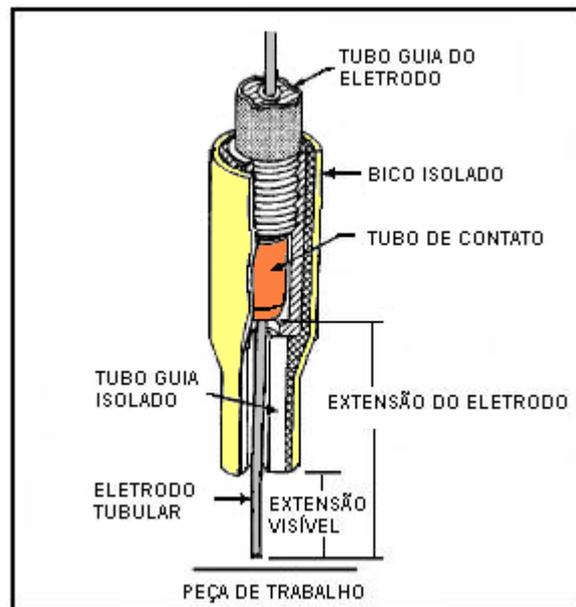


Figura 15 – Detalhe de um bico utilizado na soldagem com arame tubular autoprotetido [41].

2.8.2. Aplicações da soldagem FCAW - autoprotetido

As principais aplicações dos arames tubulares autoprotetidos são para revestimento e recuperação de peças onde se desejam ligas com propriedades especiais como resistência ao desgaste. Este tipo de aplicação é economicamente interessante, pois aumenta significativamente a vida útil de peças além de permitir sua recuperação quando desgastadas. Indústrias de construção pesada, mineradoras e usinas de cana de açúcar são hoje os maiores clientes deste tipo de aplicação.

Este tipo de processo também é utilizado para soldar aços carbono de baixa liga, e aços inoxidáveis na construção de vasos de pressão e tubulações para a indústria química, petrolífera e de geração de energia. A soldagem robotizada utilizando arames tubulares do tipo "metal cored" é também um exemplo de aplicação desenvolvida recentemente.

2.9. Defeitos comuns na soldagem

A seguir serão mostrados alguns problemas que são ocasionados durante e após a soldagem de dutos, mostrando também as possíveis soluções para estes impasses.

2.9.1. Trincamento a frio induzido pelo hidrogênio

A fissuração por hidrogênio, ou trinca a frio, são descontinuidades que ocorrem algum tempo após a soldagem, o que a torna extremamente crítica, sendo ainda mais perigoso do que a trinca a quente, pois depende de procedimentos especiais, como por exemplo, inspeção com ensaios não destrutivos (END) 48 horas após a execução da soldagem. Este tipo de defeito coloca a integridade de peças, equipamentos e estruturas em risco de fratura catastrófica. Às vezes o aparecimento destas trincas pode demorar levando alguns dias após a soldagem para surgir, e podem possuir tamanhos abaixo do limite de detecção dos ensaios não destrutivos adequados. Segundo Da Silva e Paranhos ^[45], as trincas a frio ou fissuração a frio, normalmente aparecem na ZTA, podendo também ocorrer na linha de fusão, sendo consequência da ação simultânea de quatro fatores:

- Presença de Hidrogênio dissolvido no metal fundido.
- Tensões residuais associadas à soldagem.
- Microestruturas frágeis.
- Temperaturas abaixo de 150 °C.

As principais fontes de hidrogênio em cordões depositados com arames tubulares são: umidade e compostos hidrogenados presentes no fluxo, presença de resíduos, lubrificantes na superfície do arame e condições atmosféricas impróprias durante a soldagem. O hidrogênio quimicamente ligado se dissocia em hidrogênio atômico sob a ação do calor do arco, o metal de solda fundido tem a capacidade de dissolver o hidrogênio atômico; no entanto, logo que o metal de solda se solidifica, perde sua capacidade de manter o hidrogênio em solução, e este é expelido para a atmosfera ou se difunde para fora da região do metal de solda e atinge a ZTA que é uma área importante na soldagem, especialmente nos aços de alta resistência.

A ZTA é a região da solda que não se funde durante a soldagem, porém sofre mudanças microestruturais resultantes do calor induzido pela soldagem. Essa região pode se tornar um elo fraco em uma junta soldada que, em condições normais, seria suficientemente resistente. Primeiramente, a estrutura granular da ZTA não é tão refinada e, portanto, é mais fraca que o metal de base circunvizinho ou que o metal de solda com estrutura bruta de fusão. Em segundo lugar, se a ZTA se resfriar muito rapidamente em determinados aços, pode-se formar martensita. Giraldo e Chaves ^[46] indicam quando ocorre a transformação martensítica da austenita enriquecida com hidrogênio se idealizam as condições para a formação de trincas a frio na ZTA de juntas soldadas em aços ferríticos.

Os aços carbono e os de mais baixa resistência possuem plasticidade suficiente para acomodar as tensões internas resultantes da pressão do hidrogênio de forma que não causem trincas no aço. Por outro lado, aços que possuam alta dureza e alta resistência não apresentam plasticidade suficiente para acomodar as tensões, e se houver muito hidrogênio pode ocorrer fissuração.

As medidas para prevenir este tipo de defeitos são:

- Manter os consumíveis guardados em lugares adequados e secos nos ajudará ter uma atmosfera com menor teor de hidrogênio possível.
- Evitar a formação de microestruturas frágeis, utilizando um preaquecimento.
- Tentar promover a soldagem com o menor grau de restrição possível, para evitar a ocorrência de tensões residuais elevadas, pois estas promovem deformações plásticas do material, que por sua vez aumentam o número de discordâncias, que são responsáveis pelo transporte do hidrogênio.

2.9.2. Fissuração a quente

A fissuração a quente se produz quando o cordão de solda ainda esta numa faixa de temperatura próxima à temperatura de solidificação do metal fundido ou ligeiramente por abaixo desta. A fissuração a quente está associada a mudanças de volume durante a solidificação devido à contração que experimenta o metal fundido durante a solidificação. Mas a fissuração a quente não esta só associada a trocas de volume, tem sido demonstrado que estes fenômenos estão ligados com a

segregação (acumulação) de determinados elementos presentes no aço em algumas regiões do metal solidificado, assim quando o metal passa do estado líquido para sólido, alguns átomos são expulsos da rede cristalina para outra região que pode admiti-los, e para a zona do metal que ainda está no estado líquido, isto permite que as interfaces metal-líquido se enriqueçam de impurezas (principalmente P e S), ou outros elementos (Ni, B, As, Sn, Ta e Cu), durante a solidificação produzindo regiões mais ricas em determinados elementos que outras, como consequência as transformações e a solidificação heterogênea ocorre no cordão de solda ^[47]. De todos esses elementos que favorecem a fissuração a quente o S é o mais perigoso, porque pode formar o composto Fe₂S que funde a 988°C. Uma forma de controlar a quantidade de S no aço é adicionando Mn, é preciso uma relação Mn/S = 20 para inibir a fissuração a quente ^[48]. A fissuração a quente é do tipo intergranular, onde a fissura se propaga pelos contornos de grãos e pode ter uma orientação longitudinal ou transversal ao cordão de solda.

Para evitar que se produza este tipo de problema deve-se restringir o conteúdo de impurezas especialmente P e S, tanto no metal de base como no metal de solda. O procedimento de soldagem (tipo de corrente e a velocidade de soldagem) no formato do cordão de solda, obtendo cordões mais grossos e menos profundos ajuda a evitar este tipo de defeito.

2.9.3. Falta de penetração

Resulta de uma técnica de soldagem inadequada; soldagem rápida, preparação inadequada da junta ou do material, corrente muito baixa, e eletrodo com diâmetro grande demais ^[49].

Na soldagem com arame tubular este defeito é devido à utilização de corrente muito baixa, extensão do eletrodo muito longa para a corrente aplicada e velocidade de soldagem inconsistente ou incorreta. Para solucionar estes problemas devemos aumentar a corrente, verificar a extensão do eletrodo e ajustar a velocidade de soldagem para adequá-la à penetração.

2.9.4. Porosidade

De um modo geral é causada pelo emprego de técnicas incorretas (grande comprimento do arco ou alta velocidade de soldagem), pela utilização de metal de

base sem limpeza adequada ou por eletrodo úmido. A porosidade agrupada ocorre, às vezes, na abertura e fechamento do arco. A técnica de soldagem com um pequeno passe na direção inversa, logo após começar a operação de soldagem, permite ao soldador refundir a área de início do passe, liberando o gás deste e evitando assim este tipo de descontinuidade. Um estudo feito por Wei et al ^[50], para avaliar a sensibilidade de formação de poros utilizando FCAW-S, concluiu que a formação de poros está relacionada com o conteúdo de oxigênio e nitrogênio sendo que a adição de alumínio e elementos terras raras ao fluxo do arame podem reduzir a formação destes poros no metal de solda.

2.9.5. Inclusões de escória

São provocadas pela manipulação inadequada do eletrodo e pela limpeza deficiente entre passes. É um problema previsível, no caso de projeto inadequado no que se refere ao acesso à junta a ser soldada ou mesmo com pequenos ângulos de bisel. Na soldagem com arame tubular as inclusões de escória estão relacionadas com uma alta velocidade de soldagem ^[38].

2.9.6. Falta de fusão

Resulta de uma técnica de soldagem inadequada; soldagem rápida, preparação inadequada da junta ou do material, corrente muito baixa.

Na soldagem com arame tubular a falta de fusão esta ligada à transferência por curto-circuito, ou pode ser devida à má manipulação da tocha, para resolver isso deve-se verificar as especificações recomendadas pelo fabricante ^[49].