

AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA SUPERLIGA DE NÍQUEL EMVAC 600 APÓS PROCESSOS DE SOLDAGEM POR FUSÃO TIG, ARCO PLASMA E LASER⁽¹⁾

COLEÇÃO PTC

DEVOLVER AO BALCÃO DE EMPRÉSTIMO

Wilson Aparecido Parejo Calvo⁽²⁾

Waldemar Alfredo Monteiro⁽³⁾

RESUMO

A liga de níquel nacional EMVAC 600 (INCONEL 600) apresenta alta resistência mecânica, resistência à corrosão e à oxidação em temperaturas elevadas, sendo empregada na construção de turbinas de aviões e de termoelétricas, reatores químicos, detectores e reatores nucleares. A superliga em estudo, fornecida pela empresa Eletrometal Metais Especiais, foi laminada (91,2% de redução em espessura) e solubilizada a 1.150°C por 30 minutos. As tiras solubilizadas foram soldadas em juntas tipo topo, único passe e sem adição de material, empregando-se os processos de soldagem por fusão TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado). Avaliou-se a presença de descontinuidades (trincas de solidificação e de reaquecimento), carbonetos (Cr₇C₃ e Cr₂₃C₆) e precipitados intermetálicos tipo Ni₃(Al,Ti) nas regiões dos metais de base, nas zonas termicamente afetadas (ZTA) e nas zonas de fusão (ZF). Caracterizou-se mecânica e microestruturalmente a superliga soldada pelos diferentes processos, através dos Ensaio Mecânicos de Tração, Microdureza Vickers, Medida do Tamanho Médio de Grão e pelas técnicas de Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura (MEV). A liga EMVAC 600 soldada pelo processo Laser pulsado apresentou alta penetração, alta precisão de soldagem, uma menor ZF e ZTA, além de não provocar reduções no limite de escoamento ($\sigma_{e0,2\%}$), limite de resistência (σ_r) e ductilidade. Os processos de soldagem TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado) e a Arco Plasma transferido apresentaram maiores segregações de S e P nas interfaces sólido/líquido (ZF), precipitados intermetálicos tipo Ni₃(Al,Ti) e reprecipitação de carbonetos (Cr₇C₃ e Cr₂₃C₆), reduzindo-se as propriedades mecânicas da superliga.

PALAVRAS-CHAVES

Inconel 600

Ligas a base de Níquel

Soldagem de Superligas

⁽¹⁾ Contribuição técnica a ser apresentada no "IX Seminário de Metais não Ferrosos - ABM", São Paulo, 05 a 07 de novembro de 1996.

⁽²⁾ Membro Titular da ABM, Engenheiro de Materiais no IPEN-CNEN/SP.

⁽³⁾ Membro Titular da ABM, MSc, DrSc em Tecnologia Nuclear no IPEN-CNEN/SP, Professor da CPG-IPEN/USP.

1. INTRODUÇÃO

As ligas com teores de níquel superiores a 30% em peso apresentam alta resistência mecânica, resistência ao calor e à corrosão. Dentre as superligas a base de níquel, destaca-se a liga austenítica 76,0%Ni-8,0%Fe-15,5%Cr (INCONEL 600), empregada em estruturas e componentes que trabalham em meios agressivos, exigindo-se alta qualidade nas juntas soldadas [1-3].

As ligas 600 são utilizadas na construção de turbinas de aviões e de termoelétricas, sistemas de refrigeração primários de reatores nucleares do tipo PWR e BWR, reatores químicos, varetas de elemento combustível nuclear em reatores de pesquisa TREAT (Transient Reactor Test Facility), cabos de isolamento mineral e detectores nucleares “in-core” para controle de potência tipo SPND (Self Powered Neutron Detectors) entre outras aplicações.

Na união da liga 600, utilizam-se os processos de soldagem por fusão a Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (TIG=Tungsten Inert Gas/CC⁻ pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado) [4,5]. Para cada método de soldagem empregado, a região que sofre fusão e a zona termicamente afetada estão expostas a ciclos térmicos e transformações metalúrgicas complexas e diferenciadas, que podem induzir deformações, tensões residuais, descontinuidades e mudanças microestruturais com o possível comprometimento da segurança e qualidade da junta soldada [6-13].

O objetivo do trabalho é avaliar e caracterizar a liga de níquel nacional EMVAC 600 (INCONEL 600) após processos de soldagem por fusão TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado). A avaliação foi realizada pela presença de descontinuidades (trincas de solidificação e de reaquecimento), carbonetos (Cr₇C₃ e Cr₂₃C₆) e precipitados intermetálicos tipo Ni₃(Al,Ti) nas regiões dos metais de base, nas zonas termicamente afetadas e nas zonas de fusão. As caracterizações mecânicas e microestruturais das soldas foram feitas pelos Ensaio Mecânicos de Tração, Microdureza Vickers, Medida do Tamanho Médio de Grão, e pelas técnicas de Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura (MEV).

1.1. Superligas

A superliga EMVAC 600 apresenta matriz austenítica (CFC), fase γ e várias fases secundárias (carbonetos e precipitados intermetálicos). Para as superligas obterem alta resistência mecânica e resistência à fluência, os elementos de liga devem produzir uma microestrutura coesa e estável em altas temperaturas. Os mecanismos de endurecimento da liga INCONEL 600, similar à nacional EMVAC 600, à temperaturas elevadas são: endurecimento por solução sólida pelos metais refratários Mo e W; dispersão de carbonetos (predominantemente CFC: Cr₇C₃ e Cr₂₃C₆) e precipitados intermetálicos coerentes CFC tipo Ni₃(Al,Ti), fase γ' [1,2,13-15].

Na superliga EMVAC 600, a presença das fases intermetálicas γ' [$\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$] precipitadas aumenta a resistência mecânica da liga de níquel, propiciando-se a formação de trincas de solidificação, na zona de fusão (ZF) e trincas de reaquecimento na zona termicamente afetada (ZTA), durante tratamento térmico de endurecimento após a soldagem ou em serviço a temperatura elevada (figura 1). A susceptibilidade às trincas de solidificação está associada ao teor de alumínio e titânio na liga, formando-se precipitados intermetálicos tipo $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ (fase γ'). As trincas de solidificação ocorrem na ZF e a extensão delas varia com a composição e as condições de soldagem da liga. As trincas de reaquecimento podem provocar microfissuras na ZTA, subsuperficiais e difíceis de serem detectadas, reduzindo-se principalmente o limite de resistência à fadiga do material.

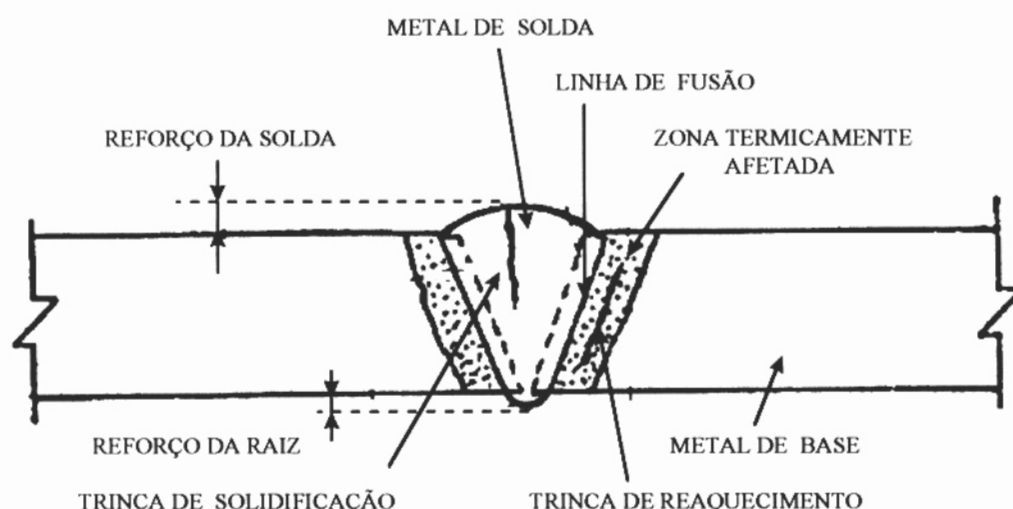


Figura 1 - Zonas de uma junta soldada com as discontinuidades: trinca de solidificação e trinca de reaquecimento.

1.2. Soldagem

O Processo de Soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) utiliza o calor produzido pelo arco formado entre um eletrodo não consumível de tungstênio e o metal de base, para viabilizar uma solda. A soldagem pode ser feita com ou sem metal de adição e pode ser manual ou automática. Um gás inerte como o argônio é soprado ao redor do arco, a fim de protegê-lo de sujeiras e contaminações pelo ar atmosférico que contém oxigênio, hidrogênio e nitrogênio (figura 2) ^[16-19].

O Processo de Soldagem a Arco Plasma é uma extensão do processo de soldagem TIG, onde a coluna do arco elétrico sofre uma constrição, obtida pela passagem do arco através de um orifício de diâmetro reduzido e de parede fria (cobre refrigerado a água). Em ambos os processos têm-se o plasma (coluna de gás ionizado), estando a diferença básica no bocal de constrição do arco e na existência de um arco-piloto para a abertura do arco principal, presente no processo plasma (figura 3) ^[4,5,16].

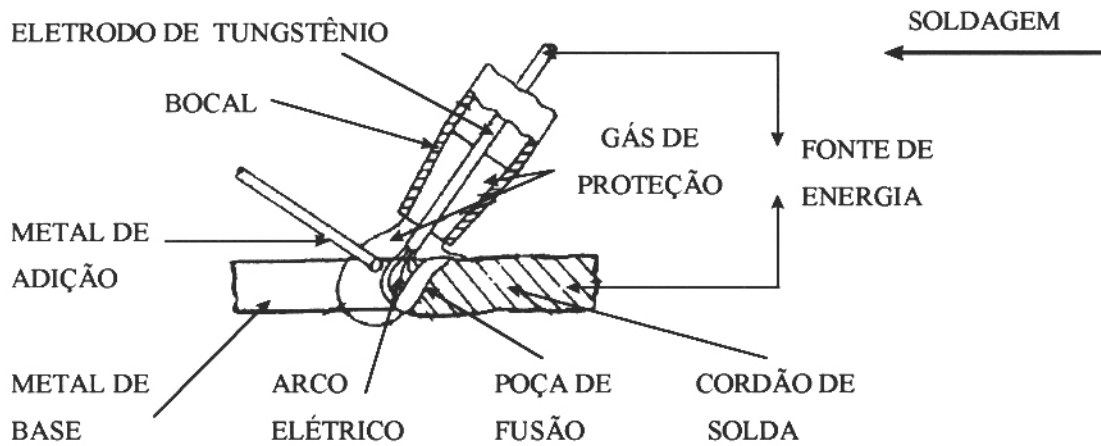


Figura 2 - Processo de soldagem TIG.

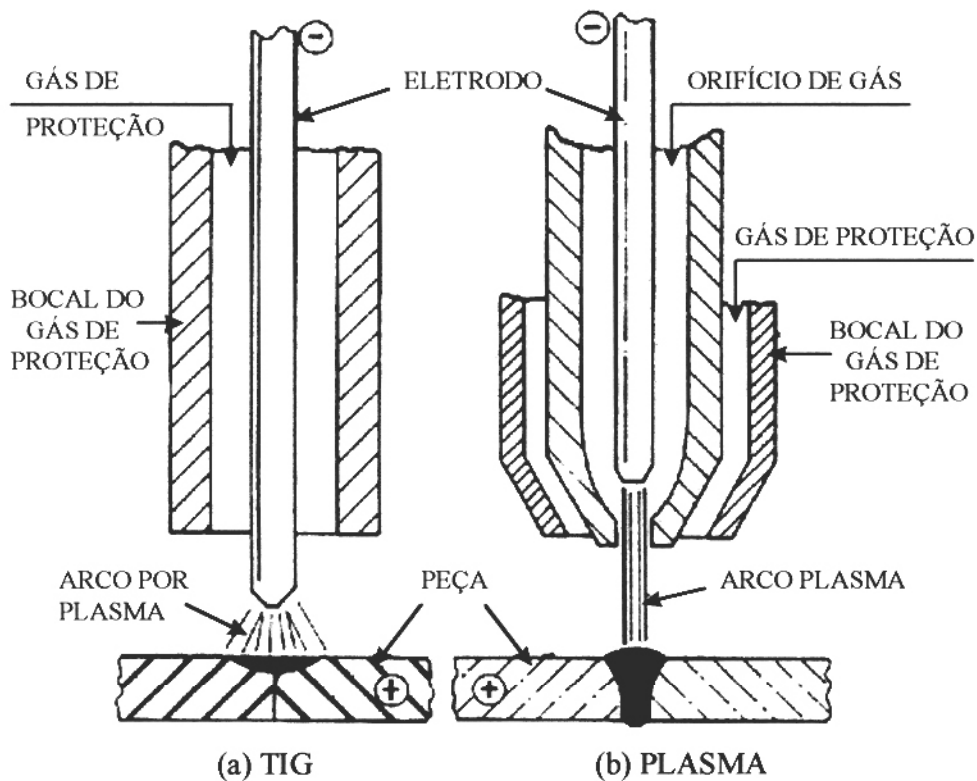


Figura 3 - Comparação entre os processos de soldagem: (a) TIG e (b) Arco Plasma.

A Soldagem por Laser é um processo de união que produz a coalescência dos materiais através do calor obtido pela aplicação de um feixe de luz (fótons) coerente concentrado e direcional sobre as superfícies a serem soldadas. Na soldagem, o feixe de laser é focalizado em um pequeno ponto para produzir uma alta densidade de potência, suficiente para fundir o metal e no caso de soldas de alta penetração, vaporizá-lo em parte. Com a solidificação do metal, forma-se a zona de fusão na solda (figura 4). O laser é transmitido através do ar ao longo de apreciáveis distâncias sem sérias atenuações de potência ou degradações [4,5,16].

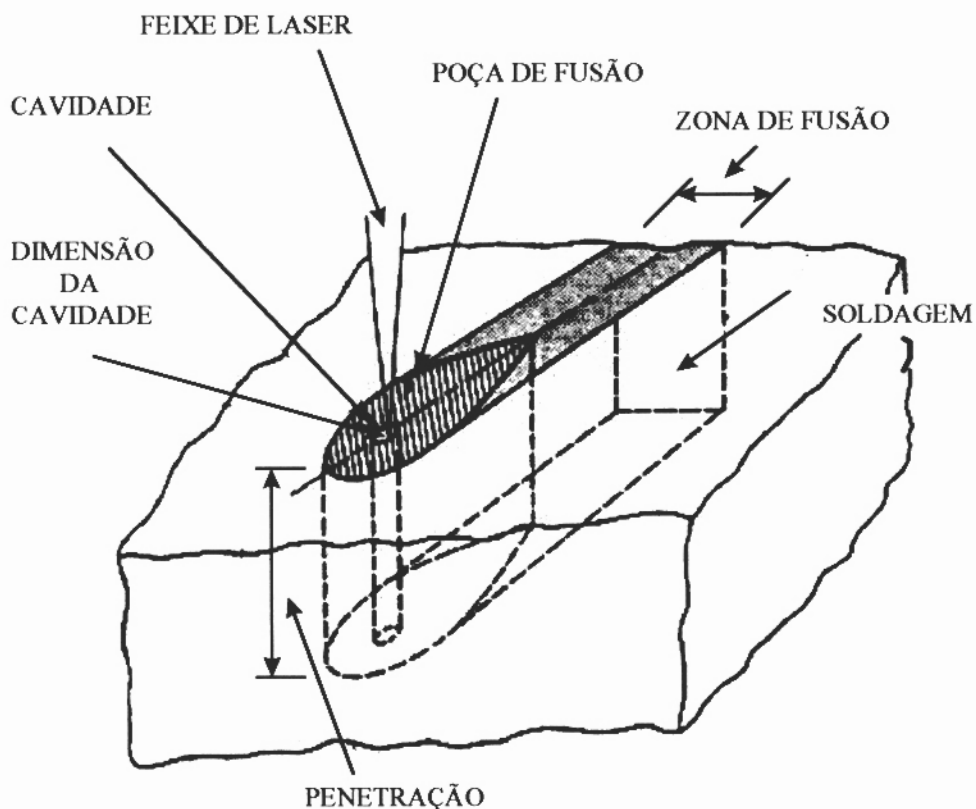


Figura 4 - Processo de soldagem por Laser.

2.0. MATERIAIS E MÉTODOS

O material em estudo, EMVAC 600 (INCONEL 600 ou UNS NO6600), foi fornecido pela empresa Eletrometal Metais Especiais e apresenta-se na forma de barra de 15,83mm de diâmetro por 2,5m de comprimento e encontra-se no estado recozido. A composição química é indicada na tabela I.

Tabela I - Composição química da liga nacional EMVAC 600, % em peso. Análise feita por Fluorescência de Raios-X, Espectrografia de Emissão e Gases.

Elemento	Cr	Fe	Al	Mn	Ti	Sn	C	P	Si	S	Ni
Peso (%)	15,9	9,74	0,39	0,34	0,30	0,25	0,21	0,20	0,17	0,01	rest.

Laminou-se a frio o material em laminador industrial STANAT TA-315-5x8, em etapas sucessivas até a espessura final de aproximadamente 1,4mm (91,2% de redução em espessura) e largura de 14mm. Após a laminação, cortaram-se as amostras com 110mm de comprimento. Fez-se os tratamentos térmicos de solubilização em forno

horizontal Globar, marca ECIL, tipo TAT, a uma temperatura de 1.150°C durante 30 minutos em vácuo ($2,7 \times 10^{-5}$ mbar), seguido de têmpera em água ^[20].

2.1. Soldagem por Fusão

O material laminado e solubilizado foi lixado até grana 600 e desengraxado com acetona. Iniciaram-se as soldagens da liga EMVAC 600, no sentido longitudinal e transversal à direção de laminação, em juntas tipo topo, único passe e sem adição de material. Os processos de soldagem por fusão empregados foram: Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (TIG/CC⁻ pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado). Os processos, os procedimentos e os parâmetros de soldagem, juntamente com a geometria da junta de solda foram os recomendados pela literatura em função da espessura e do tipo de material soldado ^[5,21].

Na Soldagem pelo Processo TIG, utilizou-se equipamento marca ESAB-OXIPLASMA, modelo TA 300 AC/DC, corrente máxima de 300A. As soldagens foram manuais, em corrente contínua polaridade direta (CC⁻), pulsada e não pulsada, com ângulo de trabalho de 90° e com ângulo de deslocamento de 75°. O arco foi aberto por alta frequência e com ângulo de deslocamento de 60°. Na Soldagem a Arco Plasma transferido, utilizou-se equipamento marca SÉCHERON, modelo Plasmafix 50E, corrente máxima de 50 Amperes. As soldagens foram manuais, em corrente contínua, com ângulo de trabalho de 90° e com ângulo de deslocamento de 60°. Na soldagem por Laser pulsado, utilizou-se equipamento marca LASAG, potência máxima de 200 Watts. As soldagens foram automáticas, com feixe de luz de energia pulsada e o laser gerado em uma coluna de neodímio (Nd) no estado sólido. O ângulo de trabalho e o de deslocamento foram de 90° (tabela II).

2.2. Ensaios de Tração

Com os materiais laminados, os solubilizados e os soldados pelos processos TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado), fez-se a usinagem dos corpos de prova tipo “sub-size” apropriados aos ensaios de tração, segundo norma ASTM E-8 (figura 5). A escolha pelas amostras tipo “sub-size” foi em função dos parâmetros nos processos de soldagem.

Os ensaios de tração foram realizados em Máquina Universal de Ensaios Instron, modelo 1125, à temperatura ambiente. Foram ensaiados no mínimo 3 (três) corpos de prova do material para cada condição: laminado, solubilizado e soldado no sentido longitudinal e transversal à direção de laminação, pelos diferentes processos de soldagem.

Tabela II - Parâmetros operacionais para soldagem da liga nacional EMVAC 600 pelo processo TIG (CC pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado).

PROCESSO DE SOLDAGEM	PARÂMETROS	VALORES
TIG	corrente tensão velocidade distância do arco eletrodo gás de proteção	40 Amperes (A) 7 Volts (V) 2,3 mm/s 3 mm W-2%Th; Ø=1,6 mm Ar (SB); 8 litros/minuto
TIG pulsado	corrente máxima corrente mínima duração do pulso tensão velocidade distância do arco eletrodo gás de proteção	40 Amperes (A) 20 Amperes (A) 0,5 segundos 7 Volts (V) 1,8 mm/s 3 mm W-2%Th; Ø=1,6 mm Ar (SB); 8 litros/minuto
Arco Plasma transferido	corrente de solda corrente piloto velocidade distância do arco eletrodo furo do bocal (Cu) gás de proteção gás do plasma	30 Amperes (A) 5 Amperes (A) 2,5 mm/s 4 mm W-2%Th; Ø=1,0 mm Ø=1,5 mm Ar (S); 10 litros/minuto Ar (U); 0,2 litros/minuto
Laser pulsado	potência energia período do pulso frequência velocidade distância focal gás de proteção	164 Watts (W) 8,2 Joules (J) 6 ms 20 Hz 150 mm/minuto zero (focado) N (S); 0,5 bar

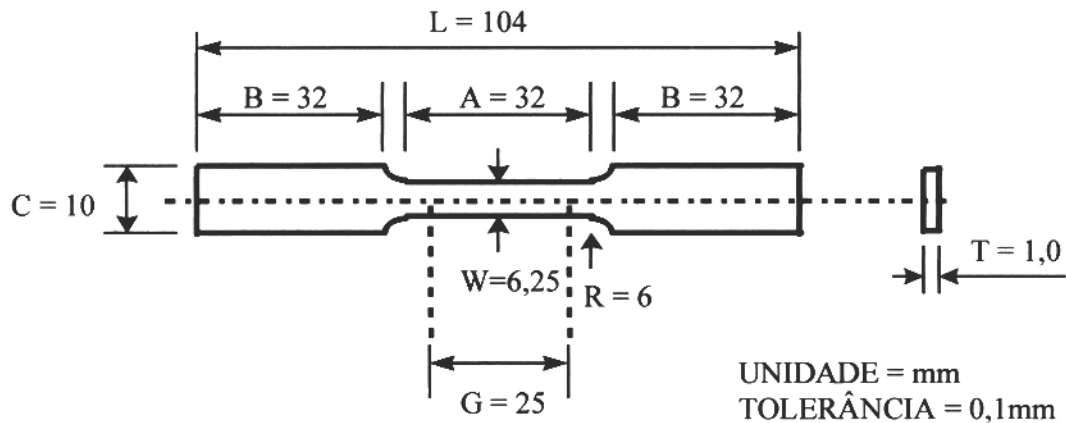


Figura 5 - Desenho esquemático dos corpos de prova tipo “sub-size” para os Ensaios de Tração.

2.3. Análise por Microscopia Óptica (MO)

As amostras como recebidas, laminadas, solubilizadas e soldadas pelos processos TIG (CC- pulsado e não pulsado), Arco Plasma e Laser foram embutidas a frio transversalmente e longitudinalmente à direção de laminação, lixadas em grana 180 a 600, polidas mecanicamente com pasta de diamante de 9, 6, 3 e 1 μ m e de alumina 0,05 μ m. As amostras foram atacadas quimicamente com os reagentes: HCl+FeCl₃ (recebidas e laminadas) e água régia (solubilizadas e soldadas). O equipamento utilizado foi um Microscópio Óptico ZEISS, modelo FOTOMI III com sistema de Microdureza Vickers.

2.4. Ensaios de Microdureza Vickers

As amostras como recebidas, laminadas, solubilizadas e soldadas pelos processos TIG (CC- pulsado e não pulsado), Arco Plasma e Laser foram embutidas a frio transversalmente e longitudinalmente à direção de laminação, lixadas, polidas mecanicamente e atacadas quimicamente conforme as condições empregadas nas Análises por Microscopia Óptica. O equipamento utilizado nos Ensaios de Microdureza Vickers (Hv) foi o OTTO WOLPERT - WERKE, tipo M - TESTOR, com carga de 200g (amostras como recebidas, solubilizadas e soldadas) e de 300g (amostras laminadas). Com estas medidas, foram levantadas as curvas de microdureza (Hv) das amostras soldadas nas regiões: zona não termicamente afetada (ZNTA), zona termicamente afetada (ZTA) e zona de fusão (ZF).

2.5. Medida do Tamanho Médio de Grão

Utilizou-se o Microscópio Óptico ZEISS, modelo FOTOMI III, onde se fez a medida do tamanho médio de grão pelo método da interseção linear, nas amostras como

recebidas, laminadas, solubilizadas e soldadas pelos processos TIG (CC- pulsado e não pulsado), Arco Plasma e Laser. Nas amostras soldadas observou-se as regiões: zona não termicamente afetada (ZNTA), zona termicamente afetada (ZTA) e zona de fusão (ZF), para se evidenciar as alterações microestruturais provocadas pelos diferentes processos de soldagem empregados.

2.6. Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com as amostras laminadas, solubilizadas e soldadas pelos processos de soldagem TIG (CC- pulsado e não pulsado), Arco Plasma e Laser ensaiadas por tração, fez-se as análises da região fraturada por microscopia eletrônica de varredura, visando-se determinar o tipo de fratura. As amostras observadas foram cortadas com 1cm de comprimento, a partir da região fraturada, limpas com tetracloreto de carbono e ultrassom. O equipamento utilizado foi um Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL JXA-6400, com tensão de aceleração de 40kV.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaios Mecânicos de Tração e Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os valores obtidos nos ensaios de tração para a liga nacional EMVAC 600 no estado laminado, solubilizado e após soldagem por fusão pelos processos TIG, Arco Plasma e Laser, encontram-se na tabela III.

Na liga EMVAC 600 laminada a frio, os valores encontrados para o limite de escoamento e o limite de resistência são próximos, mas superiores aos obtidos para o material solubilizado. Assim, o material deformado a frio apresenta-se bastante encruado com uma alta densidade de discordâncias, uma baixa tenacidade (*capacidade de absorver energia na região plástica*) e uma baixa ductilidade, com alongamento igual a 3,3%. A fraturação da amostra laminada obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresenta um grande número de microcavidades (*dimples*) equiaxiais, evidenciando-se fratura dúctil, apesar de apresentar macroscopicamente uma baixa ductilidade e uma pequena estricção, após a ruptura dos corpos de prova (figura 6a).

Na liga EMVAC 600 solubilizada, os valores encontrados para o limite de escoamento e o limite de resistência são distintos e inferiores, quando comparados aos valores obtidos no material laminado. A fraturação da amostra solubilizada apresenta microcavidades (*dimples*) equiaxiais maiores que os da amostra laminada, evidenciando-se a recristalização e o crescimento de grão. Macroscopicamente, a amostra solubilizada apresenta uma alta ductilidade e uma grande estricção após a ruptura dos corpos de prova, com alongamento de 38,7%. No centro da amostra

solubilizada, as microcavidades apresentam-se nas formas equiaxiais ou esféricas e nas extremidades, nas formas alongadas ou ovais, sempre apontando para a origem da falha (centro da amostra) (figura 6b).

Tabela III - Valores obtidos nos Ensaio de Tração para a liga nacional EMVAC 600: laminada, solubilizada e soldada pelos processos TIG, Arco Plasma e Laser.

CORPO DE PROVA			LIMITE DE ESCOAMENTO (0,2%) (kgf/mm ²)	LIMITE DE RESISTÊNCIA (kgf/mm ²)	ALONGAMENTO (%)
Laminado			121,9±2,8	125,6±1,7	3,3±0,6
Solubilizado			20,5±0,8	59,5±0,5	38,7±0,2
Soldado Processo TIG	CC-	transversal	19,4±1,0	60,8±0,7	34,6±0,8
		longitudinal	20,0±2,2	57,0±1,2	32,5±0,7
Soldado Processo TIG	CC- pulsado	transversal	21,2±1,0	60,7±1,0	36,9±0,6
		longitudinal	20,9±1,4	57,5±0,9	35,6±1,8
Soldado Processo Arco Plasma		transversal	21,2±1,9	61,2±1,0	38,0±0,7
		longitudinal	20,6±1,2	57,8±1,4	36,8±1,1
Soldado Processo Laser		transversal	20,1±1,0	61,2±0,2	39,2±1,0
		longitudinal	23,8±0,8	60,9±0,2	37,2±1,8

Em todos os processos de soldagem empregados na liga EMVAC 600, os valores encontrados para os limites de escoamento ($\sigma_{e0,2\%}$) das amostras soldadas longitudinalmente estão próximos ao valor encontrado para o material solubilizado. A presença de segregações e de possíveis microtrincas de solidificação não influenciam no $\sigma_{e0,2\%}$ (baixas tensões) tanto quanto no limite de resistência (altas tensões) do material. Apenas a liga soldada pelo processo Laser apresentou $\sigma_{e0,2\%}$ pouco acima do valor obtido para o material solubilizado.

Nos processos de soldagem TIG (CC- pulsado e não pulsado) e Arco Plasma empregados na liga EMVAC 600, os valores encontrados para os limites de resistência (σ_r) das amostras soldadas longitudinalmente são menores que os valores encontrados para o material solubilizado e o soldado pelo processo Laser. Na soldagem, observa-se que quanto menor a densidade de potência e menor a taxa de resfriamento no metal fundido, menor é o valor encontrado para o σ_r . A rápida solidificação reduz as segregações (S e P) na interface sólido/líquido, formando-se uma estrutura mais dúctil

e evitando-se as possíveis microtrincas de solidificação, provocadas pela formação dos precipitados intermetálicos tipo $Ni_3(Al,Ti)$. Além disso, as segregações presentes no metal de solda reduzem a resistência à oxidação do material.

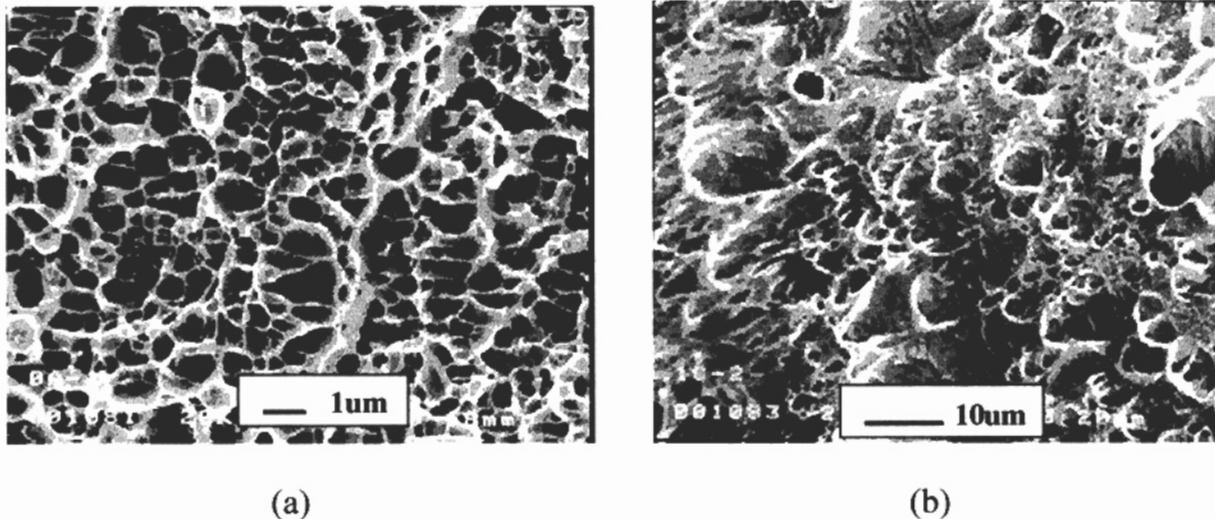


Figura 6 - Fratografia por MEV da liga nacional EMVAC 600: (a) laminada a frio, com a presença de microcavidades (*dimples*) equiaxiais, evidenciando-se a fratura dúctil; (b) solubilizada, com a presença de microcavidades (*dimples*) maiores que o do material laminado, evidenciando-se a recristalização e o crescimento de grão.

Em todos os processos de soldagem empregados na liga EMVAC 600, as amostras soldadas longitudinalmente apresentam reduções na ductilidade, quando comparado ao material solubilizado. Os corpos de prova soldados pelo processo TIG/CC⁻ não pulsado apresentam a menor ductilidade, com alongamento de 32,5%, por ser o processo que produz uma maior zona de fusão (4,0mm de largura), uma maior segregação na interface sólido/líquido e uma maior região com estrutura menos dúctil (clivagem transgranular). Nos processos de soldagem por TIG/CC⁻ pulsado, Arco Plasma transferido e Laser pulsado, as dimensões aproximadas das zonas de fusão obtidas com o auxílio de microscopia óptica são de 3,8mm, 3,1mm e 1,0mm respectivamente. Assim, na soldagem por Laser pulsado, o alongamento é de 37,2%, próximo ao da amostra solubilizada (38,7%).

Na superliga de níquel EMVAC 600, a zona termicamente afetada (ZTA) quando exposta a altas temperaturas durante o processo de soldagem, provoca crescimento de grão, solubilização e reprecipitação de carbonetos (Cr_7C_3 e $Cr_{23}C_6$) e precipitados intermetálicos tipo $Ni_3(Al,Ti)$, os quais formam trincas de reaquecimento no material durante tratamento térmico de endurecimento ou em serviço a altas temperaturas. Estas alterações microestruturais causam deteriorações nas propriedades mecânicas inerentes à liga, tais como limite de resistência, limite à fadiga, alongamento (ductilidade) e resistência à corrosão e à oxidação.

As fractografias da liga EMVAC 600, soldada pelos processos a Arco Tungstênio com Atmosfera Gasosa (TIG) pulsado e não pulsado, a Arco Plasma transferido e Laser pulsado, apresentam microcavidades (*dimples*) nas zonas termicamente afetadas (ZTA). Nas zonas de fusão (ZF), existem superfícies de clivagem transgranulares com um grande número de degraus de clivagem, e uma topografia de trincas ramificadas (*river pattern*) (figuras 7 e 8). Estas são indicações da absorção de energia pela deformação plástica localizada. Na fractografia da liga EMVAC 600 soldada pelo processo Laser pulsado, a ZF apresenta superfícies com trincas ramificadas menores, mas com diferentes origens de propagação, quando comparada com as ZF dos processos de soldagem empregados. A soldagem por Laser pulsado proporciona uma alta densidade de potência, alta penetração e altas taxas de resfriamento no metal fundido, produzindo-se grãos menores e com várias orientações nos crescimentos dendríticos.

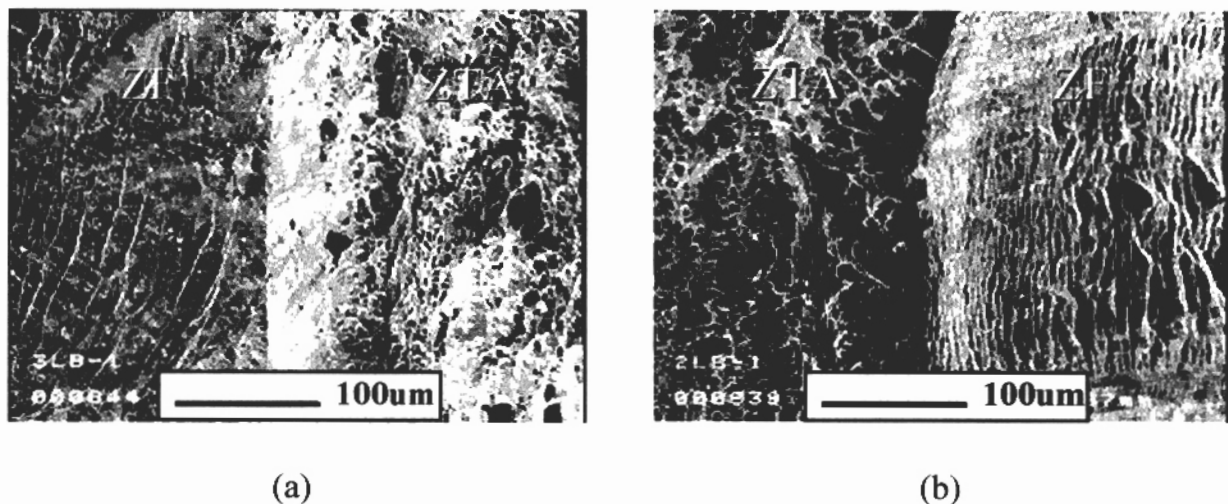


Figura 7 - Fractografias por MEV da liga nacional EMVAC 600 soldada pelo Processo TIG/CC⁻ (a) pulsado e (b) não pulsado. Existem microcavidades (*dimples*) na ZTA e superfícies de clivagem transgranulares, com degraus de clivagem e uma topografia de trincas ramificadas na ZF.

Na liga EMVAC 600, as amostras soldadas transversalmente à direção de laminação pelos processos Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado), romperam-se na zona não termicamente afetada (ZNTA) durante os ensaios mecânicos de tração. Assim, os valores obtidos para o limite de escoamento ($\sigma_{e0,2\%}$), limite de resistência (σ_r) e alongamento (ductilidade) estão próximos aos obtidos no material solubilizado. Algumas das amostras soldadas transversalmente pelo processo TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado), romperam-se na zona de fusão (ZF). Os valores obtidos para $\sigma_{e0,2\%}$ e σ_r encontram-se próximos aos do material solubilizado. Isto não ocorre com o alongamento, o qual apresenta uma pequena redução. Esta redução é mais acentuada no material soldado pelo processo TIG/CC⁻ não pulsado, no qual há uma maior quantidade de calor introduzido no material, uma maior zona de fusão, maiores segregações (S e P) na interface sólido/líquido, formando-se uma microestrutura menos dúctil e possíveis microtrincas de solidificação na ZF.

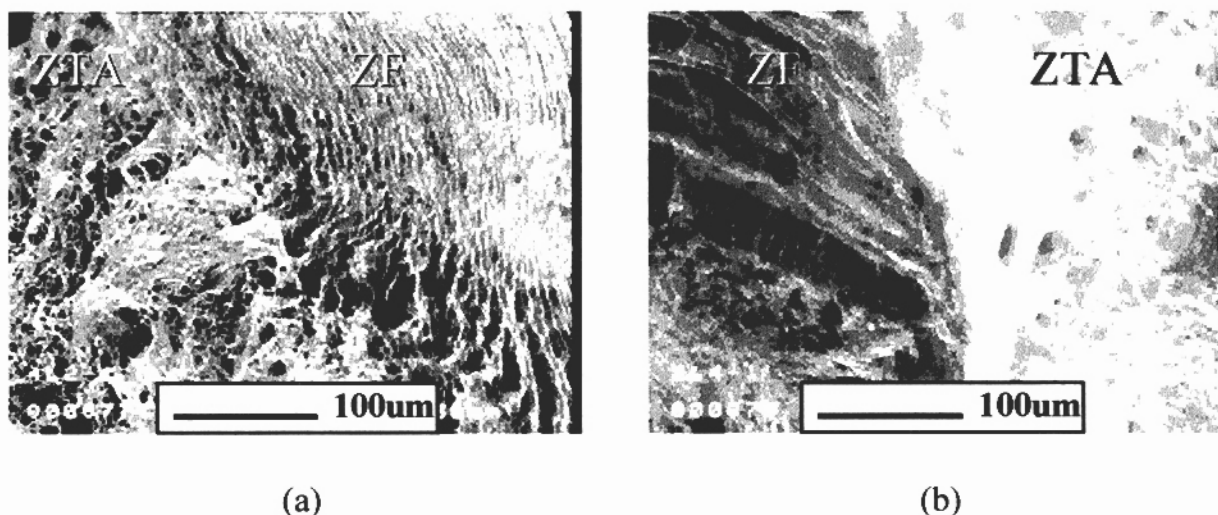


Figura 8 - Fratografias por MEV da liga nacional EMVAC 600 soldada pelos Processos (a) Arco Plasma transferido e (b) Laser pulsado. Existem microcavidades (*dimples*) na ZTA e superfícies de clivagem transgranulares, com degraus de clivagem e uma topografia de trincas ramificadas na ZF. No Processo Laser, as trincas possuem diferentes origens de propagação na ZF.

3.2. Ensaios de Microdureza Vickers

As amostras da liga EMVAC 600 laminadas apresentam altos valores de Microdureza Vickers ($368,0 \pm 32,4 \text{ kgf/mm}^2$) quando comparados aos valores encontrados nas amostras da liga como recebida ($184,7 \pm 5,7 \text{ kgf/mm}^2$) e a solubilizada ($145,4 \pm 2,9 \text{ kgf/mm}^2$). As amostras laminadas apresentam alto grau de encruamento (alta densidade de discordâncias não uniformemente distribuídas).

As amostras soldadas pelos processos TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado) e Arco Plasma (transferido) apresentam valores menores de Microdureza Vickers (Hv) nas zonas de fusão (ZF), comparados aos valores das zonas termicamente afetadas (ZTA) e não termicamente afetadas (ZNTA). Os valores de Microdureza Vickers nas ZNTA dos diferentes processos de soldagem, correspondem aos do material solubilizado. No processo de soldagem Laser pulsado, os valores de Microdureza Vickers encontrados na ZF são maiores que os valores das ZTA e ZNTA. Em todos os processos de soldagem empregados, observa-se uma elevação nos valores de Microdureza Vickers nas ZTA, provocada pela reprecipitação de carbonetos (Cr_7C_3 e Cr_{23}C_6) e intermetálicos tipo $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ [1].

No processo de soldagem Laser pulsado, os pequenos grãos recristalizados na ZF apresentam diferentes orientações dendríticas após a solidificação, elevando-se os valores de Microdureza Vickers na ZF (figura 9). Nos processos de soldagem TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado) e a Arco Plasma (transferido) ocorre recristalização com crescimento de grão na ZF, diminuindo-se a densidade de discordâncias e, conseqüentemente, os valores de Microdureza Vickers na ZF. A ZTA da liga nacional EMVAC 600 soldada pelo processo Laser pulsado apresenta os maiores

valores de Microdureza Vickers (figura 10). O processo de soldagem Laser pulsado produz a menor ZTA (0,5mm), quando comparada aos outros processos estudados: TIG/CC (3,0mm), TIG/CC pulsado (3,0mm) e Arco Plasma transferido (2,5mm). As dimensões aproximadas das ZTA foram determinadas pelas diferentes variações nos valores de Microdureza Vickers nestas regiões.

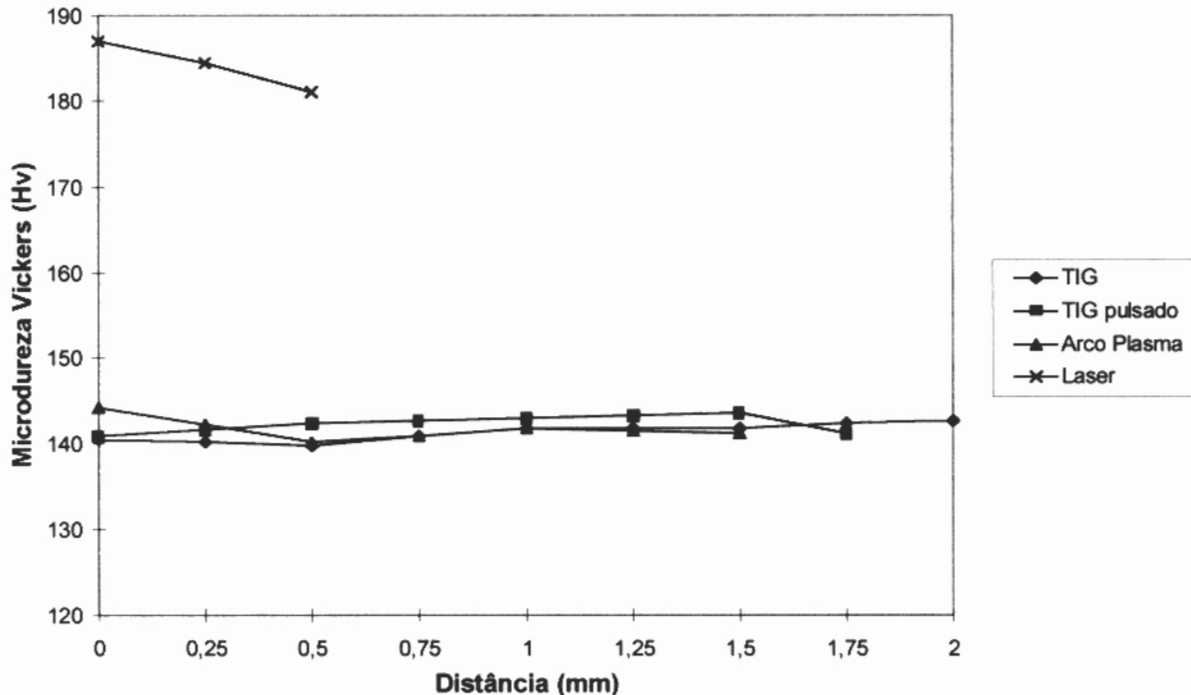


Figura 9 - Gráfico de Microdureza Vickers Hv (kgf/mm^2) em função da distância (mm) em amostras da liga nacional EMVAC 600 soldadas pelos processos TIG (CC pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado) nas zonas de fusão (ZF). As medidas iniciam no centro da ZF das amostras soldadas longitudinalmente à direção de laminação.

3.3. Análises por Microscopia Óptica e Medida do Tamanho Médio de Grão

A microestrutura obtida por microscopia óptica (MO) da liga nacional EMVAC 600, como recebida, apresenta grãos pequenos ($2,41 \pm 0,12 \mu\text{m}$) e uniformemente distribuídos. A amostra deformada a frio a 91,2% de redução em espessura, apresenta grãos alongados e altamente deformados, com carbonetos alinhados na direção de laminação (figura 11).

A microestrutura obtida por MO da liga nacional EMVAC 600 laminada (91,2% de redução em espessura) e solubilizada a 1.150°C por 30 minutos, apresenta grãos equiaxiais ($75,1 \pm 4,7 \mu\text{m}$), recristalizados e defeitos superficiais do tipo maclas térmicas (figura 12).

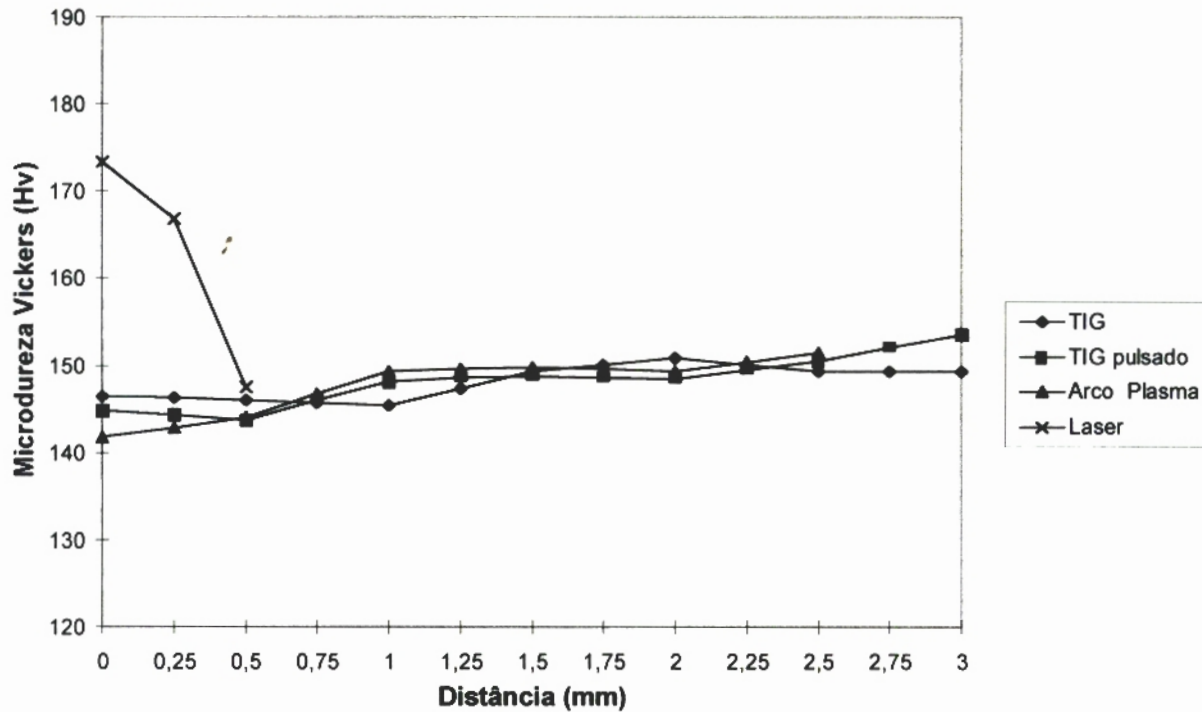
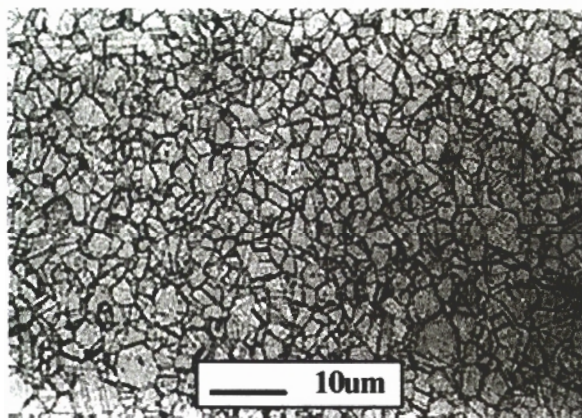
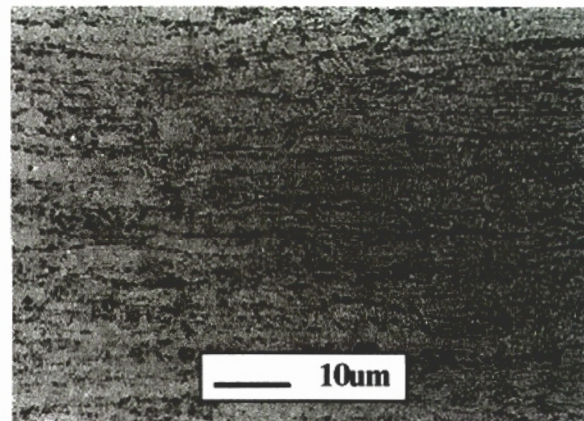


Figura 10 - Gráfico de Microdureza Vickers Hv (kgf/mm^2) em função da distância (mm) em amostras da liga nacional EMVAC 600 soldadas pelos processos TIG (CC pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado) nas zonas termicamente afetadas (ZTA).



(a)



(b)

Figura 11- Microestrutura obtida por MO da liga nacional EMVAC 600: (a) material de partida; (b) laminada a 91,2% de redução em espessura, onde observa-se uma estrutura altamente deformada, com carbonetos alinhados na direção de laminação. Ataque: $\text{HCl} + \text{FeCl}_3$.

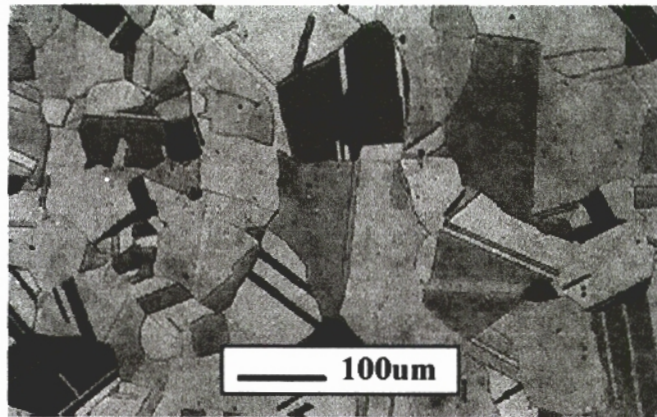
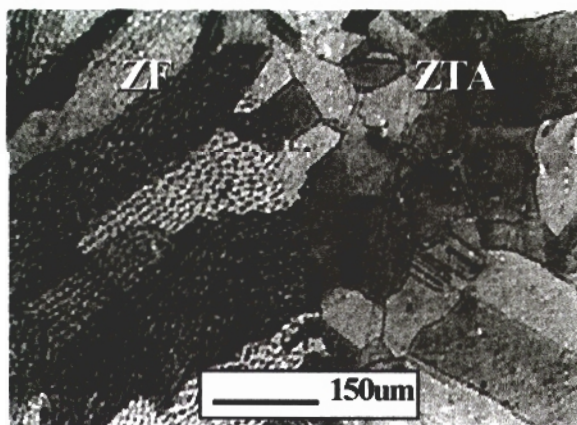
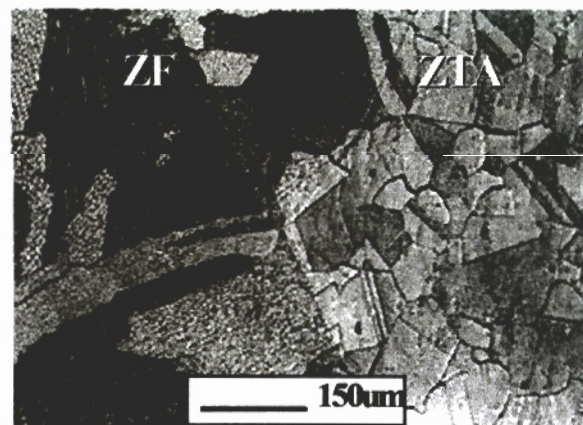


Figura 12 - Microestrutura obtida por MO da liga nacional EMVAC 600 solubilizada a 1.150°C por 30 minutos. Observam-se grãos equiaxiais, recristalizados e maclas térmicas. Ataque: água régia.

As microestruturas obtidas por MO da liga nacional EMVAC 600 soldada pelos diferentes processos em estudo, encontram-se nas figuras 13 e 14. O maior tamanho de grão médio é encontrado na ZF do processo de soldagem TIG não pulsado ($108,8 \pm 4,1 \mu\text{m}$), quando comparado aos valores dos processos TIG pulsado ($99,4 \pm 5,7 \mu\text{m}$), Arco Plasma transferido ($92,8 \pm 5,4 \mu\text{m}$) e Laser pulsado ($25,7 \pm 1,8 \mu\text{m}$). O maior tamanho de grão médio é também encontrado na ZTA do processo TIG não pulsado ($102,0 \pm 3,7 \mu\text{m}$), comparado aos outros métodos: $93,2 \pm 2,6 \mu\text{m}$, $88,7 \pm 4,6 \mu\text{m}$ e $85,9 \pm 2,9 \mu\text{m}$, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 13 - Microestruturas obtidas por MO da liga nacional EMVAC 600 soldada pelos processos: (a) TIG não pulsado e (b) TIG pulsado. Observam-se as interfaces ZF/ZTA, com grãos alongados e formações dendríticas finas nas ZF. Ataque: água régia.

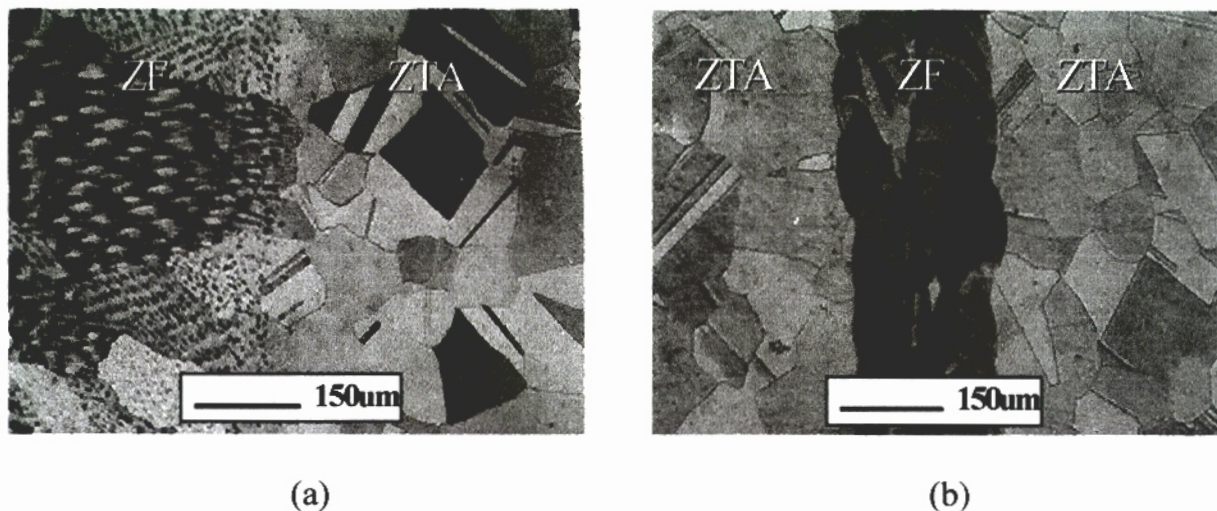


Figura 14 - Microestrutura obtida por MO da liga nacional EMVAC 600 soldada pelos processos: (a) Arco Plasma transferido e (b) Laser pulsado. Observam-se as interfaces ZF/ZTA, com grãos alongados e formações dendríticas finas nas ZF. No processo Laser, há sobreposição das poças de fusão solidificadas (círculos) na ZF. Ataque: água régia.

4.0. CONCLUSÕES

As fractografias da liga EMVAC 600 nacional (INCONEL 600) laminada a frio e a solubilizada, apresentaram microcavidades (*dimples*), evidenciando-se a fratura dúctil. As fractografias dos materiais soldados pelos processos TIG (CC pulsado e não pulsado), Arco Plasma (transferido) e Laser (pulsado) apresentaram microcavidades na zona termicamente afetada (ZTA). Na zona de fusão (ZF), superfícies de clivagem transgranulares com um grande número de degraus de clivagem e uma topografia de trincas ramificadas (*river pattern*).

Todos os processos de soldagem empregados na liga EMVAC 600 nacional, não apresentaram alterações nos valores do limite de escoamento ($\sigma_{e0,2\%}$), quando comparados aos do material solubilizado. Mas, os valores do limite de resistência (σ_r) e do alongamento (ductilidade) diminuem com o aumento da quantidade de calor introduzida no material. Assim, tem-se os valores crescentes de σ_r e alongamento nos processos de soldagem: TIG, TIG pulsado, Arco Plasma transferido e Laser pulsado. A rápida solidificação reduz as segregações (S e P) nas interfaces sólido/líquido, formando-se uma estrutura mais dúctil e evitando-se as possíveis microtrincas de solidificação na ZF, provocadas pela formação dos precipitados intermetálicos tipo Ni_3 (Al,Ti).

Na liga EMVAC 600, a ZTA quando exposta a altas temperaturas durante a soldagem, provoca crescimento de grão, solubilização e reprecipitação de carbonetos (Cr_7C_3 e $Cr_{23}C_6$) e precipitados intermetálicos tipo Ni_3 (Al,Ti), os quais podem formar

microtrincas de reaquecimento no material durante tratamento térmico de endurecimento ou em serviço a altas temperaturas, alterando-se os valores de σ_r , ductilidade, resistência à corrosão e à oxidação.

As amostras soldadas pelos processos TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado) e Arco Plasma transferido apresentam valores menores de Microdureza Vickers nas zonas de fusão (ZF), comparados aos valores das zonas termicamente afetadas (ZTA) e não termicamente afetadas (ZNTA). No processo de soldagem Laser pulsado, os valores de Microdureza Vickers encontrados na ZF são maiores que os valores das ZTA e ZNTA, pois os pequenos grãos recristalizados na ZF apresentam diferentes orientações dendríticas após a solidificação.

Em todos os processos de soldagem empregados, observa-se uma elevação nos valores de Microdureza Vickers nas ZTA, provocado pela reprecipitação de carbonetos (Cr_7C_3 e Cr_{23}C_6) e intermetálicos tipo $\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$. A liga nacional EMVAC 600 soldada pelo processo Laser pulsado apresenta os maiores valores de Microdureza Vickers e a menor ZTA.

Após a soldagem da liga EMVAC 600, deve realizar-se o tratamento térmico de solubilização no material, para alívio de tensões e reduzir carbonetos e precipitados intermetálicos na ZF e ZTA, principalmente nos processos de soldagem com baixa densidade de potência (TIG/CC⁻ pulsado e não pulsado). Assim, evita-se a formação de possíveis microtrincas de solidificação na ZF ou microtrincas de reaquecimento na ZTA.

A liga EMVAC 600 soldada pelo processo Laser pulsado apresenta uma alta penetração e precisão de soldagem, com uma menor ZF e ZTA, além de não provocar reduções nos valores de $\sigma_{e0,2\%}$, σ_r e ductilidade. Entre outras aplicações, o processo de soldagem Laser deve ser principalmente empregado em componentes que trabalham em tensões cíclicas ou à temperaturas elevadas, minimizando-se a redução no limite de resistência à fadiga, resistência à corrosão e à oxidação da superliga. Os processos de soldagem TIG (CC⁻ pulsado e não pulsado) e a Arco Plasma transferido podem ser utilizados em estruturas e componentes que não exijam alta qualidade e desempenho das juntas soldadas em meios agressivos. Além dos fatores técnicos mencionados, na escolha do processo de soldagem empregado deve-se levar em consideração o fator econômico e a relação custo-benefício do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DONACHIE, M.J.; Superalloys Source Book. **American Society for Metals**. 1984.
- [2] SIMS, C.T.; HAGEL, W.C.; **The Superalloys**. Ed. by Sims, C.T. and Hangel, W.C. J. Willey, New York. 1972.
- [3] Metals Handbook; Corrosion; **ASM**; vol. 13, 9th edition; 1987.
- [4] SCHWARTZ, M. M.; **Metals Joining Manual**. McGraw-Hill Inc., USA, 1979.

- [5] Metals Handbook. Welding, Brazing and Soldering. **American Society for Metals**. Volume 6, 9th edition, 1983.
- [6] KAISER, S.D.; Welding High-Nickel Alloys: Different but not Difficult. **Welding Journal**, 67(10): 55-57, 1988.
- [7] OWCZARSKI, W.A.; Process and Metallurgical Factors in Joining Superalloys and other High Service Temperature Materials. **Symposium in Physical Metallurgy of Metal Joining**. St. Louis, Missouri, 16-17 oct. 1980.
- [8] LUNDIN, C. D.; RUPRECHT, W.J.; The Effect of Shielding Gas Additions on the Penetration Characteristics of Plasma-Arc Welds. **Welding Journal**, 56(1):1s-7s, 1977.
- [9] KOHN, G.; HERRMANN, B.; et al; Failure of Welded Inconel 600 Pipe in the Cooling Systems of a Nuclear Reactor. **Second Israel Materials Engineering Conference**. Beer-Sheva, 21-23 feb. 1984.
- [10] PATTERSON, R.A.; NEMEC, R.B.; REISWIG, R.D.; Discontinuities formed in Inconel GTA Welds. **Welding Journal**, 66(1): 19s-25s, 1985.
- [11] SAVAGE, W.F.; NIPPES, E.F.; GOODWIN, G.W.; Effect of Minor Elements on Hot Cracking Tendencies on Inconel 600. **Welding Journal**, 56(8): 245s-253s, 1977.
- [12] RYKALINE, N. N.; **Les Sources D'Énergie Utilisées en Soudage**; Soud. Tec. Conn., 28(11/12): 471-85, nov/dez. 1974.
- [13] ASKELAND, D. R.; **The Science and Engineering of Materials**. Second SI Edition by P. Webster. Chapman and Hall. University of Missouri-Rolla, USA. 1989.
- [14] REED-HILL, R. E.; **Princípios de Metalurgia Física**. Segunda Edição. Editora Guanabara Dois S.A.. 1982.
- [15] DIETER, G.E.; **Metalurgia Mecânica**. Segunda Edição. Editora Guanabara Dois S.A.. 1981.
- [16] WAINER, E; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H.; **Soldagem, Processos e Metalurgia**. Edgard Blücher Ltda. 494p.. São Paulo, 1992.
- [17] QUITES, A. M.; DUTRA, J. C.; **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltáico**. Editora EDEME. 248p.. Florianópolis, 1979.
- [18] Welding Handbook; **American Welding Society**. 575p.. Miami, Flórida, 1978.
- [19] Soldagem; **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. 720p.. São Paulo, 1979.
- [20] FERNANDES, S. M. C.; **Caracterização Microestrutural e Mecânica da Superliga à Base de Níquel (Liga 600) após Tratamentos Térmicos**. Dissertação de Mestrado (IPEN-CNEN/SP). 1993.
- [21] CAMPOS FILHO, M. P.; **Solidificação e Fundição de Metais e suas Ligas**. Livros Técnicos e Científicos e Editora da Universidade de São Paulo. 1978.

EVALUATION AND CHARACTERIZATION OF THE NICKEL BASED SUPERALLOY EMVAC 600 AFTER WELDING PROCESSES TIG, PLASMA-ARC AND LASER

ABSTRACT

The nickel-base alloy EMVAC 600 made in Brazil (INCONEL 600) has good mechanical, corrosion and oxidation resistance in high temperatures and it has been used to build aircrafts and thermoelectric turbines, chemical reactors, radiation detectors and nuclear reactors. This studied superalloy was produced by the company Eletrometal Metais Especiais. It was cold rolled (91.2% of reduction in thickness) and heat treated at 1,150°C per 30 minutes, and welded in top unions, single pass, without adding material, by the fusion techniques TIG, Plasma-arc and Laser. Discontinuities due to hot cracking and post-welding heat treatment cracking, carbides (Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6) and intermetallics precipitates type $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ in the heat-affected zones (HAZ) and welded zones (WZ) were evaluated. Mechanical and microstructural characterization in the welded material was carried out by Tension Testing, Vickers Microhardness, Size Grain Measurement, Optical and Scanning Electronic Microscopy. EMVAC 600 welded by Laser has high penetration and joining precision, with smaller WZ and HAZ, maintaining the values of $\sigma_{e0,2\%}$, σ_r and ductility. The welding processes TIG and Plasma-arc produce more S and P segregations in solid/liquid interface (WZ), intermetallics precipitates $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ and reprecipitation of Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 , reducing the superalloys mechanical proprieties.

KEY-WORDS

Inconel 600

Nickel-base Alloys

Welding of Superalloys