

**SOLDAGEM COM LASER DE Nd:YAG DO AÇO INOXIDÁVEL
MARTENSÍTICO AISI 420 ⁽¹⁾**

**José Roberto Berretta, Maurício David M. das Neves, Wagner de Rossi, Ivan
Alves de Almeida, Spero Penha Morato, Nilson Dias Vieira Júnior ⁽²⁾**

RESUMO

Este artigo descreve uma metodologia para soldar circunferencialmente, um aço inoxidável martensítico do tipo AISI 420, empregando no processo um laser de estado sólido (Nd:YAG). As soldas foram inicialmente efetuadas sem a utilização de tratamento térmico, portanto, sem controle da velocidade de resfriamento. Neste caso, a análise metalográfica da região da solda mostrou a presença de trincas na zona afetada pelo calor. Posteriormente, as soldas foram realizadas utilizando tratamentos de pré e pós-aquecimento do material de base. Os tratamentos térmicos foram executados empregando-se o próprio laser de soldagem. Observou-se por meio de microscopia ótica, que as seções transversais desses cordões de solda, não apresentavam trincas na zona afetada pelo calor. Verificou-se, que a desfocalização do feixe laser permitiu aquecer e controlar a velocidade de resfriamento do material de base, tornando possível a soldagem deste material, sem a presença de trincas.

Palavras-chave: Solda laser; Aço inoxidável martensítico; Laser Nd:YAG

ABSTRACT

This articles describes a methodology to weld circumferentially, a martensite stainless steel of the type AISI 420, using a solid-state laser(Nd:YAG) in the process. The welds initially had been effected without the use of heat treatment, therefore, without control of the cooling rate. In this case, the microstructure analysis of the region of the weld showed the presence of cracks in the heat-affected zone (HAZ). Latter on the welds had been carried through using the heat treatment of previous and posterior heating of the workpiece. The heat treatment had been executed applying the same laser used in the welding process. No cracks were detected in the HAZ, when the cross section of the welds were observed by means of optic microscopy. It has been noticed that the out of focus point of the laser beam allowed to heat and to control the cooling rate of the workpiece, becoming possible the welding of this material, without the presence of cracking.

Key-Words: Laser welding; Martensite stainless steel; Nd:YAG laser

(1) Trabalho a ser apresentado no XXVI ENTS

(2) Pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN

1. INTRODUÇÃO

Diversos segmentos industriais vem substituindo processos tradicionais de soldagem pelo laser ^(1,2). A crescente utilização do processo laser ocorre devido, a possibilidade de obter juntas soldadas com propriedades mecânicas superiores, reduzida zona afetada pelo calor e elevada velocidade de execução da solda. O processo laser pode ser facilmente automatizado e associado com a elevada taxa de repetição permite reduzir custos e motivar novas aplicações ⁽³⁾.

Na área de soldagem podem ser utilizados os lasers de estado sólido (Nd:YAG) e de estado gasoso (CO₂). A soldagem com o laser de Nd:YAG (Yttrium Aluminum Garnet) ocorre por meio da geração e emissão de um pulso de energia concentrada, com alta taxa de repetição por unidade de tempo. O pulso incide na superfície do metal de base (MB) e propicia uma solda contínua através da sobreposição dos pontos.

Na soldagem com o laser de Nd:YAG a interação entre o feixe incidente e o MB influencia a geometria do cordão (largura/profundidade de penetração) e a dimensão da zona afetada pelo calor (ZAC) ⁽⁴⁾.

Durante a soldagem, quando um feixe de laser de Nd:YAG é direcionado para o MB, dependendo de sua densidade de potência, forma-se um orifício ao longo da espessura do MB, denominado por "key-hole". A presença do "key-hole" possibilita um aumento da penetração da solda. Entretanto, após a saída do feixe desta região ocorre o fechamento do orifício pelo metal líquido, que esta em torno "key-hole", podendo originar a presença de poros na zona de fusão (ZF) da solda, devido ao aprisionamento de gás na solidificação desta ⁽⁵⁾.

A literatura apresenta diversos trabalhos sobre a soldagem de aços inoxidáveis com laser de Nd:YAG, principalmente, em aços inoxidáveis austeníticos ⁽⁶⁻¹⁰⁾. No entanto, os aços inoxidáveis martensíticos por apresentarem baixa soldabilidade, tem sua aplicação limitada, sendo portanto menos estudados.

Os aços inoxidáveis martensíticos são materiais que tentam associar a resistência ao desgaste com a resistência a corrosão. Esses aços são balanceados quimicamente para se tornarem materiais com elevada resistência mecânica, principalmente dureza, que é conseguida através de tratamento térmico. A resistência a corrosão é obtida pela presença de cromo, geralmente no teor de 11,5 até 18%, em peso.

Durante o processo de soldagem, a velocidade de resfriamento não é uniforme, provocando, o aparecimento e a distribuição irregular de tensões residuais no MB. A elevada velocidade de resfriamento, que o MB está submetido, provoca também variações microestruturais, facilmente induzindo a formação de fase martensítica no aço inoxidável AISI 420.

Conforme mencionando anteriormente, a soldagem deste material conduz a uma região martensítica adjacente ao cordão de solda (zona de fusão - ZF), independente de sua condição inicial ser recozida ou temperada. O valor da dureza na zona afetada pelo calor (ZAC) depende da porcentagem de carbono e dos outros elementos de liga, que aumentam a temperabilidade do material, como, por exemplo, o cromo. O aumento excessivo da dureza provoca redução da tenacidade, tornando esta região bastante susceptível ao aparecimento de trincas.

Diversas técnicas são utilizadas isoladamente ou em conjunto, para reduzir o aparecimento de trincas na ZAC durante a soldagem, tais como: pré-aquecer o MB, controlar a velocidade de resfriamento inter-passes e/ou controlar a velocidade de resfriamento. O objetivo do pré e pós aquecimento é reduzir o gradiente de temperatura no MB, principalmente na ZAC e propiciar uma redução na velocidade de resfriamento. A utilização dos tratamentos térmicos na soldagem possibilita alterar a

microestrutura da ZAC, tornando-a mais tenaz, reduzindo a possibilidade de aparecimento de trincas e favorecendo uma distribuição das tensões térmicas mais homogênea.

Os aços inoxidáveis martensíticos utilizam temperaturas de pré e pós aquecimento no intervalo de 205 até 315 °C⁽¹¹⁾. O teor de carbono no material é o fator determinante para se utilizar ou não o tratamento de pré ou pós aquecimento. Geralmente, para teores inferiores a 0,10%C, em peso, não são usados os tratamentos térmicos na soldagem. A literatura⁽¹¹⁾ recomenda para teores de 0,10-0,20%C, em peso, a utilização de um tratamento de pré-aquecimento até 260 °C e um resfriamento lento do MB. Teores de carbono superiores a 0,20 %C normalmente usam um pré-aquecimento até 260 °C e uma operação de recozimento após a finalização da soldagem.

O tratamento térmico de pós-aquecimento depende da composição química do MB, principalmente do teor de carbono e das condições de serviço. O ciclo térmico do recozimento deve ser completamente controlado e utilizado, também, em casos que deseja-se reduzir a dureza, da ZAC.

O objetivo deste trabalho é soldar um aço inoxidável martensítico AISI 420, usado para fabricação de brocas empregadas em odontologia. A metodologia desenvolvida para realizar a solda, sem a presença de trincas envolveu o pré-aquecimento, a soldagem e um pós-aquecimento do MB. Um laser de Nd:YAG foi utilizado em todas as etapas da soldagem, inclusive para controlar a velocidade de aquecimento e resfriamento do MB.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material de base utilizado foi um aço inoxidável martensítico do tipo AISI 420, com composição química, em peso, apresentada na tabela I.

As amostras foram preparadas conforme representação mostrada na figura 1. A geometria particular deste produto é devida a sua aplicação e necessidade de obter uma broca, com um canal central de refrigeração, para utilização na odontologia.

As soldas foram realizadas em um equipamento desenvolvido no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), denominado de central de processamento de materiais a laser (CPML). Composta por um laser de Nd:YAG, do tipo pulsado, com energia por pulso de até 10 J, taxa de repetição maior que 300 Hz, potência média de 100W, potência pico de 3 KW e largura temporal dos pulsos controlada entre 0,2 e 10 ms, acoplado a uma fresadora CNC de 4 eixos.

Os parâmetros do laser foram mantidos constantes em todas as soldas e utilizaram-se os valores de: energia (E) = 6,4 J, potência média (P_m) = 70,4 W, tempo de pulso (t_p) = 10 ms, diâmetro do feixe de incidência no MB (d_f) = 340×10^{-6} m, densidade de potência (W_p) = $7,05 \times 10^9$ W/m² e frequência de pulsos (f) = 11 Hz. Os cordões de solda foram realizados com velocidade de soldagem (v) = 125 mm/min e sobreposição dos pulsos de 45%. Foram executadas soldas na posição de interface das duas peças, denominado x=0, e deslocada de 0,5 mm no sentido da peça de maior diâmetro, denominada posição x=0,5, conforme observado na figura 1.

O bocal de fornecimento do gás de assistência, que consiste de um tubo com 4 mm de diâmetro interno, foi posicionado de maneira que sua linha de centro esteja contida em um plano que passa pelas linhas de centro do feixe laser e do cordão de solda. Utilizou-se, o argônio com uma vazão de 15 l/min, como gás de assistência para a proteção da solda.

Conforme mencionado, este material apresenta baixa soldabilidade, portanto, existe a necessidade de se realizar um tratamento térmico de pré e pós-aquecimento.



Utilizou-se o próprio laser da CPML, como fonte de calor para controlar o aquecimento e a velocidade de resfriamento do MB⁽¹²⁾.

Os ciclos do pré-aquecimento, da soldagem e do pós-aquecimento foram executados a partir de um procedimento previamente programado no CNC, que estava acoplado ao laser.

O pré-aquecimento iniciou-se com o movimentação da amostra com velocidade periférica de $v = 42\text{mm/min}$, em seguida acionou-se o laser com parâmetros análogos aos usados na soldagem, porém com o feixe desfocalizado em relação a superfície do MB. Assim, com o aumento do diâmetro do feixe de incidência no MB ($d_f = 2,4 \times 10^{-3}\text{ m}$) obteve-se uma condição, para aquecer o material na temperatura desejada. Com a peça aquecida desligou-se o laser e realizou-se o deslocamento, para a posição de soldagem ($d_f = 340 \times 10^{-6}\text{ m}$), aumentou-se a velocidade ($v = 125\text{mm/min}$). O laser foi liberado com os parâmetros descritos anteriormente e executou-se a soldagem. Após a finalização da soldagem circunferencial, o laser foi desligado e retornou a posição desfocalizada para executar o pós-aquecimento e finalmente desligou-se o laser.

O monitoramento da temperatura dos ciclos de pré-aquecimento, da solda e do pós-aquecimento foi realizado por termopar tipo T (cobre-constantan), colocado na peça a uma distância de 5 mm da local da solda. Os dados de temperatura foram coletados por um arranjo desenvolvido no IPEN, que coleta as informações do termopar, interpreta-as, armazena-as em um microcomputador. Com este arranjo obtém-se o gráfico, de variação da temperatura no tempo, em tempo real que facilita o controle do processo.

Posteriormente, as amostras soldadas foram cortadas na seção longitudinal e transversal, preparadas metalograficamente e atacadas eletroquimicamente, com uma solução aquosa de ácido nítrico a 50%.

A microscopia ótica foi usada para medir as dimensões típicas do cordão (largura e penetração da solda) e realizar as observações microestruturais. Utilizou-se a microdureza Vickers, com carga de 200 gramas, para estimar a zona afetada pelo calor (ZAC).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, as amostras foram soldadas, com laser de Nd:YAG, sem utilização de pré ou pós aquecimento. Os parâmetros de soldagem empregados foram selecionados com base em resultados anteriores⁽¹⁰⁾ e estão relacionados em materiais e métodos.

As análises das soldas nestas condições foram realizadas por microscopia ótica (MO) e perfil de microdureza Vickers em função da distância. A observação realizada por MO mostrou que, todas as amostras soldadas apresentavam trincas na ZAC, inviabilizando sua utilização final. Os resultados obtidos a partir do levantamento do perfil de microdureza, apresentados na figura 2, indicaram excessivo aumento próximo a ZAC, com valores acima de 600 HV, se comparados com os valores próximos a 230HV na região do MB.

Os elevados valores de microdureza alcançados na ZF e na ZAC indicam a causa do aparecimento de trincas. A alta concentração de calor resultante do processo laser provocou aumento do gradiente de temperatura e, portanto, elevada velocidade de resfriamento na ZF e na ZAC, que associada a composição química do MB, induziu a formação de fase martensítica. Portanto, ocorreu uma redução da tenacidade desta região, que não apresentou capacidade de acomodar as tensões térmicas da soldagem e resultando no aparecimento de trincas.



Com o objetivo de minimizar os efeitos da elevada velocidade de resfriamento e o conseqüente aparecimento de trincas foi realizado nas amostras, um tratamento térmico de pré e pós aquecimento. Conforme já mencionado, o pré-aquecimento e o controle da velocidade de resfriamento foi realizado utilizando o mesmo laser empregado na soldagem. Os parâmetros do laser empregados no tratamento térmico foram análogos aos usados na soldagem, apenas com modificação da distância focal, para distribuir sobre uma área de maior dimensão a quantidade de calor imposto ao MB.

A variação da temperatura em função do tempo, no ciclo de pré e pós aquecimento foi monitorado em todas as amostras soldadas. A figura 3 apresenta o ciclo térmico utilizado. Observa-se, que no pré-aquecimento, a amostra foi submetida a radiação laser por 120 segundos, com ponto focal de $d_f = 2,4 \times 10^{-3}$ m, provocando um aquecimento em torno de 200 °C, essa temperatura foi medida a 5 mm da região a ser soldada. Estimou-se a temperatura na região da junta em aproximadamente 600°C, utilizando-se as equações básicas de transferência de calor por condução⁽¹³⁾.

A seguir o laser foi desligado e movimentado para a posição de soldagem. O ponto focal usado na soldagem foi de $d_f = 340 \times 10^{-6}$ m. Após a realização da soldagem, a amostra retornou ao ponto focal de $d_f = 2,4 \times 10^{-3}$ m, para início do pós-aquecimento. As amostras foram submetidas a radiação laser por 60 segundos, neste instante a temperatura de pós-aquecimento foi estimada em 650 °C.

A análise das amostras soldadas tratadas termicamente, com pré e pós aquecimento, foi realizada por MO. As seções transversais do cordão de solda são apresentadas nas figuras 4a e 4b. Não foram observadas trincas na ZF e ZAC. A redução da velocidade de resfriamento provocado pelo pré e pós aquecimento favoreceu a obtenção de uma microestrutura mais tenaz, com valores de microdureza Vickers entre 230 e 300 HV, que associada a uma distribuição mais uniforme das tensões térmicas, minimizou a possibilidade do aparecimento de trincas.

As soldas foram efetuadas em passe único e devido a utilização de elevada densidade de potência, a penetração ocorreu por "key-hole". As dimensões do cordão de solda apresentaram valores de 815 a 1.289 μ m para profundidade de penetração e de 690 a 841 μ m para largura efetiva do cordão. A profundidade de penetração foi 15% superior no final do cordão de solda, conforme figuras 4a e 4b, este incremento foi devido ao aumento da temperatura do MB, provocado pelo calor proveniente do início do passe. Nestas soldas a profundidade de penetração não deve ser total, para não ocorrer a obstrução do canal central de refrigeração.

As amostras soldadas na posição $x = 0,5$ mm apresentaram regiões com falta de fusão, conforme observada na figura 5. A presença destes entalhes podem reduzir a resistência a torção da peça.

A ZF apresentou uma microestrutura fina, basicamente dendrítica, conforme observado nas figuras 6a e 6b. Observou-se a presença de alguns poros, conforme mostrado na figura 4a, devido a soldagem utilizando "key-hole".

4. CONCLUSÕES

As soldas efetuadas sem tratamento térmico com densidade de potência (W_p) = $7,05 \times 10^9$ W/m² apresentaram trincas na ZAC do MB. As soldas realizadas com parâmetros análogos, porém com pré-aquecimento e velocidade de resfriamento controlado mostraram ZAC isenta de trincas. Assim, pode-se afirmar que a utilização deste procedimento de tratamento térmico é indicado na soldagem a laser do aço inoxidável AISI 420.



Os parâmetros de soldagem empregados foram suficientes para praticamente atingirem a penetração total.

Os valores de microdureza Vickers podem ser reduzidos utilizando um laser de Nd:YAG, para pré-aquecimento e controle da velocidade de resfriamento.

A técnica de soldagem a laser de brocas odontológicas é promissora, podendo futuramente concorrer com outros métodos já consolidados e que estão sendo utilizados comercialmente.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Baysore, J. K.; Williamson, M. S.; Adony, Y.; Milian, J. L.; Laser beam welding and formability of tailored blanks; *Welding Journal*, october 1995, pp. 345s – 352s.
- 2 - *Welding Handbook - Welding Processes*, AWS, Vol. 2, 8ª Edition (1991), pp. 713-738
- 3 - Sanders, F. I.; Wagoner, R. H.; - Forming of tailor-welded blanks-Metall. Trans. A, Vol.27 A, september (1996), pp. 2605-2616
- 4 - Mannik, L.; Brown, S. K.; - A relationship between laser power, penetration, depth and welding speed in the laser welding of steels-Journal of Laser Appl. 2 (1990) pp. 22-25
- 5 - Laser heating of metals - Prokhorov, A M.; Konov, V. I.; Ursu I.; Mihăilescu M.; Ed. Adam Hilger, Bristol-Philadelphia and New York, USA, (1990) - ISBN 0-7503-0040-X
- 6 - Bransch, H.N.; Weckman, D.C.; Kerr, H.W.; - Effects of pulse shaping on Nd:YAG spot welds in austenitic SS, *Weld. Journal*, June (1994), pp. 141s - 151s
- 7 - Zacharia, T.; David S. A; Vitek J.M.; Debroy T.;-Heat transfer during Nd:YAG pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic SS, *Metall. Trans. Vol. 20 A*, (1989) pp.957-967
- 8 - David S.A; Vitek J.M.;Hebble T.L.;-Effect of rapid solidification on SS weld metal microstructures and its implications on the Schaeffler Diagram, *Weld. Journal* (1987) pp.289s-300s.
- 9 - Suutala, N.; Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels - *Acta Universitatis, Série C*, nº 23, *Metalurgia* nº3 (1982)
- 10 - Neves, M.D.M.; Berretta, J.R.; Rossi, W.; Nogueira, E.C.; Wetter, N.U.; Viera, Jr.N.D.; - Soldagem do aço inoxidável AISI 304 por laser de Nd:YAG – *Revista da Associação Brasileira de Soldagem, Soldagem & Inspeção*, Vol, pp.
- 11 - *Metals Handbook-Welding, Brazing&Soldering*, ASM, Vol. 6, 9ª Ed. (1983) pp. 647-671
- 12 - Liu, N. Y.; Asibu-Kannatey E.; Experimental study of dual beam laser welding of 4140 steel, *Welding Journal*, Set.1997, pp. 342s-348s
- 13 - *Manual Termo-Técnico*; IBEC; Trevisan, W.; (1980) pp.61-69

6. FIGURAS E TABELAS

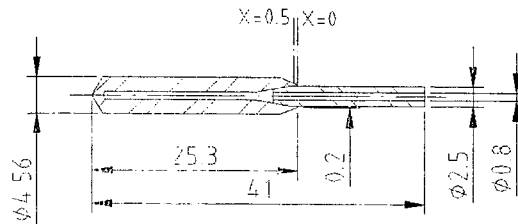


Figura 1 - Geometria da Amostra

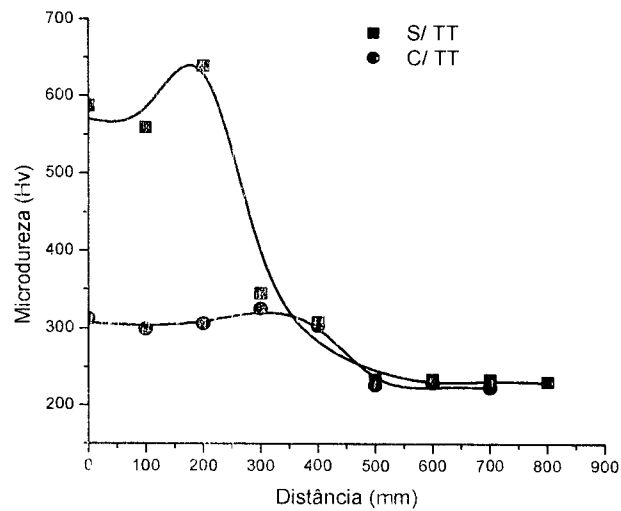


Figura 2 – Perfil de microdureza a partir do centro do cordão de solda das amostras com e sem pré e pós aquecimento

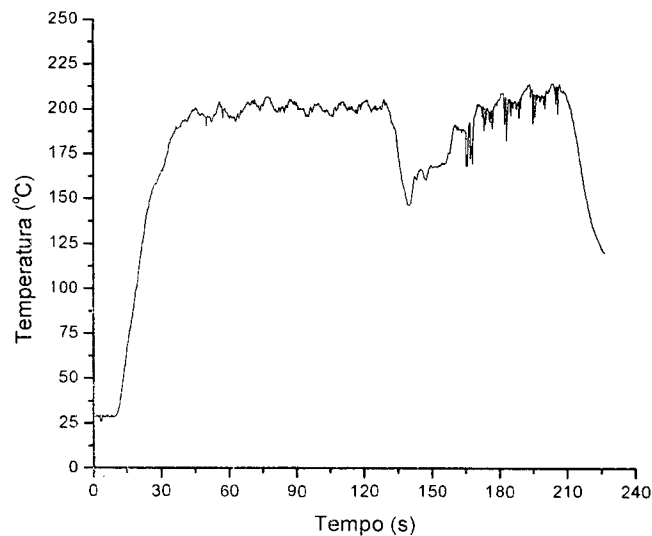
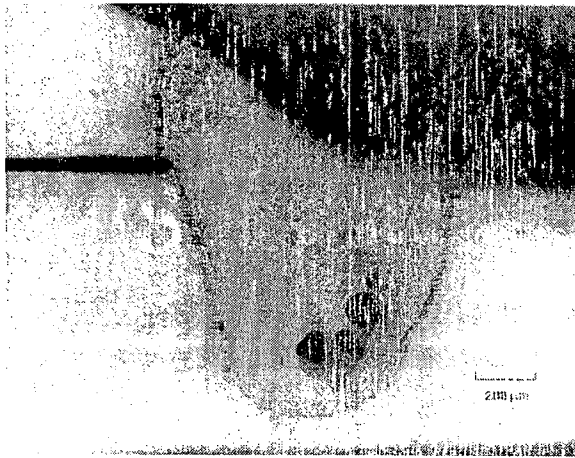
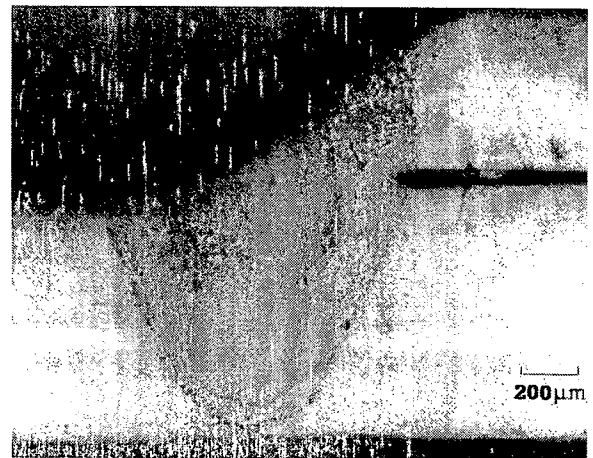


Figura 3: Gráfico da variação da temperatura no tempo para o processo de soldagem com pré-aquecimento e pós-aquecimento



(a)



(b)

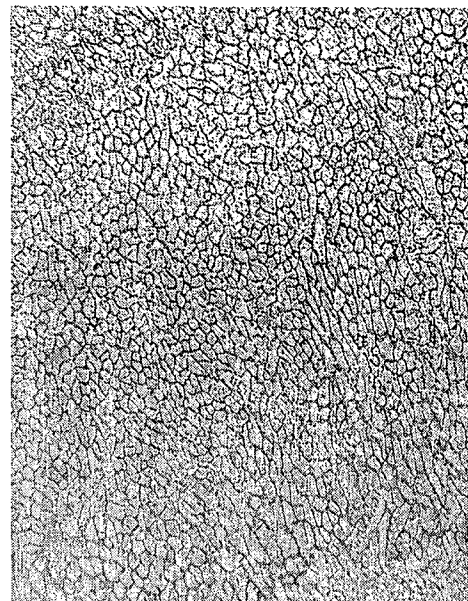
Figura 4 – Corte transversal do cordão de solda próximo ao início e ao final do cordão respectivamente



Figura 5 – Corte transversal de amostra com cordão de solda posicionado em $x=0,5\text{mm}$



(a)



(b)

Figura 6 -- Microestrutura do cordão de solda [aumento (a)x200; (b)x400]

Tabela I: Composição química (% peso) do aço AISI 420

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Cr	%Fe
0,23	0,31	0,50	0,03	0,012	0,43	13,1	Balanço