

CAPÍTULO III | EFEITOS METALÚRGICOS DA PULSAÇÃO DE CORRENTE

3.1 Introdução

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de avaliar as vantagens da aplicação de *corrente pulsada* em relação à soldagem em *corrente contínua convencional*. Normalmente, as características mais relacionadas nesta distinção são a geometria do cordão, a facilidade no controle do processo, a redução no nível de distorção e o controle sobre a estrutura do cordão depositado. Neste capítulo, portanto, será feita uma avaliação da relação entre as características apresentadas nos processos de pulsação de corrente em *alta frequência* ($F \approx 1 - 10 \text{ kHz}$), *convencional* ($F \approx 20 - 500 \text{ Hz}$) e *térmica* ($F_t \approx 1 - 10 \text{ Hz}$) aplicadas nos processos *TIG* e *MIG/MAG*, e as características metalúrgicas da região soldada. O capítulo inicia com uma abordagem sobre os fundamentos do mecanismo de solidificação da zona fundida (**ZF**). Num segundo momento, o estudo enfocará as peculiaridades metalúrgicas da **ZF** e da zona termicamente afetada, gerada na **ZF** solidificada, quando da soldagem multi-passe ou com imposição de modulação de corrente. Finalizando a abordagem, virão os efeitos da pulsação de corrente sobre o metal depositado e regiões vizinhas ao cordão, durante e após o processo de solidificação da **ZF**.

3.2 Fundamentos de metalurgia da soldagem

3.2.1 Agitação na poça de fusão

O entendimento dos mecanismos que atuam na convecção da poça de fusão, durante a operação de soldagem, é de fundamental interesse, já que a agitação desta região irá influenciar na geometria final do cordão e na microestrutura, na distribuição de segregação e na presença de porosidade na **ZF**. Esta consideração é reforçada pelo fato de que o refinamento de grão, gerado pela agitação da poça, se constituirá como o único mecanismo de refinamento possível

em aços não transformáveis e em muitos não ferrosos, durante o processo de soldagem (Threadgill et al, 1979).

As forças responsáveis pelo efeito convectivo na poça de fusão são a força devido à tensão superficial (gradiente de tensão na superfície da poça), a força eletromagnética, a força de flutuação (ou força devido à convecção com fluxo líquido – **buoyancy force**), a força devido à pressão do arco sobre a poça e a força devido ao impacto das gotas metálicas (Savage et al, 1979; Kou, 1987; Grong, 1994; Wahab et al, 1998; Kim et al, 1998; Sundaresan et al, 1999; Wang et al, 2001).

A figura 3.1 ilustra o efeito individual e o efeito combinado das forças sobre o mecanismo de convecção da poça de fusão. Nota-se que o comportamento dos campos de velocidade e de temperatura apresentam características diferenciadas dependendo da força atuante. O efeito combinado mostra a presença de fluxos em sentidos opostos, isto é, um fluxo próximo da superfície da poça, gerado pelo gradiente de tensão superficial e outro no seu interior, influenciado pela força eletromagnética.

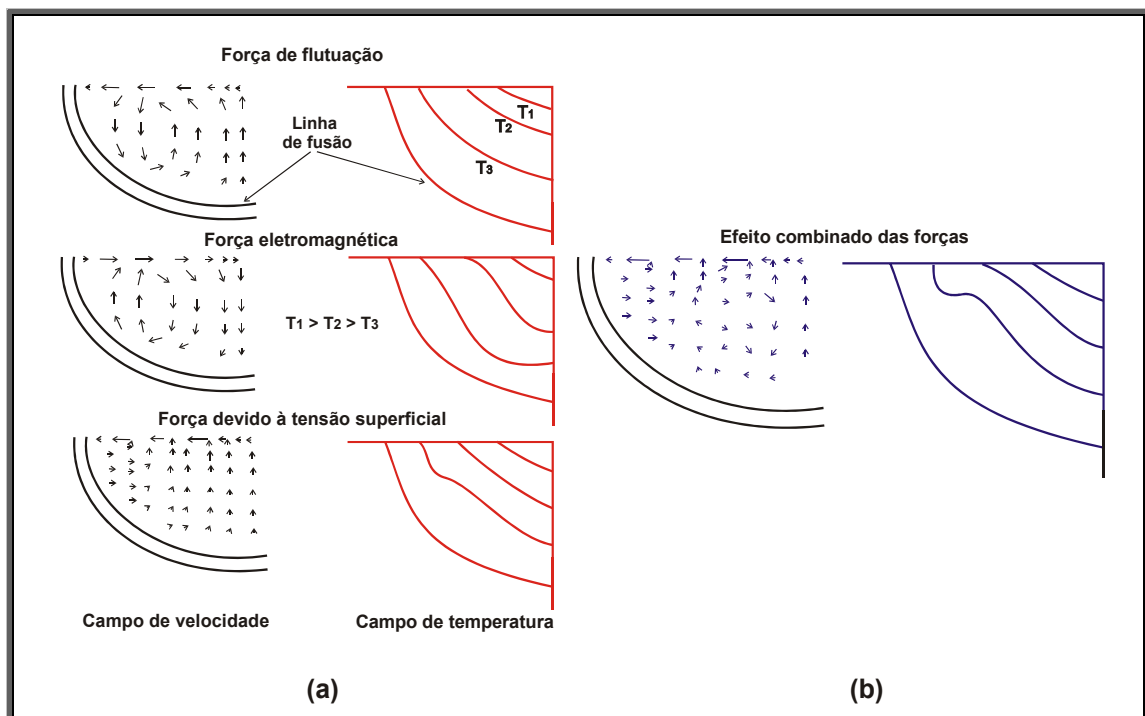


Figura 3.1 – Efeito convectivo na poça de fusão provocado por diferentes forças. Onde: (a) efeito individual e (b) efeito combinado. Adaptado de Kou (1987), Li et al (2002) e DeHerrera et al (2002).

A força eletromagnética provoca um direcionamento do fluxo para a parte central da poça no sentido da superfície para a parte inferior da poça. Esta característica promove uma poça estreita e profunda (Grong, 1994; DeHerrere et al 2002; Govindaraju et al, 2002).

A força de flutuação tende a promover uma poça mais rasa devido ao mecanismo de transporte do metal líquido “quente” para a superfície e do metal “frio” para a parte inferior da poça (Kim et al, 1998; DeHerrera, 2002).

Para o caso da força devido à tensão superficial observam-se duas situações distintas. A primeira situação refere-se a um gradiente de tensão positivo (presença de oxigênio e enxofre), onde o fluxo tenderá a formar uma poça profunda e estreita. Por outro lado, quando o gradiente for negativo, haverá a tendência da formação de uma poça mais larga e rasa (Grong, 1994; Kim et al, 1998).

O efeito do impacto das gotas sobre a poça de fusão induz a um aumento na complexidade do mecanismo de agitação desta região, em virtude da modificação gerada nos campos de velocidade e de temperatura (Wang et al, 2001).

As características apresentadas pelo efeito conjunto das forças poderão influenciar no nível de penetração, pela força eletromagnética, e na largura do cordão, pelo gradiente de tensão superficial e pela força de flutuação (Kou, 1987; Svensson, 1996).

O efeito convectivo gerado pela força eletromagnética irá distribuir as possíveis segregações e, desta forma, reduzindo o nível de macrosegregação. Por último, vem o efeito da convecção sobre o aprisionamento de porosidade na zona fundida. É importante salientar que nem sempre o efeito convectivo irá beneficiar a saída de porosidade. Esta liberação ou aprisionamento de poros irá depender da direção do fluxo resultante das interações das forças no interior da poça de fusão (Kou, 1997).

Somando-se a isso, durante a soldagem no modo pulsado poderá haver ainda uma parcela de agitação da poça provocada pela variação da pressão e da energia do arco, devido à modulação de corrente. Esta parcela de agitação da poça é caracterizada pela flutuação térmica (dependente da relação I_p/I_b e da F) e pelo aumento no nível de vibração desta região (dependente da F). Este aumento na convecção da poça foi observado ser mais pronunciado quando da imposição

do processo *TIG térmico* em corrente alternada (Savage et al, 1979; Sundaresan et al, 1999).

Do acima exposto é esperado que o grau de complexidade envolvida no processo de formação e solidificação da poça de fusão seja maior na implementação da variante *MIG/MAG Térmico*, em comparação ao modo pulsado convencional. Esta variação (discutida com mais detalhe no *capítulo V*) pode ser explicada pela modulação nos valores de I_m e v_a , entre as fases de *pulso* e *base térmica*.

3.2.2 Solidificação da zona fundida

Se o sub-resfriamento imposto na operação de soldagem não for severo e, ao mesmo tempo, o metal a ser soldado for puro haverá a tendência da poça de fusão se solidificar através de uma interface sólido-líquido geralmente planar (vide figura 3.2). Por outro lado, caso se esteja soldando uma liga metálica haverá a possibilidade de diversos modos de solidificação (planar, celular ou dendrítico – colunar ou equiaxial), dependendo das condições de solidificação impostas.

Existem duas teorias para explicar os mecanismos atuantes na passagem da frente de solidificação do modo planar para outra forma de solidificação. A primeira teoria baseia-se no *super-resfriamento constitucional* (proposta por Chalmer em 1953), enquanto que a segunda teoria trata da *estabilidade da interface* (proposta por Mullins em 1963). No primeiro caso considera-se apenas o aspecto termodinâmico. Para o último caso, incorpora-se os conceitos de cinética de interface e transferência de calor (Easterling, 1983; Kou, 1987; Svensson, 1996).

A teoria do super-resfriamento constitucional, que é a redução no gradiente de temperatura na interface sólido/líquido abaixo da temperatura *liquidus*, pode ser expressa pela equação 3.1.

$$\frac{G}{R_s} \geq \frac{\Delta T}{D_L} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

ΔT → intervalo de solidificação da liga, representado pela diferença entre a temperatura de equilíbrio *liquidus* (T_L) e a temperatura de equilíbrio *solidus* (T_s);

D_L → É o coeficiente de difusão do soluto no líquido.

A figura 3.2 apresenta um esquema dos principais modos de solidificação levando em consideração o efeito da velocidade da frente de solidificação R_s (taxa de crescimento) e do gradiente de temperatura G . Observa-se que um sucessivo incremento no super-resfriamento (redução no valor de G/R_s) irá provocar uma mudança na morfologia da frente de solidificação (controle do modo de solidificação). Em soldagem prevalecem as formas de solidificação celular e dendrítica, devido ao valor de G/R_s ser muito alto. A relação G/R_s , por sua vez, pode ser controlada pela seleção mais adequada dos parâmetros e do processo de soldagem (Palma et al, 1983; Kou, 1987).

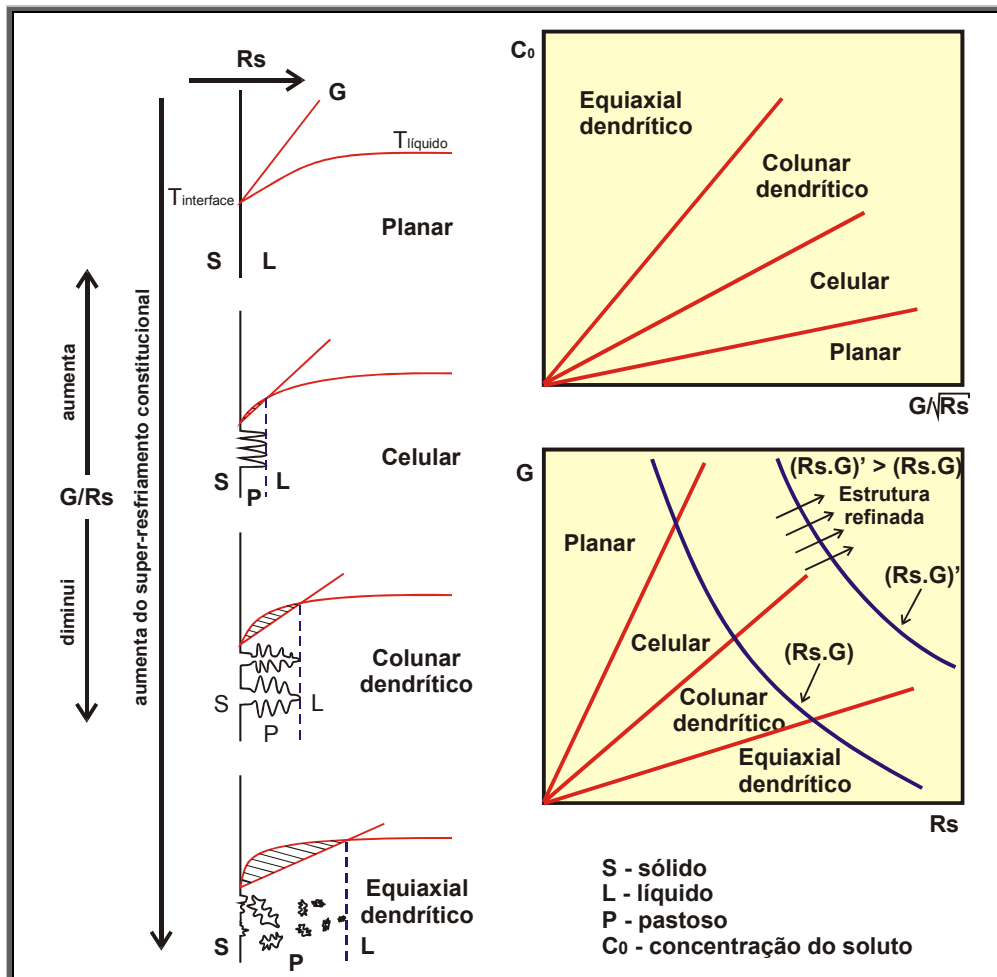


Figura 3.2 – Possíveis morfologias na interface de crescimento em função dos valores de G , R_s e C_0 . Adaptado de (Grong, 1994; Kou, 1987; Palma et al, 1983).

Outra observação possível é o efeito do produto $R_s.G$, que governa a escala da estrutura solidificada. Assim, o espaçamento celular poderá variar através da

zona fundida devido à variação de ciclo térmico em diferentes partes desta zona. Neste caso, a taxa de resfriamento (alto $R_s.G$) experimentada pela região central é maior do que a presente na linha de fusão. Conseqüentemente, os sub-grãos serão mais refinados na região central da solda (Kou, 1987; Wainer, 1992; Humphreys et al, 2001).

O espaçamento entre os ramos dendríticos será determinado pela taxa de solidificação (relação com o calor aportado). Uma elevação na taxa de solidificação provocará uma redução no espaçamento entre os ramos e, com isso, modificando a quantidade de microsegregação da liga. O que se almeja é uma estrutura final da zona fundida refinada e com boa distribuição de segregados.

a) Macroestrutura da zona fundida

O desenvolvimento da estrutura na zona fundida, na região colunar, dá-se basicamente por meio dos modos de crescimento *epitaxial* e *competitivo*.

O primeiro modo caracteriza-se pelo crescimento dos grãos na **ZF**, em direção ao centro da poça, a partir dos grãos do metal de base na linha de fusão (substrato), quando em soldagem autógena. Outra característica desse modo é a manutenção da orientação cristalográfica e do tamanho de grão apresentado pelo metal de base. Neste caso, um aumento do tamanho de grão do metal soldado e/ou da temperatura máxima na zona de ligação, provocará uma **ZF** grosseira.

O segundo modo é caracterizado pela existência de um diferente mecanismo atuando no crescimento dos grãos denominado de *crescimento competitivo*. Neste caso, os grãos tendem a crescer na direção perpendicular à frente de solidificação, maior valor de **G**. Contudo, os grãos em formação também apresentam direções preferenciais ao crescimento (nas direções $\langle 100 \rangle$ para **CFC** e **CCC** e $\langle 1010 \rangle$ para **HC**). Assim, grãos com direções de fácil crescimento paralelas a **G** crescerão mais facilmente que aqueles apresentando outras direções (vide figura 3.3).

No centro da zona fundida há a tendência do crescimento de grãos equiaxiais. Esta forma de crescimento se caracteriza pela presença de condições que favoreçam a nucleação e o crescimento dendrítico no interior da poça (Kou, 1987). Nesta região o metal líquido será levemente sub-resfriado em virtude da extensiva segregação para o centro da poça provocado pelo crescimento colunar (Becker, 1979; Grong, 1994).

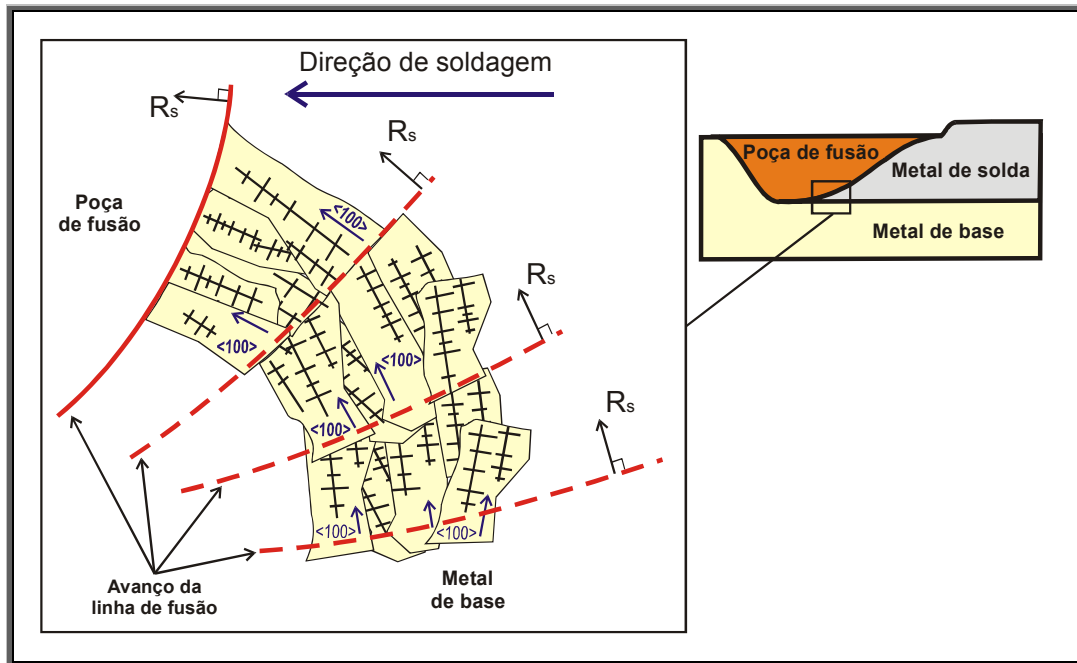


Figura 3.3 – Crescimento competitivo dos grãos durante a solidificação da ZF. Adaptado de (Easterling, 1983; Kou, 1987).

A passagem do crescimento colunar para o crescimento equiaxial é governada pela relação G/R_s . Considerando a existência de nucleação heterogênea e que a relação G/R_s decresce da linha de fusão para o centro da poça, durante o processo de solidificação, haverá um valor crítico na relação a partir do qual o crescimento passará a ser equiaxial. Este valor crítico, por sua vez, estará atrelado com calor aportado e com a velocidade de soldagem (Becker et al, 1979; Grong, 1994).

De maneira geral, as condições térmicas impostas na soldagem favorecem o crescimento equiaxial no centro do cordão. A nucleação destes grãos equiaxiais, na poça de fusão, pode ser originada por diferentes mecanismos como (Grong, 1994; Kou, 1987; Threadgill, 1979):

- Fragmentação das dendritas na zona pastosa, por efeito convectivo. As pontas destacadas são arrastadas para o centro da poça onde poderão atuar como núcleos para novos grãos;
- Destacamentos de grãos parcialmente fundidos, na linha de fusão, por efeito convectivo. Estes grãos são arrastados em direção ao centro da poça onde poderão, também, servir como sítios de nucleação de novos grãos;

- Nucleação heterogênea através da adição de partículas (inoculação), estranhas ao metal soldado (por exemplo, Ti ou Zr adicionados ao Al), que facilitem o arranjo dos átomos na forma cristalina. Estas partículas auxiliam na superação da barreira crítica de energia (ΔG^*) necessária à manutenção de um núcleo sólido com raio maior que o tamanho crítico (r^*). Becker (1979) e Kou (1987) argumentam que este mecanismo é influenciado pelos parâmetros de soldagem (elevação nos valores da v_s e do calor aportado) e, portanto, aumentando o super-resfriamento constitucional na interface sólido-líquido (elevação da relação G/R_s);
- Nucleação superficial através de uma corrente fria de gás sobre a superfície da poça ou por instantâneas reduções no calor aportado. Neste caso, a superfície da poça será termicamente sub-resfriada, facilitando o surgimento de núcleos sólidos nesta superfície.

Uma importante consideração feita por Easterling (1983) refere-se ao fato de que as estruturas equiaxiais dendríticas, oriundas da operação de soldagem, são relativamente finas comparadas às de fundição. Esta diferença é muito importante em termos de tenacidade desde que, diferente de um fundido, a solda muitas vezes, na condição “*como soldada*”, torna-se parte de uma estrutura fortemente solicitada.

b) Variações na macroestrutura da zona fundida

A solidificação da zona fundida pode variar em função da forma apresentada pela poça de fusão durante a operação de soldagem, ou seja, a velocidade de soldagem influenciará na forma da poça (elíptica ou de gota) e, por sua vez, a forma da poça atuará sobre a forma de crescimento dos grãos (estrutura colunar ou colunar-equiaxial).

Como na poça com formato de gota (velocidade de soldagem maior que a velocidade de solidificação) a frente de solidificação apresenta um perfil reto (vide figura 3.4(a)) os grãos também tenderão a crescer retos perpendicularmente a linha de fusão. De outro modo, nas poças de formato elíptico (velocidade de soldagem igual a velocidade de solidificação) os grãos tenderão a crescer curvados perpendicularmente à linha de fusão (vide figura 3.4(b)). Assim, sob alta velocidade de soldagem os grãos tenderão a crescer retos em direção ao centro do

cordão e, para reduzida velocidade de soldagem, os grãos crescerão curvados na direção do maior valor de G .

Na mesma figura observa-se a presença de grãos equiaxiais, originados numa faixa central ao longo do cordão, em soldas de alumínio e de aço inoxidável austenítico, por exemplo. Por sua vez, a formação desta região no centro do cordão impede o crescimento dos grãos colunares até o centro da zona fundida. Em poças de formato elíptico a região contendo grãos equiaxiais é mais espessa em comparação com a mesma região em poças de formato de gota. A forma alongada da poça provoca um aumento na distância fundida, na direção de v_s , em relação à fonte de calor e, com isso, provocando uma elevação em R_s e um decréscimo em G (figura 3.4(c)), em comparação ao restante da linha de fusão (Becker, 1979; Easterling, 1983; Kou, 1987; Grong, 1994). Embora em valores elevados R_s e v_s (baixo calor aportado) se produzam cordões menores e com melhores propriedades mecânicas, deve-se tomar cuidado quanto ao tamanho do cordão, pois para cordões com dimensões reduzidas há a tendência ao aparecimento de trincas durante a soldagem devido às tensões geradas por restrição (Alcan, 1993).

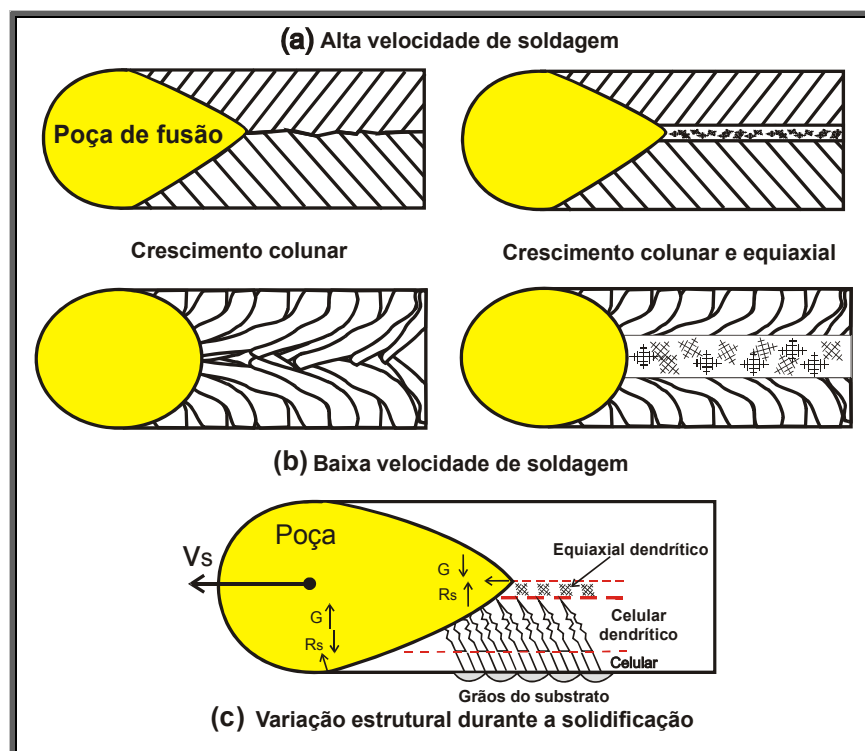
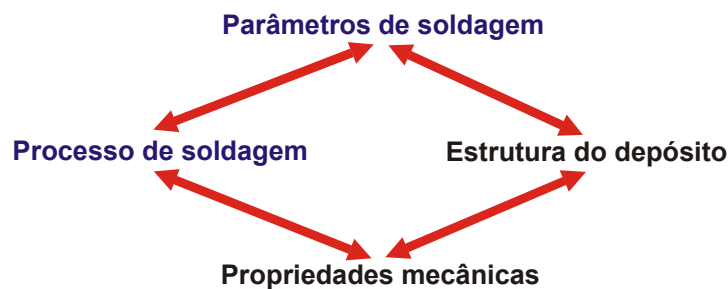


Figura 3.4 – (a) e (b) Efeito da velocidade de soldagem sobre a forma da poça e modo de solidificação e (c) variação estrutural na solidificação da ZF. Adaptado de (Easterling, 1983; Kou, 1987; Grong, 1994).

A estrutura colunar, normalmente exibida na **ZF**, é associada com defeitos, como trinca de solidificação e pobres propriedades mecânicas. Assim, num refinamento estrutural é esperado um melhoramento nas propriedades mecânicas do cordão (Threadgill, 1979; Sundaresan et al, 1999; Madhusudhan et al, 2000).

Com base nas colocações anteriores sobre a relação entre as condições de soldagem e resposta final do metal aportado é possível prever a relação biunívoca descrita abaixo.



Esta correlação entre as condições operacionais e a resposta estrutural obtida no cordão de solda reforça a importância do conhecimento e do desenvolvimento de equipamentos e novas variantes que possibilitem a obtenção de depósitos sob condições otimizadas.

3.2.3 Efeitos da soldagem multi-passe sobre a zona fundida

As características finais da zona fundida podem ainda ser influenciadas pela operação de soldagem envolvendo multi-passe (imposição de sucessivos aportes de calor gerando novos ciclos térmicos e partições térmicas). Neste caso, a deposição de um novo cordão sobre a **ZF**, já solidificada, provocará um aquecimento e uma refusão de parte desta zona.

A nova interface entre sólido e líquido, na região refundida da **ZF**, servirá de substrato para um novo mecanismo de solidificação. Portanto, o tamanho dos grãos apresentado na **ZF** contribuirá na estrutura final da nova região solidificada.

A região da **ZF** submetida a um aquecimento excessivo (termicamente afetada), por sua vez, poderá servir de sede para modificações de estrutura ou de constituição, no estado sólido, como o crescimento de grão, precipitação, dissolução ou coalescência de precipitados, transformação alotrópica ($\gamma \rightarrow \alpha$ ou $\delta \rightarrow \gamma$), etc. (Granjon, 1974; Kou, 1987; Svensson, 1996).

O efeito de algumas dessas alterações sobre a tenacidade e a resistência de um determinado material, é representado na figura 3.5 (Svensson, 1996). Onde se destaca o refino de grão como o “único” mecanismo que provoca um aumento conjunto da tenacidade e da resistência mecânica.

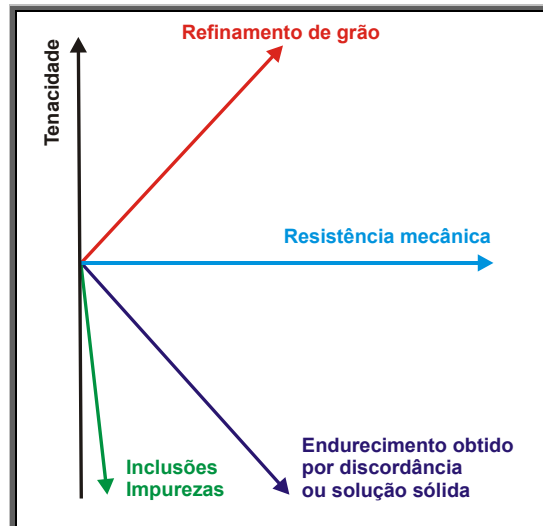


Figura 3.5 – Influência de fatores metalúrgicos sobre a resistência mecânica e a tenacidade (Svensson, 1996).

O tamanho da zona alterada termicamente dependerá da partição térmica apresentada (*temperatura x distância*) e as modificações da estrutura, em um determinado ponto da zona, serão função do ciclo térmico (*T x tempo*). Por sua vez, o tamanho da região refundida será função do nível de diluição imposto pela operação de soldagem.

Embora a região reaquecida (regenerada) apresente grãos finos e grosseiros, o tamanho médio dos grãos nesta região ainda será muito menor do que os grãos colunares da **ZF** que não sofreram alteração. Daí a importância do efeito da **ZTA** gerada pelo passe subsequente ou modulação de energia (*pulsação térmica*), em ligas que sofrem transformação no estado sólido. Neste caso, parte dos grãos colunares da **ZF** (passe anterior) será refinada na **ZTA** gerada pelo cordão depositado sobre esta (vide figura 3.6). Este reaquecimento, também, poderá termicamente afetar as **ZTA's** vizinhas ao depósito (Easterling, 1983; Palma et al, 1983; Kou, 1987; Folkhard, 1988; Svensson, 1996).

Como pode ser visto na figura 3.6, apenas uma parte da região reaquecida, por múltiplos ciclos, irá ser submetida a uma elevada temperatura de pico (ultrapassando a temperatura de transformação da liga).

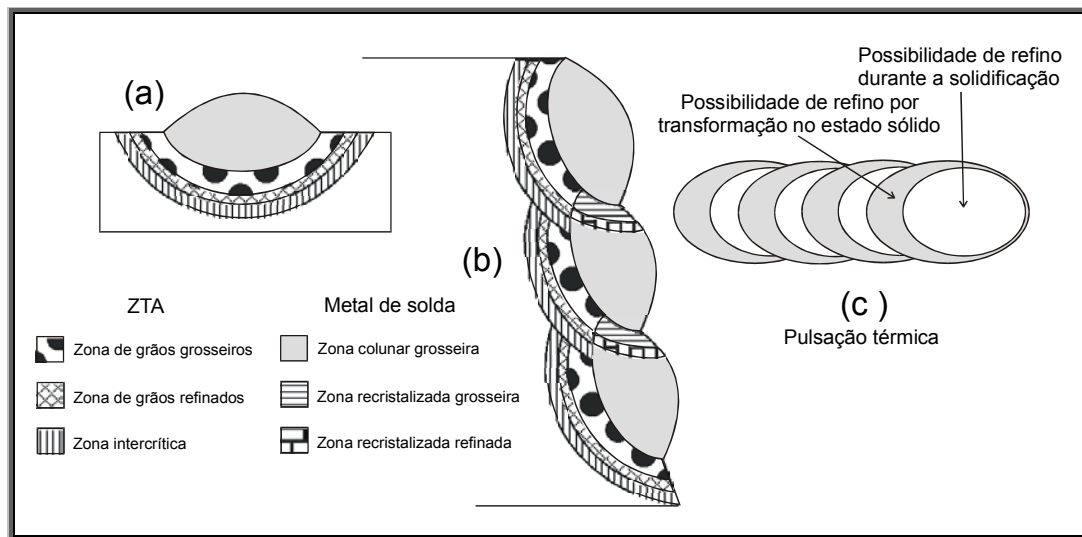


Figura 3.6 – Comparação esquemática das alterações estruturais obtidas em simples deposição (a), através de multi-passe (b) e *pulsação térmica* (c). Adaptado de (Easterling, 1983; Santos, 2001).

O refino microestrutural de parte da **ZF** (região termicamente regenerada), obtido na soldagem multi-passe ou na *pulsação térmica*, irá atuar sobre a elevação da tenacidade e na redução do nível de tensão residual (Granjon, 1974; Kou, 1987; Madhusudhan et al, 2000). Estas considerações estão ancoradas nos seguintes pontos (Easterling, 1983):

- Cada ciclo térmico gerado pelo passe subsequente efetivamente refinará os grãos da **ZF** do passe anterior ou normalizará parte desta região;
- O pré-aquecimento causado pelos passes anteriores irá prolongar o tempo de passagem no intervalo crítico de temperatura (Δt_{8-5} para o caso do aço ferrítico temperável, por exemplo);
- O passe sub-seqüente tende a recozer parte da **ZF** e, com isso, aliviando parte da tensão residual;
- O total da energia (livre de Gibbs) por cordão é reduzido à medida que o crescimento de grão é minimizado.

As considerações apresentadas sobre os efeitos da soldagem multi-passe, os mecanismos de solidificação e a agitação da poça servirão de referência para o entendimento dos possíveis efeitos da modulação de corrente (*pulsação térmica*) sobre a estrutura do cordão de solda.

3.2.4 Efeitos metalúrgicos da pulsação da corrente de soldagem

Embora se deseje controlar o modo de solidificação da **ZF** e, ao mesmo tempo, o tamanho e as características mecânicas da zona afetada termicamente, esta tarefa não é tão simples de ser atingida. Este controle é dificultado em face dos elevados níveis de temperatura e do gradiente térmico impostos pela operação de soldagem, em relação a um fundido e ao natural processo de crescimento epitaxial (Sundarsan et al, 1999). Apesar destas limitações, oriundas da operação de soldagem, diversos métodos de refino de grão foram desenvolvidos visando controlar o nível de refino na **ZF**. Um resumo com as técnicas e os mecanismos de refino atuantes na poça de fusão, como também em fundidos, é apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Técnicas de refino aplicáveis no processo de solidificação. Adaptado de (Feest, 1974; Threadgill, 1979; Kou, 1987; Malinowski-Brodnicka et al, 1990; Sundaresan et al, 1999; Madhusudhan, 2000).

Técnica de refino	Mecanismo atuante (*)
Métodos térmicos - Controle das taxas de aquecimento e resfriamento (calor aportado, interpasse e pré-aquecimento) - Nucleação superficial estimulada (jato de gás frio)	a b c a b
Métodos mecânicos - Vibração (mecânica e ultrasônica) - Agitação eletromagnética, gasosa ou mecânica (campo magnético, oscilação da tocha, borbulhamento, pulsação do arco e impacto das gotas)	c a c
Métodos químicos - Adição de elementos de liga - Adição de inoculantes no metal líquido	a b a c

(*) **a** – introdução de pontos nucleantes na poça (nucleação heterogênea); **b** – evitar refusão dos núcleos existentes e **c** – multiplicação de grãos.

Embora todos os métodos propostos acima apresentem resultados satisfatórios sobre o granulometria da **ZF**, é de suma importância que se tenha a preocupação de selecionar uma técnica que permita o refino desta região sem afetar negativamente a sua sub-estrutura, ou seja, é desejável a aplicação de um procedimento de soldagem que propicie o refino estrutural através do controle da taxa de resfriamento da poça (relação do produto $R_s \cdot G$ com o calor aportado). Por este enfoque, a escolha pela pulsação de corrente (pulsação do arco) vem se caracterizando como uma técnica muito promissora nesta direção (Street, 1990; Sundaresan et al, 1999).

A técnica de pulsação de corrente aplicada nos processos de soldagem *TIG*, *MIG/MAG* e *Arame tubular (AT)* é reportada como uma excelente controladora do refinamento de grão na **ZF** e na transição do modo de crescimento de colunar para equiaxial, na soldagem do alumínio, do aço carbono, do aço inoxidável e do titânio (Kou, 1987, Villafuerte, 1990; Street, 1990; Sundaresan et al, 1999).

No âmbito do processo de solidificação, referenciando-se ao modo goticular, sob as mesmas condições de operação, a pulsação de corrente atua tanto na redução do calor aportado quanto no grau de agitação da poça de fusão (variação na força eletromagnética). No primeiro, haverá uma influência sobre os valores de **G** e **R_s**, isto é, pelo fato da pulsação de corrente reduzir o calor aportado e elevar a taxa de resfriamento, haverá um acréscimo na relação **R_s.G** e, com isso, tendendo-se a um refinamento dos espaçamentos entre os ramos dendríticos (refinamento estrutural) e a uma redução na forma de crescimento colunar em face do favorecimento ao crescimento equiaxial dendrítico.

Para o caso do efeito da pulsação sobre a agitação da poça de fusão é previsto que uma variação no nível de corrente (oscilação entre o *pulso* e a *base*) irá influenciar na força eletromagnética (campo de velocidade no interior da poça), na pressão do arco sobre a superfície da poça e na frequência de colisão das gotas com a poça. Estas três características provocam um aumento no grau de agitação da poça e, como possíveis conseqüências, uma redução nos níveis de penetração, porosidade e macrosegregação. Somando-se a isso, há o efeito da agitação da poça sobre a fragmentação de dendritas e destacamento de grãos da zona parcialmente fundida. O que se almeja é uma estrutura refinada com melhor característica mecânica e com reduzida possibilidade de surgimento de defeitos (trinca de solidificação, por exemplo).

Com relação a **ZTA** o efeito da pulsação de corrente (redução no valor do calor aportado) é visualizado através da minimização da espessura desta região e no tempo de retenção da temperatura de efetiva recristalização, devida à variação na partição e no ciclo térmico (Kou 1987; Street, 1990). Assim, haverá um menor decréscimo na resistência da zona afetada termicamente, em relação às propriedades originais do metal de base.

Hussain et al (1996), estudando os efeitos da frequência de pulsação e do tempo de pulso, utilizando *MIG pulsado* na soldagem multi-passe da liga Al-Zn-Mg, verificaram que a pulsação convencional de corrente apresenta boa influência

sobre a resistência à fadiga, a resistência mecânica, o nível de porosidade e o refinamento estrutural do metal aportado.

Ghosh et al (1998), avaliando o efeito do *MIG pulsado* na soldagem de revestimento inoxidável, chegaram a conclusões semelhantes, ressaltando para este caso a melhoria obtida na resistência à corrosão intergranular e redução na segregação no contorno de grão da matriz, no nível de diluição e no perfil de dureza na interface *revestimento-metal de base*.

Nos dois casos acima, a seleção correta do pacote operacional “ótimo” teve como consideração não só a estabilidade na transferência metálica, mas também, a sua conseqüente resposta estrutural.

Street (1990), estudando o processo *TIG pulsado*, relata que o valor do ótimo pulso de corrente é dependente das propriedades do material, principalmente da difusividade térmica, independentemente da espessura do metal de base. Contudo, para o processo *TIG* em corrente contínua, o valor da corrente de soldagem apresenta dependência com a espessura.

Lucas (1982) e Street (1990) propuseram a utilização de uma forma complexa de onda de pulsação (figura 3.7(a)), quando da soldagem de passe de raiz em juntas espessas. A onda proposta se caracteriza por três distintas regiões. A primeira região apresenta uma intencional sobre-corrente, cuja função é de formar a poça e melhorar a rigidez do arco, contribuindo para uma rápida penetração. A segunda região da onda de pulsação tem a finalidade de controlar a penetração obtida na primeira região. Porém, a intensidade da corrente utilizada será função do metal de base (óxido superficial) e da profundidade de penetração desejada. Por fim, quando o nível de penetração é alcançado, haverá uma redução na corrente para o valor de base (com modulação de 1 a 10 Hz), com inclinação dependente da sensibilidade do material ao surgimento de trinca ou porosidade. Esta modulação, próxima da frequência de ressonância da poça, promove a agitação do metal líquido, gerando um choque na frente de crescimento e propiciando o crescimento de grãos equiaxiais, reduzindo a formação de grãos colunares e controlando o nível de segregação (figura 3.7(b)).

Outra forma de controle do refino da poça, utilizando *TIG pulsado*, é obtida pela implementação da pulsação de corrente em alta frequência (1 a 10 kHz). Nesta frequência de áudio, a propagação de distúrbios sônicos no interior da poça

de fusão mecanicamente afeta o processo de solidificação, havendo um aumento no processo de fragmentação dos ramos dendríticos (Lucas, 1982; Street, 1990).

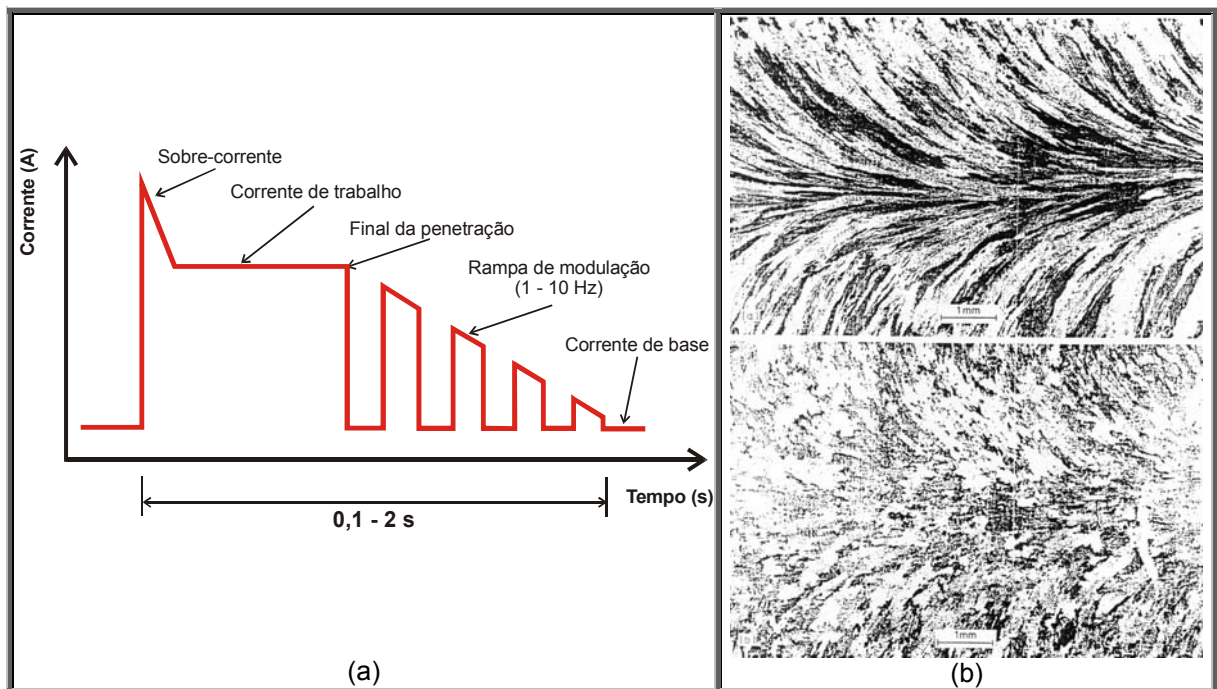


Figura 3.7 – Representação da onda com modulação para controle da solidificação (a) e forma de crescimento obtido na **ZF** sem e com a aplicação rampa de modulação em 10 Hz (b), no aço inoxidável AISI 316. Extraído de (Lucas, 1982; Street, 1990).

Street (1990), Dutra et al (1995), Sundaresan et al (1999) e Madhusudhan et al (2000) sugerem que o processo de pulsação de corrente com imposição de modulação (*pulsação térmica*), nos processos *TIG*, *MIG/MAG* e *Arame tubular (AT)*, é mais efetiva no processo de refinamento estrutural. Estas considerações, no entanto, estão bem documentadas apenas na soldagem *TIG*. Esta lacuna quanto aos possíveis efeitos metalúrgicos da aplicação da pulsação térmica no processo *MIG/MAG*, talvez, se deva à complexidade envolvida com a introdução de transferência de massa e seleção do pacote operacional “ótimo”.

Baseado nas informações sobre os efeitos da *pulsação térmica* no processo *TIG* é esperado que a referida variante, quando implementada no processo *MIG/MAG*, atue sobre o grau de agitação da poça de fusão, através da acentuação dos mecanismos citados anteriormente (força eletromagnética, força de flutuação, força devida à tensão superficial, pressão do arco e impacto da gota metálica).

Street (1990) chama a atenção para a importância na forma de chaveamento entre os períodos de *pulso* e *base térmica*, na soldagem *TIG*. O autor comenta que em materiais com susceptibilidade ao aparecimento de trincas ou porosidade a modulação de corrente entre os períodos deverá ser gradual.

Alguns autores fazem menção sobre a possibilidade da soldagem de chapas finas, empregando a *pulsação térmica*, estar relacionada com a alteração na tensão superficial e viscosidade da poça, entre os períodos de *pulso* e de *base térmica*, isto é, na fase de *pulso térmico* haverá uma fusão mais efetiva (maior penetração), enquanto que na *base térmica* ocorrerá um “resfriamento” da poça (menor penetração), característica originada no processo *TIG* (aquecimento e fusão do metal de base) (Street, 1990; Dutra et al, 1995; Yamamoto et al, 1998). Novamente, os autores não documentam esta afirmação e, principalmente, não levam em conta a presença ou não de elementos de liga (Al e S, por exemplo) que alteram a tensão superficial da poça, quando ocorre um incremento na temperatura.

Esta característica de variação de penetração, proposta anteriormente, foi observada por Threadgill (1979), Barra (1998) e Silva et al (2001) na avaliação da *pulsação térmica* sobre o perfil de diluição. A figura 3.8 apresenta macrografias mostrando o perfil variado de diluição longitudinalmente ao cordão. Threadgill (1979), na soldagem do aço baixo-carbono, relata a ocorrência de refinamento localizado na região da raiz do cordão, no ponto referente ao início do período de *base térmica*. Esta pequena região de refino deve-se ao fato de que os núcleos para a solidificação equiaxial serão estáveis apenas no início deste período. O autor não menciona se houve refino decorrente do reaquecimento cíclico, acima da temperatura de austenitização, de parte da região solidificada (transformação no estado sólido).

Santos (2001) relata que na soldagem *TIG* com *pulsação térmica* é possível atingir mais rapidamente o regime permanente em função das condições térmicas impostas e, ainda, sugere que variação de penetração deixará de ser visível em baixos valores de v_s . Silva et al (2001), utilizando mapas de grau de qualidade, observaram que o perfil variado de diluição, na soldagem *MIG/MAG térmico*, tende a desaparecer com a redução no período de *base térmica*.

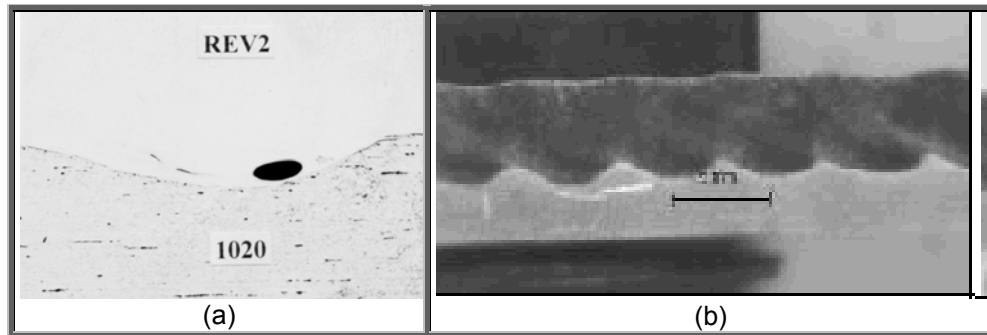


Figura 3.8 – Variação de penetração provocada pelo uso da *pulsação térmica* na soldagem MIG/MAG. Onde: (a) Aço inoxidável 309 depositado sobre aço baixo-carbono e (b) alumínio AWS ER4043 depositado sobre AA 5052. Extraído de (Barra, 1998; Silva et al, 2001).

Becker et al (1979) avaliaram as vantagens metalúrgicas do emprego da pulsação térmica (efeito do espaçamento entre os pulsos térmicos, velocidade de soldagem, tempo e intensidade da corrente de pico na fase térmica), na soldagem TIG do aço baixo-carbono, sobre o controle do processo de solidificação da **ZF**. Os resultados demonstram que o refinamento obtido deve-se claramente à transformação de fase originada pela imposição de sucessivos ciclos térmicos (aquecimento e resfriamento de uma estreita região) passando pela temperatura de austenitização da liga. Também foi observado que o valor de G e R_s variam em função da *pulsação térmica*, sendo o máximo valor atingido no início da *base térmica* (uma ordem de grandeza acima do valor referente ao *pulso térmico*) e o mínimo no final desta fase. Entretanto, como a relação G/R_s não se altera muito haverá apenas o efeito do produto $G.R_s$ que governa o tamanho do espaçamento celular (vide figura 3.9).

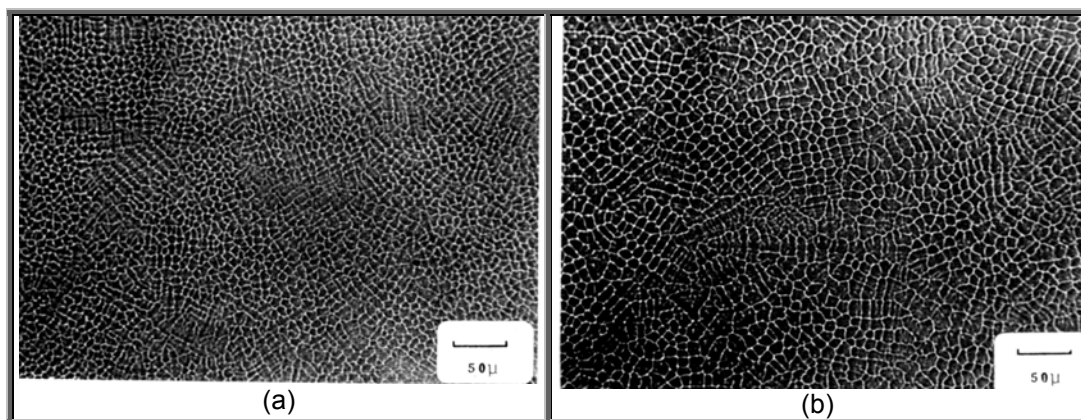


Figura 3.9 – Alteração na estrutura da **ZF** gerado pela variação de $G.R_s$ em função da imposição de pulsação térmica. Onde: (a) início do período de *base térmica* e (b) final do período de *base térmica*. Extraído de (Becker et al, 1979).

O *pulso térmico* atuará também na **ZF** como se fosse um novo cordão a ser depositado sobre uma região já solidificada (referente ao período de *base térmica*). O que resultará provavelmente num efeito equivalente ao da soldagem multi-passe, tanto sobre a região já solidificada do mesmo cordão, quanto nos cordões já depositados adjacentes à poça de fusão (vide novamente a figura 3.6(c)).

Barra (1998), em seu trabalho sobre revestimentos resistentes à cavitação, relata que em decorrência da *pulsação térmica* foi detectada a presença de três regiões em forma de “escamas” na **ZF** (figura 3.10(a)), apresentando diferentes níveis de taxa erosiva. Os depósitos foram confeccionados com a utilização da variante *MIG/MAG Térmico* e arame tubular inoxidável austenítico ligado ao cobalto, como metal de adição. O autor relata que esta variação de resistência ao fenômeno de cavitação, sobre as condições dos ensaios utilizados, não apresenta relação com o tamanho de grão (figura 3.10(b)). Como possíveis causas, o autor enumera a variação da densidade de defeitos cristalinos (falha de empilhamento, por exemplo), o nível de segregação, a variação no aporte térmico, a variação no nível de diluição e o aumento na agitação da poça, decorrentes da *pulsação térmica*, como prováveis agentes dessa diferenciação.

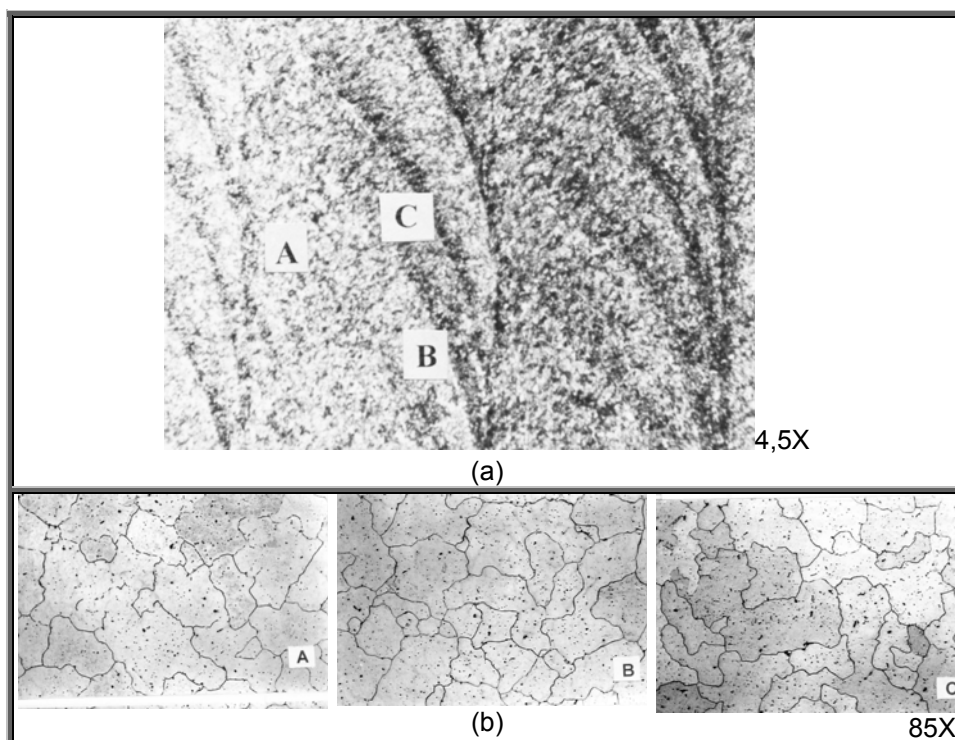


Figura 3.10 – (a) Macrografia mostrando a escamação na estrutura do depósito (regiões A, B e C), oriunda do efeito conjunto da *pulsação térmica* e da soldagem multi-passe e (b) granulometria nas referidas regiões. Extraído de (Barra, 1998).

É esperado que, para as ligas que apresentam transformação de fase no estado sólido, o processo de *pulsação térmica* ofereça ainda um mecanismo adicional de refino da microestrutura. Na soldagem do aço carbono e do aço inoxidável, este refinamento é atribuído aos múltiplos ciclos de temperatura através da faixa de transformação ($\gamma \rightarrow \alpha$ ou $\delta \rightarrow \gamma$).

Sundaresan et al (1999), contudo, observaram que em algumas ligas de titânio α - β a ductilidade não apresenta melhora sobre as condições usuais de soldagem *TIG térmico* (períodos em **CC**), devido no período de alta energia haver um aumento no tamanho dos grãos da fase β e, em baixa energia, um rápido resfriamento e aumento na relação desta fase na estrutura da **ZF**. Um efeito melhorado de refino nesta liga foi obtido com a implementação de *pulsação térmica* em corrente alternada (períodos em **CA**). Os autores conseguiram os melhores resultados de refino, empregando a *pulsação térmica* de corrente, na soldagem da liga *Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo* (vide figura 3.11).

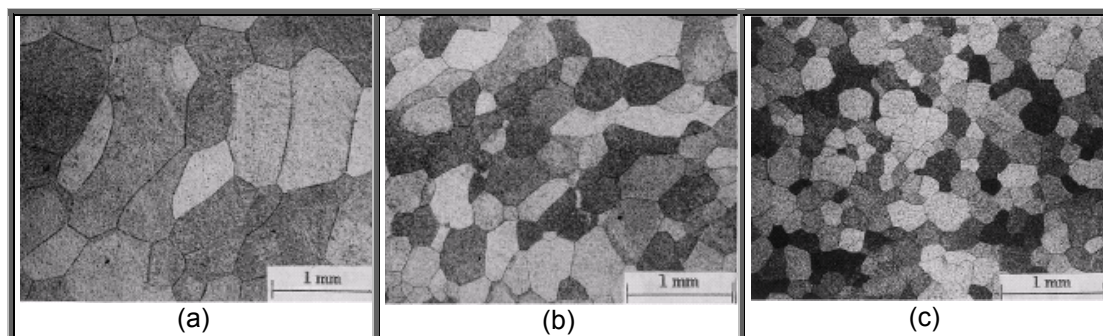


Figura 3.11 – Variações obtidas na granulometria da **ZF** em função da forma de onda de corrente aplicada. Onde: (a) Corrente contínua, (b) *pulsação térmica* (**CC**) e (c) *pulsação térmica alternada* (**CA**). Extraído de (Sundaresan et al, 1999).

Finalmente, com base no exposto anteriormente, é importante salientar mais uma vez que, para o processo *MIG/MAG térmico*, a exata relação entre um possível melhoramento estrutural (conhecimento metalúrgico) e a modulação nos sinais de **Im** e **v_a** (conhecimento de processo) ainda não é bem conhecida. Além disso, os estudos relacionados à *pulsação térmica* normalmente apresentam como foco principal os processos onde não há a ocorrência de transferência de massa (transferência metálica) durante a operação de soldagem. Esta preferência pelo processo *TIG*, por exemplo, recai na menor complexidade envolvida na modelagem ou explicação de um determinado fenômeno.