

## 4. SOLDAGEM

O processo de soldagem constitui uma das maneiras mais práticas e econômicas de se unir partes de um material, contudo, esse processo pode apresentar alguns problemas que devem ser avaliados, tais como trincas, porosidades e modificações microestruturais na zona termicamente afetada (ZTA), a qual pode apresentar diferentes microconstituintes, tendo assim um comportamento mecânico diferente do metal de base e metal de solda <sup>[68]</sup>.

Os principais problemas que se traduzem em má soldabilidade, e que podem levar o material a falhas durante a soldagem ou durante o serviço, são: 1) formação de trincas durante ou após o procedimento de soldagem, cuja natureza é basicamente a mesma para todos os materiais; e que podem ser classificadas como trincas a quente, trincas a frio e trincas de reaquecimento. 2) A perda de propriedades do material, em virtude de transformação indesejável (fragilização, amolecimento, precipitação) durante os ciclos de soldagem, além de outros. <sup>[69]</sup>.

### 4.1. A SOLDAGEM POR FUSÃO

Uma das técnicas de união, mais utilizadas é a soldagem por fusão, onde materiais iguais ou dissimilares são aquecidos até seu ponto de fusão mediante uma fonte de calor, que pode ser termoquímica, elétrica (resistência elétrica, arco elétrico), mecânica (explosão) ou energia radiante (laser, feixe de elétrons), solidificando posteriormente. Esta técnica de união pode ser feita utilizando eletrodos consumíveis (adição de material de aporte) ou eletrodos não consumíveis (com ou sem adição de material de aporte) <sup>[70]</sup>.

### 4.2.SOLDAGEM DE DUTOS

Na soldagem circunferencial de dutos o uso do processo de soldagem por eletrodo revestido (ER) vem sendo utilizado desde 1920 e ainda é amplamente

utilizado devido ao fato de ser um processo relativamente simples e versátil. O fator limitante deste processo é a taxa de deposição, resultando em uma taxa de produção relativamente baixa quando comparado com processos semi-automáticos. Ao longo da construção de um duto, utilizando a soldagem por ER pode haver a necessidade de mais equipes de trabalho, para realizar os passes de soldagem de modo a manter uma produção adequada. Sendo o passe de raiz a etapa mais crítica, a qual requer soldadores bem treinados <sup>[71]</sup>.

#### **4.2.1. Soldagem mecanizada e semi-automática**

A utilização de outros processos para a soldagem circunferencial tais como MAG, soldagem por laser e soldagem por forjamento ainda se encontram em pesquisa <sup>[68]</sup>, sendo o processo MAG para o passe de raiz aquele de maior otimização e produtividade havendo bons resultados, relativos a sua aplicação <sup>[69]</sup>.

Uma soldagem mecanizada é aquela na qual o operador controla os parâmetros de soldagem e acompanha a execução da soldagem realizada integralmente pelo mecanismo de soldagem. Na soldagem semi-automática a soldagem é realizada por um soldador, responsável pela iniciação e interrupção da soldagem, movimentando a tocha e mantendo os parâmetros de soldagem pré-estabelecidos <sup>[70]</sup>.

#### **4.3. A SOLDABILIDADE DO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).**

A soldabilidade está relacionada com o conceito da facilidade com que um material pode ser unido, atingindo propriedades mecânicas requeridas para um determinado serviço. Muitos autores definem soldabilidade simplesmente como uma medida de quão facilmente é realizada a soldagem de um determinado material, sem a presença de trincas. Não havendo a presença de trincas, o material é considerado soldável. Para uma soldagem ser considerada como bem realizada é necessário, que a mesma tenha propriedades mecânicas adequadas de modo a

suportar a degradação em serviço (danos de corrosão, por exemplo). Assim a soldabilidade é uma medida de que tão fácil é <sup>[13]</sup>:

- Obter uma solda livre de trincas;
- Conseguir propriedades mecânicas adequadas;
- Produzir soldas resistentes a degradação em serviço.

Soldabilidade não é um parâmetro fixado para um dado material, mas dependerá dos detalhes da junta, dos requisitos em serviço, do processo de soldagem para citar alguns dos fatores.

Em geral, uma liga é soldável se a junta soldada mantém a tenacidade na ZTA e a tenacidade no metal de solda é compatível com o metal de base. A soldabilidade de um aço é geralmente expressa por um índice chamado de carbono equivalente (CE), o qual correlaciona a composição química do aço com a sua tendência apresentar estruturas frágeis quando este é submetido a um determinado processo de soldagem <sup>[70]</sup>.

#### 4.3.1. Cálculo de carbono equivalente (CE)

O carbono equivalente (CE) é utilizado na avaliação da temperabilidade do aço e, quanto maior o seu valor, mais temperável será o aço, em detrimento da sua soldabilidade <sup>[58]</sup>. A ocorrência de martensita está associada à temperabilidade dos aços, quanto maior o valor de CE, maior temperabilidade e, portanto maior ocorrência de martensita. E tomando em conta que em termos de microconstituintes, a martensita após a têmpera, é uma das mais sensíveis à fragilização pelo hidrogênio, característica que aumenta com o teor de carbono do aço e, conseqüentemente com a sua dureza, o CE é um parâmetro que tem influência significativa na susceptibilidade à CST.

A norma API 5L <sup>[14]</sup> especifica que quando o conteúdo de carbono é menor ou igual a 0,12% deve ser utilizada a fórmula de Ito e Bessyo para calcular o carbono equivalente (CE) do aço, esta é dada pela equação (6) que é chamado  $P_{mc}$ :

$$C_{eq}(P_{cm}) = C + \left(\frac{Si}{30}\right) + \left(\frac{Mn}{20}\right) + \left(\frac{Cu}{20}\right) + \left(\frac{Ni}{60}\right) + \left(\frac{Cr}{20}\right) + \left(\frac{Mo}{15}\right) + \left(\frac{V}{10}\right) + (5xB) \quad (6)$$

Como este método de avaliação é empírico e depende do conteúdo de carbono, podem ser consideradas outras fórmulas para o cálculo de CE. Por exemplo, para conteúdo de carbono maior que 0,12% o CE é calculado pela fórmula do IIW (International Institute of Welding) dada na seguinte equação:

$$C_{eq}(IIW) = C + \left(\frac{Mn}{6}\right) + \left(\frac{Cr+Mo+V}{5}\right) + \left(\frac{Ni+Cu}{15}\right) \quad (7)$$

### 4.3.2. Processos de soldagem por arco elétrico

Atualmente, existe uma forte tendência na utilização de processos de soldagem que possuam maior taxa de deposição, menor perda de material de aporte e que possam operar consistentemente por longos períodos de trabalho. Este é o caso dos processos MIG/MAG e de arame tubular, os quais vêm substituindo o processo de soldagem por eletrodo revestido <sup>[71,72]</sup>.

#### 4.3.2.1. Soldagem com eletrodo revestido (SMAW) <sup>[69]</sup>

A soldagem com eletrodo revestido é definida como um processo de soldagem com arco, onde a união é produzida pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a soldar. Este processo tem como característica principal a possibilidade de soldar diversos tipos de materiais por conta das inúmeras formulações diferentes na fabricação dos eletrodos, sendo por isso um processo extremamente versátil. Esta versatilidade, associada com o baixo custo do equipamento e dos consumíveis, lhe conferiu uma vasta gama de utilizações na indústria, sendo o processo de soldagem mais utilizado no Brasil <sup>[72]</sup>.

Neste processo o eletrodo é essencial para se obter uma boa solda. O eletrodo revestido consiste de um arame de metal (que é geralmente do mesmo material a ser soldado), com um revestimento externo que define as características (propriedades mecânicas, químicas e metalúrgicas) que terá a junta soldada. No processo SMAW (figura 24), não se utiliza gás, pois a proteção contra as

contaminações trazidas pelo oxigênio e nitrogênio é feita pelo próprio revestimento do eletrodo.

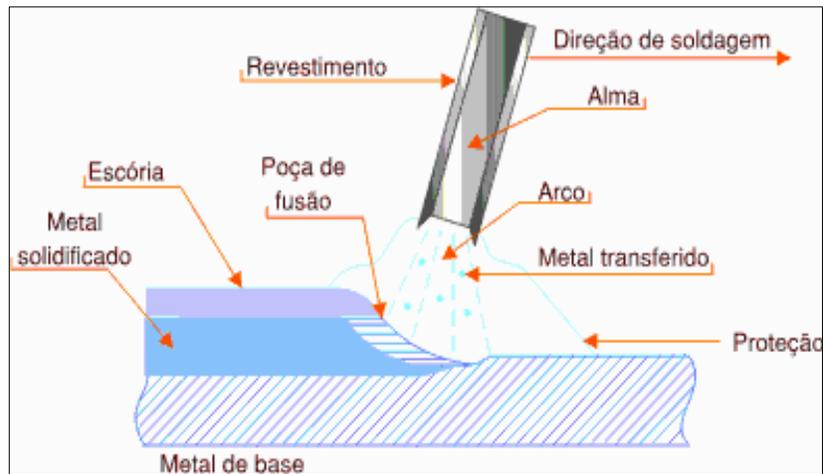


Figura 24. Esquema básico do processo de solda por eletrodo revestido (SMAW) <sup>[69]</sup>.

#### 4.3.2.2. Processo de soldagem MIG/MAG

O Processo de soldagem a arco elétrico, com eletrodo consumível sob proteção gasosa (figura 25) utiliza como eletrodo um arame maciço, e como proteção gasosa um gás inerte, um gás ativo, ou misturas de gases. Este processo utiliza como fonte de calor o arco elétrico estabelecido entre o eletrodo consumível (arame sólido) e o material que vai ser soldado, cuja fonte fornece uma tensão constante, capaz de trabalhar a elevadas intensidades de corrente contínua (geralmente menores de 500A). De um modo geral o processo MIG/MAG, trabalha com polaridade inversa (eletrodo ao positivo), permitindo um arco elétrico controlável. O tipo de gás vai depender da posição de soldagem e das recomendações do fabricante do arame consumível. Sendo chamado processo MIG quando usa um gás inerte e processo MAG quando usa um gás ativo ou mistura de gás inerte com gás ativo <sup>[69, 71, 73]</sup>.

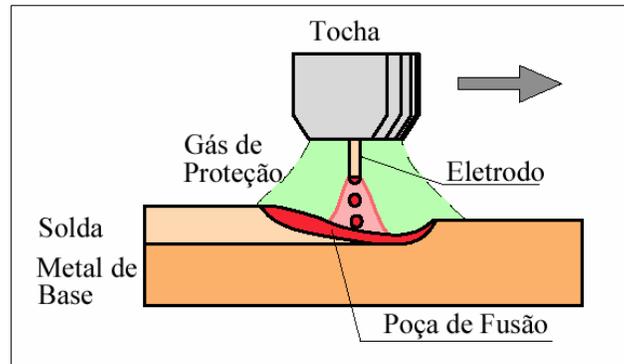


Figura 25. Esquema básico processo de Soldagem MIG/MAG<sup>[73]</sup>

As vantagens que este processo possui são: a) pode ser utilizado para qualquer tipo de material; b) uma alta taxa de deposição; c) soldar em todas as posições; d) realiza soldagens longas, diminuindo a sobreposição entre cordões sendo ideal para soldagem circunferencial; e) não requer eliminar escória, já que não forma escória; f) penetração de raiz mais uniforme que no processo com eletrodo revestido; g) processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5 ppm/100 g de metal; h) redução em problemas de distorção e tensões residuais. Apresenta as seguintes desvantagens: a) O equipamento de solda é mais caro e complexo do que para o processo por eletrodo revestido; b) Difícil utilização em espaços restritos; c) É sensível ao vento e correntes de ar; d) É um processo muito sensível à variação de parâmetros elétricos de operação do arco de soldagem; e) maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que pode levar a aumenta a ocorrência de trincas, principalmente nos aços temperáveis; formação de respingos durante a soldagem [73, 74].

#### 4.3.2.3. Processo de soldagem STT ®

As pesquisas e melhoramento em sistemas eletrônicos aplicados para máquinas de soldagem têm permitido melhorar, controlar e regular a corrente, melhorando o controle da transferência metálica do processo MIG/MAG. Atualmente no mercado existem vários tipos de processo MIG/MAG de curto-circuito de corrente controlada de aplicação específica, tais como o CSC

(Controlled Short Circuit), CMT (Cold Metal Transfer), RMD (Regulated Metal Deposition), STT (Surface Tension Transfer) e entre outros <sup>[70]</sup>.

O processo de soldagem STT® é um processo onde a corrente é controlada e seu princípio tem base na transferência por curto-circuito somada a uma transferência spray controlada (transferência por arco pulsado), o que permite fazer um controle do aporte de calor na poça de fusão e reduz a perda de material por respingos. Sendo sua aplicação inicial para a indústria de chapas de automóveis, posteriormente, após pesquisas, se inicia a utilização na soldagem de passe de raiz para dutos.

A fonte STT®, tem como princípio os tipos de transferência que ocorrem no processo MIG/MAG, gerando uma transferência controlada do metal de aporte à poça de fusão, dentro de parâmetros predefinidos e mediante um circuito de detecção da variação da voltagem com respeito ao tempo ( $dV/dt$ ), este último regula e controla os parâmetros do arco elétrico a medida que a solda avança. A fonte reage instantaneamente em todas as fases da transferência metálica, de acordo com a situação real no arco. O controle da corrente (figura 26) é independente do operador, sendo um procedimento automático <sup>[75, 76]</sup>.

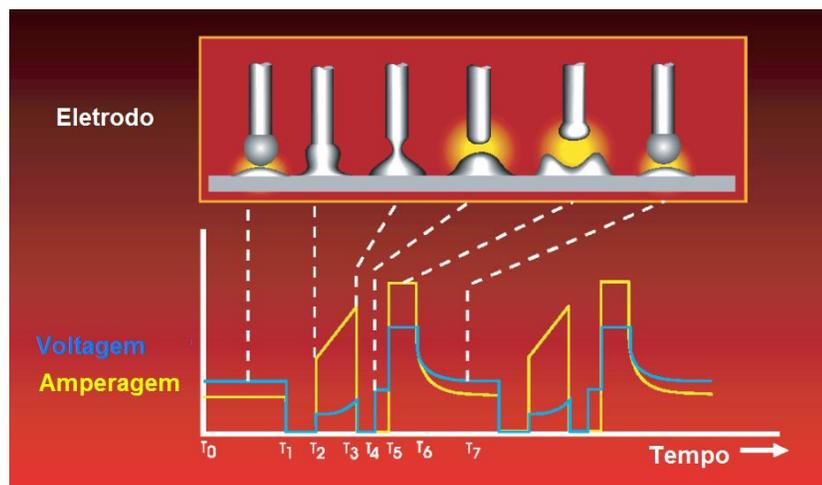


Figura 26. Relação entre a Tensão – Corrente em função do tempo para o processo STT® <sup>[76]</sup>.

Segundo DeRuntz <sup>[76]</sup>, o controle da corrente neste processo confere as seguintes vantagens: a) uma soldagem com aporte térmico controlado, reduzindo

as discontinuidades metalúrgicas por transformações de fases, assim como menor distorção do material; b) um controle adequado da corrente diminui a perda de material de aporte por respingos e ao mesmo tempo o calor transferido na gota metálica é entregue por completo à poça de fusão; c) um cordão estreito, uniforme e de boa penetração; d) velocidade de soldagem maior em relação à transferência só por curto-circuito; e) a sua versatilidade permite soldar em todas as posições. As desvantagens apresentadas são: a) precisa de operadores qualificados, devido à necessidade de uma boa seleção dos parâmetros de soldagem; b) o custo da fonte em comparação com uma fonte convencional MIG/MAG, é mais alta.

#### 4.3.2.4. Soldagem com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding FCAW)

Processo de soldagem por arco em que a fusão e união dos metais é efetuada por um arco elétrico mantido entre um fio consumível contínuo e a peça de trabalho. A proteção contra a oxidação atmosférica é obtida por meio de um fluxo contido na alma do eletrodo (figura 27). Conforme o fio fluxado utilizado, pode ser necessária proteção adicional por meio de gases.

A soldagem por arame tubular foi desenvolvida visando unir as vantagens do processo MIG/MAG (semi-automático) com as do processo Eletrodo Revestido, deste modo, o arame eletrodo maciço foi substituído pelo arame tubular com alma de fluxo fusível [77].

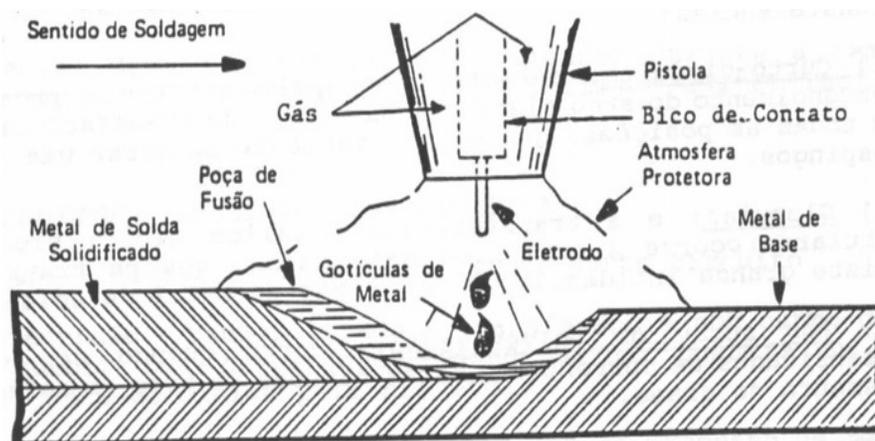


Figura 27. Soldagem a arco elétrico com Arame Tubular Autoprotetido [77].

Este processo possui duas variantes, pode ser autoprotégido (FCAW-S) ou com proteção gasosa adicional, a qual pode ser um gás inerte, gás ativo ou mistura destes. A escolha do tipo de arame vai depender das propriedades mecânicas desejadas, da disponibilidade, assim como do tipo de união. Geralmente o processo FCAW-S substitui o eletrodo revestido, e o FCAW-G naquelas aplicações onde se selecionaria o processo MIG/MAG.

As vantagens deste processo são: a) Alta taxa de deposição quando comparado com o processo MIG/MAG; b) É possível soldar em todas as posições; c) benefícios metalúrgicos que pode ser ganho pelos agregados contidos no fluxo, quando comparado ao processo MIG-MAG; d) maior penetração quando comparado com o processo MIG/MAG, e) boa qualidade do metal de solda de superfícies suaves e sanas. As desvantagens são: a) requer remoção de escória, e b) geração de grande quantidade de fumaça quando comparado com o processo MIG/MAG e o processo de eletrodo revestido <sup>[77]</sup>.

#### **4.4.METAL DE SOLDA**

O modo de solidificação controla a redistribuição do soluto, a estrutura de solidificação, tipo e forma de grão, a distribuição de inclusões e defeitos, tais como porosidade e formação de trincas a quente e frio <sup>[70]</sup>.

A estrutura de cada grão individual depende da forma da frente de solidificação, a qual está influenciada pela concentração do soluto do metal líquido e pelo parâmetro de solidificação,  $G/R_s$  ( $G$  = gradiente de Temperatura e  $R_s$  = taxa de solidificação ou de crescimento, a qual está em função da velocidade de soldagem e o seno do ângulo formado entre o limite da poça de fusão e a direção de soldagem). Na medida em que a relação  $G/R_s$  decresce, a microestrutura se torna mais dendrítica, Fig. 28 <sup>[71]</sup>.

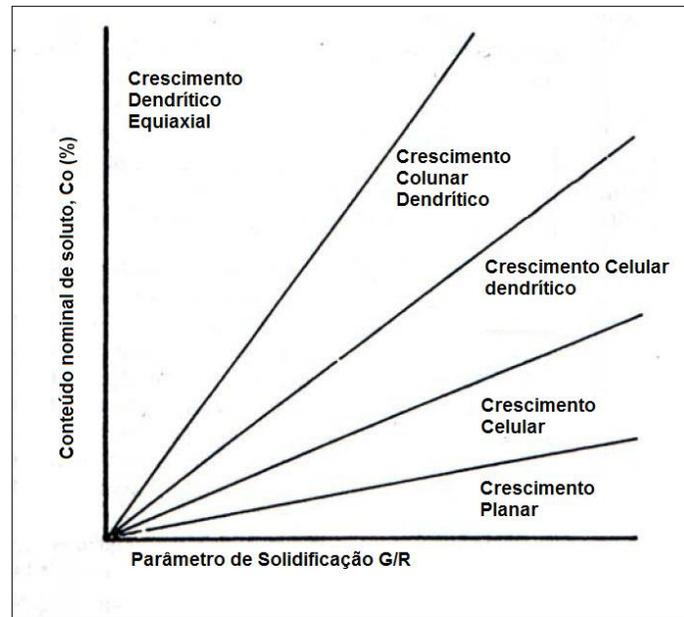


Figura 28. Fatores que controlam o modo de crescimento durante a solidificação de metais líquidos <sup>[71]</sup>.

A estrutura do grão do metal de solda depende principalmente de três fatores: a) composição (concentração do soluto), b) Parâmetro de solidificação, e c) Forma da poça de fusão. Esta última função direta da velocidade de soldagem <sup>[70]</sup>.

Durante a solidificação do metal de solda, a decomposição da austenita pode produzir grande variedade de microconstituintes, os quais dependem da taxa de resfriamento e da composição química do aço. A microestrutura primária desenvolve-se durante a solidificação e geralmente resulta em uma estrutura austenítica de grãos colunares até atingir a transformação da austenita em ferrita. A microestrutura secundária é um produto da transformação da austenita em ferrita <sup>[68]</sup>.

Bhadeshia et al. <sup>[78]</sup>, explica que em metal de solda de aços de baixa liga, a solidificação começa com a nucleação da ferrita- $\delta$  na linha de fusão, solidificando com um crescimento celular o qual vai se transformando em grãos colunares de austenita. Durante o resfriamento a austenita se transforma em ferrita

alotriomorfa (interfaces  $\alpha$ - $\gamma$  incoerentes e semi-coerentes), a qual cresce por um mecanismo de difusão nos limites dos grãos austeníticos.

Se ocorrer uma queda muito rápida de temperatura a difusão se torna mais difícil e a ferrita cresce como lamelas, formando a ferrita Widmstätten, a qual nucleia na interface  $\alpha$ - $\gamma$  e cresce dentro da austenita, tornando-se mais fina com o aumento da taxa de resfriamento. O carbono é rejeitado dentro da austenita na frente das pontas das lamelas, ao mesmo tempo, ferrita acicular nucleia nas inclusões dentro dos grãos austeníticos e cresce em forma de finas lamelas. O excedente de austenita, à temperatura martensítica decompõe-se em perlita degenerada e ou misturas de martensita e austenita retida, e devido a que o volume destas é pequeno são chamadas de microfases.

Em soldas com múltiplos passes [11, 13, 70], devido à deposição de passes subseqüentes certas regiões da microestrutura são reaquecidas. Nessas regiões devido à temperatura ficar pouco acima da temperatura de recristalização, ocorre transformação de fase. Como consequência, há um aumento da heterogeneidade microestrutural e das propriedades mecânicas resultantes. A microestrutura final é composta por passes contendo regiões de como depositada, seguidas de regiões reaquecidas. As microestruturas das regiões reaquecidas dependem da temperatura máxima na qual é submetida durante a deposição dos passes subseqüentes. A partir da linha de fusão, duas áreas podem ser verificadas: a região reaquecida de granulação grosseira e a região reaquecida de granulação fina. Altas temperaturas de recristalização são alcançadas próximas à linha de fusão, promovendo um rápido crescimento equiaxial dos grãos da austenita, que crescem por difusão nos contornos de grãos formando consequentemente uma granulação grosseira.

#### 4.4.1. Zona Termicamente Afetada

A zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) é a região do metal de base adjacente à poça de fusão. Esta região sofre um rápido ciclo térmico de aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem. Dependendo da severidade dos ciclos térmicos, a ZTA apresentará diferentes características metalúrgicas e propriedades mecânicas [71].

A ZTA de um aço soldado por fusão, geralmente é dividida em quatro regiões, em função da temperatura atingida durante o ciclo térmico da soldagem (figura 29):

- *Zona ou Região de grão grosseiro (ZTA-GG ou RGG)*, caracterizada por uma temperatura de pico entre 1100 – 1450 °C onde se inicia o crescimento do grão austenítico quando a região atinge uma temperatura superior à temperatura de grão grosseiro (aproximadamente 1100 °C). Nesta região o tamanho do grão austenítico é função da natureza do ciclo térmico de soldagem e da temperatura de formação do grão grosseiro. A microestrutura resultante vai depender do tamanho do grão austenítico e da transformação de fase, a qual é função da taxa de esfriamento na junta soldada [71, 79].

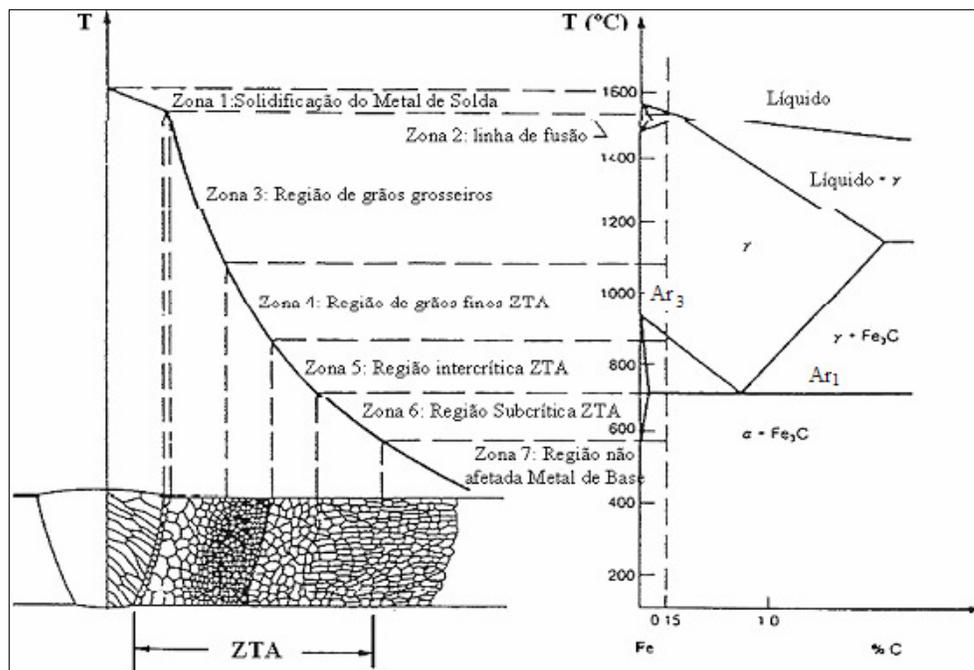


Figura 29. Zonas ou regiões da Zona Termicamente afetada [80].

- *Zona ou Região de grão fino (ZTA-GF ou RGF)*, uma região onde a temperatura do ciclo térmico se encontra entre  $Ar_3 - 1100$  °C, o crescimento do grão austenítico é relativamente lento se obtendo tamanho de grão austenítico pequeno, sendo o alumínio, titânio, nióbio e vanádio como aditivos de refinamento de grão, os quais formam nitretos ou carbeto e atuam como

elementos de ancoragem reduzindo ou impedindo o movimento do contorno do grão austenítico. Durante o resfriamento a transformação austenita-ferrita tende a formar estruturas de grão ferrítico-perlítico ou ferrítico-bainítico, já que devido ao alto número de contornos de grão, promove a formação de ferrita de contorno de grão enriquecendo à austenita excedente em carbono, podendo transformar esta última em perlita ou bainita, o que vai depender da taxa de resfriamento e do conteúdo de carbono e elementos de liga do metal de base <sup>[79]</sup>.

- *Zona ou Região Intercrítica (ZTA-IC ou RI)*, a temperatura que atinge a ZTA esta entre  $Ar_1 - Ar_3$ , a qual é uma região relativamente estreita, transformações parciais são levadas a cabo. No caso de aços ferrítico-perlíticos, durante o aquecimento as ilhas de ferrita transformam rapidamente a fase austenítica, sendo a austenita enriquecida em carbono e no esfriamento esta austenita rica em carbono pode-se transformar em perlita, bainita superior, martensita autorevenida ou martensita de alto carbono <sup>[79]</sup>.

- *Zona ou Região Subcrítica (ZTA-SC ou RS)*, ocorre a uma temperatura menor que  $Ar_1$ , nesta região normalmente não existe mudança microestrutural observável, com exceção de uma degradação de perlita lamelar a partículas esferoidais de cementita ( $Fe_3C$ ) que pode ocorrer. Assim mesmo o efeito combinado de aquecimento (100 – 300 °C) pode causar uma fina precipitação de impurezas tais como C e N, nas discordâncias dentro dos grãos ferríticos, isso fragiliza a estrutura <sup>[71, 79]</sup>.

O reaquecimento na ZTA pode promover zonas frágeis localizadas nas regiões que foram reaquecidas nas temperaturas intercrítica ou subcrítica. Porém nestas regiões o tamanho de grão é fino (RGF) e a diferenciação entre a RGF reaquecida intercrítica e subcriticamente é difícil de ser realizada. No entanto, o aparecimento de grãos frágeis localizados é dependente do tipo de aço, e a zona mais crítica é quase sempre a RGG <sup>[13]</sup>. Ikawa <sup>[81]</sup>, afirma que um dos maiores problemas na solda de aços ARBL é a perda de tenacidade nos grãos grosseiros da ZAT.

#### 4.4.2. Propriedades Mecânicas da Junta Soldada

As propriedades mecânicas da junta soldada são resultantes de um conjunto de procedimentos e respostas a estes procedimentos. Por exemplo, a especificação de procedimento de soldagem (EPS), determina os parâmetros de soldagem em função do processo de soldagem o qual, gera um metal de solda e produz um ciclo térmico no metal de base <sup>[82]</sup>.

Os possíveis defeitos gerados na solidificação do metal de solda, ou falhas na execução do procedimento poderão alterar a resistência da junta soldada. Detalhes do perfil da solda e descontinuidades que atuam comumente como concentradores de tensão incluem a região de concordância do reforço com a superfície do metal base, os respingos (quando irregulares e salientes), mordeduras, trincas e falta de penetração. Estes concentradores de tensões tornam mais fáceis à iniciação de trincas por CST ou fragilização pelo hidrogênio. Poros não são concentradores de tensão muito efetivos, mas, quando possuem dimensões elevadas ou estão presentes em grande quantidade, causam uma redução na seção útil da solda e, portanto da carga máxima que esta pode suportar, o qual também leva a uma redução na resistência à CST <sup>[11, 82, 83]</sup>.

Devido às deformações associadas com a soldagem e às suas temperaturas de transformação relativamente baixas, o metal de solda apresenta uma densidade de discordâncias elevada, o que também contribui para o aumento do limite de escoamento. Como resultado, a zona fundida tende a possuir valores dos limites de escoamento e de resistência maiores do que um metal base similar <sup>[11]</sup>.

Vários autores afirmam que o aumento na resistência mecânica pode reduzir as propriedades de resistência à corrosão, Albarram <sup>[84]</sup> comparou o aço X80 com outros graus menores e observou que o aço X80 é mais susceptível à fragilização pelo hidrogênio que os outros de menor grau (X52 e X65). Martins <sup>[64]</sup> comparou as juntas soldadas dos aços API X70 e X80, constatou que as fraturas apresentaram no metal de solda (onde se tinha maiores valores de resistência), resultando a junta do aço X80 com menores tempos de fratura quando comparada

com a junta do aço X70, sobrepõe que a junta X70 possui maior resistência a corrosão sob tensão.

O perfil de dureza da junta soldada indica que valores máximos são encontrados próximos a linha de fusão, uma vez que o tempo de permanência a alta temperatura nesta região é maior, portanto a dureza é função da taxa de resfriamento, e de acordo com a Norma ASTM A370 <sup>[85]</sup> pode ser correlacionada a valores de resistência à tração.

Embora a Norma NACE MRO 175 <sup>[43]</sup> não aprove o uso de alguns aços ARBL em ambientes contendo H<sub>2</sub>S, especialmente quando soldados, devido à alta dureza do material base (maior que o limite de 22 HRC), ou à geração de regiões de alta dureza na ZTA. Omweg e colaboradores <sup>[48]</sup> apresentam dados de várias juntas soldadas de aços API 5L X70 e X80, que contradizem esses limites recomendados pela norma, pois, a dureza determinada nessas juntas foi sempre acima de 22HRC (248 Hv), porém não foram susceptíveis a corrosão sob tensão em meios com baixa concentração de H<sub>2</sub>S.

Com relação a susceptibilidade ao trincamento de um aço ARBL <sup>[86]</sup>, é mencionado que para uma distância de 1 a 2 mm abaixo da borda superior os valores de dureza devem estar entre 300 a 350 HV, sendo o máximo aceitável 366 HV, para não ser susceptível a trincamento. Na borda inferior (próximo ao passe de raiz) a uma distância entre 1 e 2 mm a dureza máxima é de 250 HV, para que não haja susceptibilidade à trincamento por corrosão sobre tensão.

Na literatura se dá maior importância à dureza da ZTA, devido ao fato que esta é considerada como um indicador de problemas potenciais como o trincamento a frio e corrosão sob tensão.

#### **4.4.3. Mudanças Microestruturais pelo Processo de Soldagem.**

A obtenção de relações entre a estrutura e propriedades em juntas soldadas é um problema complexo, devido a interação de um grande número de variáveis

operatórias, presença de uma microestrutura heterogênea e presença de tensões residuais e deformação.

Na relação entre microestrutura e susceptibilidade à corrosão sob tensão é importante avaliar a influência dos parâmetros de soldagem sobre o metal de base, uma vez que as propriedades mecânicas como a dureza na zona termicamente afetada (ZTA) é definida por estes <sup>[64]</sup>.

A microestrutura do metal de solda em aços ARBL geralmente consiste de ferrita acicular com ferrita de contorno de grão em várias proporções e ferrita alinhada com constituintes martensita-austenita-carbonetos (M-A-C). Porém, a presença de elementos de liga, através de seus efeitos na temperabilidade, pode modificar estas estruturas e por meio da precipitação de carbonitretos pode aumentar a resistência mecânica, diminuir a tenacidade do metal de solda, e conseqüentemente reduzir as propriedades de resistência à corrosão <sup>[20, 29, 46]</sup>.

A ZTA também é uma área propensa a fragilização devido ao crescimento de grão causado pelas altas temperaturas atingidas durante a soldagem. Em aços de alto carbono existe também uma tendência de carbonetos de vanádio precipitarem e contribuir para a fragilização. Além disso, nitretos tendem a se dissociar e permanecer dissociados quando submetidos a altas taxas de resfriamento, deixando o nitrogênio em solução sólida intersticial, contribuindo para a fragilização. O titânio e zircônio são os únicos elementos que podem superar este problema porque seus nitretos são estáveis a altas temperaturas. Eles não apenas evitam a presença do nitrogênio livre, como também as partículas de TiN/ZrN inibem o crescimento de grão e também nucleiam novos grãos ferríticos. Aços ao Ti tem sido desenvolvidos para evitar a fragilização da ZTA, principalmente onde são utilizados processos com alto aporte de calor <sup>[20]</sup>.