

# Ultrassom na Soldagem a Arco – Uma Revisão Acerca dos Métodos de Aplicação e seus Efeitos

## (Ultrasound in Arc Welding - A Review of Application Methods and its Effects)

Tiago Vieira da Cunha<sup>1</sup>, Carlos Enrique Niño Bohórquez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFSC, CEM – Centro de Engenharias da Mobilidade, Joinville, Santa Catarina, Brasil, [t.cunha@ufsc.br](mailto:t.cunha@ufsc.br)

<sup>2</sup>UFSC, EMC – Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, [carlos.nino@ufsc.br](mailto:carlos.nino@ufsc.br)

### Resumo

Na última década a introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco, com o intuito de aumentar o desempenho operacional dos processos de soldagem e de melhorar a qualidade das soldas resultantes, tem sido estudada intensamente. Em vista disso, neste trabalho é apresentada uma ampla revisão da literatura acerca da utilização desta técnica, que é aplicada fundamentalmente de duas formas. A primeira mediante a vibração (mecânica) ultrassônica de algum elemento pertencente ao conjunto de soldagem seja este o eletrodo, a peça de trabalho ou o material de adição, e a outra, que diz respeito à excitação ultrassônica do arco mediante a pulsação da corrente de soldagem em frequências acima de 20 kHz. Assim, são apresentados em detalhes os métodos de introdução do ultrassom nos processos de soldagem com eletrodo permanente e consumível, suas vantagens e limitações, e os ganhos em termos operacionais, como a estabilidade do arco e o aumento da penetração, e metalúrgicos, tais como refino de grão, homogeneidade da solda, melhoria das propriedades mecânicas e redução das zonas parcialmente diluídas. Por fim, são destacadas as potencialidades desses métodos na melhoria das propriedades da solda e na aplicação em materiais de baixa soldabilidade.

**Palavras-chave:** Ultrassom na Soldagem; Arco Voltaico; Transdutores; Penetração; Refino de Grão.

**Abstract:** In the last decade the introduction of ultrasonic energy in arc welding, in order to increase the performance of welding processes and improve the quality of the welds has been studied intensively. In view of this, in this paper an extensive review of the literature concerning the use of this technique, which is applied mainly in two ways is presented. The first due to mechanical ultrasonic vibration of some element belonging to the welding set, such as the welding electrode, the workpiece or the filler material. The other one respect to the arc ultrasonic excitation due to pulsation of welding current at frequencies above 20 kHz. So, are presented in detail the methods of introduction of ultrasound in welding processes with permanent and consumable electrode, its advantages and limitations, and gains in operational terms, such as arc stability and increased penetration, and metallurgical, such as grain refining, weld homogeneity, improved mechanical properties and reduction of partially diluted zones. Finally, it highlighted the potential of these methods in the improvement of weld properties and application in low weldability materials.

**Key-words:** Ultrasonic Welding; Arc Voltaic; Transducers; Penetration; Grain Refining.

### 1. Introdução

Apesar do surgimento cada vez mais crescente de novos processos e/ou técnicas de soldagem por fusão, o arco voltaico continua sendo a principal fonte de calor empregada na união por fusão dos materiais metálicos. Isto se deve fundamentalmente às características ímpares do arco voltaico de soldagem que, entre outras coisas, permite o emprego de equipamentos de baixo custo, associado à facilidade de se estabelecer o arco sob atmosferas gasosas diversas e a facilidade no monitoramento e controle do aporte de energia à peça de trabalho. Diante disso, esforços são empreendidos constantemente com o

intuito de aumentar a produtividade e a qualidade das uniões e revestimentos realizados com os processos de soldagem a arco. Neste sentido, ao longo das últimas décadas, diversas técnicas têm sido estudadas e desenvolvidas a fim de atender a estes propósitos. Neste contexto, um dos métodos que recentemente tem despertado atenção, devido aos resultados obtidos nos processos de soldagem no qual vem sendo empregado, diz respeito à introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco.

Os efeitos do ultrassom no processamento de materiais são conhecidos e aproveitados há muito tempo [1]. Entretanto, apesar de ser atualmente empregado em diversos segmentos industriais, inclusive na união de materiais, o mesmo ainda não é aplicado efetivamente na soldagem a arco em âmbito industrial, apesar de na última década ter sido objeto de vários estudos. Conforme será apresentado mais adiante, diversos são os trabalhos encontrados na literatura que abordam os efeitos resultantes da introdução de energia ultrassônica na soldagem, não só sob o ponto de vista operacional de processo, mas,

---

Recebido em 19/03/2014, texto final em 01/09/2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1903.04>

principalmente, em relação aos aspectos metalúrgicos das soldas resultantes. Os resultados desses estudos evidenciam o potencial intrínseco presente na aplicação do presente método na soldagem a arco, como forma de aumentar o desempenho operacional dos processos e a qualidade final das soldas.

Diante disso, neste trabalho, busca-se fornecer, a partir de uma ampla revisão da literatura, uma visão abrangente e atualizada, dos meios de se introduzir ultrassom na soldagem a arco e seus respectivos efeitos no que se refere às características operacionais do processo e metalúrgicas do cordão de solda. De acordo com as informações levantadas, a introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco é realizada, fundamentalmente, de duas formas: a) por meio de vibrações produzidas por transdutores mecânicos; b) com a excitação ultrassônica do arco voltaico mediante a pulsação da corrente em frequências acima de 20 kHz. Em função disso, o conteúdo deste trabalho está organizado em duas partes, conforme os meios de introdução. Inicialmente a abordagem está focada especificamente nas técnicas que fazem uso dos transdutores do tipo mecânico para a obtenção da energia ultrassônica a ser introduzida no arco voltaico. Estes transdutores são basicamente de dois tipos, aqueles baseados em cristais piezelétricos e os transdutores magnetostritivos [2], ambos amplamente empregados no processamento de materiais [3]. Na sequência é abordado um novo método para a introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco, que se constitui como alternativa ao emprego dos tradicionais transdutores do tipo mecânico. Neste método, desenvolvido no final da década de 1990 e chamado de arco com excitação ultrassônica da corrente, o arco voltaico atua não somente como uma fonte de calor, mas também, como um mecanismo de emissão de ultrassom atuando diretamente na poça fundida. O que permite introduzir energia ultrassônica na soldagem a arco sem a necessidade de qualquer dispositivo ou sistema auxiliar de soldagem.

## 2. Excitação ultrassônica por meios mecânicos

Estão disponíveis na literatura diversos trabalhos recentes que visam a introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco por meios mecânicos. Entretanto, a contribuição científico-tecnológica destes trabalhos não está associada diretamente à tecnologia para a obtenção do ultrassom propriamente dita, mas, ao desenvolvimento de técnicas que permitam a aplicação do ultrassom em diversos processos de soldagem a arco. Neste sentido, diferentes técnicas, no que diz respeito ao elemento que está sujeito diretamente à vibração, têm sido propostas tanto para a soldagem com eletrodo permanente como para a soldagem com eletrodos consumíveis.

### 2.1. Ultrassom na soldagem TIG

Com o objetivo de introduzir ultrassom na soldagem TIG, Sun et al. [4,5], conceberam um sistema que permite oscilar longitudinalmente o eletrodo de tungstênio, mediante a excitação oriunda de um transdutor piezelétrico ultrassônico, transmitida por um fio de titânio acoplado axialmente ao eletrodo. Assim, as vibrações do eletrodo são transmitidas ao arco e, por sua

vez, deste à poça fundida, de modo independente à forma de onda e a polaridade da corrente de soldagem. Empregando este método na soldagem do aço inoxidável AISI 304, esses autores observaram um aumento significativo da penetração e da relação penetração/largura do cordão, o que pode ser benéfico em soldagens de união, para evitar descontinuidades e/ou aumentar a velocidade de soldagem. Com o emprego de uma frequência de vibração do eletrodo de 20,5 kHz e potência do ressonador de 200 W, Sun et al. [4] obtiveram um aumento da penetração de 1,18 mm para 3,12 mm e de 1,20 mm para 3,71 mm ao soldar com correntes de 100 e 150 A, respectivamente (Figura 1). Este aumento de penetração na soldagem do aço inoxidável também é relatado por Fan et al. [6] na soldagem do aço AISI 304, e por Sun et al. [7], ao empregar potências de vibração ultrassônica de até 1 kW.

Além disso, Sun et al. [5] observaram um aumento da relação penetração/largura de 235% nas soldas realizadas com corrente de 100A e de 380% nas soldas realizadas com 150 A, em comparação com as soldas obtidas na soldagem TIG convencional. Segundo estes autores, esta maior penetração se deve ao efeito direcional do campo ultrassônico devido à oscilação longitudinal do eletrodo, que parece aumentar a pressão do jato de plasma sobre a poça fundida. Neste contexto, Sun et al. [8] afirmam que a variação da pressão do arco ao se empregar vibração ultrassônica apresenta um comportamento peculiar. Diferentemente do que ocorre na soldagem TIG convencional, onde a pressão do arco decresce continuamente com o aumento da distância entre o eletrodo e a peça, com vibração ultrassônica esses autores observaram um valor máximo de pressão do arco para uma distância de 4,4 mm.

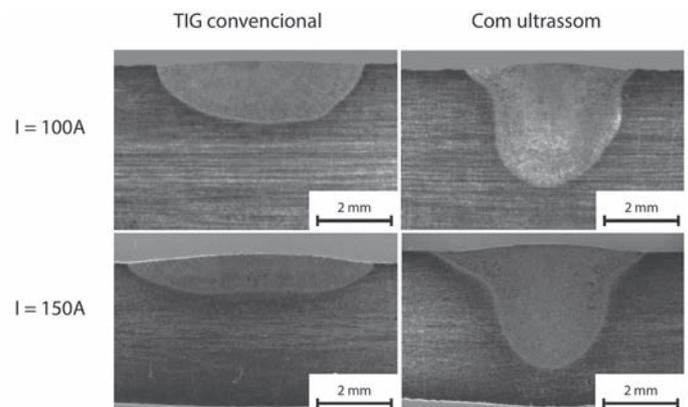


Figura 1. Macrografias transversais de soldas autógenas em aço AISI 304 realizadas pelo processo TIG convencional e com vibração ultrassônica do eletrodo [4]

O aumento na penetração da solda também é relatado por Wen [9] ao aplicar as vibrações ultrassônicas diretamente na peça de trabalho, na direção da espessura. Ao soldar pelo processo TIG uma liga de alumínio 7075-T6, com frequência de vibração de 20 kHz e potência do ressonador de 2 kW, esse autor observou um aumento na penetração de até 45% e redução do tamanho de grão na região próxima à linha de fusão de até 42%, em relação à soldagem TIG convencional.

Utilizando um método de vibração da peça similar ao empregado por Wen [9], Dong et al. [10] realizaram soldas dissimilares em juntas sobrepostas de Al-Mg com aço galvanizado e Al-Mg com aço inoxidável (Figura 2). No caso da união com aço galvanizado, foi obtida a redução de compostos intermetálicos Fe-Al e um significativo refino de grão na zona fundida, resultando num aumento da resistência à tração da junta soldada de 115 para 146 MPa.

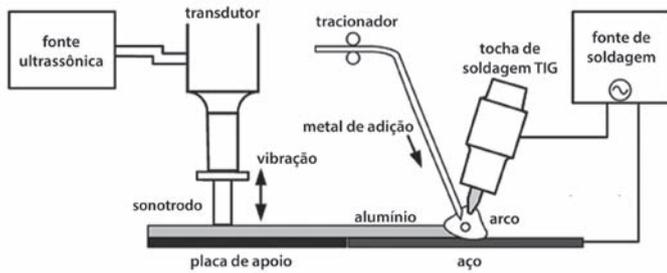


Figura 2. Diagrama esquemático do sistema de vibração ultrassônico da peça proposto por Dong et al. [10]

Em vez de fazer vibrar a peça na direção da espessura, como proposto por Wen [9] e Dong et al. [10], Watanabe et al. [11] aplicaram a vibração ultrassônica na mesma direção do deslocamento da tocha na soldagem, conforme mostra a Figura 3. Assim, ao soldar em forma autógena pelo processo TIG o aço inoxidável austenítico SUS 310S, com diferentes velocidades de soldagem, obtiveram um aumento na resistência à tração. Além disso, observaram uma redução da largura dos grãos colunares e mudanças na morfologia dos grãos de celular dendrítica para subgrãos alinhados na direção de crescimento. Segundo esses autores, o aumento da resistência à tração e a redução na largura dos grãos colunares são potencializados com o aumento da amplitude de vibração ultrassônica.

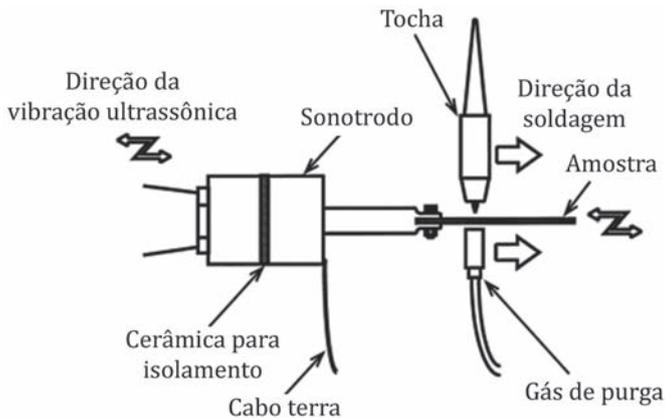


Figura 3. Diagrama esquemático do sistema de vibração ultrassônico empregado por Watanabe et al. [11]

Nos métodos em que o transdutor ultrassônico está acoplado à peça de trabalho [9-12], e não à tocha de soldagem, têm-se como vantagem uma maior flexibilidade do processo, devido ao sistema de vibração ultrassônico não estar sujeito às elevadas temperaturas do arco, nem tampouco ser necessário o seu

deslocamento durante a operação de soldagem. Além disso, devido à oscilação ultrassônica estar desvinculada da corrente de soldagem, estes métodos podem ser aplicados facilmente a qualquer tipo de corrente de soldagem. Contudo, como desvantagem, são limitados à soldagem de pequenas peças, pois na medida em que o tamanho da peça aumenta, uma maior potência da fonte ultrassônica é requerida, o que pode inviabilizar sua aplicação [13].

Diante das dificuldades em fazer vibrar o eletrodo ou a peça, Watanabe et al. [13] desenvolveram um método para o processo TIG, que permite introduzir vibração ultrassônica diretamente na poça fundida. Este método consiste na vibração ultrassônica do arame empregado como material de adição, por intermédio de um sonotrodo ultrassônico acoplado ao tubo guia. Deste modo, a vibração ultrassônica é transmitida à poça de fusão pelo próprio material de adição, em contato com a poça, sendo esta vibração aplicada na direção perpendicular a de soldagem e paralela à superfície da peça (Figura 4). Os resultados obtidos por Watanabe et al. [13] com o emprego deste método, evidenciam o efeito de refino de grãos para baixas velocidades de soldagem, enquanto que para maiores velocidades, há formação de grãos equiaxiais na região central do cordão. A resistência a tração e, sobretudo, a ductilidade, também foram melhoradas com o emprego da vibração ultrassônica em todas as velocidades de soldagem avaliadas (o valor de alongamento na fratura aumentou cerca de 40%).

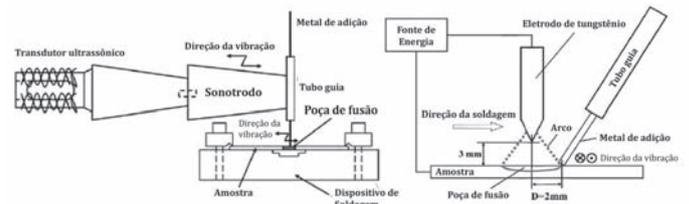


Figura 4. Diagrama esquemático do sistema de vibração ultrassônico do arame proposto por Watanabe et al. [13]

## 2.2. Ultrassom na soldagem com eletrodo revestido

Cui et al. [12,14] também utilizando transdutores do tipo mecânico, fizeram vibrar a peça em frequências ultrassônicas na direção da espessura, de forma similar ao empregado por Wen [9] e Dong et al. [10], com o objetivo de produzir refino de grão na zona fundida [14] e evitar a formação das zonas parcialmente diluídas (ZPDs) [12] na soldagem com eletrodos revestidos. Empregando este método, Cui et al. [14] investigaram a relação entre a fração volumétrica de microestrutura colunar dendrítica com a potência de vibração ultrassônica na soldagem do aço inoxidável AISI 304, utilizando 316L como material de adição. Seus resultados mostram que o aumento de 0 para 90% na potência do sistema de vibração ultrassônico utilizado, resulta num significativo decréscimo da fração de microestrutura colunar dendrítica de 95% para 10% (Figura 5), dando origem a uma microestrutura predominantemente equiaxial dendrítica fina.

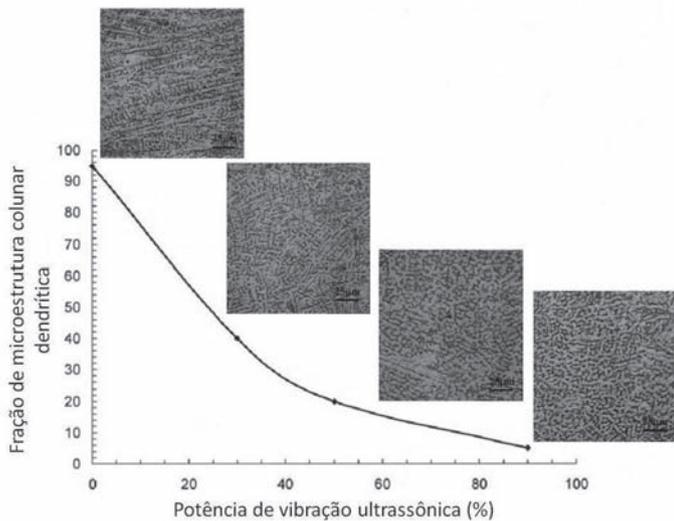


Figura 5. Fração da microestrutura colunar dendrítica no metal de solda em função da potência de vibração ultrassônica [14]

De acordo com Cui et al. [14], este refino de grão pode ser atribuído aos efeitos não lineares induzidos na poça fundida pelo ultrassom, o qual pode causar localmente elevadas temperaturas e regiões de alta pressão, além de intensa agitação do metal fundido, influenciando fortemente, deste modo, o processo de solidificação [15]. Estes efeitos não lineares incluem cavitação e fluxo acústico [16,17]. A cavitação, ou seja, a formação de pequenas cavidades no metal líquido ocorre como resultado de tensões trativas produzidas por ondas acústicas em fase de rarefação. Estas cavidades continuam crescendo por inércia até ocorrer o seu colapso devido à ação de tensões de compressão durante a fase de compressão da onda sonora. Este colapso produz, assim, ondas de choque de alta intensidade e intensa convecção na poça fundida. O fluxo acústico é um tipo de fluxo turbulento desenvolvido próximo da interface sólido-líquido da poça fundida, devido à perda de energia da onda sonora. Cui et al. [12] atribuem a este fluxo induzido ultrassonicamente a eliminação completa das zonas parcialmente diluídas que observaram ao soldar o aço inoxidável super austenítico AL-6XN pelo processo eletrodo revestido com vibração ultrassônica. Segundo estes autores, este fluxo turbulento promove uma intensa mistura do metal de base com o metal de adição, ambos no estado líquido, evitando, assim, a formação das referidas zonas durante a soldagem, o que pode contribuir significativamente para o aumento da resistência à corrosão das soldas realizadas no material em questão.

### 2.3. Ultrassom na soldagem MIG/MAG

Fan et al. [18-20] propõem uma forma, diferente aos métodos apresentados anteriormente, de introduzir ultrassom na soldagem MIG/MAG com o objetivo de melhorar a transferência metálica. Em seu método, a vibração ultrassônica não é aplicada nem à peça de trabalho, nem ao material de adição ou eletrodo. Neste método, chamado de U-MIG/MAG, o corpo principal da tocha de soldagem constitui um transdutor piezolétrico de vibração

ultrassônico, com o material de adição sendo alimentado por um orifício concêntrico presente ao longo do seu eixo axial. A onda ultrassônica é então irradiada da extremidade do sonotrodo ultrassônico, e refletida pela superfície da peça de trabalho [19]. Esta onda refletida interage com a onda incidente, formando assim, um campo de radiação acústica, na região onde o arco voltaico é estabelecido.

Com a aplicação deste método, foi observado que tanto as características do arco, como o modo de transferência e a aparência do cordão de solda mudam significativamente. Aplicando uma frequência de vibração de cerca de 20 kHz e amplitude máxima de 45  $\mu\text{m}$ , o arco se apresentou mais constrito e com um comprimento menor do que no MIG/MAG convencional [21]. Os cordões de solda obtidos foram mais largos, sem a presença de mordeduras, como resultado da maior molhabilidade produzida pela ação do campo ultrassônico [19,20]. Além disso, para uma mesma condição de soldagem, foi observado que a presença do campo ultrassônico mudou o modo de transferência de globular para curto circuito. De acordo com os resultados de Fan et al. [20], enquanto que no processo MIG/MAG convencional o modo de transferência globular foi obtido para tensões de arco acima de 24 V, no processo UMIG/MAG a transferência por curto circuito ocorreu para tensões de arco de até 29 V. Já para tensões de arco abaixo de 24 V, onde em ambos os processos a transferência foi por curto circuito, a frequência de curto circuito obtida com o processo U-MIG/MAG foi consideravelmente maior (Figura 6). Este resultado indica, portanto, que com o emprego do campo ultrassônico na soldagem MIG/MAG as gotas podem ser transferidas à poça fundida com menor tamanho, correspondendo, assim, a uma condição de maior estabilidade do processo e, conseqüentemente, uma melhor qualidade do cordão de solda [22].

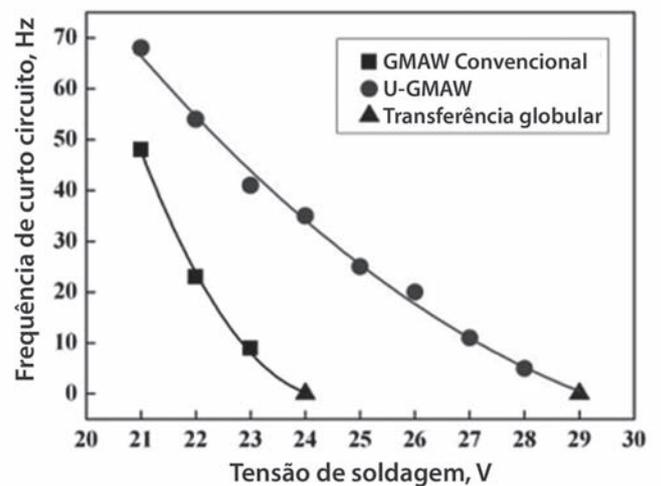


Figura 6. Frequências de curto circuito para diferentes tensões de arco [20]

Fan et al. [18] também estudaram a influência do campo ultrassônico sobre a geometria das gotas no modo de transferência globular. De acordo com seus resultados, ao soldar com frequência ultrassônica de 20 kHz, potência do ressonador de 110 W e amplitude de vibração de 30  $\mu\text{m}$ , quando o diâmetro

das gotas excede o diâmetro do arame, as mesmas começam a se deformar, alongando-se na direção axial do eletrodo, enquanto o seu diâmetro permanece constante. Este processo de alongamento continua até que haja o destacamento, de modo que a gota adquire um formato aproximadamente elipsoidal, com um comprimento, na direção axial do arame, cerca de duas vezes o diâmetro. Embora estes autores não tenham conseguido medir diretamente o tamanho das gotas, devido às dificuldades decorrentes do seu formato alongado, afirmam que, aparentemente, o volume das gotas no processo UMIG/MAG é menor que o obtido na soldagem MIG/MAG convencional. Por fim, cabe salientar que, segundo estes mesmos autores, o emprego da vibração ultrassônica no processo MIG/MAG reduziu em 10 A a corrente de transição para as condições de soldagem utilizadas nos ensaios.

### 3. O arco como fonte de energia ultrassônica

Conforme foi visto, o emprego de transdutores do tipo mecânico nos processos de soldagem a arco é limitado [23], uma vez que estes transdutores não suportam as elevadas temperaturas presentes em regiões próximas ao arco, suas dimensões e massa dificultam o seu deslocamento juntamente com a tocha de soldagem [24] e sua aplicação é restringida pelas dimensões da peça de trabalho [20]. Em vista disso, no final da década de 1990, Wu et al. [25] desenvolveram um novo método, chamado de arco com excitação ultrassônica da corrente, onde o arco voltaico atua não somente como uma fonte de calor, mas, também, como um mecanismo de emissão de ultrassom para introduzir energia na poça fundida [24]. Isto só é possível, tendo em vista que o arco possui boa característica de resposta dinâmica, não apresentando restrições dentro do espectro ultrassônico [3,24,26].

No método proposto por Wu et al. [25], o arco com excitação ultrassônica é obtido por intermédio de uma corrente contínua, de valor constante (corrente principal de soldagem), associada a uma corrente pulsada com frequência de pulsação superior a 20 kHz (corrente de excitação). A corrente contínua é proveniente de uma fonte de soldagem convencional, enquanto que a corrente pulsada provém de outra fonte de energia (fonte de excitação), capaz de realizar o chaveamento da corrente em altas frequências. A corrente com frequência de pulsação ultrassônica é então modulada à corrente constante, para assim, formar a corrente que passa pelo arco de soldagem. Esta modulação da corrente é conseguida conectando-se, em paralelo, os cabos de corrente das duas fontes de soldagem, conforme mostra a Figura 7.

Neste método a principal fonte de energia do arco é do tipo convencional, de corrente contínua, enquanto que a corrente pulsada com frequências no campo do ultrassom é responsável por dar origem à característica ultrassônica do arco, sendo pouco significativa a sua contribuição para o aporte de calor à peça. Assim, com a utilização de duas fontes distintas os controles do aporte de calor e da emissão ultrassônica se tornam independentes.

Variações do método proposto por Wu et al. [25] são encontradas na literatura em trabalhos mais recentes. Cong et

al. [28,29] empregaram na soldagem TIG uma fonte de corrente

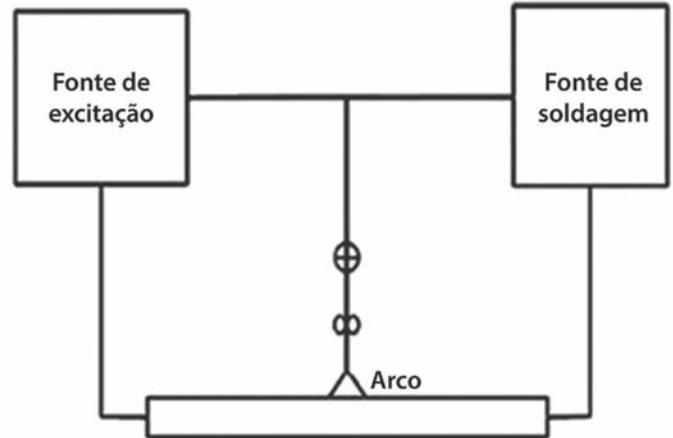


Figura 7. Diagrama esquemático do método com excitação ultrassônica pela modulação da corrente de soldagem[27]

alternada, com forma de onda retangular em baixa frequência, associada a uma fonte capaz de realizar a pulsação da corrente em frequências ultrassônicas. A corrente de excitação ultrassônica foi então modulada à corrente principal de soldagem somente durante os períodos de pulso positivo da corrente alternada, dando origem a um pulso híbrido, conforme a denominação dada pelos autores (Figura 8).

Seguindo a mesma linha dos trabalhos acerca da excitação ultrassônica do arco mediante a pulsação da corrente, onde as informações não são apresentadas de forma completa, nos trabalhos de Cong et al. não é apresentada a topologia do circuito que permite a modulação da corrente de excitação somente durante os períodos de pulso positivo da corrente principal de soldagem alternada, nem tampouco, é explicitada de que forma a modulação entre as correntes foi obtida, já que esta modulação não é trivial de ser conseguida assim como nos casos onde a corrente principal de soldagem é contínua.

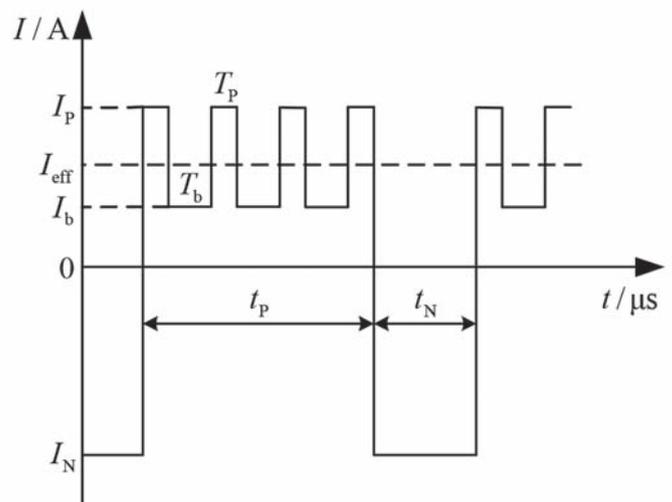


Figura 8. Diagrama esquemático da forma de onda híbrida obtida pela modulação da corrente de excitação ultrassônica à corrente principal de soldagem alternada [29]

Já Wang et al. [16] conceberam um método que combina a técnica do arco excitado ultrassonicamente com o já conhecido duplo cátodo. Sua proposta consiste em estabelecer um arco principal em corrente contínua, assim como o que é utilizado na soldagem TIG tradicional, sendo este a principal fonte de calor para realizar a fusão do metal de base. E outro, de menor intensidade, porém, com corrente pulsada em frequências acima de 20 kHz, com a função de introduzir energia ultrassônica na poça fundida. Estes dois arcos são, então, estabelecidos um próximo ao outro, dando origem a um único arco híbrido atuando numa única poça fundida, como mostra a Figura 9.

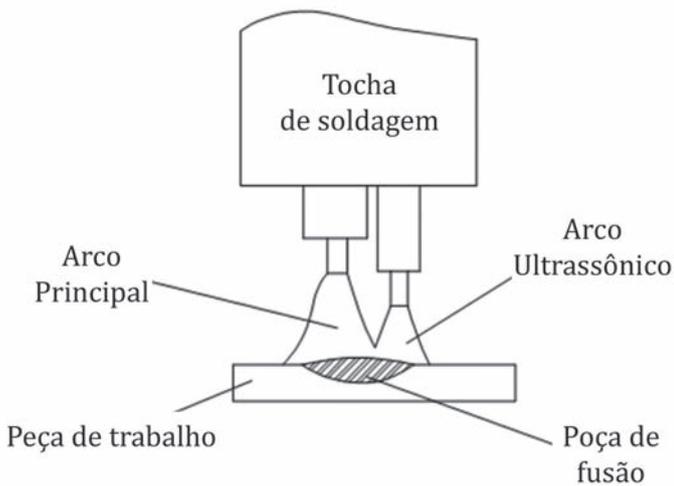


Figura 9. Diagrama esquemático do método de duplo cátodo com excitação ultrassônica [16]

Conforme pode se observar, os diferentes métodos de excitação ultrassônica do arco, utilizando o próprio arco voltaico como fonte de emissão de ultrassom, não impõem à operação de soldagem nenhuma limitação quanto às dimensões da peça de trabalho e ao deslocamento da tocha de soldagem, nem tampouco exigem requisitos especiais em relação ao projeto da tocha e das juntas de soldagem. Assim, para viabilizar a aplicação destes métodos, basta que o equipamento de soldagem seja capaz de fornecer a corrente de excitação ultrassônica. Em vista disso, é possível encontrar na literatura a aplicação deste método em outros processos de soldagem diferentes do TIG, como, por exemplo, no processo plasma (seja pela técnica “meltin” [30-32] ou “keyhole” [33]) e arco submerso [34,35]. Inclusive, podem-se aproveitar as vantagens da pulsação ultrassônica na aplicação da aspersão térmica, para melhorar as propriedades do revestimento. De acordo com He et al. [36] e Hao et al. [37], o emprego do ultrassom melhorou a atomização durante o processo de spray, reduzindo efetivamente o tamanho das partículas fundidas e melhorando, assim, a uniformidade do revestimento. Hao et al. [37] também relatam o aumento da aderência do revestimento no processo de aspersão térmica e Ma et al. [38] no revestimento por plasma.

### 3.1. Efeitos da oscilação ultrassônica da corrente na soldagem a arco

Nos casos em que o arco atua como fonte de energia ultrassônica devido à pulsação da corrente, resultados experimentais mostram que a pressão sonora oriunda do arco cresce linearmente com a amplitude da corrente de excitação ultrassônica [3], evidenciando, assim, a ótima característica de resposta dinâmica da coluna de plasma perante a corrente de soldagem. Além disso, a vibração das partículas no plasma sob influência do campo ultrassônico pode aumentar a velocidade instantânea e a condutividade térmica dessas partículas. Isso contribui para a constrição do arco e, assim, para um incremento da densidade de corrente, o que tende a aumentar a penetração da solda [4]. O efeito de constrição do arco é relatado por Cong et al. [39] e Qi et al. [29], como resultado da aplicação do método do pulso híbrido no processo TIG, o que resultou numa maior pressão do arco e aumento da densidade de energia do mesmo. Ainda segundo Qi et al. [29], a pressão do arco depende da frequência de pulsação, sendo que nos ensaios realizados o valor máximo foi obtido para frequência de 40 kHz. Já Cong et al. [40] afirmam que, além de aumentar a penetração da solda, a ação de limpeza catódica é significativamente melhorada com a elevação da frequência de pulsação ultrassônica.

De acordo com os resultados de Wang et al. [16] o emprego do ultrassom, além de melhorar a estabilidade do arco na soldagem com duplo cátodo, também contribui para aumentar a eficiência do processo de soldagem. Este aumento de eficiência também é citado por Wu et al. [41] na soldagem a arco submerso empregando excitação ultrassônica. Já He et al. [42], utilizando a tenacidade como critério de avaliação, afirmam que a qualidade da junta soldada está relacionada tanto com a frequência quanto com a energia de excitação do arco, e que há uma faixa de energia para a qual a performance da junta é significativamente melhorada..

Em relação às características dimensionais do cordão de solda, Zhou et al. [43], na soldagem de ligas de titânio grau 5, afirmam que a largura da solda diminui à medida que a frequência e a energia de excitação ultrassônica são aumentadas. Do mesmo modo, Qi et al. [44], na soldagem do aço inoxidável 0Cr18Ni9Ti, mostram que à medida em que a frequência de pulsação aumenta, diminui a largura do cordão, enquanto a penetração da solda aumenta. Este aumento de penetração da solda com a frequência também foi observado por Qi et al. [29] na soldagem TIG com corrente alternada de uma liga de alumínio do tipo 2219 utilizando o método de excitação do pulso híbrido. Contudo, de acordo com os seus resultados, a largura do cordão de solda também aumenta com a frequência de pulsação da corrente.

Quando é considerado o desempenho das uniões soldadas em componentes de engenharia, algumas das questões mais importantes são as propriedades mecânicas do metal de solda, a integridade da junta soldada e a soldabilidade [45]. Estas questões estão intimamente relacionadas com a microestrutura do metal de solda [14]. Assim, é possível encontrar na literatura uma grande quantidade de trabalhos que demonstram que a microestrutura com grãos refinados não somente reduz a

susceptibilidade às trincas [46-49], mas, também, melhora as propriedades mecânicas do metal de solda como dureza, ductilidade, resistência à tração e resistência à fadiga. Neste contexto, a introdução de energia ultrassônica na poça fundida tem se mostrado um método promissor de aumento da qualidade das soldas resultantes.

Em diversos trabalhos é descrita a obtenção de um notável refino de grãos na zona fundida [50-53] com tendência à formação de grãos equiaxiais [43], como resultado da introdução da excitação ultrassônica no arco. Zhang et al. [54] investigaram o efeito de refino de grão na solda para uma ampla faixa de frequências de excitação ultrassônica. Seus resultados indicam que o refino de grão é efetivo somente em determinadas frequências, neste caso 30, 50 e 80 kHz, atribuindo isto à ressonância existente entre a excitação externa e a poça fundida [25]. Com base no trabalho de Zhang et al. [54], Chen et al. [55] na soldagem do aço CLAM (China Low Activation Martensitic steel) adotaram uma frequência de 50 kHz e observaram que o ultrassom, além de reduzir o tamanho das ripas de martensita, produziu uma distribuição mais fina e uniformemente distribuída de precipitados de carboneto M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, efeitos estes que também são relatados por Chen et al. [56]. Resultados semelhantes são descritos por Lei et al. [51] na soldagem plasma do compósito SiCp/6061Al, empregando como material de adição a liga Ti-6061Al, onde compostos como TiC e TiN foram significativamente refinados, ao mesmo tempo em que sua distribuição tornou-se expressivamente mais homogênea.

Lei et al. [27], também na soldagem plasma do compósito SiCp/6061Al, investigaram o efeito de refino de grão para frequências de excitação ultrassônica de 25 a 80 kHz e correntes com amplitude de até 20 A. De acordo com os seus resultados, as fases Al<sub>3</sub>Ti foram nitidamente refinadas, com tamanhos de grão de 10-20 μm para frequência de 30 kHz e 5-10 μm para frequência de 50 kHz, contrastando com o tamanho de 20-40 μm obtido sem a excitação ultrassônica. Além disso, quando submetidas ao ensaio de tração, as amostras realizadas com frequência de 50 kHz apresentaram os melhores resultados. Além do refino das partículas Al<sub>3</sub>Ti, Lei et al. [31] relatam uma redução significativa da segregação intergranular de partículas ricas em Si com o aumento da frequência. Neste contexto, Lei et al. [30] e Xue et al. [32] observaram que quando a frequência de pulsação não pertence ao grupo das frequências de ressonância, a introdução do ultrassom apenas conduziu ao refinamento da fase recém-criada de Al<sub>3</sub>Ti. Já, quando foram utilizadas frequências de pulsação pertencente ao grupo das frequências de ressonância, foi observada, além do refino, uma dispersão e distribuição homogênea das partículas de Al<sub>3</sub>Ti. Este resultado concorda com o que é descrito por Lei et al. [33] na soldagem plasma pela técnica “key-hole”. Segundo os autores, a excitação ultrassônica do arco nas frequências de ressonância é mais eficiente do que aquela em frequências não ressonantes no que se refere à redução do tamanho de grão e à homogeneização da microestrutura.

He et al. [57], na soldagem a arco submerso, também descrevem a redução do tamanho de grão na zona fundida e o estreitamento da região de grãos grosseiros na ZAC (ZAC-GG). Esta redução do tamanho de grão, juntamente com o

estreitamento da ZAC-GG também é relatada por Qi et al. [58], na soldagem TIG do aço inoxidável austenítico ICr18Ni9Ti. Wu et al. [59] também atribuem ao arco ultrassônico o refino de grãos obtido na soldagem de aço carbono e de titânio, melhorando, assim, a ductilidade e a resistência à fadiga das juntas soldadas. Wang et al. [16], na soldagem TIG com duplo cátodo, ao aplicar corrente com pulsação ultrassônica de amplitude de 10 A, razão cíclica de 50% e frequência de 53 kHz também obtiveram refino de grão na microestrutura do aço inoxidável AISI 304. Ainda de acordo com Wang et al. [60], além de refinar o grão, o emprego deste método pode melhorar efetivamente as propriedades à tração das soldas.

Análises metalográficas realizadas por vários autores mostram que, além do significativo efeito de refino de grão obtido com excitação ultrassônica na soldagem por arco submerso do aço ao níquel 09MnNiDR, mais ferrita acicular aparece na zona fundida [34,35,41,50], enquanto que diminui a quantidade de ferrita proeutetóide [61]. Zhang et al. [24], ao empregarem corrente de excitação ultrassônica de 15 A com frequência de 50 kHz, observaram uma mudança considerável da morfologia dos grãos de ferrita, de lamelar para acicular, o que resultou num aumento de resistência mecânica entre 6% e 11%. Os resultados obtidos por Cong et al. [28] e Qi et al. [62], na soldagem TIG com corrente alternada da liga de alumínio 2219-T87, mostram que a utilização de corrente ultrassônica modulada durante os períodos de pulso positivo da corrente, promove a mudança dos grãos grosseiros na zona fundida para equiaxiais finos, acarretando num aumento da resistência à tração de cerca de 22%. Cong et al. [63], na soldagem da liga de alumínio 5A06 com frequência de pulsação de 40 kHz, afirmam a obtenção de resistência à tração e alongamento percentual da solda de 95,8% e 84,8%, respectivamente, em relação ao metal de base. Mudança dos grãos colunares grosseiros para equiaxiais também é relatada por He et al. [3] na soldagem da liga Ti-6Al-4V, utilizando frequência e corrente de excitação de 50 kHz e 10 A, respectivamente (Figura 10).

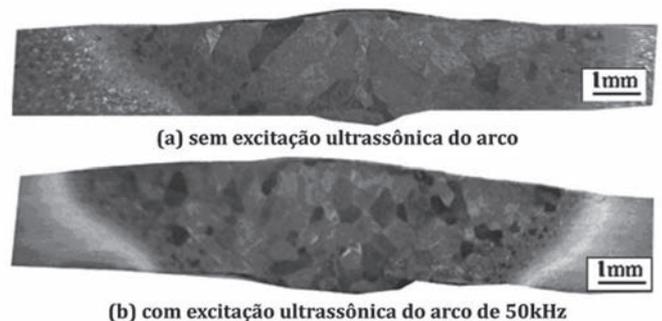


Figura 10. Macroestrutura das juntas Ti-6Al-4V soldadas (a) sem ultrassom e (b) com ultrassom [3]

Segundo as informações presentes na literatura, a vibração ultrassônica também tem influência significativa sobre a zona parcialmente fundida (ZPF) e a zona afetada pelo calor (ZAC). Segundo Zhang et al. [24] e He et al. [64], a vibração ultrassônica acelera a condução de calor e, como resultado, aumenta a taxa de resfriamento da solda, fazendo com que o metal permaneça

durante um tempo menor acima da temperatura AC3 e reduzindo, assim, o tamanho dos grãos na zona parcialmente fundida. Neste contexto, Zhang et al. [34], na soldagem com arco submerso, relata a obtenção do refino da microestrutura de grãos grosseiros na zona parcialmente fundida. Além disso, de acordo com Zhang et al. [24] a vibração ultrassônica quebra os filmes óxidos presentes na interface sólido/líquido durante a solidificação e, devido ao fluxo turbulento desenvolvido próximo desta interface, promove o desprendimento dos grãos parcialmente fundidos do metal de base imediatamente adjacente à poça fundida.

Como regra geral, é desejável que a ZAC seja o mais estreita possível. Entretanto, de acordo com os resultados de Zhang et al. [24], o tamanho da ZAC cresce na medida em que a excitação ultrassônica aumenta. Segundo estes autores, isto é decorrente da compressão e expansão periódica da matriz metálica devido à propagação do ultrassom. Assim, durante a compressão, o volume de uma determinada região da matriz decresce acarretando num aumento de temperatura local, enquanto que na expansão ocorre o efeito contrário. Este gradiente de temperatura entre as áreas de compressão e expansão promove a transferência de calor na matriz, responsável pelo aumento do tamanho da ZAC. Entretanto, ao analisar a microestrutura desta região, Zhang et al. [24] observaram que a zona afetada pelo calor possuía uma estrutura de grãos mais finos, com tamanho de grão na ZAC-GG 50% menor do que os obtidos sem ultrassom e com melhores propriedades mecânicas do que o metal de base. Em relação às propriedades da ZAC, Wu et al. [41] também afirmam que a resistência ao impacto do aço 09MnNiDR, nesta região, foi melhorada em cerca de 50% com o emprego da soldagem ultrassônica em 50 kHz.

#### 4. Considerações finais

Os trabalhos pesquisados mostram que o ultrassom pode ser aplicado com êxito numa área até então não explorada: a soldagem a arco. Conforme pôde ser observado, a proposta destes trabalhos está centrada no desenvolvimento de técnicas adequadas de aplicação do ultrassom e na potencialização dos efeitos benéficos em relação à execução da soldagem e a garantia de qualidade final da solda.

Conforme visto, as formas de introdução de energia ultrassônica na soldagem a arco podem ser classificadas em dois grupos principais: a) a excitação mecânica de algum elemento que compõe o conjunto de soldagem seja este o eletrodo, a peça de trabalho ou, diretamente, a poça fundida; b) a pulsação da corrente em altas frequências (acima de 20 kHz), que pode ser implementada em um só arco (mediante a modulação da corrente provinda de duas fontes de energia independentes) ou em dois arcos agindo sobre uma mesma poça fundida.

A excitação mecânica apresenta como principal vantagem o fato da oscilação ultrassônica estar totalmente desvinculada da corrente de soldagem, o que permite a implementação desta técnica com uma fonte de energia convencional. Por outro lado, apresenta dificuldades e restrições, dentre elas: a relativa baixa temperatura máxima de trabalho do ressonador, o que dificulta sua aplicação junto à tocha de soldagem, devido às elevadas temperaturas inerentes ao arco voltaico; a necessidade de

utilizar um ressonador de elevada potência quando se pretende excitar um elemento de elevada massa, como é o caso da peça de trabalho; há também limitações quanto à massa e dimensões do ressonador, quando são empregadas técnicas em que este deve ser deslocado juntamente com a tocha de soldagem. Além disso, há de ser considerado também o custo do sistema de geração de ultrassom tendo em vista o seu relativo alto valor quando comparado ao dos equipamentos de soldagem.

Já a excitação ultrassônica do arco mediante a pulsação da corrente de soldagem em frequências ultrassônicas não requer a utilização de qualquer dispositivo ou sistema auxiliar de soldagem. De fato, esta técnica pode ser implementada com o uso de duas fontes de energia. Uma convencional, de maior potência, responsável pela maior parte do aporte de energia à solda, e uma auxiliar, pulsando em frequências acima de 20 kHz e, portanto, exigindo uma alta velocidade de chaveamento, constituindo-se, assim, numa fonte ultrarrápida. Essas duas fontes podem ser empregadas de forma isolada, cada uma alimentando um arco voltaico, porém, ambos atuando sobre uma mesma poça fundida, ou conectadas em paralelo, dando origem a uma corrente de soldagem modulada, capaz de excitar ultrassonicamente o arco voltaico. Entretanto, nos casos onde a corrente principal de soldagem não é contínua, esta modulação não é simples, o que demanda, necessariamente, o desenvolvimento de circuitos complexos de eletrônica de potência. Com base nisso, surgem dois desafios a serem vencidos para a aplicação desta técnica. O de conceber fontes de soldagem com características dinâmicas tais que a taxa de variação da corrente permita a sua oscilação em elevadas frequências, e o desenvolvimento da tecnologia envolvida na modulação entre a corrente de excitação e a corrente principal de soldagem, principalmente nos casos onde a corrente de soldagem é alternada.

Conforme visto, os benefícios decorrentes do uso da introdução do ultrassom na soldagem a arco são diversos. Dentre eles, tem-se: a) a melhoria das características operacionais do processo, tais como a regularidade e estabilidade da transferência metálica, o aumento da penetração (o que pode ser traduzido em melhoria da produtividade e sanidade da solda), aumento do molhamento do cordão; b) melhoria das características metalúrgicas, como refino de grão na zona fundida e ZAC, aumento da homogeneidade da microestrutura, refino das partículas de segunda fase, alteração da morfologia dos grãos na zona fundida (de colunares para equiaxiais), redução das zonas parcialmente diluídas e redução da fração volumétrica de intermetálicos frágeis. Estas alterações metalúrgicas produzem efeitos positivos sobre a resistência mecânica, tenacidade, resistência à corrosão da solda, o que possibilita trabalhar com materiais de difícil soldabilidade, seja em juntas similares ou dissimilares.

Diante de tantas possibilidades, o emprego do ultrassom na soldagem a arco desponta, naturalmente, como uma técnica promissora na busca por melhores resultados na soldagem. Contudo, várias questões ainda precisam ser estudadas e melhor compreendidas, tais como a influência dos efeitos (sobre a resposta dinâmica da corrente ultrassônica) inerentes à oscilação da corrente em elevadas frequências que surgem devido à indutância do circuito de soldagem, o mapeamento da

relação entre os diversos parâmetros de soldagem deste novo processo com as características metalúrgicas e geométricas, bem como com as propriedades mecânicas da junta de solda e o desenvolvimento de meios tecnologicamente viáveis de modo a se conseguir a aplicação deste método de forma confiável no âmbito industrial.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – POSMEC da Universidade Federal de Santa Catarina e a empresa IMC Soldagem.

## 6. Referências Bibliográficas

- [1] KOMAROV, S. V.; KUWABARA, M.; ABRAMOV, O. V. High Power Ultrasonics in Pyrometallurgy: Current Status and Recent Development. *ISIJ International*, 45, n. 12, 2005.
- [2] TORREIRA, R. P. Salas Limpas. 1ª edição. ed. [S.l.]: Hermus. ISBN 85-289-0237-4.
- [3] HE, L. et al. Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process. *Applied Physics Letters*, 89, 2006.
- [4] SUN, Q. J. et al. Penetration increase of AISI 304 using ultrasonic assisted tungsten inert gas welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 14, n. 8, 2009.
- [5] SUN, Q. et al. The arc characteristic of ultrasonic assisted TIG welding. *China Welding*, 17, n. 4, 2008.
- [6] FAN, Y. et al. TIG welding of the stainless steel 304 based on the ultrasonic vibration. *Transactions of the China Welding Institution*, 30, n. 2, 2009.
- [7] SUN, Q. et al. Investigation and application of ultrasonic-TIG hybrid welding equipment. *Transactions of the China Welding Institution*, 02, 2010.
- [8] SUN, Q. et al. Characteristic of arc pressure in Ultrasonic-TIG hybrid welding. *Journal of Mechanical Engineering*, 47, n. 4, 2011.
- [9] WEN, L. D. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7075-T6. *Materials Letters*, 57, 2003.
- [10] DONG, H. et al. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 534, 2012.
- [11] WATANABE, T. et al. The effect of ultrasonic vibration on the mechanical properties of austenitic stainless steel weld. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 21, n. 2, 2003.
- [12] CUI, Y.; XU, C. L.; HAN, Q. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation. *Scripta Materialia*, 55, 2006.
- [13] WATANABE, T. et al. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2010.
- [14] CUI, Y.; XU, C. L.; HAN, Q. Microstructure Improvement in WeldMetal Using Ultrasonic Vibrations. *Advanced Engineering Materials*, 9, n. 3, 2007.
- [15] HAN, Y. et al. Influence of high-intensity ultrasound on grain refining performance of Al-5Ti-1B master alloy on aluminium. *Materials Science and Engineering A*, 405, 2005.
- [16] WANG, J.; HONG, X. Research on Twin-arc TIG Welding with Ultrasonic Excitation and Its Effect to Weld. *Key Engineering Materials*, 450, 2011.
- [17] ESKIN, G. I. Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonics Sonochemistry*, 8, 2001.
- [18] FAN, Y. Y. et al. Ultrasonic Wave Assisted GMAW. *Welding Journal*, 91, n. 3, 2012.
- [19] FAN, Y. et al. Development and preliminary study on the ultrasonic assisted GMAW method. *China Welding (English Edition)*, 19, n. 4, 2010.
- [20] FAN, Y. Y. et al. Research on short circuiting transfer mode of ultrasonic assisted GMAW method. *Science and Technology of Welding & Joining*, 17, n. 3, 2012.
- [21] FAN, Y. et al. Research on arc characteristics and metal transfer modes of ultrasonic assisted GMAW process. *China Welding (English Edition)*, 20, n. 3, 2011.
- [22] MODENESI, P. J.; AVELAR, R. C. The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 86, 1999.
- [23] ZHANG, C. L.; WU, M. S. High frequency Modulated Arc as an Ultrasonic Generator and Its Physical Property. *Transactions of The China Welding Institution (Resumo)*, 1, 2001.
- [24] ZHANG, C.; WU, M.; DU, J. Improving Weld Quality by Arc-Excited Ultrasonic Treatment. *Tsinghua Science and Technology*, 6, n. 5, 2001.
- [25] WU, M. et al. Study on Mechanism of Arc-Excited Ultrasonic. *Chinese journal of mechanical engineering*, 12, n. 1, 1999.
- [26] LU, S.; FUJII, H.; NOGI, K. Marangoni convection and weld shape variations in Ar-O<sub>2</sub> and Ar-CO<sub>2</sub> shielded GTA welding. *Materials Science and Engineering A*, 380, 2004.
- [27] LEI, Y. C.; WANG, Z. I.; CHEN, X. Z. Effect of arc-ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiC<sub>p</sub>/Al MMCs. *Trans. NonFerrous Met. Soc. China*, 2, 2011.
- [28] CONG, B. et al. Influences of Ultrasonic Pulse Square-Wave Current Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of 2219 Aluminum Alloy Weld Joints. *Acta Metallurgica Sinica*, 45, n. 9, 2009.
- [29] QI, B. et al. The effect of hybrid ultrasonic pulse current parameters on VPTIG arc pressure and weld formation. *Materials Science Forum*, 704-705, 2012.
- [30] LEI, Y. et al. Effect of arc ultrasonic vibration on microstructure of joint of plasma arc 'in situ' welding of SiC<sub>p</sub>/6061Al. *Science and Technology of Welding and Joining*, 16, n. 7, 2011.
- [31] LEI, Y. et al. Effect of ultrasonic frequency arc on microstructures of joint in plasma arc welding of SiC<sub>p</sub>/Al MMCs. *Transactions of the China Welding Institution*, 32, n. 4, 2011.
- [32] XUE, H. et al. Mechanism of AC arc-ultrasonic on joint of SiC<sub>p</sub>/6061Al MMCs. *Material Science and Technology*, 19, n. 5, 2011.

- [33] LEI, Y. et al. Numerical analysis of the molten pool vibration mode for arc-ultrasonic keyhole plasma arc welding. *China Welding (English Edition)*, 21, n. 1, 2012.
- [34] ZHANG, C. et al. Effects of arc-excited ultrasonic on microstructures and properties of weld. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 10, n. 6, 2000.
- [35] ZHANG, Y. et al. Improving weld quality of 09MnNiDR steel by using arc-excited ultrasonic. *China Welding (English Edition)*, 15, n. 1, 2006.
- [36] HE, L. et al. Study on Arc—ultrasonic Improving Overlaying Welding and Thermal Spaying Quality. *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, 18, n. 7, 2007.
- [37] HAO, H.; LI, L.; WU, M. Improving Bonding Strength of Arc-spraying Chromium Coatings by Arc-ultrasonic. *Hot Working Technology*, 9, 2004.
- [38] MA, J. et al. Influence of Arc-Ultrasonic Voltage on Adhesion Strength of Plasma Sprayed ZrO<sub>2</sub> Thermal Barrier Coating. *Materials Protection (resumo)*, 2, 2008.
- [39] CONG, B.; QI, B.; ZHOU, X. Ultrafast-convert hybrid pulse square-wave variable polarity TIG arc behavior. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 35, n. 8, 2009.
- [40] CONG, B.; QI, B.; ZHOU, X. TIG arc behavior of ultrafast-convert high-frequency variable-polarity square wave. *Transactions of the China Welding Institution*, 30, n. 6, 2009.
- [41] WU, M. et al. Arc-excited ultrasonic welding to improve the quality of 09MnNiDR joints. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2, 2006.
- [42] HE, L.; LI, L.; WU, M. Effect of arc-ultrasonic parameters on welding joint performance. *Journal of Tsinghua University*, 50, n. 2, 2010.
- [43] ZHOU, R. L. et al. Arc-ultrasonic tungsten inert-gas arc welding of TC4 Ti alloy. *Transactions of The China Welding Institution*, 6, 2004.
- [44] QI, B. et al. The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012.
- [45] FOLKHARD, E. *Weld. Metall. of Stainless Steels*. New York: Springer-VerlagWien, 1984.
- [46] EASTERLING, K. *Int. to the Phys. Metall. of Weld*. Butterworths, 2, 1983.
- [47] KOU, S.; LE, Y. *Metall. Trans. A*, 16A, 1985.
- [48] GARLAND, J. G. *Met. Const. and Brit. Weld. J.*, 21, 1974.
- [49] DAVIES, G. J.; GARLAND, J. G. *Inst. Metall. Rev.*, 20, 1975.
- [50] ZHANG, Y. J.; LU, M.; WU, M. S. Effect of arc-excited ultrasonic on the quality of the 09MnNiDR steel's joint. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 4, 2006.
- [51] LEI, Y. C. et al. Improving Effect of Arc-Ultrasonic on Microstructure and Properties of Weld in Plasma Arc Welding of SiC<sub>p</sub>/6061Al Composite. *Materials for Mechanical Engineering*, 12, 2009.
- [52] DU, J. L. et al. Influence on grain refinement of arc-ultrasound in welding process. *Electric Welding Machine*, 3, 2002.
- [53] HE, L.; LI, L.; WU, M. Propagating feature of arc ultrasonic and its effect on bond area. *Transactions of the China Welding Institution*, 31, n. 8, 2010.
- [54] ZHANG, C. et al. Research on Resonance Mechanism of Arc-ultrasonic. *J. Mater. Sci. Technol.*, 16, n. 5, 2000.
- [55] CHEN, X.; SHEN, Z.; WANG, J. Effects of an ultrasonically excited TIG arc on CLAM steel weld joints. *Int J Adv Manuf Technol*, set., 2011.
- [56] CHEN, X. et al. Effect of GTA-ultrasonic excited-voltage on microstructure and impact toughness of CLAMs weldments. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 32, n. 6, 2011.
- [57] HE, L. B. et al. Effect of Arc-ultrasonic on Welding Structure and Property of Q235A Steel with SMAW. *Hot Working Technology*, 01, 2006.
- [58] QI, B. et al. Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding power source topology and welding applicability. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 35, n. 1, 2009.
- [59] WU, M. et al. Study on arc-ultrasonic welding technology. *Transactions of the China Welding Institution*, 26, n. 6, 2005.
- [60] WANG, J.; LIN, T. Twin-arc TIG welding with ultrasonic excitation. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 45, n. 1, 2011.
- [61] YANG, B. Y. et al. Study on Arc-ultrasonic SAW Improving Structure and Property of 09MnNiDR Welding Joint. *Hot Working Technology*, v. 02, 2006.
- [62] BOJIN, Q. et al. Ultrafast-convert complex-pulse VPTIG technology of high strength aluminum alloy ( Conference Paper ). *Welding in the World*, 53, 2009.
- [63] CONG, B. et al. Ultrafast-Convert Complex-Pulse Square-Wave VPTIG Welding of 5A06 Aluminum Alloy. *Aerospace Materials & Technology*, 02, 2009.
- [64] HE, L.; LI, L.; WU, M. Effect of Arc Ultrasonic on Welding Heat Transfer Process. *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, 21, n. 2, 2010.