



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRESSA CLARICE DE SOUSA CÂMARA

**IDENTIFICAÇÃO DA MORFOLOGIA DO GRÃO NO METAL DE SOLDA EM
FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO**

MOSSORÓ-RN

2018

ANDRESSA CLARICE DE SOUSA CÂMARA

**IDENTIFICAÇÃO DA MORFOLOGIA DO GRÃO NO METAL DE SOLDA EM
FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA, Campus Mossoró para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga – UFERSA.

MOSSORÓ-RN

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C172i Câmara, Andressa Clarice de Sousa.
Identificação da morfologia do grão no metal de solda em função da variação da temperatura de pré-aquecimento / Andressa Clarice de Sousa Câmara. 2018.
32 f. : il.

Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Mecânica, 2018.

1. TIG Autógeno. 2. Solidificação. 3. Parâmetros de soldagem. 4. Microestrutura. I. Fraga, Francisco Edson Nogueira, orient. II. Título.

ANDRESSA CLARICE DE SOUSA CÂMARA

**IDENTIFICAÇÃO DA MORFOLOGIA DO GRÃO NO METAL DE SOLDA EM
FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Defendida em: 14/04/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga
Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis
Prof. Dr. Francisco Evaristo Uchoa Reis (UFERSA)
Membro Examinador

Eng. Ingrid Heloisa da Silva Alves
Eng. Ingrid Heloisa da Silva Alves (UFERSA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais, Andrea Carla e José Hamilton, e a minha irmã, Ana Clarice, que estão sempre presentes em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as bênçãos, proteção e força concedidas.

Aos meus pais, Andrea Carla e José Hamilton, por sempre se esforçarem para me oferecer o melhor. Obrigada por todo amor, carinho, dedicação e apoio!

À minha irmã Ana Clarice e ao meu namorado Stênio Davyd, pelo apoio, paciência e incentivo ao longo dessa jornada.

À toda minha família, pela torcida e vibrações para a conclusão desse curso.

Aos meus amigos, que estiveram presentes durante essa árdua jornada, tornando-a mais leve e feliz!

À Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA), por proporcionar ambiente e estrutura de educação com qualidade.

Ao meu orientador, Francisco Edson Nogueira Fraga, pela atenção e dedicação.

Enfim, a todos que se fizeram presentes ao longo dessa caminhada e que me incentivaram para a conclusão dessa etapa da minha vida.

RESUMO

O conhecimento da influência de parâmetros da soldagem sobre a microestrutura dos materiais metálicos é de suma importância pois a avaliação dos microconstituintes tem relação direta com as propriedades mecânicas finais obtidas na junta soldada, bem como a morfologia do grão que exerce um papel importante na tenacidade do metal de solda. Diversas variáveis no processo de soldagem podem influenciar na solidificação do metal de solda, como por exemplo a energia de soldagem, a condutividade térmica do material, a espessura do material e o pré-aquecimento, em que todas estão associadas à taxa de resfriamento que, por sua vez, influencia diretamente nos processos de nucleação e crescimento na solidificação. Este trabalho tem o objetivo identificar diferentes morfologias de grão que podem ser encontradas em um metal de solda em função da variação da temperatura de pré-aquecimento. Dessa forma, foram realizados experimentos com solda TIG autógena variando o pré-aquecimento em três níveis (soldagem à 36°C, à 100°C e à 200°C), mantendo energia de soldagem e demais parâmetros constantes. Os metais de solda foram analisados metalograficamente, caracterizando as morfologias de grão presentes nas seções transversais dos cordões de solda. Foram encontradas combinações de morfologias distintas para cada temperatura de pré-aquecimento. Na amostra sem pré-aquecimento foi encontrado zona colunar com equiaxial central, enquanto que a amostra a 100°C apresentou apenas crescimento epitaxial e por fim a amostra a 200°C mostrou crescimento epitaxial com zona equiaxial central, evidenciando a influência da temperatura de pré-aquecimento. Complementarmente foi possível constatar que a largura e a profundidade do cordão de solda são maiores à medida que esse parâmetro é aumentado.

Palavras-chave: TIG Autógeno. Solidificação. Parâmetros de soldagem. Microestrutura.

ABSTRACT

The knowledge of the influence of welding parameters on the microstructure of the metallic materials is extremely important because the evaluation of the microconstituents has a direct relation with the final mechanical properties obtained in the welded joint, as well as the morphology of the grain that plays an important role in the tenacity of the welding metal. Several variables in the welding process can influence the solidification of the weld metal, such as the welding energy, the thermal conductivity of the material, the thickness of the material and the preheating, all of which are associated with the cooling rate, in turn, directly influences the processes of nucleation and growth in solidification. This work has the objective to identify different grain morphologies that can be found in a weld metal as a function of preheating temperature variation. In this way, experiments with autogenous TIG welding were performed, varying the preheating in three levels (welding at room temperature, at 100°C and 200°C), maintaining welding energy and other constant parameters. The welding metals were analyzed metallographically, characterizing the grain morphologies present in the cross sections of the weld beads. Combinations of different morphologies were found for each preheating temperature, in the sample at room temperature was found columnar zone with central equiaxial, while the sample at 100°C showed only epitaxial growth and finally the sample at 200 ° C showed epitaxial growth with central equiaxial zone, evidencing the influence of the preheating. In addition, it was possible to verify that the width and the depth are bigger as this parameter is increased.

Key words: Autogenous TIG. Solidification. Welding Parameters. Microstructure.

.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do processo de soldagem TIG.....	11
Figura 2: Curvas de Temperatura em várias posições de uma junta soldada.....	15
Figura 3: Representação esquemática do crescimento epitaxial.....	17
Figura 4: Estruturas de solidificação na seção longitudinal.....	18
Figura 5: Corpo de prova em temperatura ambiente.....	21
Figura 6: Corpo de prova a 100°C.....	21
Figura 7: Corpo de prova a 200°C.....	22
Figura 8: Local do corte na seção transversal do cordão.....	22
Figura 9: Amostras polidas e lixadas para análise.....	23
Figura 10: Macrografia da amostra soldada sem pré-aquecimento.....	24
Figura 11: Macrografia da amostra soldada com pré-aquecimento de 100°C.....	25
Figura 12: Macrografia da amostra soldada com pré-aquecimento de 200°C.....	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Processos de Soldagem.....	12
2.2 Soldagem Tig	12
2.3 Variáveis do processo de soldagem.....	13
2.3.1 Corrente.....	13
2.3.2 Velocidade de soldagem.....	14
2.3.3 Eletrodo	14
2.3.4 Gás de proteção	15
2.3.5 Temperatura de pré-aquecimento.....	15
2.3.6 Taxa de resfriamento	16
2.4 Morfologia do grão.....	18
2.4.1 Morfologias encontradas no metal de solda	18
3 METODOLOGIA	22
3.1 Materiais e Equipamentos	22
3.2 Procedimento e preparação dos corpos de prova.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é o processo de união de materiais usado para obter a união localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição (BRACARENSE et al, 2013). Os processos de soldagem são utilizados nas mais diversas situações que vão desde um simples reparo, como consertos em geral, até a construção de pontes e de superpetroleiros, ou seja, as aplicações práticas dependem do que se quer e são relacionadas diretamente ao que se precisa.

O processo de soldagem é influenciado por uma gama de fatores como metal de base, metal de adição, corrente, tipo de gás de proteção, tipo de junta, posição da soldagem, características elétricas, taxa de resfriamento, técnicas de soldagem e temperatura de pré-aquecimento (FIGUEIROA et al, 2015). Essas variáveis influenciam na penetração, largura e altura do cordão de solda, além de influenciar na morfologia e microestrutura do grão do metal de solda.

Um dos parâmetros mais importantes é a temperatura de pré-aquecimento cuja principal função é reduzir a taxa de resfriamento e, como consequência minimizar a formação de microestruturas frágeis, acelerar a difusão do hidrogênio e diminuir as tensões residuais causadas pela soldagem (QUESADA & ZALAZAR, 2002). A temperatura de pré-aquecimento também pode alterar a morfologia dos grãos no metal de solda durante a solidificação, podendo contribuir inclusive para um processo de crescimento somente epitaxial para determinadas condições de temperatura de pré-aquecimento.

A morfologia do grão exerce um papel importante na tenacidade do metal de solda, pois morfologias diferentes apresentam valores distintos dessa variável. Morfologias possíveis de se observar no metal de solda em uma junta soldada são desde apenas crescimento epitaxial, zona equiaxial central com crescimento epitaxial, ou apenas zona equiaxial central. Também é possível a ocorrência de zona coquilhada com crescimento colunar e zona equiaxial central, variando as condições de soldagem (PINHEIRO, 2012).

O propósito do presente trabalho é investigar quais combinações de morfologia podem ser observadas com a variação da temperatura de pré-aquecimento para uma determinada energia de soldagem utilizando a soldagem TIG Autógeno (Tungsten Inert Gas).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo contém as pesquisas realizadas em algumas bibliografias disponíveis sobre os assuntos relacionados com esse trabalho para proporcionar um melhor entendimento do contexto em que ele se apresenta e como forma de auxílio na interpretação dos resultados obtidos.

2.1 Processos de Soldagem

Grande parte dos processos de soldagem consiste em aquecer a superfície de contato de dois corpos levando-os a um estado de fusão e plasticidade. A região onde ocorre a fusão dos materiais é denominada junta, que se caracteriza por sua resistência e coesão depois do resfriamento. Dois dos principais tipos de processos de soldagem são os processos por pressão e os processos por fusão (SGARBI, 2013).

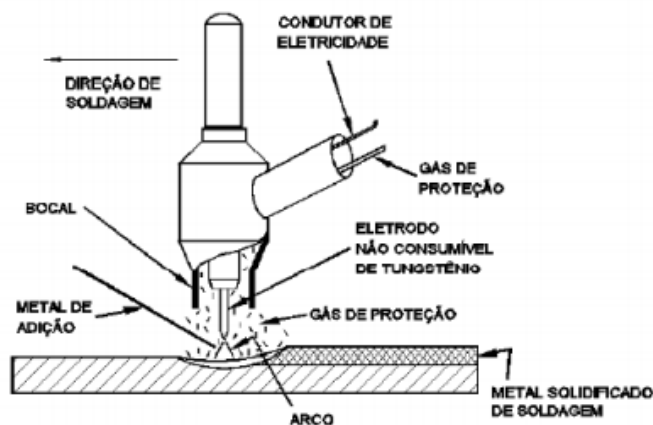
Os processos por fusão podem ser separados em sub-grupos, por exemplo, de acordo com o tipo de fonte de energia usada para fundir as peças. Dentre estes, os processos de soldagem a arco são o de maior importância industrial. Devido à tendência de reação do material fundido com os gases da atmosfera, a maioria dos processos de soldagem por fusão utiliza algum meio de proteção para minimizar estas reações (GOUVEIA, 2008).

2.2 Soldagem Tig

De acordo com Sgarbi (2013) a Soldagem TIG ou GTAW (dos termos em inglês *Tungsten Inert Gas* e *Gas Shielded Tungsten Arc Welding*) é um processo que utiliza um eletrodo não consumível de tungstênio puro ou composto com outros metais não consumíveis, no qual o arco elétrico se estabelece entre a peça de trabalho e o eletrodo. A poça de fusão e o eletrodo são protegidos contra os efeitos atmosféricos por um gás inerte cujo fluxo é direcionado pelo bocal da tocha de soldagem.

Quando a soldagem não é feita com metal de adição é conhecida como TIG Autógeno. Para o outro caso, o metal de adição é alimentado diretamente na poça de fusão. A Figura 1 ilustra o processo de soldagem TIG.

Figura 1 – Representação esquemática do processo de soldagem TIG.



Fonte: Liberato (2013)

Uma característica importante deste processo é o excelente controle de energia transferida para a peça e, aliado à eficiente proteção contra a contaminação, permite a soldagem de materiais de difícil soldabilidade, com ótimos resultados (LIBERATO, 2013). Além disso, em geral, produz soldas com boa aparência e acabamento.

2.3 Variáveis do processo de soldagem

Segundo Modenesi (2005), algumas das principais variáveis da soldagem são: nível de corrente, tipo de corrente, tensão de operação, comprimento do arco, velocidade de deslocamento, diâmetro do eletrodo, ângulo da tocha em relação à peça e tipo de gás de proteção.

No entanto, deve-se levar em consideração que as variáveis não agem especificamente de forma independente, havendo forte interação entre elas, de forma que algumas variáveis devem ser tratadas de maneira conjunta. Pimenta (2013) afirma que devido ao elevado número de variáveis envolvidas e a inter-relação entre elas, o estabelecimento das condições ótimas de soldagem para uma dada aplicação não é fácil.

Na soldagem TIG algumas variáveis tem uma maior influência que será descrita posteriormente.

2.3.1 Corrente

Na soldagem TIG, a variável que talvez tenha maior influência é a corrente. Há uma forte interação entre corrente e tensão. Para determinados valores de corrente existe

uma relação proporcional com a tensão. A corrente está mais ligada à penetração da solda (MODENESI, 2001). Dessa forma, quanto mais intensa a corrente, maior a penetração, já correntes mais baixas podem causar falta de fusão e baixa penetração.

Outro fator relacionado à corrente é a polaridade, que afeta tanto a penetração quanto a distribuição do calor entre o eletrodo e a peça. Segundo Teixeira (2011) a operação por corrente contínua com eletrodo na polaridade negativa é mais utilizado para soldagem de aços carbono. Assim, o calor gerado está 30% no eletrodo e 70% na peça a ser soldada, o que resulta na maior penetração, sendo a poça de fusão estreita e profunda. Na operação por corrente contínua com eletrodo na polaridade positiva, o calor gerado está 70% no eletrodo e 30% na peça a ser soldada, o que resulta numa poça de fusão rasa e larga. Há ainda a operação por corrente alternada, onde a distribuição de calor é intermediária, sendo indicada para soldagem de alumínio e cobre.

Figueirôa et al (2015) observou que quanto maior a corrente de soldagem, maiores os valores das características geométricas obtidas como largura do cordão, penetração linear, área penetrada, reforço linear, área de reforço e zona termicamente afetada (ZTA), e isso se deve ao fato de uma maior quantidade de energia ser imposta à peça na forma de calor, bem como a maior quantidade de metal de adição.

2.3.2 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é proporcional a corrente de soldagem. Maiores velocidades de soldagem requerem correntes de soldagem mais intensas, e para correntes baixas, a velocidade de soldagem deve ser reduzida. Uma velocidade de soldagem mais alta é preferível, visto que reduz a ocorrência de distorções (PRITCHARD, 2001).

Richard (2014) constatou que a largura do cordão de solda diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo maior no processo TIG do que no processo convencional FACW (Flux Cored Arc Welding – Soldagem a arco elétrico com arame tubular), isso para as mesmas velocidades. Foi observado também que a penetração do cordão de solda apresentou um comportamento irregular com o aumento da velocidade de soldagem, porém, foi observado que a mesma foi maior para o processo TIG.

2.3.3 Eletrodo

Para a soldagem TIG, outro parâmetro de influência é o diâmetro do eletrodo não consumível que é proporcional a corrente de soldagem. Sobre isso, Teixeira (2011) aponta que eletrodos com maiores diâmetros suportam maiores correntes de soldagem. Para

corrente contínua, utilizam-se eletrodos de tungstênio com óxido de tório, lantânio, ou cério, pois estes não formam uma semiesfera na ponta do eletrodo, mas sim uma ponta em ângulo. Para corrente alternada, utilizam-se eletrodos de tungstênio puro ou com óxido de zircônio, pois o calor do arco elétrico torna suas pontas semiesféricas durante o processo de soldagem.

O ângulo de apontamento do eletrodo também influencia no perfil da solda. Essa influência ocorre de forma que quanto mais agudo o ângulo, maior será a penetração e menor a largura do cordão de solda, para uma mesma corrente utilizada (PIMENTA, 2013).

2.3.4 Gás de proteção

O gás de proteção é um importante fator para garantir a qualidade da solda. Ele protege o ambiente da solda, que inclui eletrodo, poça de fusão e o próprio arco de solda. A ausência dessa proteção faz com que os gases da atmosfera reajam quimicamente com a solda. Geralmente são usados dois gases para a proteção, hélio e argônio (NORRISH, 1992). Nesse caso, o tipo de gás influencia na estabilidade do arco elétrico, na geometria do cordão de solda, na proteção da poça de fusão, na transferência de calor e na velocidade da soldagem.

Segundo Teixeira (2011, apud MACHADO, 1996), a seleção correta da vazão de gás de proteção é importante, não pode ser deficiente nem excessiva, o que acarretaria em descontinuidades e aumento nos custos de soldagem. A determinação de uma vazão de gás laminar depende do tipo de gás de proteção, da distância do bocal à peça, do tipo de junta, da geometria do bocal, da intensidade de corrente, da existência ou não de deslocamento de ar, da inclinação da tocha, do comprimento do arco elétrico, do tipo de metal de base, da velocidade e posição de soldagem.

Mateus et al (2011) observou que na soldagem TIG, quando se utiliza misturas de Ar-H₂ como gás de proteção há uma maior eficiência de fusão do que utilizando argônio puro. Outro ponto constatado foi que o uso de misturas Ar-H₂ no gás de proteção se caracteriza como uma importante alternativa para elevar a velocidade de soldagem, além de diminuir de maneira acentuada a tendência de formação dos defeitos de soldagem.

2.3.5 Temperatura de pré-aquecimento

A temperatura de pré-aquecimento é a mínima temperatura que deverá ser alcançada em toda a espessura do material, antes de efetuar a soldagem, a qual deverá

estender-se numa zona suficientemente ampla, em ambos os lados da junta, segundo Silva et al (2007). O forno convencional, as tochas de gás, os calefadores elétricos ou os aquecedores de painel radiantes infravermelhos podem ser usados para aplicar o pré-aquecimento.

Segundo Martins et al (2011), o pré-aquecimento é primordial para garantir um controle de taxas de resfriamento. Com a redução das taxas de resfriamento, obtém-se a redução da quantidade de microconstituintes duros e frágeis, além disso ocorre o aumento do tempo de resfriamento em baixas temperaturas, reduzindo as tensões residuais e favorecendo a remoção do hidrogênio da junta soldada para a atmosfera, o que minimiza o surgimento de trincas a frio naquela região.

Dessa forma, dentre todas as variáveis que influenciam na formação da microestrutura no metal de solda, uma das mais impactantes é a velocidade de resfriamento em uma determinada faixa de temperatura, sendo essa velocidade dependente primordialmente do aporte de energia e, portanto, indiretamente da temperatura inicial da junta (PINHEIRO, 2012).

Em um estudo feito por Silva et al (2007) foi evidenciado que o metal de solda, quando utilizado o pré-aquecimento, apresentou um melhor valor de tenacidade que o metal de base.

Outra influência que a temperatura de pré-aquecimento pode causar é alterar a morfologia dos grãos no metal de solda durante a solidificação em razão dela estar diretamente relacionada com a taxa de resfriamento. E tanto as diferentes taxas de resfriamento como o tempo de permanência em altas temperaturas, segundo Figueiroa et al (2015) causam mudanças morfológicas e microestruturais significativas.

2.3.6 Taxa de resfriamento

Os efeitos do aquecimento e resfriamento em soldagens são responsáveis por promover uma variedade de alterações nas propriedades físicas, metalúrgicas e microestruturais dos conjuntos soldados (SUZUKI, 1997).

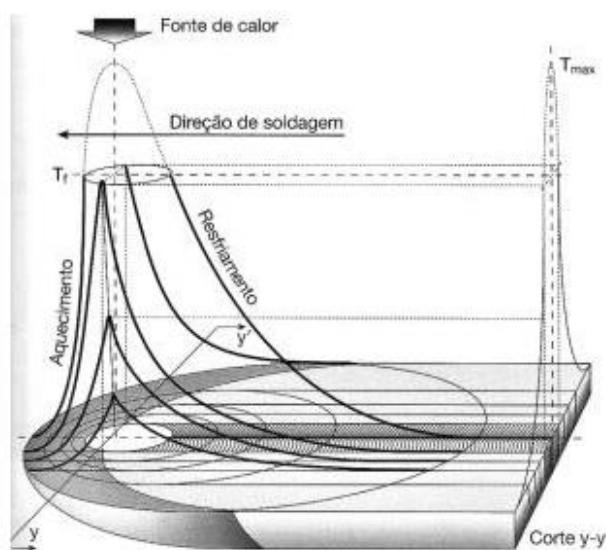
A taxa de resfriamento irá determinar a microestrutura em materiais que sofrem transformações de fase durante o resfriamento. Como a forma da curva de distribuição de calor determina as transformações no metal de solda e na zona afetada pelo calor, o controle da taxa de resfriamento irá permitir o controle das transformações de fases que

ocorrerão. Dessa forma, todos os fatores de influência sobre a curva de ciclo térmico estão relacionados com o controle da taxa de resfriamento (MODENESI, 2005).

Um outro fator é a espessura do material, que quanto maior é a espessura, mais rápido é o resfriamento, porque maior é a extração de calor. De modo análogo ocorre com a condutividade térmica do material, pois quanto maior é a condutividade, mais rápido é resfriamento, pelo mesmo motivo do fator anterior. Já com relação ao aporte térmico e temperatura de pré e de pós-aquecimento, acontece o oposto, pois quanto maior esses fatores, mais lento será o resfriamento (QUESADA & ZALAZAR, 2002).

A determinação dos ciclos térmicos permite a obtenção das linhas isotérmicas, ou seja, o efeito que o aporte de calor concentrado na poça de fusão de um cordão de solda produz sobre a superfície da chapa mostrando a distribuição das linhas que alcançam igual temperatura (isotermas) e distintas distâncias do centro do arco. A Figura 2 mostra curvas de temperatura em várias posições de uma junta soldada.

Figura 2 – Curvas de temperatura em várias posições de uma junta soldada.



Fonte: Gouveia (2008)

Assim, observa-se que quando se aumenta a temperatura de pré-aquecimento, as isotermas crescem. Pois a entrega de energia adicional desloca a isoterma para pontos mais distantes do centro do arco, proporcionando um aumento no tempo de aquecimento e elevando a temperatura máxima. Porém há uma diminuição da velocidade de resfriamento.

Já efeito contrário tem a condutividade térmica do material, ou seja, quanto maior a condutividade térmica da chapa, as isothermas se contraem, diminuindo o tempo de aquecimento e a temperatura máxima, aumentando assim a velocidade de resfriamento.

2.4 Morfologia do grão

A morfologia do grão exerce um papel importante na tenacidade do metal de solda. Modenesi (2005) afirma que grãos equiaxiais refinados proporcionam melhores valores de tenacidade quando comparados com grãos colunares que não foram afetados pelo ciclo térmico na soldagem.

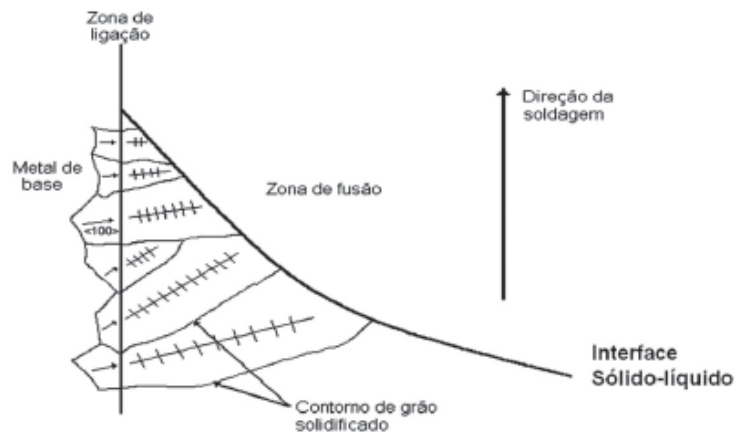
2.4.1 Morfologias encontradas no metal de solda

Morfologias possíveis de se observar no metal de solda em uma junta soldada são desde apenas crescimento epitaxial, zona equiaxial central com crescimento epitaxial, ou apenas zona equiaxial central. Também é possível a ocorrência de zona coquilhada com crescimento colunar e zona equiaxial central (PINHEIRO, 2012).

Em materiais como o aço, quando o mesmo solidifica, dois fenômenos distintos ocorrem: nucleação e crescimento dos cristais. Inicialmente forma-se um pequeno núcleo sólido, no seio do líquido, que posteriormente cresce. Isto sucede com vários núcleos simultaneamente até que todo o material seja um sólido (COSTA, 2014). Um processo inerente à esse mecanismo é o super-resfriamento que é quando o líquido se encontra abaixo da temperatura de fusão, sendo a condição necessária para que haja a nucleação. Os mecanismos podem ser nucleação homogênea, nucleação heterogênea ou crescimento epitaxial.

No crescimento epitaxial, os grãos da zona de fusão crescem com a mesma orientação cristalina dos grãos da ZAC (zona afetada pelo calor). Como a barreira termodinâmica para a solidificação é praticamente nula, há uma diminuição severa da força motriz necessária para a nucleação dos novos grãos. Assim, a solidificação de cada um desses novos grãos ocorre ao longo da mesma direção cristalográfica dos grãos da ZAC (NELSON et al, 1999). Dessa forma, como a energia de ativação é praticamente nula, sendo necessário um super-resfriamento muito baixo para que haja a nucleação, levando-se em consideração as outras formas de nucleação. A figura 3 mostra a representação esquemática do crescimento epitaxial e como ele ocorre a partir da linha de fusão.

Figura 3 – Representação esquemática do crescimento epitaxial.

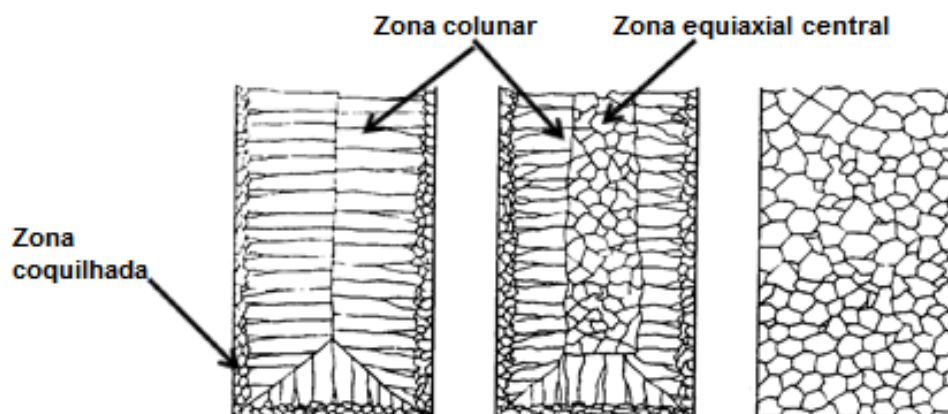


Fonte: Modenesi (2005)

Na nucleação homogênea, a fase sólida nucleia em meio à fase líquida, sem que haja interferência ou contribuição energética de elementos ou agentes estranhos ao sistema metal líquido/metal sólido. Nesse caso, para que haja a nucleação é necessário um elevado super-resfriamento. Na nucleação heterogênea, a fase sólida nucleia em meio à fase líquida contando com a contribuição energética de agentes estranhos ao sistema, tais como impurezas, inclusões sólidas, paredes de molde, entre outros. E, nesse caso, a necessidade de super-resfriamento para que haja a nucleação é mais baixa que na nucleação homogênea (MODENESI, 2005).

Segundo Costa (2014), diversos fatores influenciam na velocidade de crescimento dos grãos da fase sólida, alguns deles são: as direções de eixos cristalográficos, direção de extração de calor e impedimento pelos cristais vizinhos. Dessa forma, a morfologia pode apresentar três zonas distintas em sua macroestrutura: zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial central. A Figura 4 mostra as três zonas e algumas junções entre elas.

Figura 4 – Estruturas de solidificação na seção longitudinal de um lingote de fundição.



Fonte: Costa (2014)

De acordo com a Figura 4, a primeira imagem apresenta zona coquilhada e zona colunar, enquanto seguinte possui as três zonas bem definidas. No entanto, a terceira imagem contém apenas a zona equiaxial central.

A zona da superfície é chamada de zona coquilhada e é formada devido a uma taxa severa de resfriamento que produz uma alta taxa de nucleação de finos grãos equiaxiais aleatoriamente orientados no líquido super-resfriado, adjacente à parede do molde (KRAUSS, 2005).

A segunda zona que se desenvolve pelo crescimento de grãos alongados é chamada de zona colunar. Os grãos colunares se alinham paralelamente à direção do fluxo e desenvolvem-se a partir dos grãos coquilhados, por meio de crescimento seletivo preferencial. Os cristais colunares apresentam seus principais eixos cristalográficos na direção do fluxo de extração de calor e mostram uma orientação marcadamente preferencial de crescimento, coincidente com as direções cristalográficas do crescimento dendrítico (KRAUSS, 2005).

Já a zona equiaxial central, segundo Verran (2009), é formada por grãos equiaxiais de orientação cristalográfica aleatória. Os cristais são produzidos pela nucleação no líquido altamente superesfriado e pela ruptura de alguns cristais na região colunar pela convecção do líquido.

A morfologia do grão influencia nas propriedades mecânicas do material, Zulian et al (2010) analisou a relação entre propriedades mecânicas e características morfológicas dos grãos da estrutura bruta de solidificação de liga Al-4,5%Cu e observou que a dureza mostra-se mais sensível à região macrográfica em que se situa, sendo maior

em regiões colunares. Isso ocorre em razão dessas regiões apresentarem espaçamentos dendríticos menores quando comparados às suas respectivas regiões equiaxiais.

Da mesma forma, Reis (2009) observou que para lingotes da liga Al-4,0%Cu, solidificados no forno unidirecional vertical com temperatura média de 720°C e resfriados a ar comprimido com vazão de 30l/min, a região colunar possuiu uma maior dureza que a região equiaxial na solubilização. E ainda que após um breve envelhecimento natural esta situação se manteve bem mais acentuada.

3 METODOLOGIA

Esse procedimento teve a finalidade de identificar a morfologia do grão no metal de solda em função da variação da temperatura de pré-aquecimento. Dessa forma, foi feito um experimento de soldagem em chapas de aço SAE 1020 com espessura de 1/4” utilizando o processo de soldagem TIG autógeno.

3.1 Materiais e Equipamentos

Os materiais e equipamentos utilizados para a realização desse experimento serão descritos a seguir:

- Máquina de solda TIG/ESAB;
- Forno convencional de bancada;
- Pirômetro digital a laser GM550E;
- Gás de proteção – mistura de Argônio e CO₂ (dióxido de carbono);
- Eletrodo de tungstênio puro;
- Corrente contínua com polaridade direta;
- Distância de 2mm entre o eletrodo e a peça;
- Ácido de ataque metalográfico do tipo Nital 2%;
- Microscópio óptico Olympus GX51 acoplado com câmera fotográfica.

3.2 Procedimento e preparação dos corpos de prova

Para a primeira parte do procedimento foram cortados corpos de prova de aço com 7,5cm de largura e 14cm de comprimento. Utilizando uma lixadeira politriz os corpos de prova foram lixados para limpeza de óxidos a fim da obtenção de melhores resultados na soldagem.

Primeiramente foram feitos testes a fim de se ajustar os demais parâmetros de soldagem como tensão, corrente e velocidade, sendo que esses seriam constantes. Assim, verificou-se que os parâmetros que proporcionariam melhores resultados no que diz respeito à penetração do cordão de solda seriam uma tensão de 15,2V, uma corrente de 130A e uma velocidade média de soldagem de 9,65cm/min. Outro ponto importante é a posição da solda, sendo utilizada a plana na superfície da chapa de aço.

O único parâmetro variável para esse procedimento experimental foi a temperatura de pré-aquecimento, sendo utilizadas três distintas. Para a observação da

morfologia do grão do metal de solda utilizou-se um corpo de prova em temperatura ambiente (36°C), um corpo de prova em 100°C e por último um em 200°C.

A primeira soldagem foi realizada com o corpo de prova em temperatura ambiente, em torno de 36°C. A temperatura foi medida com um pirômetro, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Corpo de prova em temperatura ambiente.



Fonte: Autoria Própria

Para a continuação do procedimento experimental, um outro corpo de prova foi pré-aquecido a uma temperatura acima de 100°C em um forno de bancada, após isso o mesmo foi retirado do forno e utilizando um pirômetro foi possível a observação da temperatura desejada. Dessa forma, assim que a temperatura de 100°C foi alcançada (Figura 6), a soldagem foi realizada.

Figura 6 – Corpo de prova a 100°C.



Fonte: Autoria Própria

Para a última soldagem o corpo de prova foi pré-aquecido no forno a uma temperatura maior que 200°C, e da mesma forma da amostra anterior, foi retirado do forno e com o pirômetro foi observado até que o mesmo estivesse com uma temperatura de 200°C (Figura 7) para que então fosse realizado o procedimento de soldagem.

Figura 7 – Corpo de prova a 200°C.



Fonte: Autoria Própria

Após a soldagem dos corpos de prova foi retirada uma amostra de cada cordão de solda mediante um corte transversal em relação ao cordão de solda (Figura 8).

Figura 8 – Local do corte na seção transversal do cordão.



Fonte: Autoria Própria

A preparação das amostras para a análise consistiu no embutimento a frio, no lixamento com lixas de granulometria 320, 600, 800, 1000 e 1200 e posterior polimento. O resultado pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Amostras polidas e lixadas para análise.



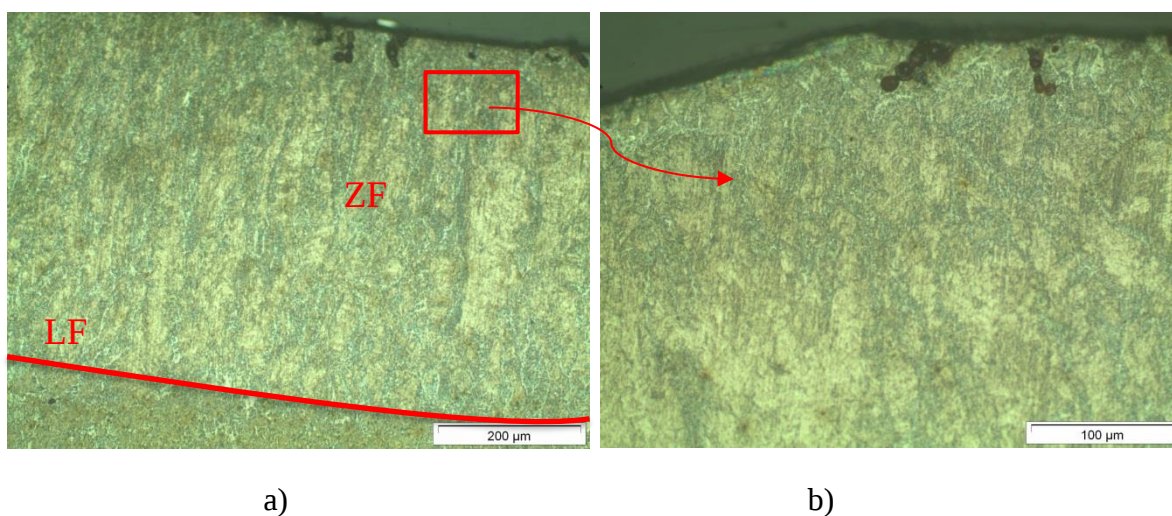
Fonte: Autoria Própria

Com as amostras já lixadas e polidas utilizou-se uma solução de Nital 2% (ácido nítrico com álcool etílico) para o ataque químico a fim de se revelar a microestrutura. Todas as partes observadas foram fotografadas utilizando o microscópio óptico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a análise microscópica, foi possível observar as morfologias de grão obtidas no metal de solda. A Figura 10 mostra as macrografias encontradas no cordão de solda do corpo de prova soldado sem pré-aquecimento. A figura 10b refere-se a uma ampliação da zona delimitada pelo quadrado vermelho da figura 10a.

Figura 10 – Macrografia da amostra soldada sem pré-aquecimento. a) Morfologias encontradas próximo a linha de fusão (LF) e na zona fundida (ZF) com aumento de 100x. b) Morfologias encontradas próximo à linha de superfície da amostra com aumento de 200x.



Fonte: Autoria Própria

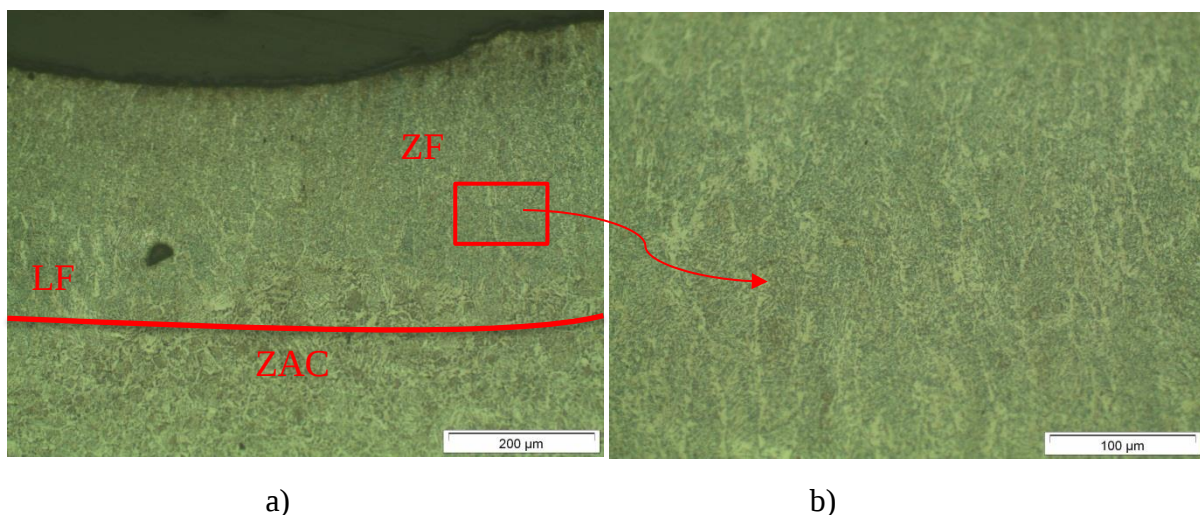
Para a soldagem com a peça em temperatura ambiente é esperado que seja formada uma zona coquilhada no início da solidificação da peça, pois existe uma grande diferença de temperatura entre o metal líquido da poça de fusão e o metal de base. Esta diferença causa um forte resfriamento do metal líquido em contato com o metal de base e propicia a nucleação de um grande número de grãos (MODENESI *et al*, 2013).

No entanto, de acordo com a Figura 10a observa-se a ausência da zona coquilhada próximo à linha de fusão e a presença de uma zona colunar na poça de fusão. Isso pode ser explicado pelo fato de que, segundo Modenesi *et al* (2013), em um cordão de solda o metal líquido da poça de fusão em contato com o metal de base não é fortemente super-resfriado, pois o metal de base é aquecido até sua temperatura de fusão pela fonte de calor. Dessa forma, a formação de um grande número de novos grãos não tende a ocorrer, a zona coquilhada não é formada e o cordão de solda é constituído predominantemente por uma zona colunar.

Na figura 10b é possível perceber a presença de grãos equiaxiais centrais próximo à superfície da amostra, pois nesse local ocorre a solidificação final e o calor é extraído de forma igual em todas as direções. Assim, os novos grãos formados tendem a crescer com um formato equiaxial.

Na soldagem utilizando uma temperatura de pré-aquecimento de 100°C foram obtidas morfologias de grão diferentes, como pode ser observado na Figura 11. A figura 11b refere-se a uma ampliação da zona delimitada pelo quadrado vermelho da figura 11a.

Figura 11 – Macrografia da amostra soldada com pré-aquecimento de 100°C. a) Morfologias encontradas próximo a linha de fusão (LF) e na zona fundida (ZF) com aumento de 100x. b) Presença de ferrita de contorno de grão com aumento de 200x.



Fonte: Autoria Própria

É observada na Figura 11a a ZAC de grãos grosseiros na parte inferior e a solidificação da poça de fusão que começa com crescimento epitaxial dos grãos da zona parcialmente fundida, ao longo da interface sólido-líquido. A zona de fusão é composta apenas de crescimento epitaxial, pois o metal líquido solidificou-se formando uma continuação dos grãos do metal de base. Segundo Wang et al (2004), o crescimento epitaxial é benéfico para a solda, pois proporciona uma continuidade dos grãos existentes no metal de base, reduzindo regiões com presença de concentradores de tensões na solda, em especial as trincas.

A diferença marcante entre a solidificação de uma fundição e a de uma solda é o fenômeno de crescimento epitaxial em soldagem, pois nesse caso não há barreiras de

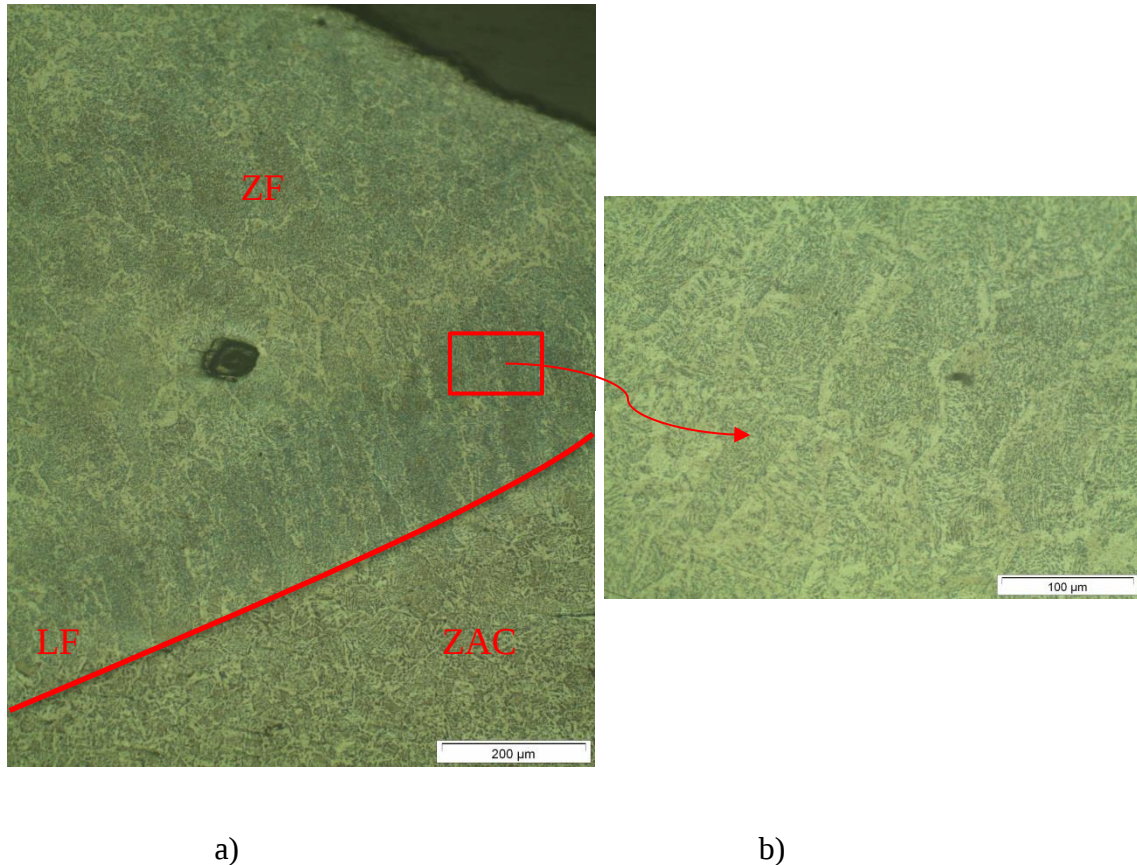
nucleação e a solidificação ocorre espontaneamente pelo crescimento epitaxial. Ele é observado, na maioria das vezes, na soldagem autógena.

Outro ponto importante é a presença da ferrita de contorno de grão (Figura 11b) ao longo dos grãos epitaxiais. Esse tipo de ferrita está presente em soldagens com baixa velocidade de resfriamento e é o primeiro constituinte que se forma pela decomposição da austenita e consiste de cristais de ferrita que nuclearam nos contornos de grão austenísticos em elevadas temperaturas de transformação (BRAMFITT, 1993). Nesse caso, a amostra foi pré-aquecida a uma temperatura de 100°C, o que explica a baixa velocidade de resfriamento.

A ferrita de contorno de grão é um constituinte indesejável, pois segundo Levine et al (1977), a propagação de trincas pelos contornos dos constituintes ferrita de contorno de grão e ferrita poligonal é facilitada devido às granulações grosseiras dos mesmos, sendo que ambos são normalmente considerados prejudiciais à tenacidade. Inúmeras pesquisas mostram que as trincas no metal de solda de aço ferrítico normalmente se propagam ao longo da ferrita de contorno de grão.

A terceira condição estudada foi a soldagem com uma temperatura de pré-aquecimento de 200°C. Os resultados obtidos com a análise microscópica da amostra podem ser visualizados na Figura 12. A figura 12b refere-se a uma ampliação da zona delimitada pelo quadrado vermelho da figura 12a.

Figura 12 – Macrografia da amostra soldada com pré-aquecimento de 200°C. a) Morfologias encontradas próximo a linha de fusão (LF) e na zona fundida (ZF) com aumento de 100x. b) Presença de ferrita de contorno de grão com aumento de 200x.



Fonte: Autoria Própria

A Figura 12a mostra as três regiões bem definidas. Na parte inferior constata-se a ZAC de grãos grosseiros, a partir da linha de fusão ocorreu um crescimento epitaxial seguido pela presença de zona equiaxial central com grãos grosseiros.

Observando a Figura 12b, é possível perceber também a presença de ferrita de contorno de grão ao longo dos grãos epitaxiais, no entanto, essa mostrou uma maior formação e crescimento que na Figura 11b porque a velocidade de resfriamento foi mais baixa que a amostra pré-aquecida a uma temperatura de 100°C, visto que a mesma foi pré-aquecida a 200°C.

A largura e a profundidade do cordão de solda também foram observadas e estão descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões dos cordões de solda.

Descrição da amostra	Largura	Profundidade
T _{36°C}	6mm	1mm
T _{100°C}	8mm	1,5mm
T _{200°C}	8,3mm	2,2mm

Fonte: Autoria Própria.

A análise da morfologia do cordão foi basicamente qualitativa pois foi feito somente um cordão de solda sendo observado mediante apenas um corte na seção transversal. Relacionando as larguras obtidas constatou-se que ocorreu um aumento de 33% na largura do cordão de solda da amostra com pré-aquecimento em relação à de temperatura ambiente. Já a profundidade do cordão cresceu em torno de 50% a cada aumento da temperatura de pré-aquecimento.

Silva et al (2009) também observou essa influência quando utilizou a soldagem FACW com duas amostras, sendo uma em temperatura ambiente e outra com pré-aquecimento de 100°C, além de utilizar dois tipos de arames tubulares. Como resultado, na amostra pré-aquecida ocorreu um aumento tanto na largura quanto na profundidade do cordão de solda, independentemente do tipo de arame tubular utilizado.

5 CONCLUSÕES

A partir dos experimentos e análises feitos utilizando a soldagem TIG Autógeno e temperaturas de pré-aquecimento distintas foi possível observar que a variação desse parâmetro influencia no surgimento de diferentes morfologias do grão no metal de solda.

Na amostra em temperatura ambiente foi observada uma zona colunar seguida por uma equiaxial central, além da ausência de uma zona coquilhada que pode ser explicada pela literatura. Enquanto que a amostra pré-aquecida a 100°C teve uma zona fundida composta de crescimento apenas epitaxial. Por fim a amostra pré-aquecida a 200°C que apresentou crescimento epitaxial com uma zona equiaxial central de grãos grosseiros.

Também foi observada a presença da ferrita de contorno de grão nas amostras que foi utilizado o pré-aquecimento, tendo um crescimento maior na amostra a 200°C pois a velocidade de resfriamento foi mais baixa.

Foi constatado que a largura e a profundidade do cordão de solda também são influenciadas pela temperatura de pré-aquecimento, visto que o uso desse parâmetro aumentou em 33% a largura e em 50% a profundidade do cordão de solda.

Dessa forma, pode-se concluir que o pré-aquecimento tem efeitos benéficos e maléficos para a soldagem. Visto que foram conseguidos maiores valores de largura e profundidade do cordão de solda, no entanto, houve uma maior formação de ferrita de contorno de grão com a utilização do pré-aquecimento. E, de acordo com a literatura, esse constituinte prejudica a tenacidade e facilita a propagação de trincas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRACARENSE, A.Q.; MODENESI, P.J.; MARQUES, V.P.; *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*, in: Belo Horizonte, 2013.
- BRAMFITT, B. L. *Weldments: Solidification Structures of Steel*. ASM Handbook, vol.09, p. 1345-1356, 1992.
- COSTA, J.P.G.A. *Produção e caracterização de barras laminadas do aço DIN 39MnCrB6-2*. 2014. 93f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.
- FIGUEIROA, D.W.; PIGOZZO, I.O.; SILVA, R.H.G.; SANTOS, T.F.A.; URTIGA, S.L. *Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono*. Soldagem e Inspeção, São Paulo, vol.20, 2015.
- GOUVEIA, R.R. *A Influência da temperatura de interpasse na tenacidade do metal de solda na soldagem multipasse do aço inoxidável martensítico CA6NM pelo processo TIG*. 2008. 82f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- KRAUSS, G. *Steels – processing, structure, and performance*. S.l.: ASM International, 2005.
- LEVINE, E.; HILL, D.C. *Toughness in HSLA steel weldments*. Metal Construction, v.9, n.8, p.346-53, Agosto, 1977.
- LIBERATO, F.M. *Soldagem A-TIG em Aços Inoxidáveis Ferríticos UNS S41003*. 2013. 95f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2013.
- MARTINS, W.P.; NASCIMENTO, C.C.F.; MENESES, V.A.; PAIVA, A.E.M.; LEAL, V.S.; *Influência dos Parâmetros de Soldagem no Comportamento microestrutural e nas propriedades mecânicas de juntas soldadas em Aços ARL; 6º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Caxias do Sul, SP. 2011.*
- MATEUS, B.S.; JAIR, C.D.; RÉGIS, H.G. *Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos*. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 16, p.333-340, Out/Dez 2011.
- MODENESI, P.J. *Descontinuidade e Inspeção em juntas soldadas*, in: Belo Horizonte, 2001.
- MODENESI, P.J. *Fontes de energia para a soldagem a arco*, in: Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2005.

NELSON, T.W.; LIPPOLD, J.C. E MILLS, M.J.; *Nature and Evolution of the Fusion Boundary in Ferritic-Austenitic Dissimilar Weld Metals*, Part1 - Welding Research Supplement, 1999, 329-s a 337.

NORRISH, J. *Advanced Welding Processes*, IOP Publishing Ltd, 375 pp, 1992.

PIMENTA, E.A.R. *Estudo dos processos de soldagem TIG e MIG em estruturas de alumínio 6351 T6 NBR ISSO 209-2010*. 2012. 86f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Taubaté, São Paulo, 2012.

PINHEIRO, M.M. *Influência do preaquecimento e tratamento térmico pós-soldagem nas propriedades mecânicas do metal de solda de aços de alta resistência obtidos por processo arame tubular tipo metal cored*. 2012. 89f. Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2012.

PRITCHARD, D. *Soldering, Brazing & Welding – A Manual of Techniques*. Crowood Press, 2001.

QUESADA, H.J., ZALAZAR, M. *Evaluación a la fisuración de um acero de alta resistência*. Soldar Conarco, n 117, pp.5-8, 2002.

REIS, B.P. *Influência da Estrutura de Solidificação nas Condições de Solubilização da Liga Al-4,0%Cu*. Revista Thema, vol.09, 2009.

RICHARD, T.L. *Influência da Velocidade de Soldagem sobre as Geometrias dos Cordões de Solda Realizados Através dos Processos de Soldagem FACW e TIG*. Semana Internacional das Engenharias da Fahor, 2014.

RUIMAR, R.G.; ANDERSON, G.M.P.; ANDRÉ, R.C.; SÉRGIO, L.H.; PAULO, C.O. *Efeito da temperatura de interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM*. Soldagem e Inspeção, São Paulo, Vol. 18, p.127-136, Abr/Jun 2013.

SILVA, G.G.; KOBAYASHI, Y.; *Análise da influência da temperatura de Preaquecimento na formação de microfases em cordão de solda obtido pelo Processo de Soldagem à arco elétrico com proteção gasosa e arame consumível*; 4º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Estância de São Pedro, Campinas;SP. 2007.

SILVA, J.H.F.; TREVISAN, R.E.; *Estudo da influência da temperatura de Preaquecimento em soldas FCAW Autoprotetido e com proteção gasosa*; 5º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação; Belo Horizonte, MG. 2009.

SGARBI, P.V. *Construção e Validação de um calorímetro com vazão contínua de água para avaliação do rendimento térmico em processos de soldagem*. 2013. 101f.

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SUZUKI, R, N. *Solução analítica para distribuição de temperatura no processo de soldagem MIG com múltiplos passes*. 1997. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TEIXEIRA, G.S. *Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG-MAG em tandem*. 2011. 122f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011.

VERRAN, G.O. *Metalurgia Física*. UDESC. 2009.

WANG, N.; MOKADEM, S.; RAPPAPAZ, M.; KURZM, W.; *Solidification cracking of superalloy single and bi-crystals*. Acta Materials 52, 2004, pp.3173-3182.

ZULIAN, F.D.; RIJO, M.G.Q.; MISSIAGGIA, L.; HECKTHEUER, D.A.; BOEIRA, A.P. *Correlação entre Propriedades Mecânicas e Características macroestruturais em Ligas de Al-Cu*. Revista Thema, vol.07, 2010.