



FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

ORLANDO PEREIRA VILAS BÔAS

**APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE SOLDAGEM DE CHAPAS EM
AÇO CARBONO**

Salvador,
2015

ORLANDO PEREIRA VILAS BÔAS

**APLICAÇÃO DE VIBRAÇÃO NA EXECUÇÃO DE SOLDAGEM DE CHAPAS EM
AÇO CARBONO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Tecnologia Senai CIMATEC, como um dos pré-requisitos necessários à obtenção do grau de Especialização em Engenharia de Soldagem.

Orientador: Eng^o Mec. Dr. Charles Chemale Yurgel

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Professor Eng^o Mec. Dr. Manoel Carreira Neto _____

FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

Professor Eng^o Mec. Dr. Carlos Augusto de Souza _____

FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI CIMATEC

Salvador,
2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC

V695a Vilas Bôas, Orlando Pereira

Aplicação de vibração na execução de soldagem de chapas em aço carbono / Orlando Pereira Vilas Bôas. – Salvador, 2014.

48 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Charles Chemale Yurgel.

Orientador: Prof. MSc. Manoel Teodoro Belitardo Pereira.

Monografia (Especialização em Engenharia de Soldagem) – Programa de Pós-Graduação, Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador, 2014.

Inclui referências.

1. Soldagem. 2. Vibração mecânica - Soldagem. 3. Refino de grãos – Soldagem. 4. Aumento de resistência – Processo de soldagem. I. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. II. Yurgel, Charles Chemale. III. Pereira, Manoel Teodoro Belitardo. IV. Título.

CDD: 671.52

AGRADECIMENTOS

A Deus e a nossa família pelo apoio em todos os momentos difíceis durante a execução deste projeto de dissertação.

Ao meu Professor Eng^o Mec. MS. Manoel Teodoro Belitardo pelo encorajamento e entusiasmo transmitido, a companheira de jornadas e principal motivadora Teng. Stephany Freire pela orientação técnica.

Aos colegas do SENAI / CIMATEC no encorajamento, apoio e orientação técnica.

A Empresa Caraíba Metais pela disposição em ajudar apoiando tecnicamente nos nossos estudos e experimentos.

RESUMO

O presente trabalho contém uma revisão bibliográfica de temas como: nucleação no processo de soldagem, refinamento de grãos e propriedades mecânicas e técnicas de refinamento de grãos na soldagem com o intuito de respaldar e justificar a realização do procedimento experimental. Para a avaliação dos resultados obtidos com este procedimento experimental, realizaram-se uma análise metalográfica, testes de tensão até a ruptura, e dobramento artesanal até a ruptura, onde se verificaram alterações no perfil do cordão de solda e na ZF que tem como objetivos avaliar a microestrutura da zona fundida (ZF) de um cordão de solda depositado sobre uma chapa de aço carbono AISI 1020, aplicando-se níveis conhecidos de frequência da vibração mecânica no sistema no momento da soldagem com o intuito de refinar os grãos da ZF. Sua aplicação prática na Indústria visando redução de custos e aumento de produtividade.

Palavras-Chave: Soldagem. Vibração. Aumento de resistência mecânica. Refino dos grãos. Cinta de fundição. Aumento de produção.

ABSTRACT

This job contains a bibliographic review of subjects as nucleation in the welding process, grain refinement and mechanical properties and grain refinement techniques in welding in order to endorse and justify the accomplishment of the experimental procedure. For the evaluation of the results obtained with this experimental procedure, there were one metallographic analysis, stress tests to break, and handmade folding until the break, where there have been changes in the weld bead profile and FA aims to evaluate the microstructure of the fused area (FA) of a weld bead deposited on carbon steel sheet AISI 1020, applying known frequency of the mechanical vibration levels in the system at the time of welding in order to refine the grains of FA. Its practical application in industry to reduce costs and increase productivity.

Keywords: Welding. Vibration. Increased mechanical resistance. Refining of grains. Belt casting. Production increase.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CRESCIMENTO EPITAXIAL HETEROGÊNEO EM UM AÇO INOXIDÁVEL.	16
FIGURA 2 - FRAGMENTAÇÃO DENDRÍTICA.	17
FIGURA 3 - NUCLEAÇÃO HETEROGÊNEA NUMA LIGA DE ALUMÍNIO	18
FIGURA 4 - MOVIMENTAÇÃO DE DISCORDÂNCIAS DE UM GRÃO PARA OUTRO.	20
FIGURA 5 - EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO DE LIGAS DE FE VERSUS LIGAS DE AL.....	21
FIGURA 6 - TAMANHO DE GRÃO E DUREZA, AÇO AISI 52100.	22
FIGURA 7 - TENSÃO LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (LRT) E A DUREZA.	23
FIGURA 8 – TAMANHO DE GRÃO E TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL	24
FIGURA 9 - MODO DE SOLIDIFICAÇÃO	25
FIGURA 10 - NUCLEAÇÃO HETEROGÊNEA	26
FIGURA 11 - EFEITO DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO DO ARCO ELÉTRICO	27
FIGURA 12 - ESQUEMA DA NUCLEAÇÃO SUPERFICIAL ESTIMULADA.....	28
FIGURA 13 - APLICAÇÃO DE UM CAMPO ELETROMAGNÉTICO.....	29
FIGURA 14- EFEITOS DA AGITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	29
FIGURA 15 - AGITAÇÃO ULTRASSÔNICA.....	30
FIGURA 16 - APARATO DE SOLDAGEM AUTOMATIZADA.....	33
FIGURA 17 - VIBRADOR PNEUMÁTICO.....	33
FIGURA 18 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO VIBRADOR PNEUMÁTICO	34
FIGURA 19– FIXAÇÃO DO VIBRADOR NA BANCADA.....	34
FIGURA 20 - MEDIÇÃO DA VIBRAÇÃO.....	35
FIGURA 21 - ESQUEMA ILUSTRANDO A RETIRADA DAS AMOSTRAS	35
FIGURA 22 - MACROGRAFIA DAS AMOSTRAS SOLDADAS	36
FIGURA 23 – MICROGRAFIAS DA ZONA FUNDIDA.....	36
FIGURA 24 - EVOLUÇÃO DA DUREZA MÉDIA (HV)	37
FIGURA 25- DUREZA (HV) VERSUS FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO (Hz).....	38
FIGURA 26 - SISTEMA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO HAZELETT	39
FIGURA 27 - MÁQUINA AUTOMÁTICA TIG DO FABRICANTE JETLINE.....	40
FIGURA 28 - CHAPA CINTA SOLDADA E PRONTA PARA A OPERAÇÃO	40
FIGURA 29 – CHAPA CINTA DE AÇO CARBONO SOLDADAS	42
FIGURA 30 - AMOSTRAS DE CINTA PADRONIZADAS	42
FIGURA 31 - TESTE DE DOBRAMENTO ARTESANAL ATÉ RUPTURA	43
FIGURA 32 - TESTE LABORAL DE TRAÇÃO ATÉ A RUPTURA	44
FIGURA 33 - ETAPAS DE SOLDAGEM COM O VIBRADOR MECÂNICO	45

FIGURA 34 – COMPARATIVO ENTRE OS DOBRAMENTOS ATÉ RUPTURAS.....	46
FIGURA 35 - COMPARATIVO ENTRE AS TRAÇÕES ATÉ RUPTURAS.	46

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- PARÂMETROS PARA SOLDAGEM MAG	32
QUADRO 2 - MÉDIA DE DUREZA (HV) ENCONTRADA	37
QUADRO 3 - PARÂMETROS PARA SOLDAGEM TIG	41
QUADRO 4 - DOBRAMENTO ATÉ RUPTURA (SEM VIBRAÇÃO)	43
QUADRO 5 - TRAÇÃO ATÉ RUPTURA (SEM VIBRAÇÃO)	44
QUADRO 6 - DOBRAMENTO ATÉ RUPTURA (COM VIBRAÇÃO)	45
QUADRO 7 - TRAÇÃO ATÉ RUPTURA (COM VIBRAÇÃO).....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMA	13
1.2 HIPÓTESE	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Geral	14
1.3.2 Específicos	14
1.4 METODOLOGIA DO TRABALHO	14
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 PROCESSO DE SOLDAGEM	16
2.1 MECANISMO DE NUCLEAÇÃO	16
2.2 FRAGMENTAÇÃO DENDRÍTICA	17
2.3 NUCLEAÇÃO HETEROGÊNEA.....	17
2.3.1 Destacamento	18
2.3.2 Nucleação superficial	18
2.4 EFEITO DO REFINAMENTO DE GRÃO.....	18
2.4.1 Aumento da resistência mecânica	19
2.4.2 Tensão de escoamento	19
2.4.3 Dureza	22
2.4.4 Tensão limite de resistência à tração	23
2.4.5 Tenacidade	23
2.5 TÉCNICA DE REFINAMENTO DE GRÃOS.....	25
2.5.1 Inoculação	26
2.5.2 Oscilação do arco elétrico	27
2.5.3 Pulsação do arco elétrico	27
2.5.4 Nucleação superficial estimulada	28
2.5.5 Excitação eletromagnética	28
2.5.6 Excitação ultrassônica	29
2.5.7 Vibração mecânica	30
3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM.....	32
3.2 METALOGRAFIA	35
3.3 ENSAIO DE DUREZA	36
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	38
4 APLICAÇÃO PRÁTICA DO ESTUDO DE CASO	39
4.1 TESTE COMPARATIVO	41
4.1.1 Processo padrão	41
4.1.2 Processo com vibração	44
4.2 VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE LABORATORIAL.....	46
4.3 ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CUSTO.....	47
4.4 AUMENTO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO.....	47
5 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O refinamento de grão acarreta mudanças nas propriedades mecânicas dos aços. Técnicas de refinamento de grão na soldagem são bastante utilizadas com este intuito e a agitação mecânica é uma delas. Trata-se de um processo físico de incrementar a agitação da poça de fusão através de ondas mecânicas que resultará em mudanças no fluxo de calor na soldagem. Este trabalho visa verificar os efeitos que a vibração mecânica tem sobre o refino microestrutural da zona fundida do cordão de solda.

1.1 PROBLEMA

Através de dados estatísticos do plano de manutenção da Caraiba Metais foi traçado este estudo de caso específico com aplicação prática na possível busca da solução do problema em que as chapas cintas unidas por soldagem rompem a cada batelada de arraste dos lingotes de cobre durante a produção. A solda com arco elétrico apresenta algumas imperfeições na soldagem dos cordões por motivos técnicos operacionais resultando às vezes em soldas fragilizadas.

1.2 HIPÓTESE

A melhoria na uniformidade do cordão de solda durante a deposição do material de adição e o refino da zona fundida pode resultar em soldas mais consistentes aumentando a vida útil entre trocas de cinta menos fragilizadas com maior resistência à tração e a flexão no cordão da cinta soldada.

1.3 OBJETIVOS

Aumentar o tempo de troca da chapa cinta de arraste do lingoteamento durante o processo de produção, e ganho no tempo de produção é o objeto proposto deste projeto de estudo.

1.3.1 Geral

Melhorar a qualidade da soldagem elétrica em peças e equipamentos, aplicando a vibração pneumática controlada nas frequências desejadas que possa melhorar a resistência deste cordão durante o processo de união, neste caso, cinta de arraste em aço carbono com união soldada.

1.3.2 específicos

Aumentar a qualidade da soldagem em peças e equipamentos como chapas, tubulações de aço carbono, estruturas metálicas, componentes de equipamentos e caldeiraria em geral atuando diretamente nos seguintes fatores:

- Aumentar a dureza da zona fundida.
- Aumentar a tenacidade.
- Aumentar a resistência à tração.
- Aumentar a resistência à fadiga por dobramento.

1.4 METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia utilizada neste trabalho é baseada em:

- Levantamento de dados e informações no banco de dados do SENAI / Cimatec e Caraíba Metais.
- Pesquisa bibliográfica utilizando para isto sites abertos na Internet, e sites específicos na área de soldagem.
- Pesquisa na biblioteca SENAI / Cimatec conforme autores referenciados.
- Contatos e troca de informações presenciais, por e-mail com consultores, e especialistas técnicos internos SENAI / Cimatec.e Caraíba Metais.
- Experimento prático na Caraíba Metais com análise dos resultados.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos:

O primeiro capítulo apresenta a introdução do trabalho, descrevendo o objetivo, justificativa, metodologia e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo trata de uma revisão bibliográfica sobre os mecanismos de nucleação presentes no processo de soldagem, o efeito do refinamento de grão nas propriedades mecânicas dos aços e as técnicas de refinamento de grão utilizadas no processo de soldagem, conforme autores referenciados.

O terceiro capítulo descreve o procedimento experimental de soldagem realizado numa chapa aço carbono SAE 1020, esp. $\frac{3}{4}$ ", bivelada, 200 x 200 mm, com e sem vibração, cortada em corpos de provas com o intuito de verificar as consequências da vibração mecânica no refino da zona fundida durante o processo de deposição do metal.

O quarto capítulo descreve um teste comparativo de soldagem numa chapa aço carbono SAE 1020, esp. $\frac{1}{16}$ ", 500 x 600 mm, com e sem vibração, cortada em corpos de provas com o intuito de verificar a possibilidade de aumentar a vida útil da chapa cinta de arraste do equipamento descrito neste trabalho.

O quinto capítulo discute os resultados obtidos nos dois experimentos, apresentando as conclusões.

2 PROCESSO DE SOLDAGEM

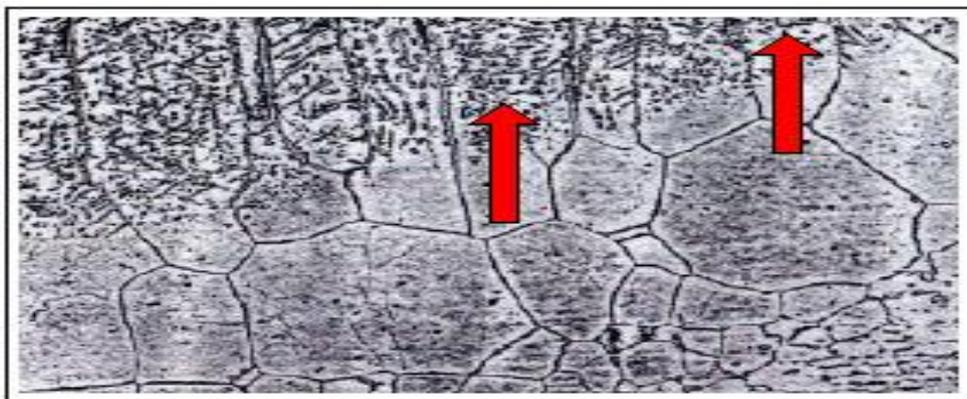
O fenômeno da solidificação neste processo de soldagem pode ser dividido em duas etapas a nucleação da fase sólida, e o posterior crescimento desta fase sólida estável durante o processo de resfriamento natural da poça.

2.1 MECANISMO DE NUCLEAÇÃO

O processo de nucleação pode ser classificado como homogêneo ou heterogêneo a depender de como ocorre o evento da nucleação se ocorre sem ou com a presença de impurezas, inoculantes, e ou superfícies externas. (VEDIA, SVOBODA, 2004). De um modo geral a nucleação homogênea em metais líquidos ocorre somente sob condições bastante controladas de solidificação, e em metais puros. Para que ocorra a formação de uma partícula sólida estável que vai começar a crescer um conglomerado de átomos no líquido deve atingir um tamanho mínimo, e a este tamanho mínimo denominou-se raio crítico (ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 2003).

A nucleação heterogênea acontece quando a solidificação ocorre a partir de superfícies pré-existentes, tais como as paredes do molde no processo de fundição ou quando da presença de partículas sólidas no líquido. Na soldagem é comum acontecer o crescimento epitaxial que é um processo de nucleação heterogênea, onde, um embrião sólido do metal de solda se forma a partir da superfície do grão do metal de base parcialmente fundido (figura 01), (VEDIA, SVOBODA, 2004; SAVAGE, 1965 *apud* MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2006).

Figura 1 - Crescimento epitaxial heterogêneo em um aço inoxidável.



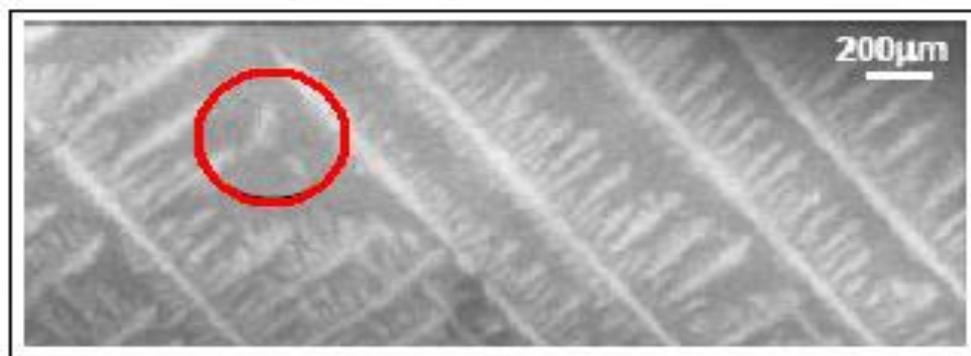
Fonte: Vedia e Svoboda (2004)

2.2 FRAGMENTAÇÃO DENDRÍTICA

A seguir serão brevemente discutidos os mecanismos de nucleação heterogênea que podem ocorrer no processo de soldagem com fragmentos de dendrita, e agir como núcleo para formação de novos grãos. Para tanto, devem conseguir sobreviver à temperatura da poça de fusão durante o processo de resfriamento natural. As próprias forças de convecção inerentes ao processo de soldagem ao arco elétrico podem a princípio causar a fragmentação dendrítica (figura 02), (KOU, 2003). A convecção gera flutuações de temperatura no metal líquido, e aumentar a temperatura em volta das dendritas em crescimento.

A temperatura de fusão dos braços secundários da dendrita em relação à sua raiz é menor em função da alta concentração de soluto e do seu pequeno raio de curvatura, fato que causa a fusão dos mesmos, e sua separação da dendrita em crescimento (FEMINGS, 1968 *apud* DÜNDAR, 2003). Os braços de dendrita destacados são carregados pela corrente de convecção e podem iniciar o crescimento de novos grãos em direções aleatórias (DÜNDAR, 2003).

Figura 2 - Fragmentação dendrítica.



Fonte: Li *et al*,2006.

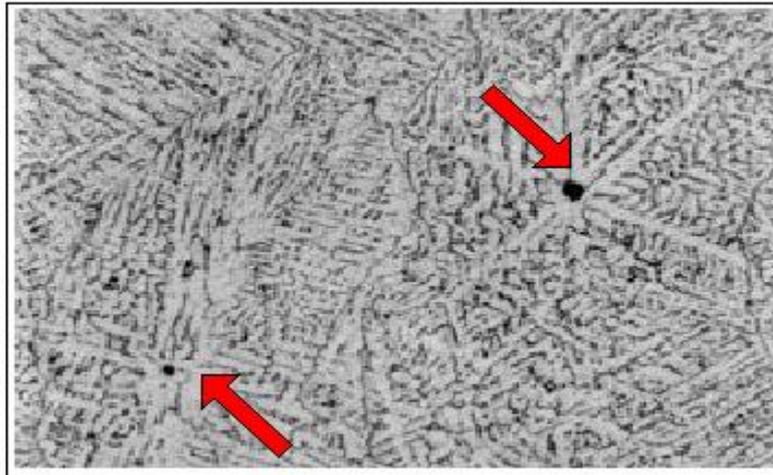
2.3 NUCLEAÇÃO HETEROGÊNEA

A convecção na poça de fusão também pode ocasionar o destacamento de grãos da zona parcialmente fundida do metal de base. Esses grãos, assim como os braços de dendrita, podem agir como núcleos de formação de novos grãos no metal de solda, e resistir à temperatura da poça de fusão durante o processo de deposição do metal com resfriamento normal (KOU, 2003).

2.3.1 Destacamento

A nucleação heterogênea na soldagem ocorre em função da presença de corpos estranhos na poça de fusão, tais como inoculantes ferrosos (figura 3), (WANG E CHOU, 2007; KOU, 2003; UNDOPHOI, 2007). Nucleação heterogênea numa liga de alumínio 6061 soldada pelo processo TIG.

Figura 3 - Nucleação heterogênea numa liga de alumínio



Fonte: Kou, 2003.

2.3.2 Nucleação superficial

A nucleação superficial na poça de fusão pode ser induzida pela exposição desta a um jato de gás arrefecedor ou pela redução ou remoção instantânea do calor aportado (*heat input*). Este núcleo sólido pode transformar-se em novos grãos quando lançado ao interior da poça de fusão pelas forças de convecção (KOU, 2003; UNDOPHOI, 2007).

2.4 EFEITO DO REFINAMENTO DE GRÃO

O tamanho do grão diz muito sobre o material a idéia de que o tamanho do grão afeta as propriedades mecânicas dos aços permeia a mente da humanidade há centenas de anos. Desde 800 d.C os metalurgistas orientais utilizavam o aspecto macrográfico do componente produzido para avaliar a sua qualidade (AZEVEDO; CAMPOS, 2007).

Os ferreiros utilizavam tratamentos térmicos para aumentar a durabilidade das espadas produzidas (COCHRANE; NAYLOR, 2008). Entretanto, somente com o avanço dos estudos de metalurgia, e o surgimento de técnicas como a metalografia é que esta idéia deixou de ser intuição para se tornar uma verdade científica.

Métodos de refinamento de grão começaram a ter uma maior atenção quanto à pesquisa e desenvolvimento no início do século XX. Nesta época sua utilização voltava-se ao aumento da qualidade de peças de aço fundida (COCHRANE; NAYLOR, 2008).

2.4.1 Aumento da resistência mecânica

Para que o mecanismo de aumento da resistência mecânica dos metais seja entendido, deve-se compreender a relação entre o movimento das discordâncias e o comportamento mecânico destes. Visto que a deformação plástica de um componente metálico corresponde ao movimento de um grande número de discordâncias, segundo (CALLISTER, 2002), “a habilidade de um metal para se deformar plasticamente depende da habilidade das discordâncias para se moverem”.

A resistência mecânica está relacionada à indução de deformação plástica por intermédio da redução da mobilidade das discordâncias. Quanto mais livre estiver o movimento das discordâncias, maior será a facilidade com que um componente metálico poderá se deformar (CALLISTER, 2002; VAN VLACK, 1984). As técnicas de aumento de resistência mecânica têm como base o princípio de dificultar o movimento de discordâncias (CALLISTER, 2002; VAN VLACK, 1984). Portanto, é nisso que também se baseia o aumento da resistência mecânica de metais através do refinamento do grão.

2.4.2 Tensão de escoamento

Em meados dos anos cinquenta, dois cientistas, E.O. Hall e N.J. Petch, trabalhando independentemente um do outro, desenvolveram estudos que posteriormente vieram a culminar na lei que revolucionou o estudo do tamanho de grão, a Lei de Hall-Petch, que trata da relação entre o tamanho do grão e a tensão

de escoamento do material. Esta lei diz que com a diminuição do tamanho de grão aumenta-se a resistência ao escoamento do material. A Lei de Hall-Petch é descrita matematicamente pela seguinte equação (MEIER, 2004; ZHAO *et al*, 2005):

Onde:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad \text{:(Eq. 1)}$$

σ_y = Tensão limite de escoamento (MPa).

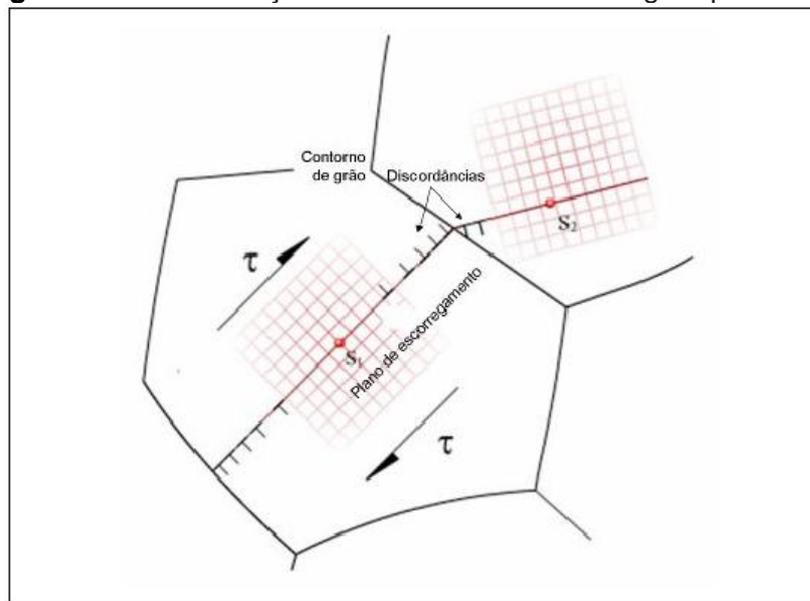
σ_0 = Tensão limite de escoamento de um único cristal (MPa).

k_y = Constante de cada material (adimensional).

d = Diâmetro do grão (mm).

Esta lei baseia-se no princípio de que o contorno de grão atua como barreira ao movimento das discordâncias pelos motivos básicos a seguir:

Figura 4 - Movimentação de discordâncias de um grão para outro.



Fonte: Cochrane e Naylor, 2002.

- Grãos adjacentes possuem orientações cristalográficas diferentes, portanto uma discordância terá que mudar sua direção de movimento para passar de grão em grão o que proporciona o empilhamento destas no contorno de grão. (CALLISTER, 2002; WIKIPEDIA, 2008).

- A desordem atômica nos contornos de grão resulta numa descontinuidade de planos de escorregamento entre um grão e outro (CALLISTER, 2002; WIKIPEDIA, 2008).

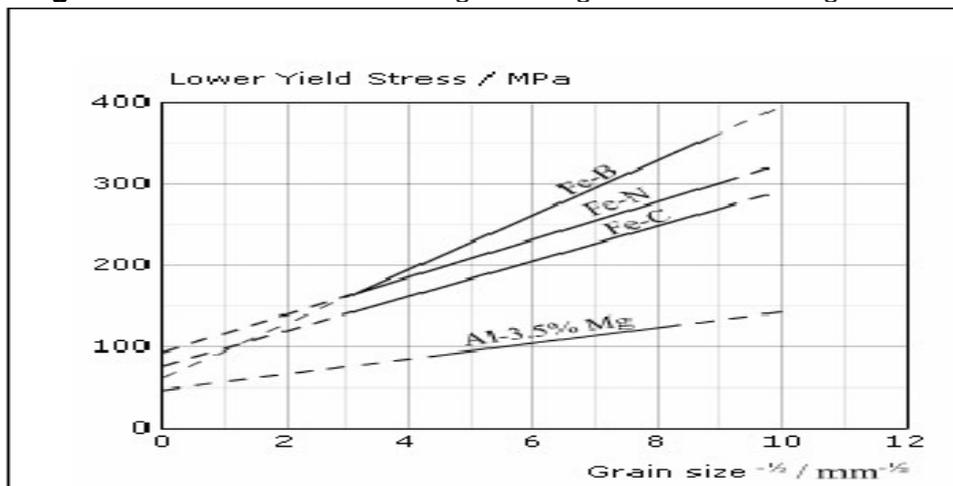
- Menor tamanho de grão significa um menor caminho livre médio para movimentação de discordâncias, promovendo o empilhamento destas nos contornos. (ASKELAND, PHULÉ, 2004).

- Quanto maior for o ângulo entre as orientações cristalográficas de um grão para outro, maior será a dificuldade para as discordâncias atravessarem os contornos de grão (CALLISTER, 2002; COCHRANE; NAYLOR, 2008). A figura 04 esquematiza o fato;

Muitos outros estudos já confirmaram a relação de Hall-Petch em uma variedade de metais e ligas. O mais completo estudo para aços ferríticos é o de W.B. Morrison em 1983, que confirmou a validade da Lei de Hall-Petch para grãos com diâmetros de 1,5 a 150 μm . (COCHRANE, NAYLOR 2008).

Ligas diferentes possuem respostas diferentes ao refinamento do grão, como mostra o gráfico, portanto para algumas ligas, como as de alumínio, o decréscimo do tamanho do grão (*grain size*) não apresenta um efeito tão pronunciado no limite de escoamento (*yield stress*), quanto em relação às ligas de ferro, cabendo a este outro tipo de mecanismo para aumentar a sua resistência (figura 05), (MEIER, 2004; COCHRANE; NAYLOR, 2008).

Figura 5 - Efeito do tamanho de grão de ligas de Fe versus ligas de Al.



Fonte: Cochrane e Naylor, 2002.

2.4.3 Dureza

A dureza é definida pela ASM - American Society for Metals (1993), como a propriedade do material de resistir à deformação permanente. Portanto, a explicação para a dureza aumentar com a diminuição do grão também pode ser associada à Lei de Hall-Petch e, portanto, pode ser representada pela seguinte fórmula (CALLISTER, 2002; WIKIPEDIA, 2007):

Onde:

$$H_y = H_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

(Eq. 2)

H_y = Dureza (HB).

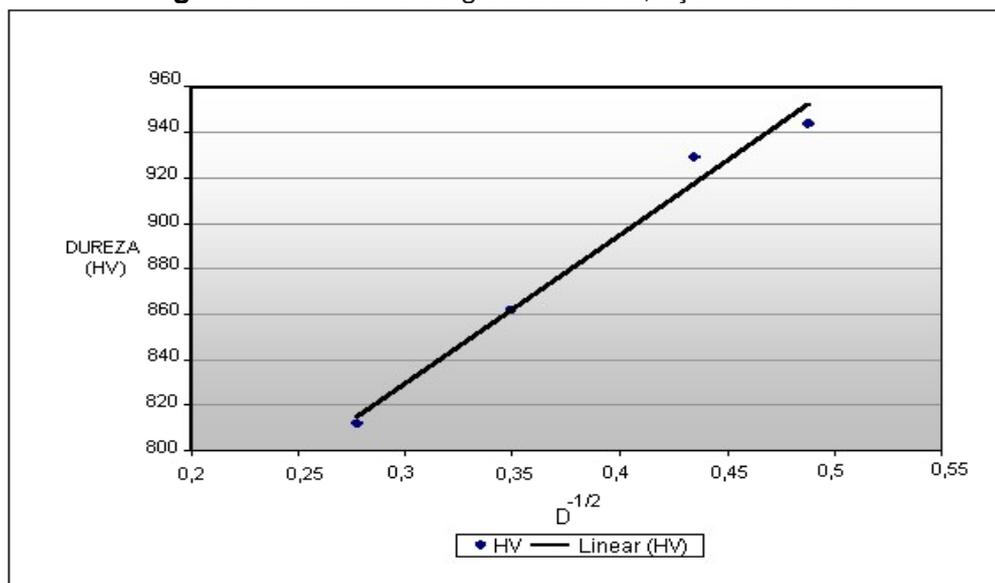
H_0 = Dureza de um único cristal (HB).

k_y = Constante de cada material (adimensional).

d = Diâmetro do grão (mm).

O gráfico demonstra claramente como a variação no tamanho de grão num aço de alto carbono AISI 52100, influencia diretamente nos valores de dureza (HV) (figura 06), (GOLDENSTEIN, 2003).

Figura 6 - Tamanho de grão e dureza, aço AISI 52100.



Fonte: Goldenstein, 2003.

2.4.4 Tensão limite de resistência à tração

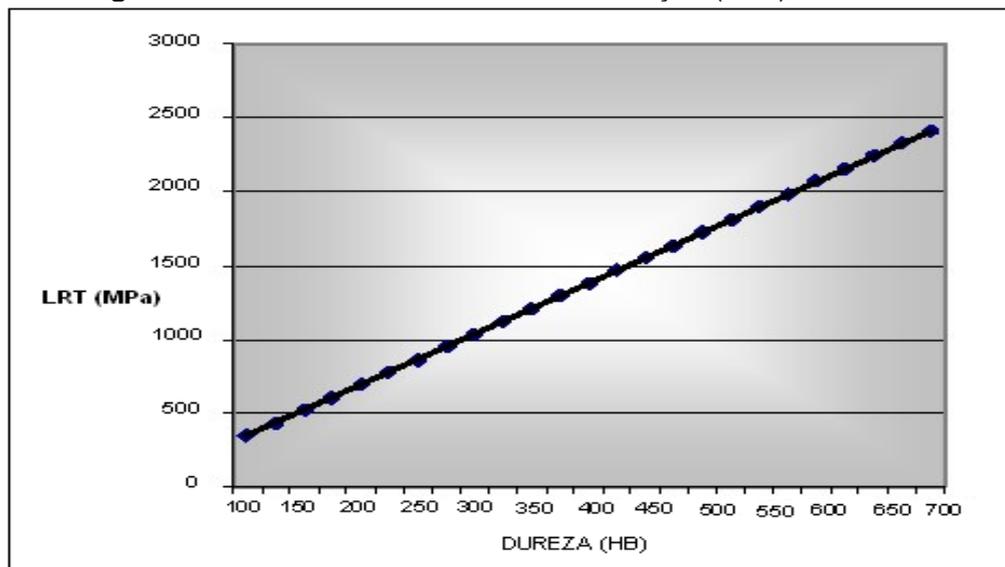
Existe uma equação matemática que relaciona o limite de resistência à tração com a dureza Brinell, e que pode ser aplicada para a maioria dos aços (CALLISTER, 2002).

$$\text{LRT (MPa)} = 3,45 \times \text{HB}$$

(Eq. 3)

Com valores obtidos através desta equação foi criado o gráfico que evidencia a relação direta entre limite de resistência à tração e dureza, (figura 07).

Figura 7 - Tensão limite de resistência à tração (LRT) e a dureza.



Fonte: Callister, 2002

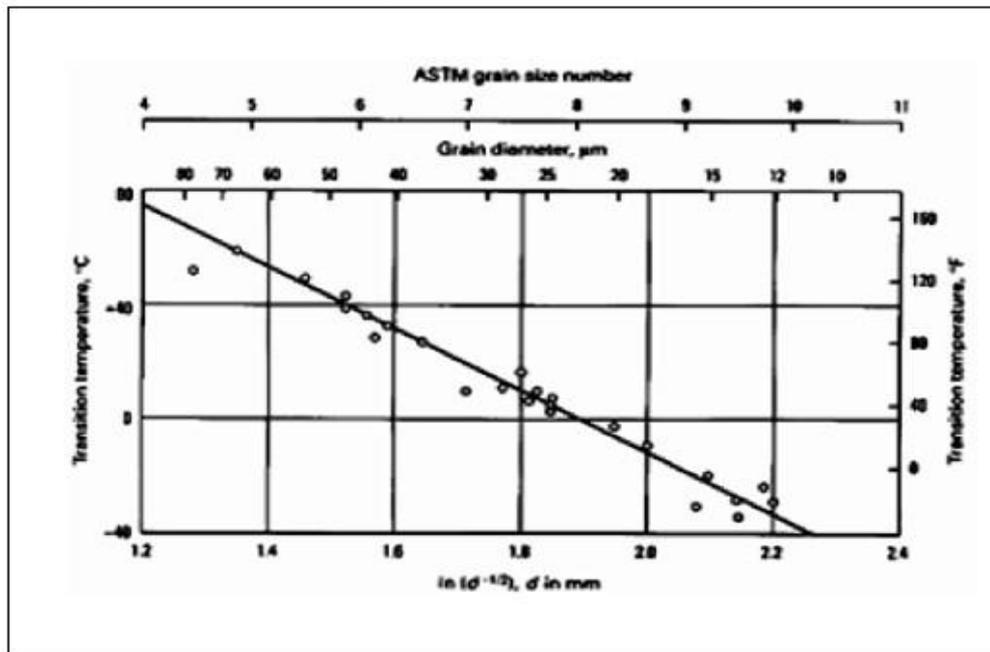
2.4.5 Tenacidade

A tenacidade é definida como a capacidade de um material de absorver energia até a sua fratura (CALISTER, 2002; ASM – AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1993). A tenacidade também pode ser definida como a área sob a curva de tensão x deformação do material, ou seja, uma perfeita associação entre limite de resistência e ductilidade (SILVA, 1999).

Baseando-se nesta definição de tenacidade, e no conceito de que o refinamento do grão aumenta o limite resistência dos aços sem diminuir a sua ductilidade, deduz-se que a tenacidade também será afetada pelo tamanho do grão.

É fato que o tamanho do grão tem efeito sobre a tenacidade. Relativamente poucos estudos foram realizados neste sentido, entretanto todos eles mostram que com o decréscimo do tamanho do grão a temperatura de transição dúctil-frágil também cai, então é possível concluir que além de aumentar a tensão limite de escoamento e a dureza, o refinamento do grão também influi na tenacidade do material, diminuindo a temperatura onde ocorre a transição dúctil-frágil (figura 08), (COCHRANE; NAYLOR, 2008; ASM, 1993). O gráfico demonstra claramente este efeito em um aço carbono.

Figura 8 – Tamanho de grão e temperatura de transição dúctil-frágil



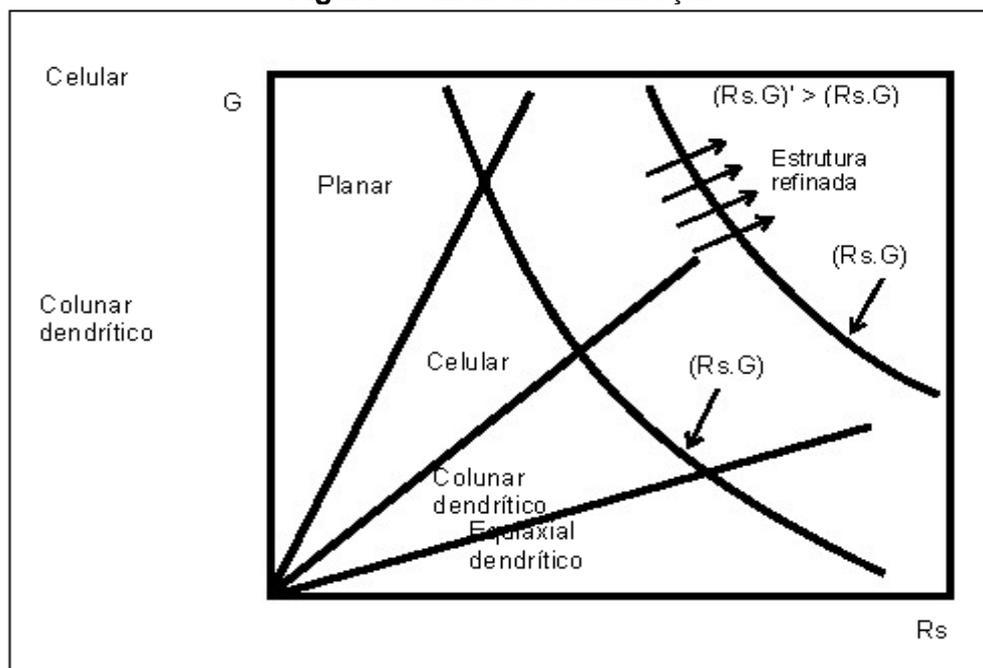
Fonte: ASM, 1993.

2.5 TÉCNICA DE REFINAMENTO DE GRÃOS

Como foi visto anteriormente a estrutura do grão afeta significativamente as propriedades mecânicas do material. Grãos refinados são desejados na maioria das aplicações. É sabido que o gradiente de temperatura na zona fundida (G), e a taxa de crescimento do grão (R), juntos determinam a microestrutura de solidificação de forma que a relação G/R determina o modo de solidificação, e o produto $G.R$ determina o tamanho da microestrutura de solidificação (figura 09), (KOU, 2003; MESSLER, 1999). Os métodos de controle de grão atuam na poça G/R de modo a interferir no tamanho da microestrutura de solidificação.

O modo de solidificação em função do gradiente de temperatura (G), e da taxa de crescimento do grão (R_s), demonstrado no gráfico.

Figura 9 - Modo de Solidificação



Fonte: Adaptado de Kou, 2003.

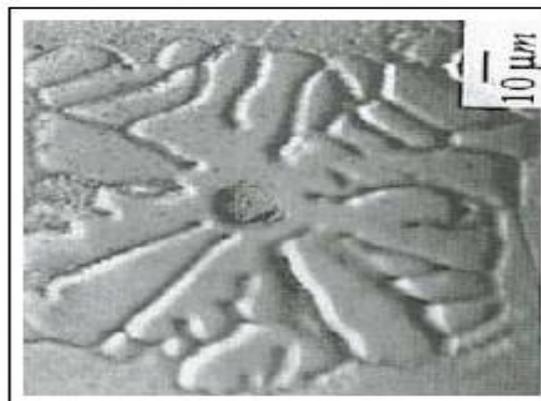
Na soldagem existem alguns métodos de controle de grão que são utilizados com o intuito de evitar a formação de grãos grosseiros, e garantir a continuidade das propriedades do material soldado até diminuir a probabilidade do surgimento de defeitos, como por exemplo o trincamento a quente. Alguns destes métodos serão citados a seguir.

2.5.1 Inoculação

A inoculação consiste em adicionar elementos que funcionarão como agentes de nucleação (inoculantes) no metal líquido a ser solidificado. O resultado desta inoculação é a formação de grãos equiaxiais com estrutura refinada advindos da nucleação heterogênea, inibindo o crescimento epitaxial (figura 10), (KOU, 2003; MESSLER, 1999). O refinamento de grãos através da inoculação é bastante utilizado em fundidos, entretanto existem relativamente poucos estudos sobre seus efeitos na solidificação da poça de fusão.

A nucleação heterogênea num aço inoxidável ferrítico causada pela partícula de TiN (Nitrato de Titânio) no centro.

Figura 10 - Nucleação heterogênea



Fonte: Kou, 2003.

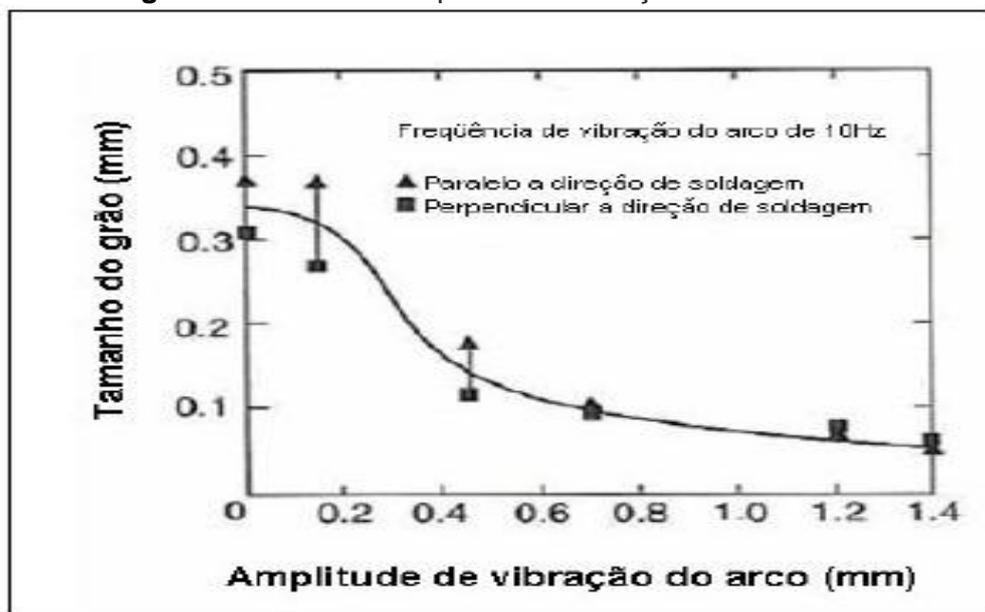
Gregg, Bhadeshia; Svensson, (1997) estudaram os efeitos da inoculação em soldagem de aço carbono com partículas não metálicas, e comprovaram que estas são potenciais formadoras de sítios de ferrita acicular.

Elementos metálicos que possuem alto ponto de fusão como o Titânio, Nióbio e Zircônio, também são utilizados para o refinamento de grãos através da nucleação heterogênea que é mais eficiente na soldagem do que nos fundidos, em função do menor tamanho da poça fundida (WANG; CHOU, 2007; KOU, 2003; UNDOPHOI, 2007).

2.5.2 Oscilação do arco elétrico

A oscilação do arco elétrico pode ser neste caso, produzida magneticamente ou mecanicamente. O refinamento de grão é obtido por nucleação heterogênea através da fragmentação de dendritas. O gráfico demonstra o efeito da amplitude de vibração do arco elétrico, para uma mesma frequência, no tamanho de grão na soldagem de uma liga Al-2.5Mg (figura 11).

Figura 11 - Efeito da amplitude de vibração do arco elétrico



Fonte: (KOU, 2003; UNDOPHOI, 2007).

Pode-se verificar que o tamanho de grão tende a diminuir com o aumento da amplitude de vibração do arco elétrico.

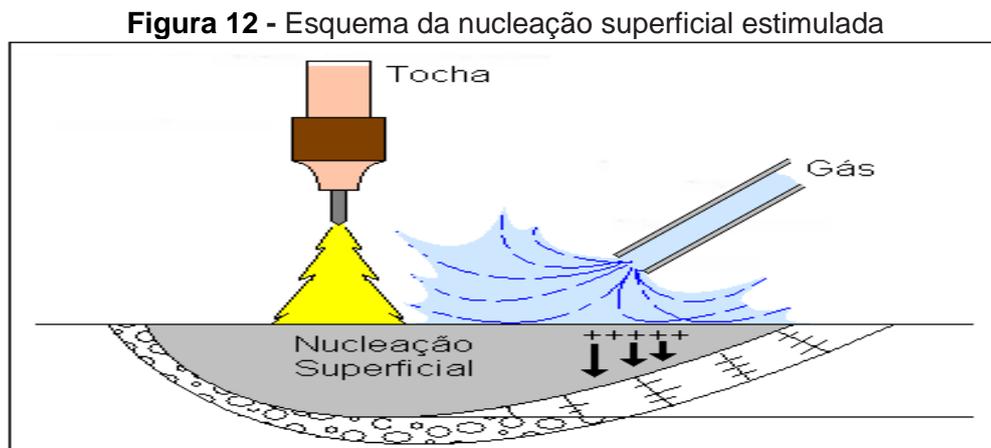
2.5.3 Pulsação do arco elétrico

A soldagem pulsada consiste em ciclar a corrente de soldagem de um alto valor a um baixo valor em uma frequência selecionada. O alto valor da corrente, chamado de corrente de pico, dependendo do processo, geralmente é selecionado para garantir a penetração, evitar a falta de fusão, e o baixo valor de corrente, chamado de corrente de base, deve ter um valor mínimo para manter a estabilidade do arco.

A pulsação da corrente de soldagem tem a vantagem de garantir a energia necessária para a adequada fusão do metal quando se atinge a corrente de pico, e promover uma dissipação do calor quando se atinge a corrente de base podendo diminuir o tamanho da zona termicamente afetada (ZTA), e também o tamanho de grão da zona fundida (SUNDARESAN, RAM e REDDY, 1998; MESSLER, 1999; UNDOPHOI, 2007).

2.5.4 Nucleação superficial estimulada

Esta técnica baseia-se na injeção de um gás inerte resfriado, geralmente argônio, que é direcionado para a superfície da poça de fusão causando um resfriamento localizado que resulta na nucleação de grãos na superfície. Esta pequena nucleação superficial é lançada para dentro da poça de fusão, e cresce podendo formar grãos equiaxiais (figura 12), (KOU, 2003; UNDOPHOI, 2007).



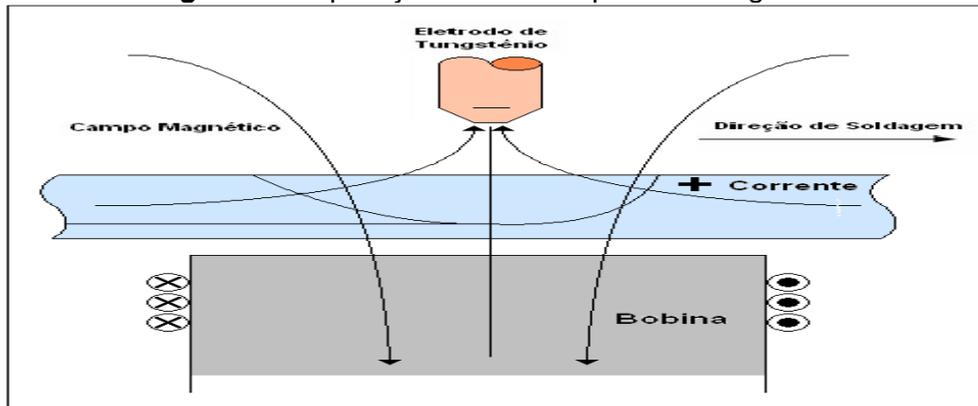
Fonte: Adaptado de Kou, 2003.

2.5.5 Excitação eletromagnética

A agitação da poça de fusão pode ser induzida aplicando-se um campo eletromagnético alternado, paralelo ao eletrodo de soldagem, onde a excitação promovida por este campo tende a uniformizar a temperatura da poça de fusão estimulando a nucleação heterogênea em conjunto com agentes inoculantes. (KOU, 2002; UNDPOPHOI, 2007).

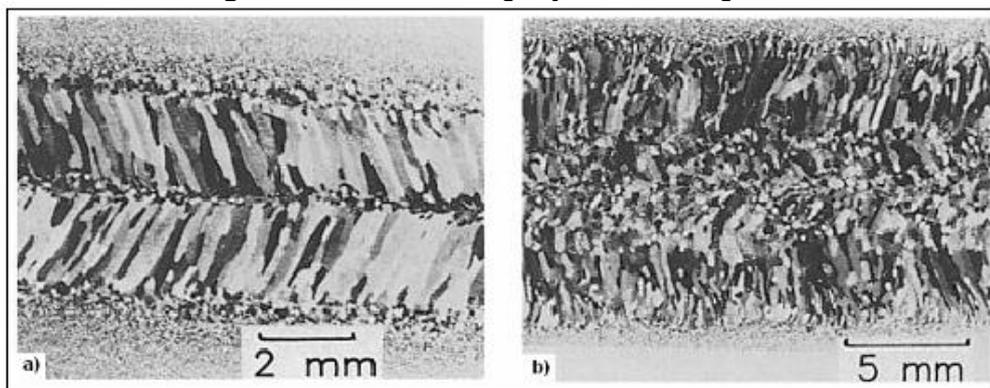
A figura asseguir apresenta um esquema ilustrando a aplicação de um campo eletromagnético em uma soldagem TIG autógena, e os efeitos da agitação eletromagnética da poça na estrutura do grão na soldagem TIG de um aço inoxidável ferrítico AISI Tp 409 (figuras 13 e 14).

Figura 13 - Aplicação de um campo eletromagnético



Fonte: Adaptado de Kou, 2003.

Figura 14- Efeitos da agitação eletromagnética



Fonte: Kou, 2003.

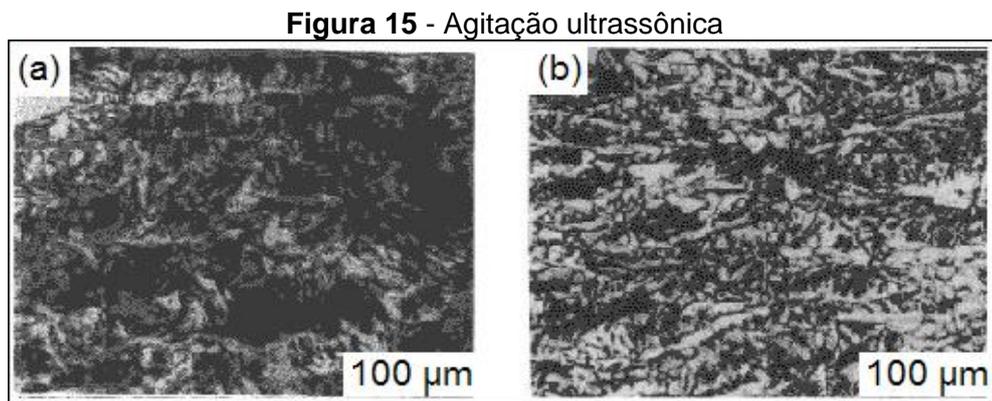
2.5.6 Excitação ultrassônica

Ondas ultrassônicas com frequência acima de 20 kHz podem ser utilizadas para controlar o processo de solidificação do metal. Na soldagem, a excitação ultrassônica é geralmente obtida através da excitação do metal de base ou da excitação do arco elétrico. Entretanto, a excitação através de transdutores piezoelétrico no metal de base é difícil de ter seus parâmetros ajustados além do fato de que por ser a soldagem um processo que envolve altas energias térmicas a maioria dos acoplantes não consegue resistir a tais temperaturas, restringindo a aplicação

deste método nos processos de soldagem. O arco elétrico pode ser utilizado como emissor de ondas ultrassônicas e se mostra um meio bastante efetivo de excitação da poça de fusão, pois, atua diretamente sobre ela (ZHANG *et al*, 2000; XU, 2007).

Verificou o efeito que a excitação ultrassônica do arco elétrico tem sobre a estrutura e as propriedades da zona fundida. Os resultados apresentados mostram que um maior percentual de ferrita acicular é formado na zona fundida, os grãos são refinados e a tenacidade é aumentada (figura 15), (ZHANG *et al*, 2000).

As microestruturas demonstradas são da zona fundida de um aço carbono JIS H08Mn2Si, (a) sem excitação, e (b) com 50 kHz de frequência de excitação ultrassônica.



Fonte: Zhang, 2000.

2.5.7 Vibração mecânica

A utilização de vibração na soldagem tem sido pesquisada visando principalmente o alívio de tensões residuais pós-soldagem. (CHEEVER, 1977 *apud* BRANDÃO, 1993). Técnicas de vibração são utilizadas na fundição de metais para melhorar suas propriedades. Quando se aplica vibração mecânica a metais fundidos observa-se que inclusões, escórias e gases são trazidos à superfície do metal líquido deixando-o mais uniforme. Verifica-se também que a vibração na fundição surte efeito no tamanho médio dos grãos (SCHMIDT e EHRET, 1937 *apud* BRANDÃO, 1993). A vibração mecânica também pode ser utilizada como meio de promover a agitação da poça de fusão no processo de soldagem. Ao aplicar-se vibração durante a soldagem a poça de fusão é afetada.

Durante a solidificação, as dendritas podem ser quebradas antes que se atinja um tamanho grosseiro de grão. Estes fragmentos de dendrita, a depender do tamanho, podem funcionar como núcleos de solidificação.

Além de produzir uma microestrutura mais refinada, o que pode melhorar as propriedades mecânicas, este procedimento também contribui para diversificar as direções de crescimento de grão, distribuição de impurezas no metal fundido, inibindo a formação de trincas de solidificação (WU, 1999; QUINGHUA, LIGONG e CHUNZHEN, 2006).

Poucos estudos foram desenvolvidos até o presente momento sobre este tema, o que o torna difícil de ser aplicado no dia-a-dia industrial. Neste trabalho foi realizado um experimento utilizando vibração mecânica no ato da deposição do cordão de solda sobre chapas de aço carbono.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo descrever o procedimento experimental que foi realizado com o intuito de verificar o efeito da vibração mecânica do refino microestrutural da zona fundida.

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM

Através do apoio técnico do Senai / Cimatec no laboratório de soldagem com procedimento qualificado EPS / RQPS por Teng. Stephany Freire e Soldador qualificado Tec. Cícero Oliveira, onde foi implementado o procedimento de soldagem com parâmetros específicos para verificação dos efeitos da vibração mecânica, utilizou-se 3 chapas de aço carbono SAE 1020 com espessura de $\frac{3}{4}$ " e dimensões de 20X30 mm. O equipamento usado foi uma máquina de solda MIG/MAG automática, e os parâmetros de soldagem podem ser observadas no quadro 1.

Quadro 1- Parâmetros para soldagem MAG

Processo de Soldagem	MAG (GMAW)
Posição da Soldagem	Horizontal Plana
Corrente	200 A
Tensão	30 v
Velocidade de Soldagem	25 cm/min
Velocidade do Arame	10 m/min
Diâmetro do Arame	1 mm
Gás de Proteção	Gás Carbonico
Vazão do Gás	20 l/min
Metal de Adição	AWS ER - 70S-6
Modo de Transferência	Curto-circuito

Fonte: Próprio autor

Depositou um cordão de solda em cada chapa, mantendo os mesmos parâmetros de soldagem, variando a frequência de vibração utilizando vibrador pneumático. Na chapa 1, soldou sem vibração, na chapa 2 com vibração de aproximadamente 80 Hz, e na chapa 3 com 160 Hz (figuras 16).

Figura 16 - Aparato de soldagem automatizada.



Fonte: Próprio autor

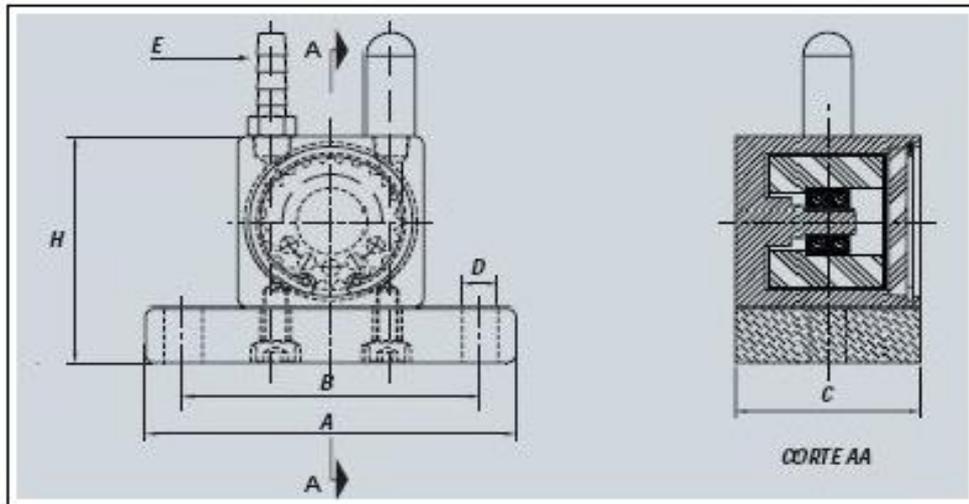
Para proporcionar a vibração, foi utilizado o vibrador pneumático Mavi® Luft Max Turbo T-50-2, que produz vibração mecânica quando acionado pneumáticamente através da rotação de uma massa excêntrica (figura 17).

Figura 17 - Vibrador pneumático.



Fonte: Próprio autor

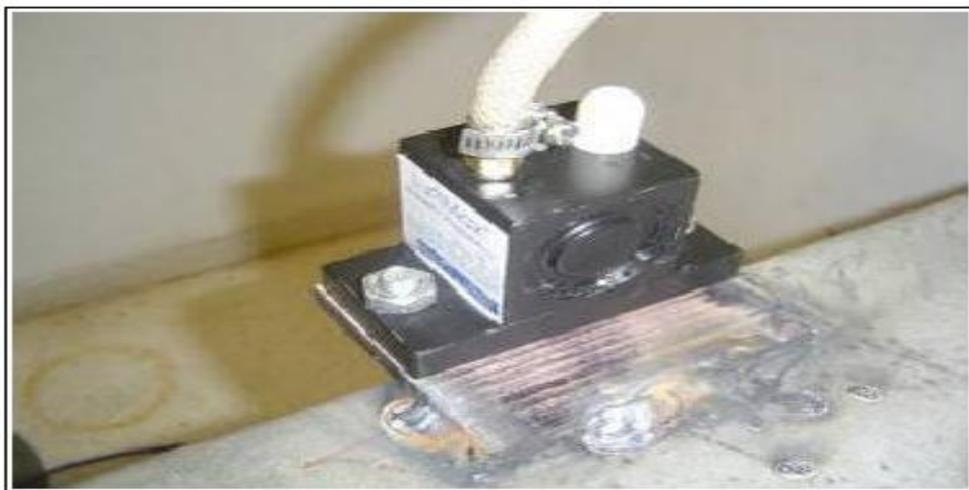
Figura 18- Desenho esquemático do vibrador pneumático



Fonte: Catálogo da MAVI – Máquinas Vibratórias 2008

O vibrador fixado na bancada de soldagem sendo aparafusado em uma chapa soldada direto na bancada (figura 19).

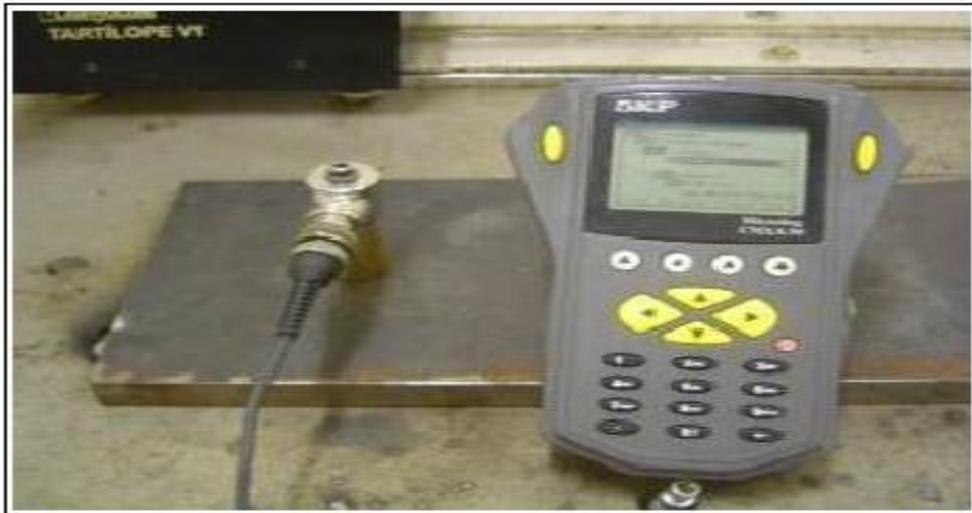
Figura 19– Fixação do vibrador na bancada.



Fonte: Próprio autor

Para que houvesse a transmissão da vibração proporcionada pelo vibrador, com o mínimo de perdas, as chapas foram soldadas na bancada antes de ser realizado o experimento. As frequências de vibração foram medidas diretamente nas chapas, antes de ser realizada a deposição do cordão de solda. O aparelho utilizado foi o Medidor de Vibração Microlog CMXA 50 da SKF (figura 20).

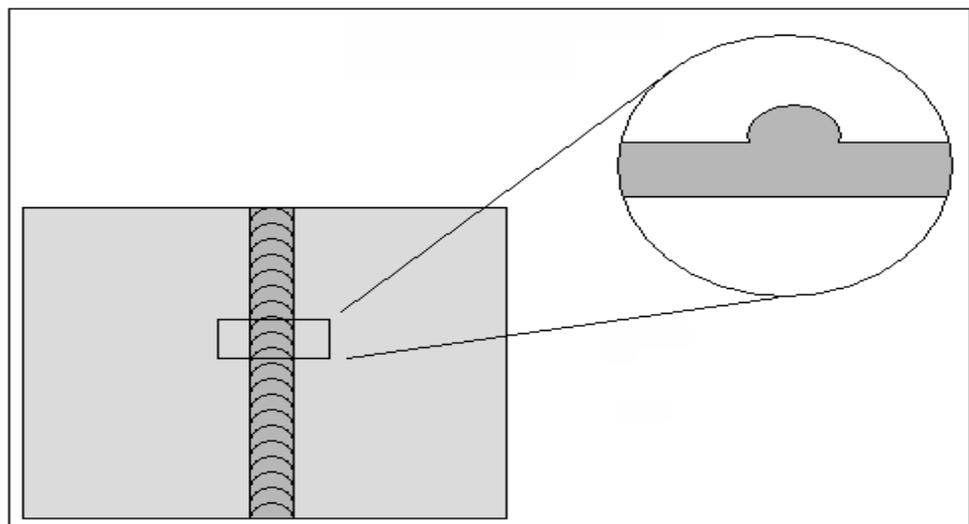
Figura 20 - Medição da vibração.



Fonte: Próprio autor

Após o procedimento de soldagem as chapas foram removidas e levadas para a preparação de amostras de ensaios metalográficos (10mm x 30mm, esp. $\frac{3}{4}$ "), conforme o processo de retirada das amostras (figura 21).

Figura 21 - Esquema ilustrando a retirada das amostras



Fonte: Próprio autor

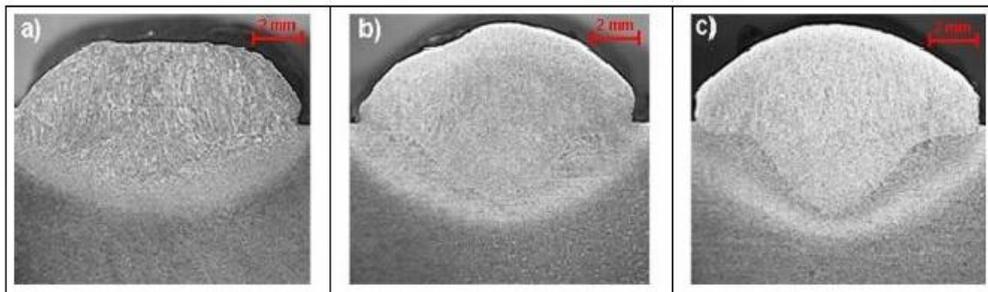
3.2 METALOGRAFIA

Chapa de aço carbono "SAE 1020, esp. $\frac{3}{4}$ ", bixelada, 200 x 200 mm, procedimento experimental de soldagem com e sem vibração, cortada com uso de serra fita em amostras como corpos de provas (10mm x 30mm, esp. $\frac{3}{4}$ "). Cortadas

primeiramente na serra fita, e depois para que as amostras tivessem um melhor acabamento superficial o que facilitaria na etapa do lixamento, usou-se uma máquina de corte do tipo “cut-off”.

Foram realizados cortes transversais no cordão de solda e preparadas três amostras. As amostras foram lixadas com lixas d’água, polidas, e depois foram atacadas quimicamente com Nital a 2% para fazer a micrografia. Abaixo as macrografias das amostras com freqüências de vibração aplicadas como mostra a macrografias da zona fundida (ZF) das amostras, e com freqüências de vibração aplicadas: a) = 0 Hz, b) = 80 Hz, e c) = 160 Hz (figura 22).

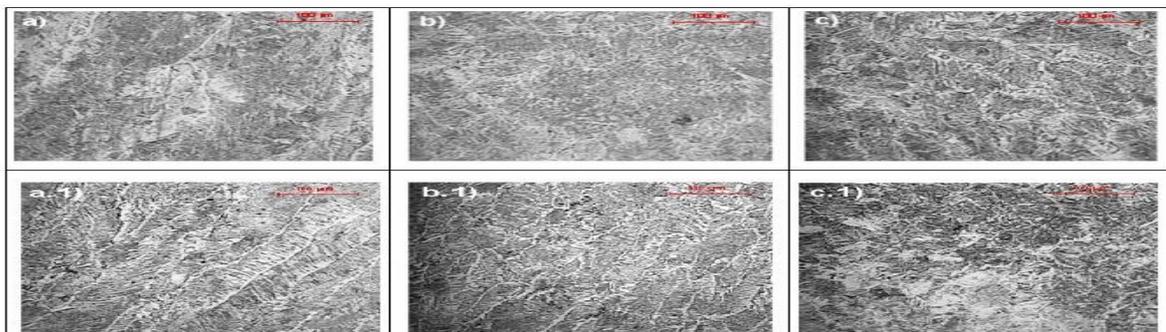
Figura 22 - Macrografia das amostras soldadas



Fonte: Próprio autor

Após a macrografia, as amostras foram lixadas novamente, polidas com pasta de diamante e atacadas quimicamente com Nital a 2% para a realização da micrografia, (figura 23).

Figura 23 – Micrografias da Zona Fundida



Fonte: Próprio autor

3.3 ENSAIO DE DUREZA

Os corpos de prova foram submetidos a ensaio de dureza Vickers (HV)

através de um durômetro de impacto digital portátil (WULTEST, modelo 2007) para verificar se houve alterações nesta propriedade em função da agitação mecânica empregada no momento da soldagem. A dureza foi medida em 3 pontos da zona fundida de cada corpo de prova, além do metal de base para que se estabeleça uma comparação de resultados. As médias de dureza (HV) encontradas para cada corpo de prova estão no quadro 2.

Quadro 2 – Média de dureza (HV) encontrada

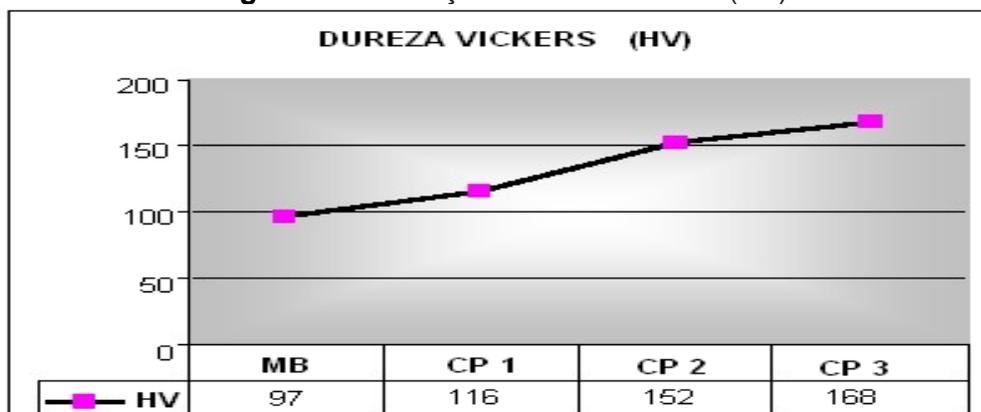
AMOSTRA	HV
M B	97
CP 1 (0 Hz)	116
CP 2 (80 Hz)	152
CP 3 (160 Hz)	168

Fonte: Próprio autor

- MB – Metal básico
- CP1, CP2, CP3: Corpos de prova

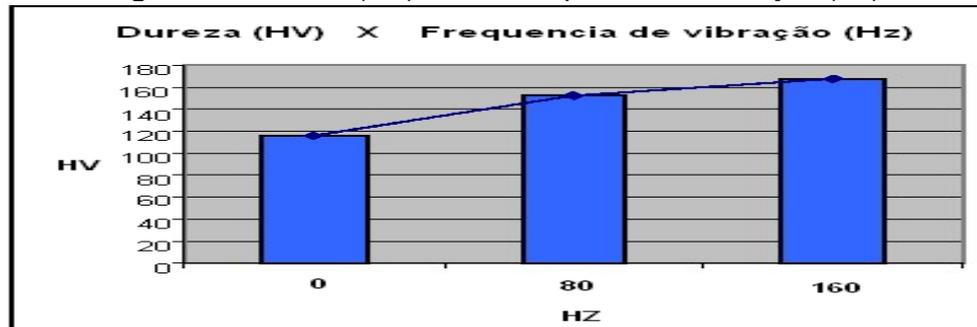
No gráfico abaixo demonstra a tendência de evolução da dureza média (HV) dos corpos de prova em relação à dureza do metal de base (MB). Freqüências de vibração aplicadas: CP 1 = 0 Hz, CP 2 = 80 Hz e CP 3 = 160 Hz (figura 24).

Figura 24 - Evolução da dureza média (HV)



Fonte: Próprio autor

A que demonstra a dureza (HV) em relação à frequência de vibração dos corpos de prova (figura 25).

Figura 25- Dureza (HV) versus frequência de vibração (Hz).

Fonte: Próprio autor

3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise macrográfica demonstra que o perfil térmico do cordão de solda é alterado com a aplicação de vibração mecânica, de modo que a penetração do cordão de solda é visivelmente maior na amostra que sofreu maior frequência de vibração, 160 Hz, em relação às outras amostras. Pode-se atribuir este fato à maior agitação da poça de fusão que proporciona uma maior homogeneização do calor e uma alteração na convecção do metal líquido.

Outro fenômeno que pode ser associado a este aumento de penetração é a oscilação conjunta da tocha de soldagem, que representa uma oscilação do arco elétrico, variando-se assim o *“stick-out”*, ou distância do eletrodo, neste caso consumível, à peça.

A micrografia também revela que a microestrutura da zona fundida (ZF) do cordão de solda também foi alterada. Percebe-se que houve um refinamento de grão nas amostras que sofreram agitação por vibração mecânica. Este fato pode ser atribuído à nucleação de novos grãos devido à fragmentação dendrítica que pode ter sido ocasionada pela ação das ondas mecânicas impostas ao sistema.

A oscilação do arco elétrico também pode ter influenciado nestes resultados em função de possíveis alterações momentâneas no calor aportado. O ensaio de dureza demonstrou que os valores de dureza (HV) aumentaram com o aumento da frequência de vibração dos corpos de prova (CP). O CP que sofreu vibração de 80 Hz demonstrou um aumento de dureza de 31 % e o CP que sofreu vibração de 160 Hz demonstrou um aumento na dureza de 45% em relação ao CP que não sofreu vibração.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA DO ESTUDO DE CASO

Na Caraíba Metais S/A, empresa do ramo metalúrgico especializada na fabricação e comercialização de cobre eletrolítico e seus derivados, a laminação de vergalhão utiliza um sistema de lingotamento contínuo Hazelett conforme figura 26, onde o cobre líquido é transformado em barras lingotes de cobre de secção retangular (130 mm x 60 mm).

Figura 26 - Sistema de lingotamento contínuo Hazelett



Fonte: Próprio autor

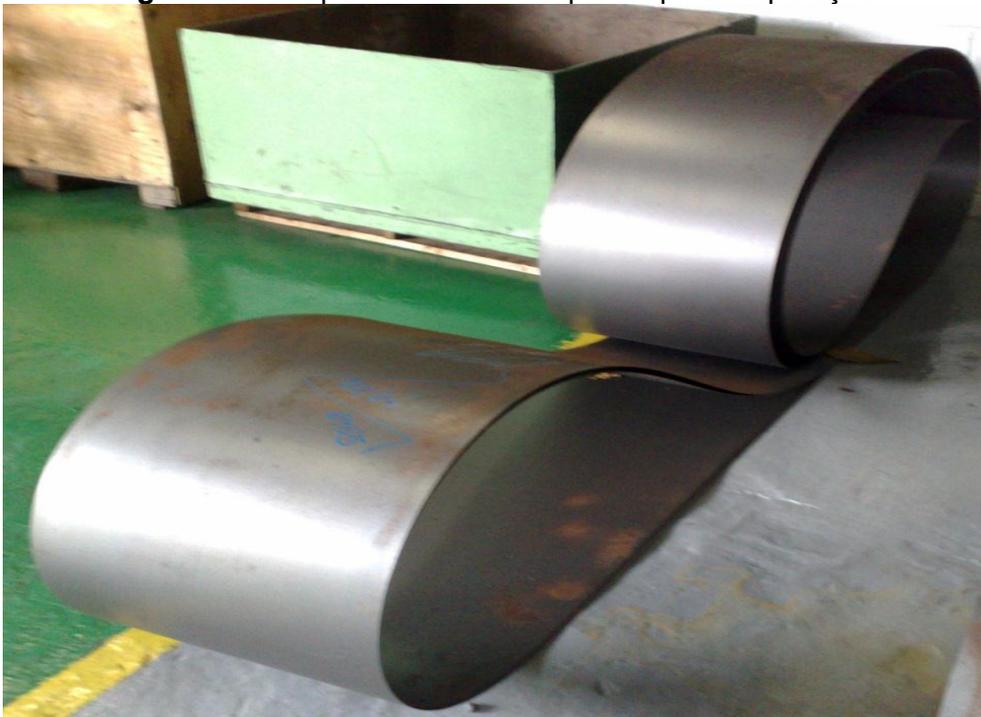
Este lingotamento utiliza duas chapas cintas que são montadas por união soldada em máquina automática TIG do fabricante JETLAIN. Estas cintas operam durante 24 horas ininterruptamente, sendo descartada devido à fragilização da soldagem por tensão e dobramento (figuras 27 e 28).

Figura 27 - Máquina automática TIG do fabricante JETLINE



Fonte: Próprio autor

Figura 28 - Chapa cinta soldada e pronta para a operação



Fonte: Próprio autor

4.1 TESTE COMPARATIVO

Foi inserido no processo padrão de soldagem da chapa cinta de arraste na Caraíba Metais o incremento da vibração mecânica, e feito testes laborais comparativos nas cintas com e sem vibração na soldagem, onde foi verificada maior resistência mecânica no cordão através dos dados.

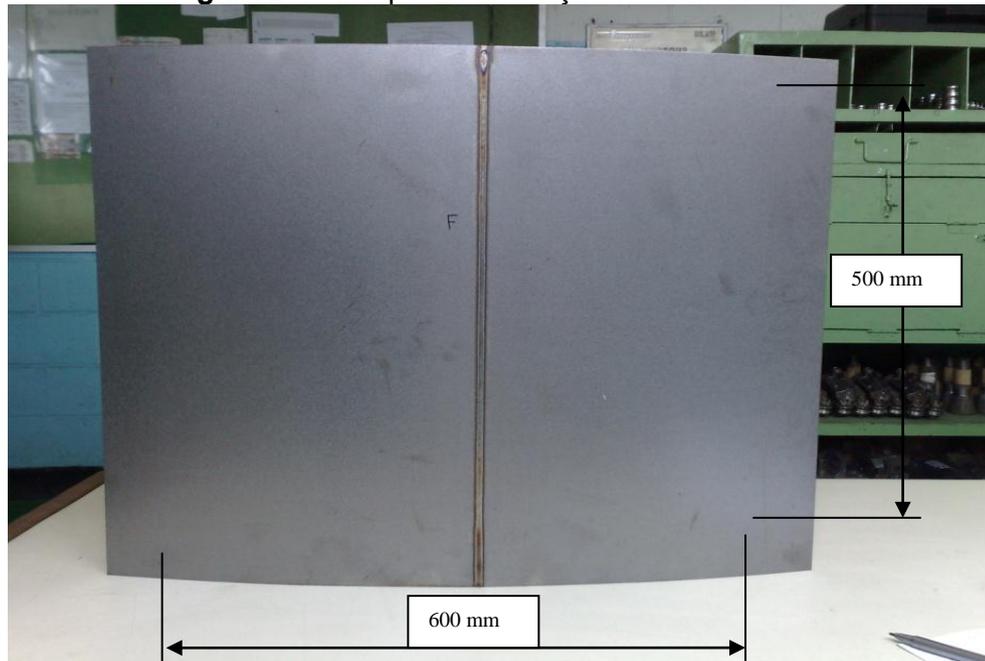
4.1.1 Processo padrão

Através do apoio da empresa Caraíba Metais, onde foi implementado o procedimento com parâmetro específicos com a finalidade de aumentar a resistência mecânica do cordão de solda na união da chapa cinta objeto deste estudo, foi testado a vibração mecânica na união da cinta com a instalação do vibrador pneumático fixado na própria chapa durante o procedimento de soldagem na máquina automática TIG do fabricante JETLINE com procedimento de soldagem qualificado EPS / RQPS por técnicos qualificado nas instalações da empresa Caraíba Metais. Para verificação dos efeitos da vibração mecânica na soldagem foi utilizando a chapa cinta aço carbono SAE 1020, esp. 1/16", 300mm x 500 mm, unidas através da soldagem com e sem vibração, cortada em amostras de corpos de provas com o intuito de verificar de forma laboral a possibilidade de aumentar a vida útil no cordão de solda da chapa cinta de arraste do equipamento de lingotamento descrito neste trabalho. Foi recortado duas chapas cintas no tamanho de 300 X 500 mm, e soldada pelo processo TIG normal conforme quadro 3 (figura 29).

Quadro 3 – Parâmetros para soldagem TIG

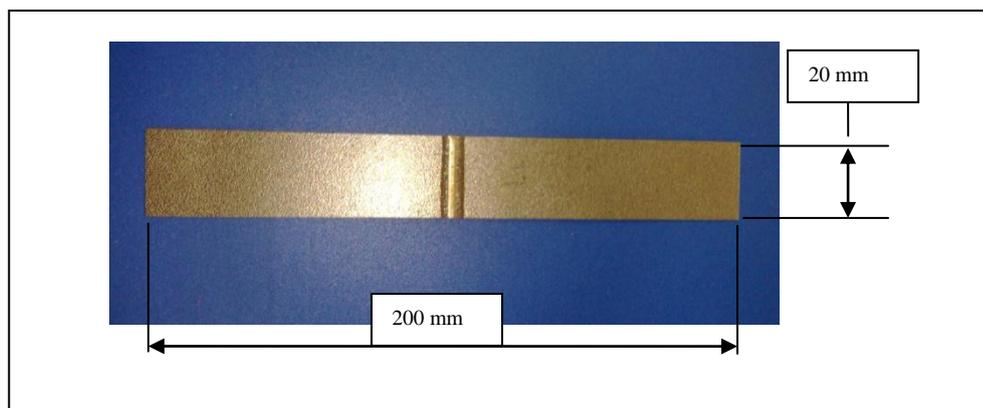
Processo de Soldagem	TIG
Posição da Soldagem	Horizontal Plana
Corrente	110 A
Tensão	8,8 V
Velocidade de Soldagem	8,2 cm/min
Velocidade do Arame	5,1 cm/min
Diâmetro do Arame	0,8 mm
Gás de Proteção	Argônio
Vazão do Gás	20 l/min
Metal de Adição	Aço Inox 308
Modo de Transferência	Curto-circuito

Fonte: Próprio autor

Figura 29 – Chapa cinta de aço carbono soldadas

Fonte: Próprio autor

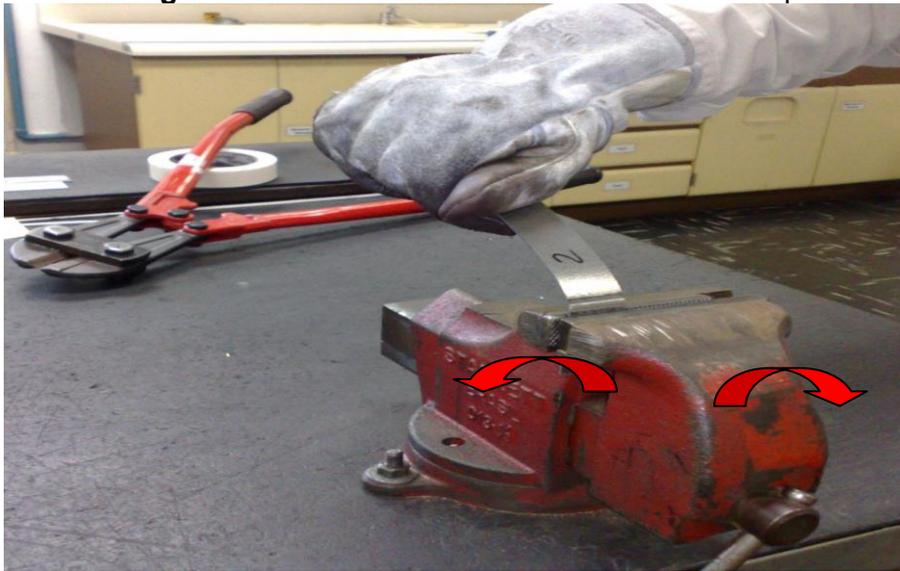
Após a soldagem a chapa foi recortada em dez amostras padronizadas conforme mostra (figura 30).

Figura 30 - Amostras de cinta padronizadas

Fonte: Próprio autor

Em cinco das amostras foram feitos teste de dobramento artesanal até ruptura, e os resultados encontrados estão mostrados no quadro 4 (figura 31).

Figura 31 - Teste de dobramento artesanal até ruptura



Fonte: Próprio autor

Quadro 4 - Dobramento até ruptura (sem vibração)

AMOSTRA	FLEXÕES (Quant.)
AM - 1	5
AM - 2	7
AM - 3	7
AM - 4	6
AM - 5	5
Média	6

Fonte: Próprio autor

Em outras cinco amostras foram feitos teste laborais de tensão até ruptura e os resultados encontrados estão demonstrados no quadro 5 (figura 32).

Figura 32 - Teste laboral de tração até a ruptura

Fonte: Próprio autor

Quadro 5 - Tração até ruptura (sem vibração)

AMOSTRA	TRAÇÃO (Kgf)
AM - 6	1965
AM - 7	1967
AM - 8	1964
AM - 9	1970
AM - 10	1969
Média	1967

Fonte: Próprio autor

4.1.2 Processo com vibração

Foi recortado duas chapas cinto no tamanho de 300mm X 500 mm e soldadas conforme mostrado na figura 30. Para proporcionar a vibração foi utilizado o vibrador pneumático Mavi® Luft Max Turbo T-50-2 que produz vibração mecânica quando acionado pneumaticamente através da rotação de uma massa excêntrica, (figuras 16). Este vibrador foi fixado no centro da chapa, a soldagem utilizou os mesmos parâmetros do quadro 3. A vibração foi fixada em 80 Hz (figura 33).

Figura 33 - Etapas de soldagem com o vibrador mecânico

Fonte: Próprio autor

Após a soldagem a chapa foi recortada em dez amostras padronizadas conforme mostrado na figura 30. Em cinco das amostras foram feito teste de dobramento artesanal até ruptura, e os resultados encontrados estão mostrados no quadro 6, conforme mostra (figura 31).

Quadro 6- Dobramento até ruptura (com vibração)

AMOSTRA	FLEXÕES (Quant.)
AM - 11	8
AM - 12	7
AM - 13	7
AM - 14	8
AM - 15	6
Média	7,2

Fonte: Próprio autor

Em outras cinco amostras foram feitos teste de tensão até ruptura conforme mostra (figura 34), os resultados encontrados estão mostrados no quadro 7.

Quadro 7- Tração até ruptura (com vibração)

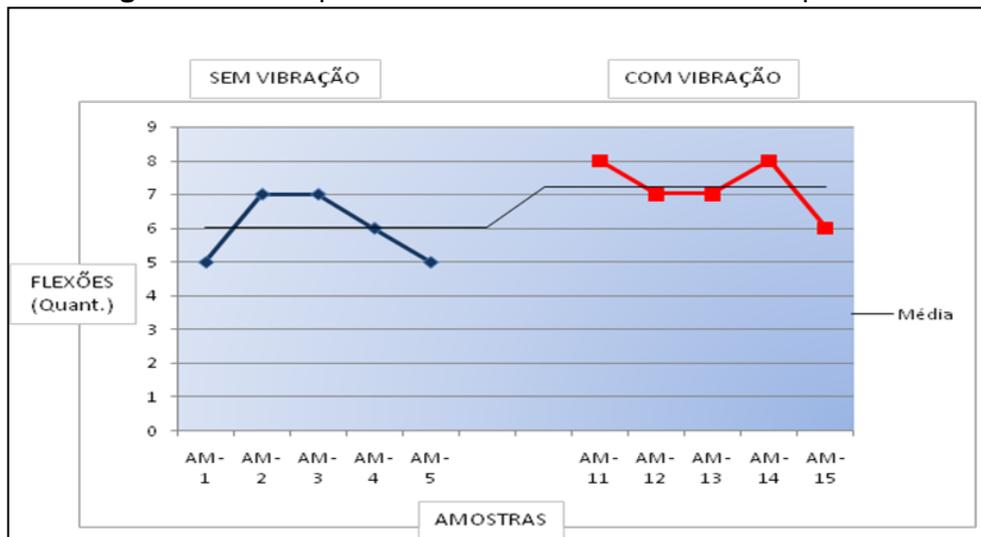
AMOSTRA	TRAÇÃO (Kgf)
AM - 16	2443
AM - 17	2451
AM - 18	2445
AM - 19	2453
AM - 20	2448
Média	2448

Fonte: Próprio autor

4.2 VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE LABORATORIAL

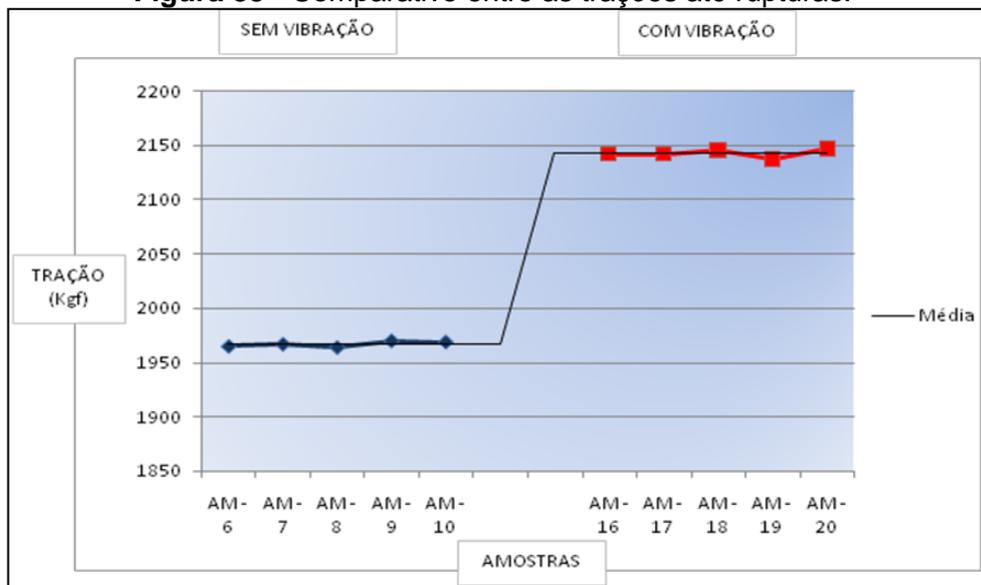
Através da análise laboratorial foi verificado um aumento na resistência mecânica do cordão de solda no dobramento artesanal na quantidade de flexões até ruptura, e na tensão de ruptura o que pode resultar em ganho na vida útil operacional das chapas cintas, ver gráficos abaixo (figuras 34 e 35).

Figura 34 – Comparativo entre os dobramentos até rupturas.



Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Comparativo entre as trações até rupturas.



Fonte: Próprio autor

4.3 ESTIMATIVA DE REDUÇÃO DE CUSTO

A Caraíba Metais produz anualmente 220.000 toneladas de vergalhão de cobre, a produção diária é de 720 t. Um par de cintas pesa 87 Kg. tem uma vida útil de 24 horas, então, o consumo específico da chapa cinta é de 0,12 Kg / t, na produção de vergalhão de cobre. Para uma produção de 220.000 t, tem-se um consumo de 26.400 Kg. O preço do quilograma de cinta é de R\$ 15,00 (Quinze reais) então, o custo anual é de R\$ 396.000,00 (Trezentos e noventa e seis mil reais).

A vida útil da cinta está diretamente relacionada com a tensão de ruptura e dobramento até a ruptura, qualquer ganho nestes itens significa ganho proporcional na vida útil (HAZELETT, 2000). Então um ganho de 25% corresponde a uma vida útil de 30 horas significa uma diminuição no consumo específico para 0,10 Kg./t de vergalhão de cobre. Para a mesma produção de 220.000 t, tem-se um consumo de 22.000 Kg, com um custo anual de R\$ 330.000,00 (Trezentos e trinta mil reais) a redução de custo em material é de R\$ 66.000,00 (Sessenta e seis mil reais) por ano, com o mínimo custo de implementação no processo de soldagem.

4.4 AUMENTO DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Para uma produção anual com 52 semanas, trabalhando seis dias na semana e 24 horas por dia tem-se 144 horas semanais, com uma vida útil das cintas de 24 horas são necessárias 6 seis trocas de cintas com parada de produção de 45 minutos por cada troca, em uma semana são 270 minutos ou 4,5 horas, em um ano são 234 horas. Com o aumento da vida útil das cintas para 30 horas serão necessárias 4,8 seis trocas de cintas. Em uma semana serão 216 minutos ou 3,6 horas, em um ano serão 187,2 horas.

O acréscimo na produção anual será de 46,8 horas, com a capacidade nominal de produção em 30 t/h. tem-se uma produção a mais de 1404 t. O prêmio da Caraíba por tonelagem de vergalhão produzido é de R\$ 575,00 (Quinhentos e setenta e cinco reais), Ou seja, o ganho anual é de R\$ 807,300,00 (Oitocentos e sete mil e trezentos reais).

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos conclui-se que a excitação mecânica tem efeitos sobre o cordão de solda, alterando o perfil de distribuição de calor na peça o que proporciona mudanças na penetração do cordão de solda, e na microestrutura da zona fundida (ZF). Nos dois casos em que se utilizou a vibração, 80 Hz e 160 Hz, houve um refino na microestrutura do cordão de solda na deposição, aumento na penetração, e que no ensaio de dureza esta propriedade também se alterou em função do aumento da frequência de vibração aplicada.

O estudo de caso realizado na Caraíba Metais demonstrou um ganho na tensão de ruptura, e dobra até a ruptura que possibilita aumentar a vida útil da cinta de lingotamento resultando em ganhos na diminuição de custos, e aumento da capacidade de produção para a Indústria conforme evidenciado no presente estudo de caso será conquistado pela redução de custo anual no de troca e substituição da cinta durante o processo de manutenção, e o aumento na capacidade de produção em dois dias a mais no ano.

REFERÊNCIAS

ASM - AMERICAN SOCIETY FOR METALS (International) (Org.). Metals Handbook Vol 6: Welding, Brazing, and Soldering. Ohio, Metals Park, 2003.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **The Science and Engineering of Materials**. 4. ed. Toronto: Thomson, 2004.

AZEVEDO, Cesar R. F.; CAMPOS, Beatriz A. Breve história da metalografia. São Paulo, 2007.

BRANDÃO, José E. S. A. Efeito da Vibração Mecânica Durante a Soldagem de Aços Carbono. **Anais XIX ENTS - ABS**: p. 143-159. 1993.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002.

COCHRANE, Robert; NAYLOR, David. **Grain Size Strengthening**. Disponível em: <<http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=171&pageid=208127786>>. Acesso em: 02 fev. 2008.

DÜNDAR, Sacit. Dendritic Solidification in a Copper Nickel Alloy. **Turkish J. Eng**: p. 129–134, 2003.

GOLDENSTEIN, H. **Obtenção de Grãos Ultrafinos em Aços Hipereutetóides**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. Grain boundary strengthening. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org>> Acesso em: 11 jan. 2008.

GREGG, J.M.; BHADESHIA, H.K.D.H.; SVENSSON, L.E. Inoculation of steel welds with non-metallic particles. **Materials Science & Engineering**: p. 145-157. 1997.

KOU, Sindo. Welding Metallurgy. 2. ed. Hoboken: **Wiley-Interscience**, 2003.

LI, et al. Real Time Observation of Dendritic Solidification in Real Alloys by Synchrotron Microradiography. **SRMS-5 Conference**, Chicago, p. 1. 30 ago. 2006

MEIER, Mike. The Hall-Petch Relationship. Davis: University of California, 2004.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

QINGHUA, Lu; LIGONG, Chen; CHUNZHEN, Ni. Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties. **Mechanics of Materials**, p. 1-10. 29 out. 2006

SILVA, P.S.C.P. **Comportamento Mecânico e Fratura de Componentes e Estruturas Metálicas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1999.
SUNDARESAN, S.; RAM, G.D.J.; REDDY, G.M. Microstructural refinement of weldfusion zones in a–b titanium alloys using pulsed current welding. **Materials Science & Engineering**: p. 88-100. 1998.

UNDOPHOI, Tapany. **The weld microstructure**. Suranaree: Suranaree University ofTechnology, 2007.

VAN VLACK, L.H. **Princípios de Ciências dos Materiais**. 5. ed. São Paulo: Campus, 1984.

VEDIA, L. A. de; SVOBODA, H. G. **Introducción a la Metalurgia de la Soldadura**. Ago, 2004.

WANG, S.C.; CHOU, C.P. Effect of adding Sc and Zr on grain refinement and ductility of AZ31 magnesium alloy. **Journal of Materials Processing Technology**: 116-121. 2007.

WU, Weite. Influence of Vibration Frequency on Solidification of Weldments. **Scripta Materialia**: p. 661-665, 1999.

XU, Z.; YAN, J.; CHEN, W.; YANG, S. Effect of ultrasonic vibration on the grain refinement and SiC particle distribution in Zn-based composite filler metal. **Materials Letters**: 2007.

ZHANG, *et al.* Effects of arc-excited ultrasonic on microstructures and properties of weld. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**: p. 712-716, 2000.

ZHAO, *et al.* Grain growth and Hall–Petch relation in dual-sized ferrite/cementite steel with nano-sized cementite particles in a heterogeneous and dense distribution. **Scripta Materialia**: p. 1193–1197, 2005.