



## **CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE STELLITE 6 DEPOSITADOS POR ELETRODO REVESTIDO, SOLDAGEM POR ARCO TRANSFERIDO A PLASMA E LASER**

### **Bruna De Bernardo Foltran**

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Depart. Acadêmico de Mecânica  
Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 – Curitiba, PR, Brasil (egretta@cits.br)

### **Edgar Yoshio Kuwabara**

Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro Politécnico, Cx. P.19011 – 81531-990 – Ctba., PR, Brasil (kuwabara@netpar.com.br)

### **Ana Sofia D'Oliveira**

Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica  
Centro Politécnico, Cx. P.19011 – 81531-990 – Curitiba, PR, Brasil (sofmat@demec.ufpr.br)

**Resumo.** Nas duas últimas décadas as superligas resistentes ao desgaste a altas temperaturas tiveram pouca alteração em sua composição química. As recentes melhorias do desempenho das superligas têm sido obtidas através da otimização dos processos de deposição. Os processos de soldagem tradicionais são métodos convencionais na aplicação de revestimentos duros, porém técnicas mais recentes como soldagem por arco transferido a plasma (PTA) e técnicas de deposição a laser vêm ganhando espaço nas aplicações de revestimentos resistentes ao desgaste. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de exposição a elevadas temperaturas e diferentes ciclos térmicos (750°C, 1050°C e cinco ciclos térmicos a 1050°C) de revestimentos superficiais de Stellite 6 depositados sobre substrato de aço inox 304, pelos processos de soldagem com eletrodo revestido e de arco transferido a plasma (PTA), e por técnicas de processamento a laser. A caracterização do efeito da temperatura e dos ciclos térmicos sobre as microestruturas produzidas pelas técnicas de processamento é realizada através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. As propriedades mecânicas à temperatura ambiente e a altas temperaturas são analisadas através de microdureza Vickers.

**Palavras-chave:** Superligas à base de cobalto, Stellite 6, Eletrodo revestido, Laser cladding, Arco transferido a plasma.

## **1. INTRODUÇÃO**

As superligas a base de cobalto são amplamente empregadas como revestimentos em situações que necessitem resistência ao desgaste e/ou corrosão a altas temperaturas. Stellite é o nome comercial de um grupo composto por mais de 20 ligas à base de cobalto, originalmente desenvolvidas no início do século por Elwood Haynes, divididas em dois

grandes grupos: 1) Co-Cr-W-C e 2) Co-Cr-W/Mo-Ni/Fe-C, conforme descrito por Antony (1983) e Crook (1993).

A liga em estudo, Stellite 6, é do tipo Co-Cr-W-C e apresenta uma microestrutura hipoeutética com uma matriz rica em Co, Co-Cr-W e lamelas de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  na região interdendrítica. Antony (1983) apresentou a análise quantitativa da microestrutura da liga Stellite 6 (Co-28Cr-4W-1,1C) como sendo composta por 12,6% em peso de  $Cr_7C_3$  em uma solução sólida Co-23Cr-4,5W. A fase de carboneto  $Cr_7C_3$  não é pura, mas varia, contendo aproximadamente  $(Cr_{0,8}Co_{0,15}M_{0,05})_7C_3$  onde M representa o W, assim como elementos residuais. As propriedades mecânicas da liga são fortemente dependentes das fases de carbonetos presentes e da sua microestrutura.

As diferenças mais significativas entre os processos de deposição convencionais, como a soldagem por eletrodo revestido (ER) e as técnicas alternativas, entre elas soldagem por arco transferido a plasma (PTA) e deposição a laser, encontram-se na eficiência da soldagem, grau de diluição (fração fundida do metal base no volume total de revestimento depositado) e velocidade de solidificação.

Davis e Davis & Associates (1993) comparam as características de diversos processos de soldagem empregados para aplicação de revestimentos duros conforme apresentado na tabela 1 para os três processos em estudo.

Tabela 1 – Características dos processos de deposição empregados em revestimentos.

| Processo de deposição | Modo de aplicação | Metal de adição  | Diluição [%] | Deposição [kg/h] | Espessura mínima [mm] | Eficiência de depósito [%] |
|-----------------------|-------------------|------------------|--------------|------------------|-----------------------|----------------------------|
| ER                    | manual            | vareta revestida | 10~20        | 0,5~5            | 3,2                   | 65                         |
| PTA                   | manual/automático | pó               | 5~15         | 0,5~7            | 0,8                   | 85-95                      |
| Laser                 | automático        | pó               | 1~10         | (a)              | 0,13                  | 85-95                      |

(a) Varia muito conforme a taxa de alimentação do pó e a potência do laser

O objetivo deste estudo é comparar os revestimentos de duas camadas de Stellite 6 realizados pelos processos de eletrodo revestido, método convencional, com os processos de PTA e laser (técnicas competitivas que utilizam o material de revestimento na forma de pó). As características dos revestimentos são comparadas à temperatura ambiente, a elevadas temperaturas e a diferentes ciclos térmicos, com o intuito de observar os efeitos obtidos com cada processo de deposição.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os revestimentos foram realizados em substratos de aço inoxidável AISI 304, sendo cada processo de deposição controlado por parâmetros pré-selecionados.

No processo de soldagem a arco por eletrodo revestido o metal de adição foi o AWS ER-CoCrA (composição química nominal: Co – 28Cr – 5,4W – 0,95C – 0,01Mo – 0,3Ni – 1,6Fe – 1,7Si – 0,5Mn), com diâmetro de 3,2 mm. A faixa de tensão empregada foi de 20 a 24 V e a faixa de corrente contínua de 100 a 140 A. Os eletrodos foram mantidos em estufa a 150° C por no mínimo 2h. A velocidade de soldagem foi de 150 a 200 mm/min. O revestimento ficou com duas camadas compostas por cordões de 10 mm de largura com uma sobreposição de 50 a 70% pelo cordão adjacente.

Nos processos de deposição por soldagem a plasma por arco transferido e laser foi empregada a liga na forma de pó com composição Co – 28Cr – 4W – 1,1C – 1,1Si – 0,5Mn e granulometria de 45 a 180  $\mu\text{m}$ .

Os parâmetros empregados no processo PTA foram:

fluxo do gás plasma – Argônio: 2,33 l/min

fluxo do gás de proteção – Argônio/ Hidrogênio: 4,72 a 7,08 l/min

fluxo do gás de alimentação – Argônio: 2,36 l/min

faixa de corrente: 60 a 70 A (primeira camada), 90 a 100 A (segunda camada)

faixa de tensão: 20 a 24 V

taxa de alimentação: 22,7 a 45,4 g/min

taxa de suprimento de pó: 15,1 a 26,5 g/min

oscilação do arco: largura – 16 mm, frequência – 1,3 a 1,5 Hz

velocidade de avanço: 200 mm/min.

O revestimento a laser foi desenvolvido utilizando-se um laser de  $\text{CO}_2$  de elevada potência, 3 kW. A potência aplicada foi de 2,2 kW, utilizou-se lentes com comprimento focal de 25 cm com o foco situado 20 mm abaixo da superfície, a velocidade transversal foi de 8 mm/s e a taxa de deposição de pó foi de 0,2 g/s. O revestimento resultante ficou com duas camadas compostas por cordões de 6 mm de largura com uma sobreposição de 50 a 70%.

Os tratamentos térmicos, simulando as condições de serviço a elevada temperatura, foram realizados a  $750^\circ\text{C}$  e  $1050^\circ\text{C}$  por 10 min após a estabilização da temperatura, seguidos de resfriamento ao ar. Também foram produzidas amostras tratadas a  $1050^\circ\text{C}$  que após terem sido resfriadas ao ar voltaram ao forno na temperatura de  $1050^\circ\text{C}$ , repetindo o processo num total de cinco vezes para simular as situações de ciclagem térmica.

As amostras foram preparadas para exame metalográfico de acordo com os procedimentos padrões de lixamento e polimento. O ataque químico foi realizado em solução de 15 ml  $\text{H}_2\text{O}$ , 15 ml  $\text{HNO}_3$ , 15 ml  $\text{CH}_3\text{COOH}$  e 60 ml  $\text{HCl}$ .

Antes do ataque químico foi realizado o perfil de microdureza, da superfície até o substrato de cada amostra, com um indentador Vickers e carga de 500g.

Após o ataque químico as amostras foram analisadas em microscópio ótico, objetivando correlacionar a microestrutura com os valores de microdureza e proceder à análise quantitativa de imagem das microestruturas.

Através do uso do microscópio eletrônico de varredura foi possível observar as regiões dendrítica e interdendrítica e realizar microanálise semi-quantitativa da composição química destas regiões, empregando-se a técnica de espectroscopia por dispersão de energia.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Superfície e interface**

A figura 1 apresenta o corte transversal dos revestimentos obtidos pelos diversos processos de deposição.

A aparência geral dos revestimentos é boa, não apresentando trincas externas. Os revestimentos aplicados por ER e laser apresentaram porosidades. No processo de ER pode-se atribuir a presença de porosidades à elevada velocidade de soldagem, uma vez que os eletrodos permaneceram em estufa. No caso do laser, a cada novo cordão o equipamento é desligado, porém o sistema de alimentação do pó continua operando, pois sua velocidade de arranque não é a mesma que a do equipamento a laser. Com isso, partículas de pó não fundido podem depositar-se no revestimento apresentando baixo poder de umectação, tornando-se locais preferenciais à nucleação de poros.

A interface entre o revestimento e o metal base é contínua e sem imperfeições nos processos de ER e laser, sendo que no processo a laser a interface é homogênea e regular. No processo PTA ocorreu falta de fusão em praticamente 87% do cordão em função da corrente empregada na primeira camada ser muito baixa. Somente na extremidade direita do revestimento (como pode ser observado na fig. 1c) houve diluição, pois neste local foi realizada a abertura do arco da segunda camada com corrente superior à anterior, promovendo uma boa aderência do revestimento ao substrato.

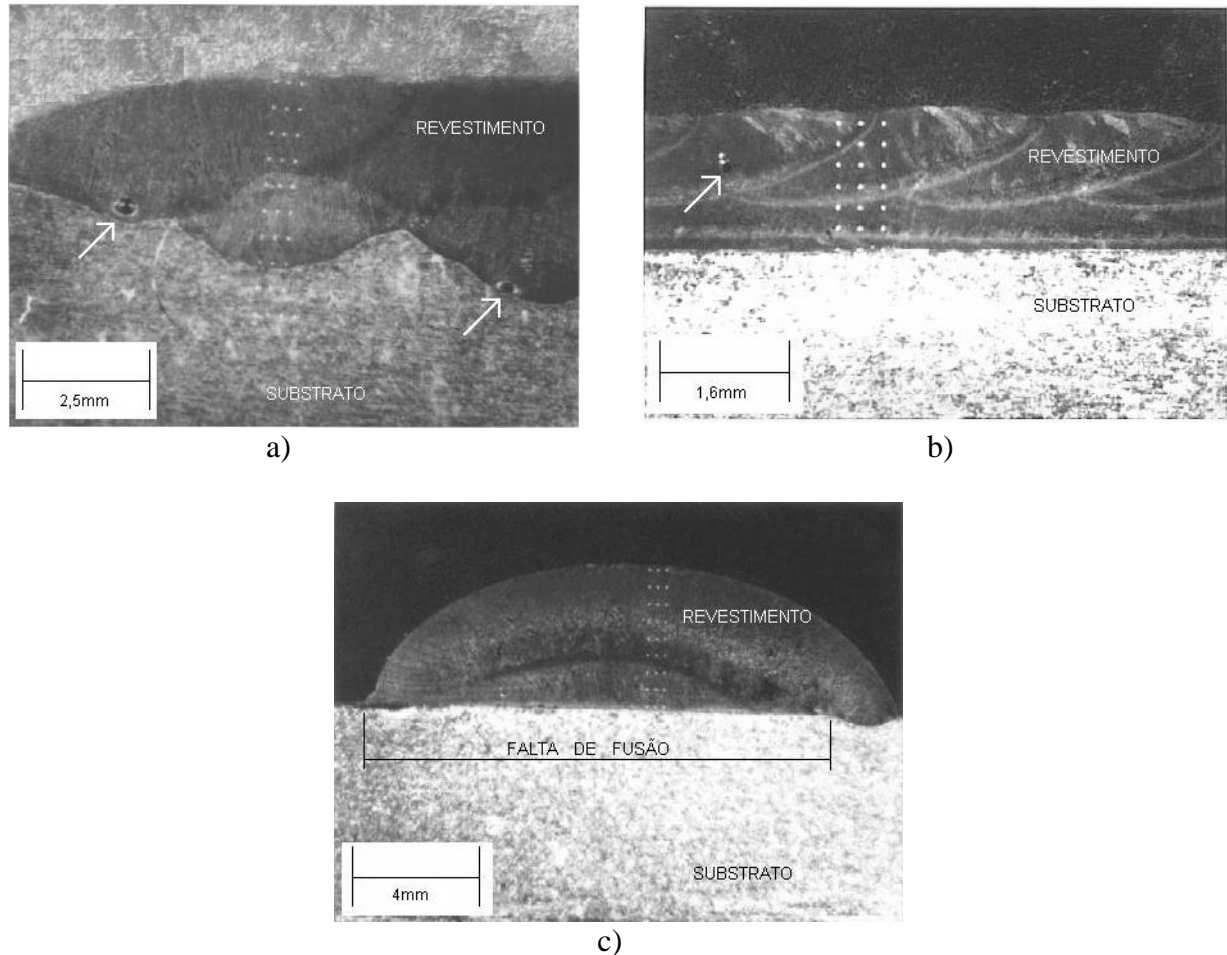


Figura 1– Seção transversal dos revestimentos: a) Eletrodo Revestido, b) Laser e c) PTA.

O acréscimo de espessura ocasionado pelos revestimentos de duas camadas foi, no ponto mais espesso, de 4,5 mm para o PTA, 2,5 mm para o ER e 1,6 mm para o laser. Além da maior espessura, o processo PTA é capaz de produzir cordões de solda com maior largura devido ao movimento pendular da tocha em relação ao deslocamento transversal do substrato, conferindo ao processo uma elevada taxa de deposição.

Quanto ao aspecto externo dos revestimentos o processo PTA foi o que apresentou melhor acabamento superficial.

### 3.2 Microestrutura

Dois parâmetros de processamento afetam a microestrutura: 1) sobreposição de camadas e 2) sobreposição de cordões adjacentes. Como as amostras possuem duas camadas, e no caso das amostras de ER e laser cada camada é constituída por cordões adjacentes sobrepostos,

suas microestruturas variam devido ao aquecimento causado pelo cordão subsequente e pelos cordões da segunda camada. Desta forma a microestrutura de todas as amostras foi analisada a cerca de 100 $\mu$ m da superfície (segunda camada) e a cerca de 100  $\mu$ m da interface (primeira camada). As figuras 2 a), b) e c) apresentam as estruturas metalográficas resultantes de cada processo de deposição.

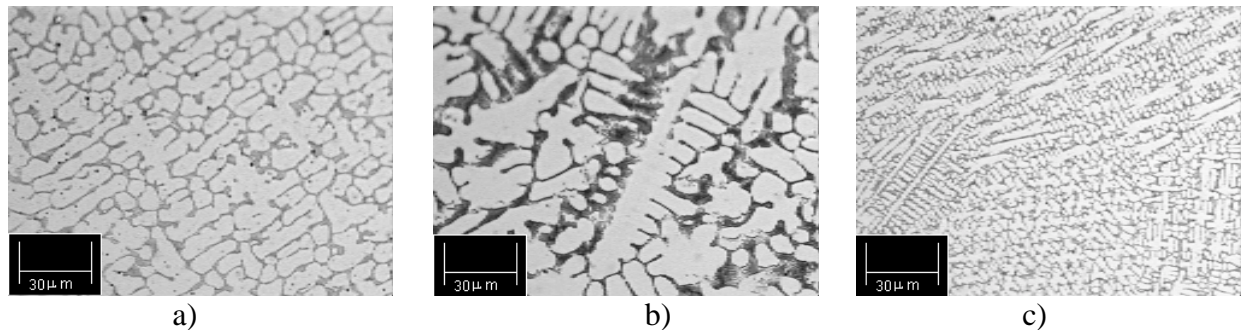


Figura 2 – Micrografias das amostras sem tratamento térmico: a) ER, b) PTA e c) Laser.

As microestruturas obtidas constituem-se de uma região dendrítica rica em Co e uma região interdendrítica rica em carbonetos. O revestimento a laser apresenta uma microestrutura mais fina em função da sua elevada taxa de solidificação, como pode ser observado pela média do espaçamento dos braços das dendritas secundárias –  $\lambda$  (medidas em seções transversais, acompanhando a direção do tronco da dendrita primária, sobre o plano metalográfico) apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Média do espaçamento dos braços das dendritas secundárias.

| Téc. de Processamento | $\lambda$ [ $\mu$ m] | Desvio padrão [ $\mu$ m] |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| ER                    | 4,68                 | 1,01                     |
| PTA                   | 5,80                 | 1,02                     |
| Laser                 | 1,95                 | 0,65                     |

Tendência similar também foi observada no trabalho apresentado por Monson e Steen (1987) ao compararem revestimentos de Stellite 6 depositados pelos processos de soldagem oxi-acetilênica, soldagem a arco com eletrodo de tungstênio (TIG), PTA e laser. Apesar de não citarem o processo de ER é possível relacioná-lo devido às microestruturas apresentadas por Cassina e Machado (1992) ao compararem os processos de soldagem oxi-acetilênica, TIG e ER. Os valores de  $\lambda$  também são bem próximos aos encontrados por Lungscheider e Oberländer (1992) ao estudarem o processo de PTA ( $\lambda= 3\sim 8 \mu$ m) e laser ( $\lambda= 1\sim 5 \mu$ m), e por Frenk et al (1993) em revestimentos a laser de Stellite 6 com condições intermediárias de processamento ( $\lambda= 1,5\sim 3 \mu$ m).

Analisando em separado as microestruturas características de cada processo de deposição, observa-se que para o caso do ER não houve variação significativa da microestrutura nas amostras sem tratamento térmico e tratada a 750° C. A partir da temperatura de 1050° C nota-se que a região interdendrítica começa a ficar mais grosseira, acentuando-se a 1050° C, 5 ciclos, com o aparecimento de precipitados dispersos na matriz como apresentado na fig. 3.

Esta observação foi confirmada pela análise quantitativa de imagem das regiões dendrítica e interdendrítica, indicando um aumento em torno de 15 pontos percentuais da região interdendrítica (tanto a 100 $\mu$ m da superfície quanto a 100  $\mu$ m da interface) na amostra tratada a 1050° C, 5 ciclos, conforme apresentado na fig. 6 a).

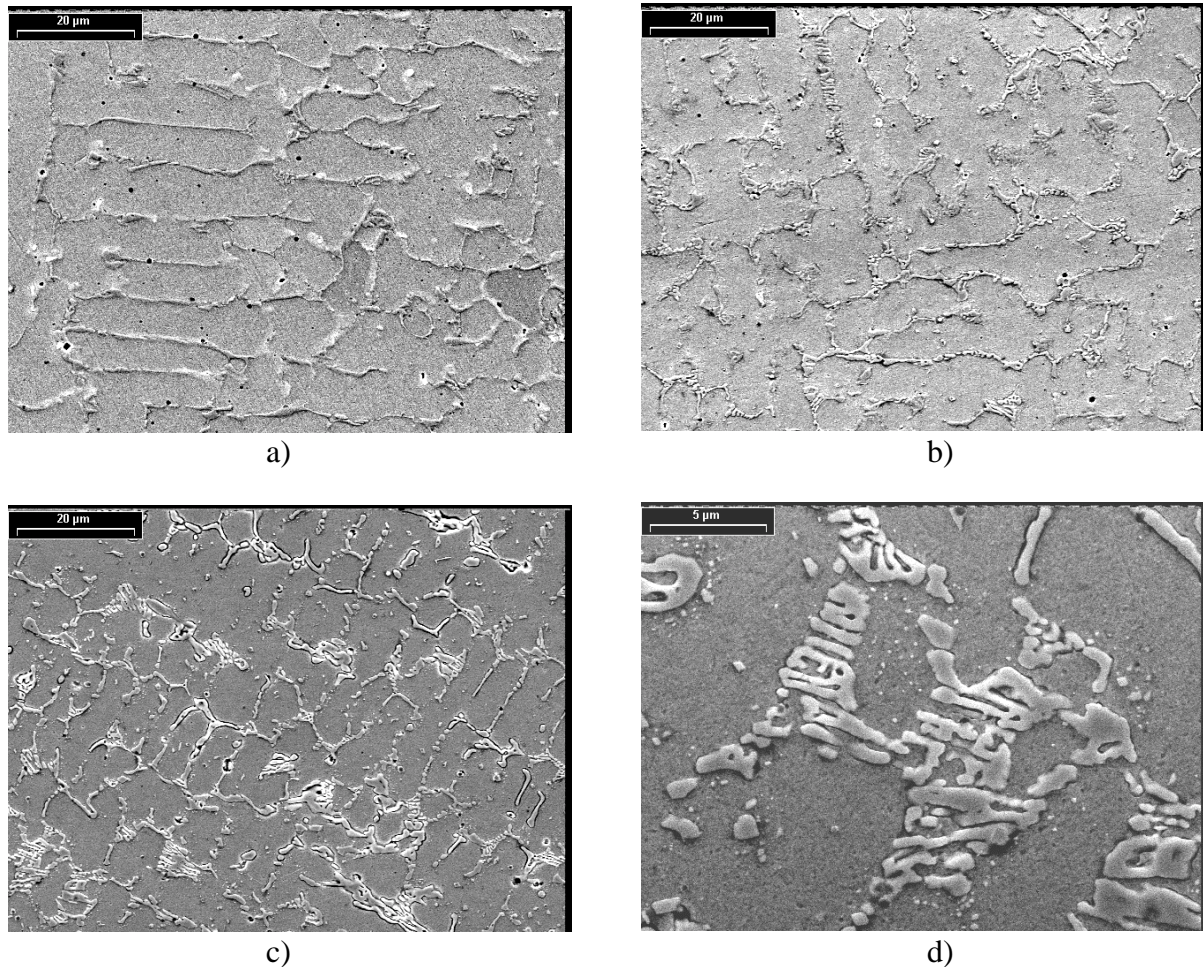
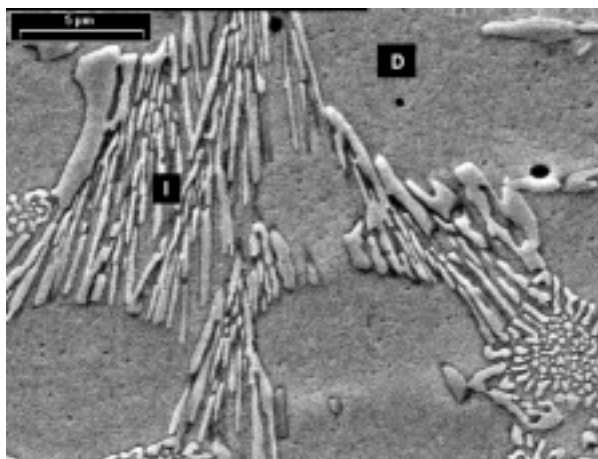


Figura 3 – Imagem MEV das amostras revestidas por ER:  
 a) Sem tratamento térmico, b) Tratada a 1050° C, c) Tratada a 1050° C, 5 ciclos, e d) Maior ampliação da amostra tratada a 1050° C, 5 ciclos.

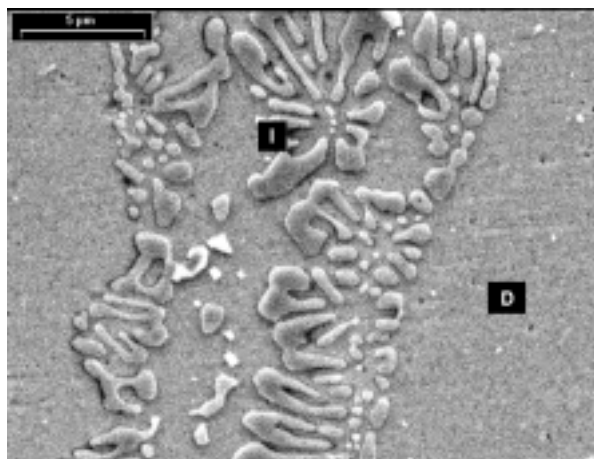
Para as amostras revestidas a plasma foi observada uma alteração morfológica das lamelas da região interdendrítica, que se tornaram mais espessas e esferoidizadas para a temperatura de tratamento a 1050° C, 5 ciclos (fig. 4), apesar da análise quantitativa de imagem (fig. 6 b) não indicar nenhuma tendência de aumento da região interdendrítica e as análises semi-quantitativas da composição química serem semelhantes nas diversas temperaturas de ciclos térmicos (tanto para as regiões dendrítica – D e interdendrítica – I), conforme apresentado na fig. 4.

No caso do revestimento a laser a região interdendrítica das amostras tratadas a 1050° C e 1050° C, 5 ciclos, tornou-se mais grosseira se comparada às amostras sem tratamento térmico e tratada a 750° C. Porém não houve variação significativa da composição química das regiões dendrítica e interdendrítica para as diversas condições de tratamento térmico, como apresentado na fig. 5, para dois casos representativos dos demais. A análise quantitativa de imagem também não foi conclusiva, pois sua determinação foi dificultada pela falta de contraste entre as regiões dendrítica e interdendrítica, causando muita dispersão dos valores obtidos (fig. 6 c).

Ao se comparar os gráficos da fig. 6, verifica-se que o percentual de região interdendrítica para a condição sem tratamento térmico é maior nos revestimentos a laser e PTA.



a)



b)

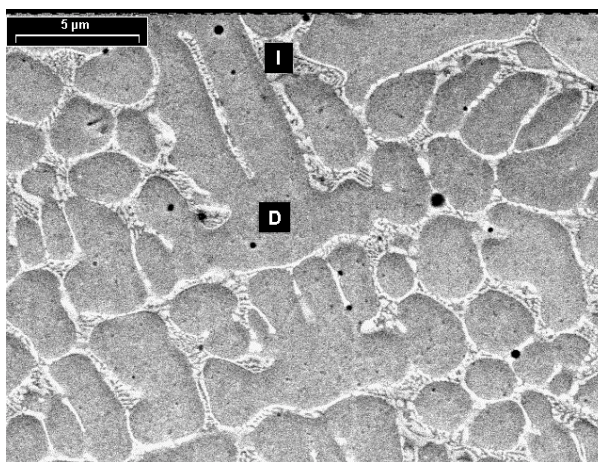
Figura 4 – Imagens micrográficas do MEV e resultados da análise semi-quantitativa da composição química das amostras revestidas por plasma:

a) Sem tratamento térmico,

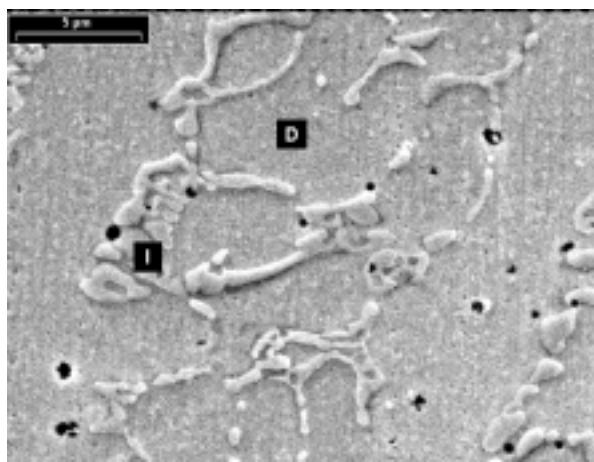
D: 60,7Co – 24,0Cr – 2,0W – 0,5C [% em peso] e I: 37,8Co – 45,7Cr – 5,1W – 0,9C [% em peso];

b) Tratada a 1050° C, 5 ciclos,

D: 62,3Co – 22,6Cr – 2,5W – 0,5C [% em peso] e I: 38,7Co – 48,3Cr – 4,0W – 0,9C [% em peso].



a)



b)

Figura 5 - Imagens micrográficas do MEV e resultados da análise semi-quantitativa da composição química das amostras revestidas por laser:

a) Sem tratamento térmico,

D: 62,3Co – 22,9Cr – 2,6W [% em peso] e I: 37,6Co – 41,0Cr – 4,5W – 0,9C [% em peso];

b) Tratada a 1050° C, 5 ciclos,

D: 59,5Co – 21,1Cr – 2,5W [% em peso] e I: 39,8Co – 40,6Cr – 3,3W [% em peso].

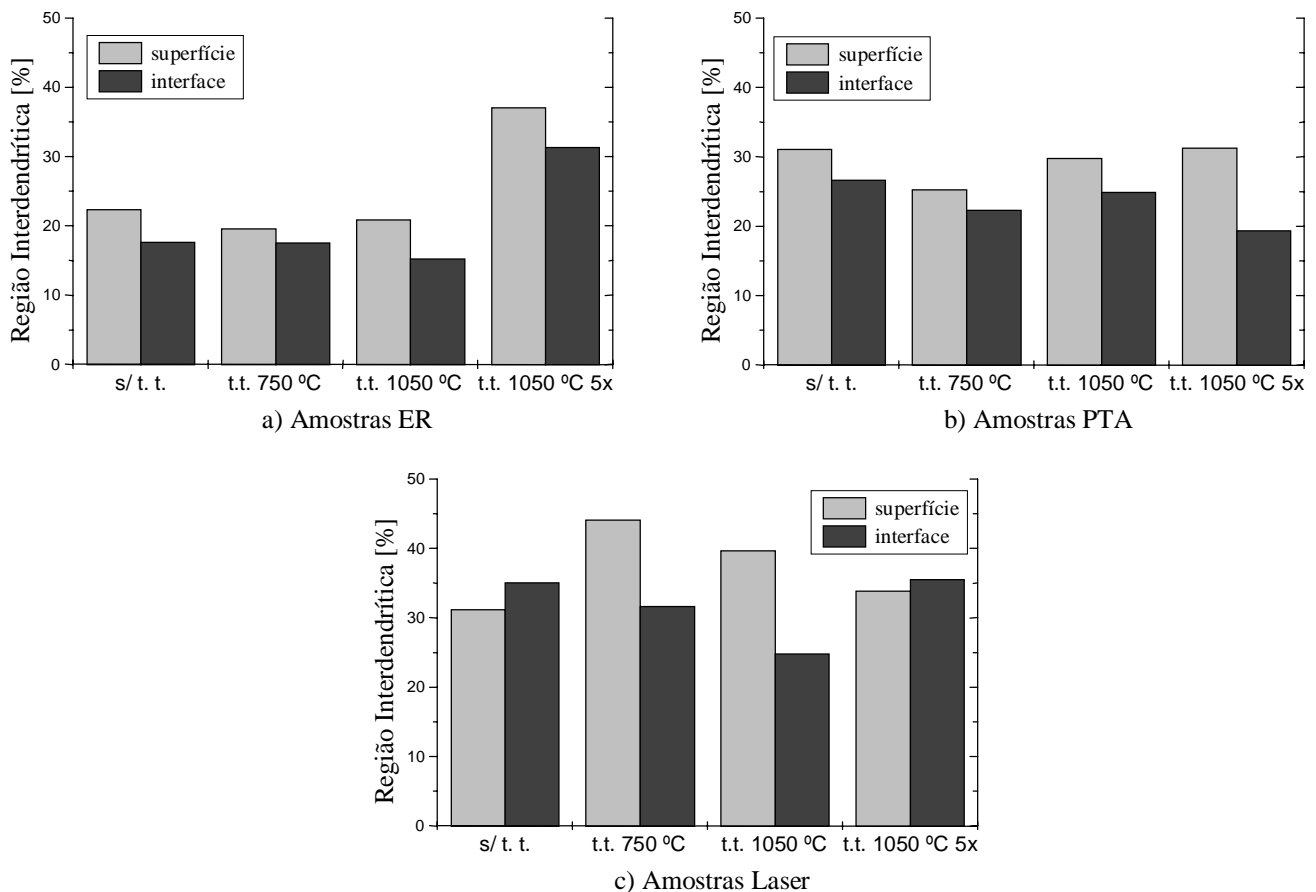


Figura 6 – Análise quantitativa de imagem, percentual da região interdendrítica a 100 $\mu$ m da superfície e a 100 $\mu$ m da interface: a) ER, b) PTA e c) Laser.

### 3.3 Microdureza

Nas amostras depositadas por ER o perfil de microdureza não apresentou um valor constante ao longo da seção transversal (superfície/ substrato) do revestimento, havendo uma queda precoce dos valores de microdureza antes da interface nos revestimentos das amostras sem tratamento térmico e tratada a 1050 $^{\circ}$  C. Tal fato se deve à grande irregularidade dos cordões (devido ao elevado grau de diluição), ou seja, nestas amostras as quatro primeiras impressões de microdureza situaram-se sobre a segunda camada e as demais na primeira, que apresentou uma dureza inferior, devido ao efeito do aquecimento ocasionado pelos cordões da segunda camada. Como nas amostras tratadas a 750 $^{\circ}$  C e 1050 $^{\circ}$  C, 5 ciclos, houve um número maior de impressões sobre a segunda camada, seus perfis de microdureza não apresentaram esta queda.

Analisando-se somente os valores de microdureza mais próximos da superfície nas amostras de ER (de modo a excluir os valores de dureza localizados sobre a primeira camada), é possível notar uma queda da dureza na amostra tratada a 1050 $^{\circ}$  C, porém a dureza volta a subir a 1050 $^{\circ}$  C, 5 ciclos. Isso, associado à análise microestrutural (na qual foi observado um aumento da região interdendrítica para esta condição de tratamento e ciclagem térmica) indica que a possível precipitação de carbonetos tenha propiciado aumento de dureza.

Nas amostras revestidas a plasma os perfis de microdureza se mantiveram constantes em toda a espessura do revestimento e apresentaram valores muito próximos nas diversas condições de tratamento. A microdureza média dos revestimentos por PTA foi de 470 HV 0,5.



Entretanto tais amostras apresentaram falta de fusão na interface revestimento/ substrato, o que caracteriza uma união mecânica, podendo apresentar um comportamento diferente na região próxima à interface quando ocorrer união metalúrgica.

Para as amostras depositadas a laser observa-se uma queda dos perfis de microdureza para as condições de tratamento a  $1050^{\circ}\text{C}$  e  $1050^{\circ}\text{C}$ , 5 ciclos. Conclui-se que apesar da composição química ser semelhante ao longo das temperaturas de tratamento térmico, a ocorrência de difusão nas amostras tratadas a  $1050^{\circ}\text{C}$  e  $1050^{\circ}\text{C}$ , 5 ciclos (conforme observado na análise microestrutural) propiciou o engrossamento da região interdendrítica, ocasionando uma diminuição dos contornos de fase e conseqüentemente a diminuição de resistência, confirmada pela queda do perfil de microdureza em torno de 11%.

A figura 7 apresenta os perfis de microdureza Vickers conforme a temperatura de tratamento térmico. Observa-se que a dureza do revestimento a laser é superior à produzida pelos demais processos nas amostras sem tratamento térmico e tratada a  $750^{\circ}\text{C}$ , apresentando um valor médio de microdureza de 507 HV 0,5. Isso se deve a sua microestrutura mais fina, com uma maior quantidade de contornos de fase. Nas condições mais críticas de tratamento térmico ocorreu um decréscimo da dureza dos revestimentos a laser, pois sendo uma estrutura menos estável que as demais é mais facilmente afetada pelo fornecimento de energia oriundo do aumento de temperatura, chegando a valores de microdureza comparáveis aos obtidos pelos processos de ER e PTA.

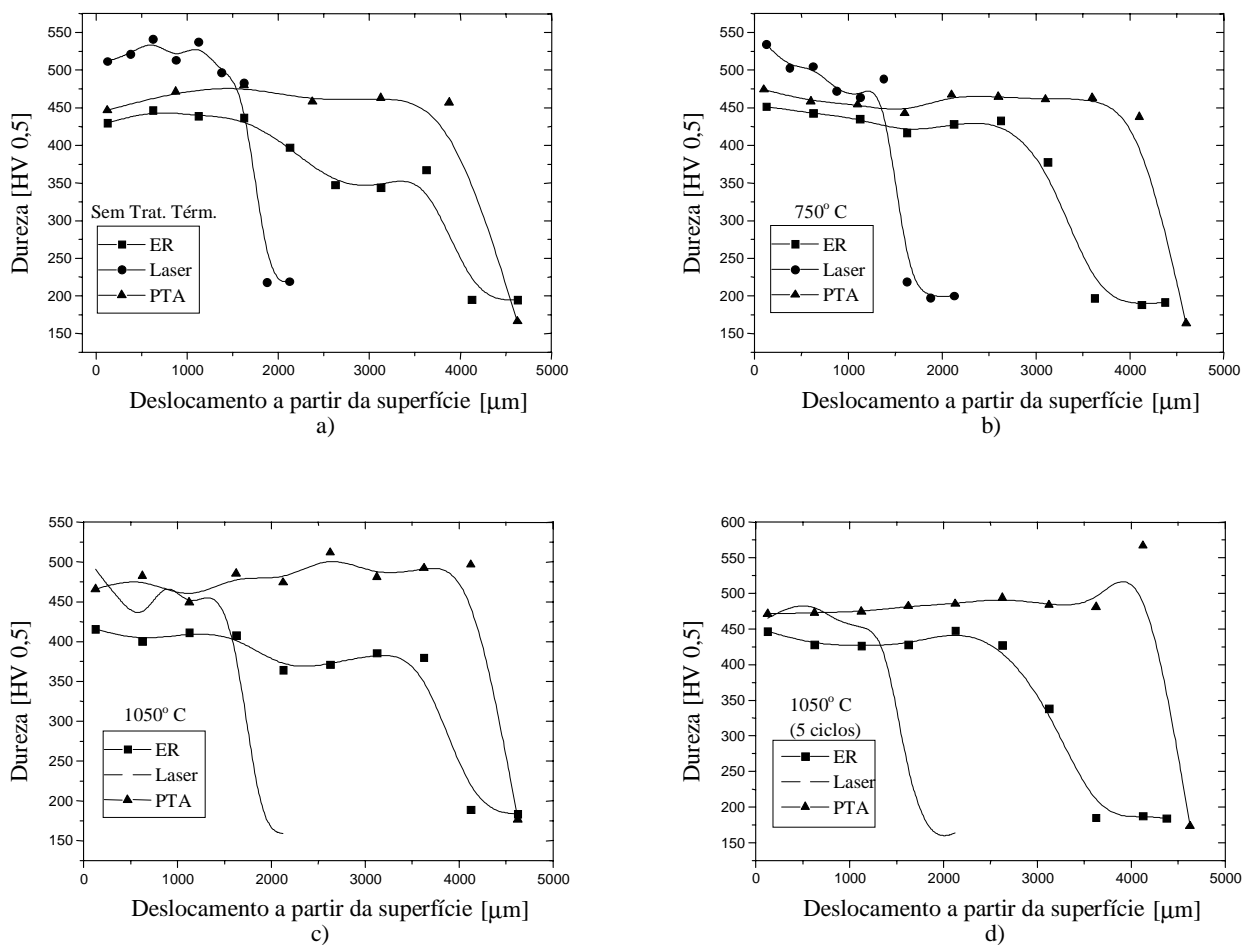


Figura 7 – Perfil dos valores médios de microdureza:  
a) Amostras sem tratamento térmico, b) Amostras tratadas a  $750^{\circ}\text{C}$ ,  
c) Amostras tratadas a  $1050^{\circ}\text{C}$ , d) Amostras tratadas a  $1050^{\circ}\text{C}$ , 5 ciclos.

## CONCLUSÕES

Com base nas análises microestruturais e nos dados experimentais, conclui-se que:

1. O processo de deposição por PTA admite maiores taxas de deposição, gerando revestimentos com maiores espessuras e largas, sendo assim o mais indicado para o revestimento de grandes áreas.
2. O melhor acabamento superficial foi obtido pelo processo de PTA, conferindo a este processo menores gastos com posterior usinagem.
3. Revestimentos obtidos por laser apresentam valores de dureza até 10% superiores às obtidas pelos demais processos para temperaturas de tratamento de até 750° C, em consequência de sua microestrutura mais fina, decorrente das maiores taxas de solidificação. Para temperaturas superiores, os revestimentos a laser apresentam valores equivalentes aos demais processos.
4. Os revestimentos obtidos por PTA mantiveram seus valores de dureza e granulometria ao longo das diversas etapas de tratamento, sendo menos influenciados pelo aumento de temperatura e ciclagem térmica.

## REFERÊNCIAS

- Antony, K. C., 1983, Wear resistant cobalt-base alloys, *Journal of Metals*, February, pp.52-60.
- Cassina, J. C. and Machado, I. G., 1992, Low-stress Sliding Abrasion Resistance of Cobalt-Based Surfacing Deposits Welded with Different Processes, *Welding Journal*, vol. 71, n. 4, April, pp. 133s-137s.
- Crook, P. – Haynes International Inc., 1993, Cobalt and Cobalt Alloys, in *ASM Handbook – Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, vol. 2, 10th ed, OH: ASM Metals Park.
- Davis, J.R. – Davis and Associates, 1993, Hardfacing, Weld Cladding and Dissimilar Metal Joining, in *ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering*, vol. 6, 10th ed., OH: ASM Metals Park.
- Frenk, A., Henchoz, N. and Kurz, W., 1993, Laser Cladding of Cobalt-based alloy: Processing parameters and microstructure, *Zeitschrift fuer Metallkunde*, vol. 84, n. 12, December, pp.886-892.
- Lungscheider, E. and Oberländer B. C., 1992, A Comparison of the Properties of Coatings Produced by Laser Cladding and Conventional Methods, in *Surface Modification Technologies V*, T.S. Sudarshan and J. F. Braza, pp. 383-400.
- Monson, P. J. E. and Steen W. M., 1987, Laser Treatment of Materials, *Proceedings of European Conference on Laser Treatment of Materials*, B. L. Mordike, pp. 123-132.

## CHARACTERIZATION OF STELLITE 6 COATINGS DEPOSITED BY SHIELDED METAL ARC WELDING, PLASMA TRANSFERRED ARC AND LASER CLADDING

**Abstract.** *In the last decades the superalloys resistant to wear and high temperatures have had little change in their chemical composition. Recent improvements in their performance have been obtained through the optimization of the deposition processes. Traditional welding processes are conventional methods for applying hard coatings. However, recent techniques like plasma transferred arc (PTA) and laser deposition techniques have been increasingly used in the application of wear-resistant coatings. The purpose of this paper is to analyse the*

*effects of exposing Stellite 6 coatings deposited on 304 stainless steel to high temperatures and thermal cycles (750 °C, 1050 °C and five cycles at 1050 °C). Shielded metal arc welding (SMAW), PTA and laser deposition processes are analyzed. The characterization of high temperature and thermal cycle effects on the microstructures produced by the processing techniques is accomplished through optical and scanning electron microscopy. The mechanical properties at ambient and high temperatures are analyzed by means of Vickers microhardness.*

***Key-words:*** Cobalt-based superalloys, Stellite 6, Shielded metal arc welding, Laser cladding, Plasma transferred arc.