

## **EFEITO DA INTENSIDADE DE CORRENTE NAS CARACTERÍSTICAS DE REVESTIMENTOS SOLDADOS COM MATERIAL DE ADIÇÃO ATOMIZADO**

### **Danielle Bond**

Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico – Dpto. Eng. Mecânica. Jardim das Américas. Curitiba, PR. CEP 81531-990, dbond@onda.com.br

### **Paulo César Okimoto**

Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico – Dpto. Eng. Mecânica. Jardim das Américas. Curitiba, PR. CEP 81531-990, pok@demec.ufpr.br

### **Ana Sofia C. M. D'Oliveira**

Universidade Federal do Paraná. Centro Politécnico – Dpto. Eng. Mecânica. Jardim das Américas. Curitiba, PR. CEP 81531-990, sofmat@demec.ufpr.br

**Resumo.** *Técnicas de revestimento são utilizadas para aumentar a vida útil e o desempenho de componentes de equipamentos sujeitos a condições severas de operação. É o caso dos equipamentos de processo onde materiais têm de operar em ambientes hostis estando expostos a fenômenos de erosão a temperatura elevada. Este trabalho estuda o efeito da intensidade de corrente nas características de revestimentos de stellite 6. A liga a base Co na forma atomizada foi depositada por PTA sobre substratos de aço carbono com intensidades de corrente de 70A, 130A, 190A e 250A. Os revestimentos foram caracterizados inicialmente por inspeção visual, seguido por microdureza, microscopia ótica e eletrônica de varredura e difração de raio X. Resultados confirmaram a relevância da intensidade de corrente na qualidade dos revestimentos, com a menor intensidade de corrente resultando em depósitos com descontinuidades e as maiores intensidades em elevada diluição com o substrato. Medidas de dureza revelaram que apenas as intensidades de corrente mais elevadas, 190A e 250A provocam uma redução de dureza. Avaliação da microestrutura mostra uma mudança na cinética de solidificação com o aumento da intensidade de corrente.*

**Palavras-chave:** *PTA, revestimentos duros, diluição, liga Co, cinética de solidificação.*

## 1. INTRODUÇÃO

Na indústria do petróleo vários componentes trabalham sob condições severas de desgaste em combinação com altas temperaturas e ambientes corrosivos. Uma alternativa capaz de prolongar a vida útil destes componentes é a realização de endurecimento superficial (*hardfacing*). Este pode ser obtido pela aplicação de um material (revestimento) duro e resistente ao desgaste na superfície de um material menos nobre (substrato) através de um processo de soldagem ou de aspersão térmica, segundo Davis<sup>(1)</sup>. O desempenho destes revestimentos depende da otimização dos parâmetros utilizados no processo de deposição, pois estes irão determinar a microestrutura resultante do depósito.

Entre os processos de deposição disponíveis o PTA (plasma com arco transferido) permite obter estruturas mais refinadas quando comparadas aos outros processos de soldagem de revestimentos. Esta característica tem sido atribuída a utilização de material na forma de pó, segundo Silvério<sup>(2)</sup>. Os revestimentos soldados, pelo fato de envolverem uma poça de fusão, podem ser considerados microfusões, caracterizadas por uma variação de composição, a qual decorre da diluição, e uma cinética de solidificação que influencia a microestrutura do depósito, e conseqüentemente suas propriedades. Pretende-se avaliar a hipótese que a cinética de solidificação de revestimentos obtidos com pós é diferente daquela obtida quando se utiliza arame como material de adição. No processo de soldagem o aumento do movimento de convecção do metal líquido (devido a velocidade de soldagem, pulsação de corrente, etc.), provoca a quebra dos braços das dendritas que agem como nucleantes, resultando em estruturas finas em conseqüência materiais mais duros e resistentes, segundo Ohno<sup>(3)</sup> e Porter<sup>(4)</sup>. Já no que se refere à estrutura de solidificação decorrente de materiais atomizados, a hipótese é que concorrentes com estas dendritas há pequenos agrupamentos de partículas de pó que funcionam, antes mesmo das dendritas se quebrarem, como nucleantes, e aumentam a área superficial do sistema proporcionando um aumento do super-resfriamento necessário para a solidificação refinando a estrutura, de acordo com a teoria de Cahn<sup>(5)</sup>. Assim sendo o refinamento da estrutura de solidificação seria função do tamanho destes agregados de pó, os quais se fundem e se solidificam com velocidades específicas, resultando numa maior taxa de nucleação quando comparada a cinética de solidificação com o uso de arame, onde se pode considerar que apenas uma grande gota funde e solidifica. Dependendo do nível de corrente utilizado, a poça de fusão terá quantidade e tamanho diferente destes agregados de pó alterando sua cinética de solidificação. Em baixos níveis de corrente espera-se uma estrutura bem refinada, porém com partículas não fundidas. Já para elevados níveis a estrutura poderá ter até mesmo uma granulometria mais grosseira do que a obtida com arame.

O objetivo deste trabalho é a avaliação indireta da cinética de solidificação, pela caracterização da estrutura de solidificação de revestimentos obtidos com uma liga de Co atomizado, utilizando diferentes níveis de intensidade de corrente para deposição por PTA.

## 2. METODOLOGIA

Utilizou-se o equipamento de PTA com alimentação de pó STARWELD 300, Deloro Stellite. O material depositado, no aço SAE 1020, foi a liga conhecida comercialmente por Stellite 6 (a base de cobalto), conforme composição química da Tabela 1. Utilizou-se quatro níveis de corrente diferentes, mantendo-se as outras variáveis constantes conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 1. Composição química da liga., Stellite 6

C	Co	Cr	W	Si
1.2%	65.2%	28%	4.5%	1.1%

Tabela 2. Parâmetros utilizados no processamento

Distância tocha à peça	Vazão gás plasma	Vazão gás proteção	Vazão gás arraste	Velocidade de deposição	Taxa de alimentação	CORRENTE			
10mm	2 l/min	15 l/min	2l/min	10 cm/min	constante	70A	130A	190A	250A

Os níveis de corrente foram escolhidos objetivando a realização de uma varredura numa faixa de valores que incluíssem a corrente normalmente utilizada para a deposição desta liga, 130A, e valores inferiores e superiores a esta.

Os cordões foram caracterizados de acordo com seus aspectos gerais, com o auxílio de uma lupa; com a realização de dureza nas faces, média de 3 medidas de dureza HRC ao longo de cada amostra; e com a determinação do valor de diluição entre material base e material de adição, através da medição do teor de Fe no depósito e no substrato pela análise de EDS em microscópio eletrônico de varredura. Para uma caracterização mais detalhada dos cordões realizaram-se 3 perfis de microdureza Vickers (HV 0,5), em cada zona fundida, a partir de 0,125mm da extremidade do cordão com intervalo de 0,20mm. Caracterizou-se a microestrutura da zona fundida, da seção transversal de cada amostra, com microscopia ótica e eletrônica de varredura. Para isto estas foram lixadas, polidas e atacadas com uma solução de 60ml HCl, 15ml água destilada, 15ml HNO<sub>3</sub> e 15ml ácido acético. As fases presentes na zona fundida foram analisadas pela difração de raios-X na superfície dos cordões, os quais foram cortados no sentido longitudinal objetivando a obtenção de uma superfície plana.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Análise dos Aspectos dos Cordões

Com baixa intensidade de corrente observou-se, conforme a Figura 1, que o cordão apresentou-se muito irregular com diversas descontinuidades como mordeduras e reforço excessivo. Já o cordão obtido com elevada corrente apresentou-se bem mais largo com muita oxidação, quando comparados aos obtidos com corrente normalmente utilizada. Em ambos os casos houve deposição de pó não fundido ao redor dos cordões e não ocorreram trincas nos cordões.

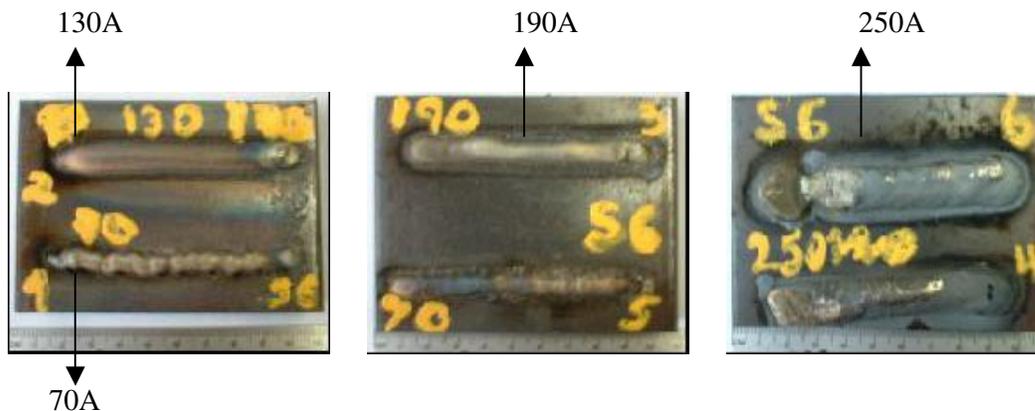


Figura 1. Aspectos dos cordões com diferentes intensidades de corrente

### 3.2. Dureza na Superfície do Depósito

Os níveis de dureza obtidos nas faces dos depósitos são mostrados na Figura 2. Observa-se que o nível de dureza na amostra produzida com 70A é o mesmo esperado pelo fabricante da liga depositada (40HRC), e que este diminui progressivamente com o aumento da corrente até alcançar uma perda de aproximadamente 50%. Isto indica que para níveis inferiores de corrente utilizados neste trabalho, a dureza da liga de Co não é afetada durante a deposição. Condição ideal para deposição desde que se garanta a integridade do revestimento pela ligação metalúrgica entre revestimento e substrato.

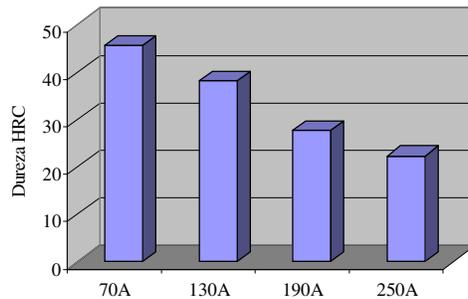


Figura 2. Níveis de dureza HRC nas faces dos cordões

### 3.3. Diluição

A quantidade de material base que se mistura com o material de adição é chamada de diluição. O objetivo nos processos de deposição é produzir a mínima diluição possível, suficiente apenas para garantir uma perfeita ligação metalúrgica, para que o revestimento permaneça com as propriedades da liga depositada. A baixa energia entregue ao substrato pelo processo PTA possibilita a obtenção de revestimentos com baixa distorção e diluição da ordem de 5 a 15%, segundo Davis<sup>(1)</sup>, tradicionalmente medida pela relação de áreas. A diluição pode ser também avaliada pelo teor de Fe, procedimento pertinente principalmente quando se esperam baixos níveis de diluição ou a geometria da zona fundida se apresenta irregular, segundo Yaedu<sup>(6)</sup>.

Para as amostras com baixa intensidade de corrente (70A) houve pequena quantidade de diluição (3%). Em análise metalográfica observou-se falta de fusão, conforme Figura 3, em alguns pontos do revestimento, porém o cordão manteve-se íntegro aparentemente. Isto explica os valores tão baixos de diluição encontrados, pois apenas em poucos pontos houve mistura do revestimento com o substrato. Isto nos permite utilizar as propriedades obtidas neste depósito como referência das propriedades da liga original antes de ser depositada. E no outro extremo, para alta intensidade de corrente (250A) a diluição foi excessiva (59%), bem maior do que o máximo valor geralmente obtido no processo PTA de 15%. Vale aqui ressaltar que estes valores são referência pelo método das áreas, porém segundo Yaedu<sup>(6)</sup> os valores obtidos pelos teores de Fe são sempre superiores. Estes elevados valores de diluição resultarão num comprometimento das propriedades do revestimento.

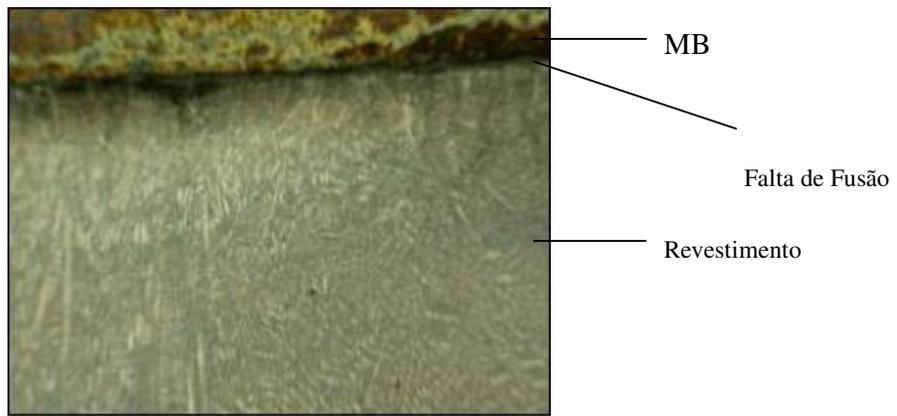


Figura 3. Interface do cordão e MB com corrente de 70A. 50x

### 3.4. Microdureza na Zona Fundida

Os perfis de dureza dos perfis, medidos na zona fundida, obtidos na seção transversal dos cordões depositados com 70A e 130A foram semelhantes e variaram de 460 a 520HV. Para 190A variaram de 390 a 430HV; e com 250A variaram de 280 a 330HV, conforme Figura 4. Esta diminuição de dureza pode ser associada com o aumento no nível de diluição, discutido anteriormente. Seguindo as medidas de macrodureza observou-se uma queda progressiva nos valores de microdureza com o aumento da corrente.

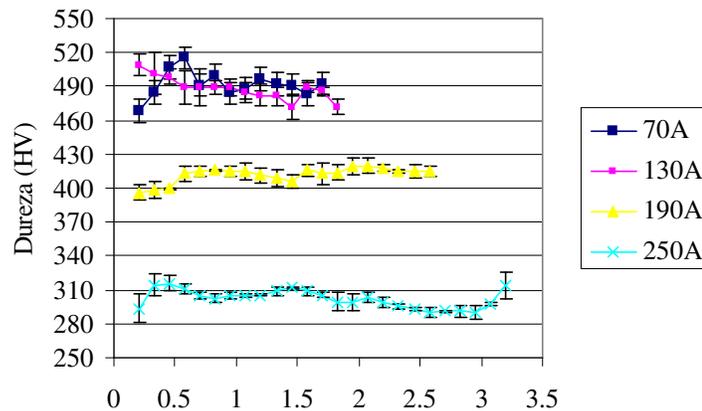


Figura 4. Perfil de dureza na ZF a partir da extremidade do cordão.

A média de dureza medida na zona fundida, em sua seção transversal de cada amostra, revela que nos níveis de corrente 70A e 130A a dureza mantém-se elevada, como mostra a Figura 5. Só a partir de 190A houve decréscimo de dureza, como esperado devido aos maiores valores de diluição medidos.

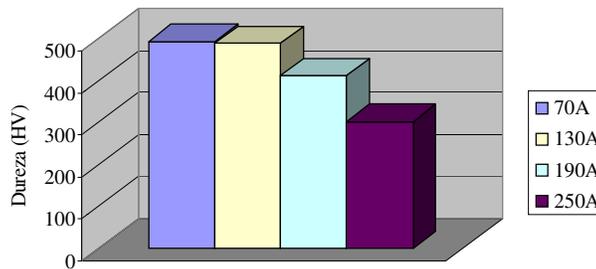


Figura 5. Média da dureza na seção transversal de cada depósito

### 3.5. Micrografias

A microestrutura da zona fundida das amostras consiste numa região dendrítica de solução sólida rica em cobalto ( $\alpha$ ), e na região interdendrítica pode se encontrar o eutético ( $\alpha$  e carbonetos), conforme Figuras 6a, b.

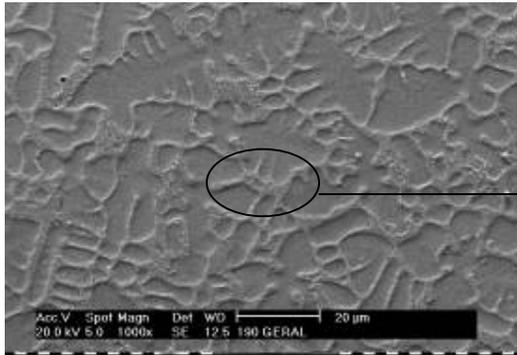


Figura 6a

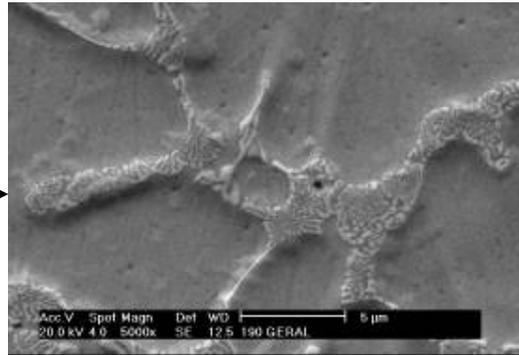


Figura 6b

Figura 6a. Aspecto geral da estrutura dos depósitos.

Figura 6b. Detalhe da estrutura dos revestimentos, onde se observa região dendrítica rica em Co e interdendrítica o eutético.

Na amostra obtida com a corrente de 130A (valor de referência para obtenção de depósitos íntegros) apresentou interface entre o cordão e o metal de base com frente plana de solidificação, seguida de crescimento celular e celular dendrítico, conforme Figura 7. A interface com crescimento planar ocorre geralmente nos processos de alta energia, como no PTA, pois o baixo super-resfriamento na interface faz com que o super-resfriamento térmico prevaleça em relação ao super-resfriamento constitucional o qual gera crescimento celular e dendrítico, segundo Ohno<sup>(4)</sup> e Potter<sup>(5)</sup>. Com o aumento da corrente para 190A a microestrutura apresentou-se semelhante com a amostra com 130A, porém a região de interface plana e o crescimento celular parecem ser de menor espessura.

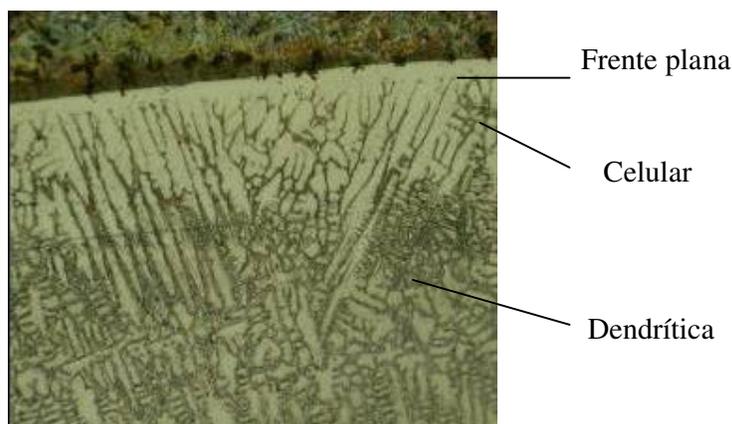


Figura 7. Interface do cordão e MB com corrente de 130A. 200x

Já a amostra obtida com a corrente de 250A, apresentou a microestrutura da zona fundida completamente diferente das outras amostras, não apresentando interface plana. A região central apresenta grãos grandes com contornos alotropomórficos bem definidos e carbonetos no centro, conforme Figura 8. apesar de morfologias diferentes, os resultados de difração de RX mostraram que em todos os revestimentos se formaram fases semelhantes.

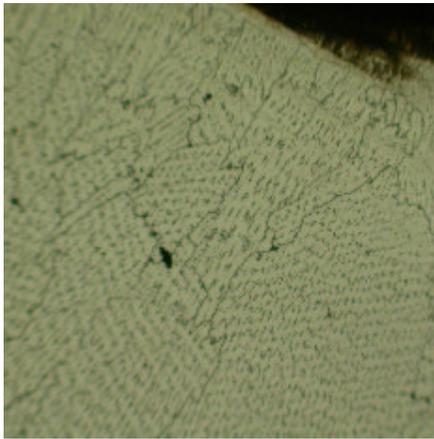


Figura 8a

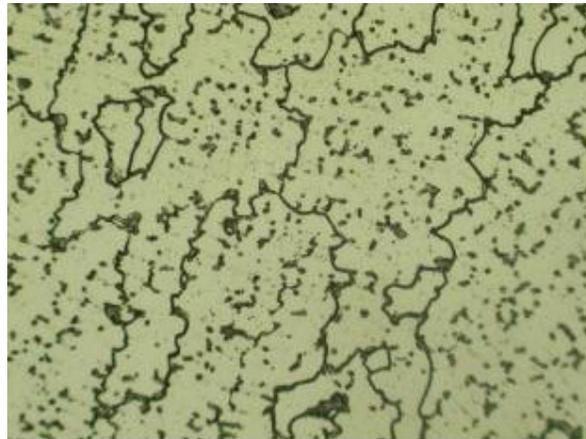


Figura 8b

Figura 8a. Aspecto geral da estrutura, com microscopia ótica, com corrente elevada.  
Figura 8b. Detalhe da estrutura observa-se grãos alotropomórficos com carbonetos da região interdendrítica.

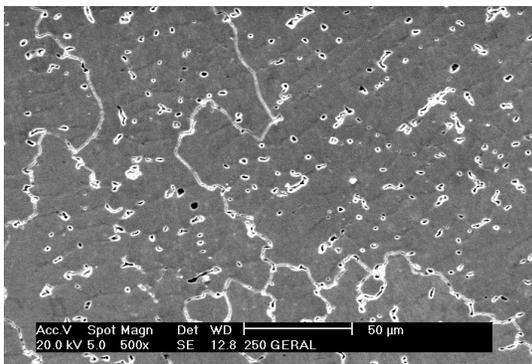


Figura 8c

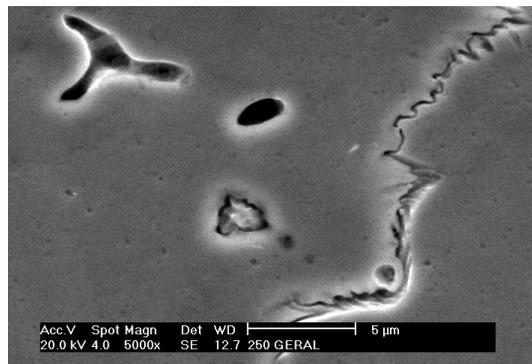


Figura 8d

Figura 8c. Aspecto geral da estrutura, com microscopia eletrônica, com corrente elevada.  
Figura 8d. Detalhe da estrutura observa-se grãos alotropomórficos com carbonetos da região interdendrítica.

#### 4. CONCLUSÕES

Para as condições de teste utilizadas pode-se concluir que:

- A realização de depósitos fora das condições recomendadas, com excesso ou escassez de energia, resulta em cordões com descontinuidade e grande desperdício de pó ao seu redor.
- Para valores inferiores de corrente não houve fusão com o metal de base e quando ocorreu foi mínima a diluição, medida pelos percentuais de Fe. Já para valores superiores a diluição foi máxima.
- A queda de dureza, em relação aos valores originais do revestimento, causada pela diluição ocorre apenas a partir de 190A para os valores estudados.

- A microestrutura da zona fundida consiste numa região dendrítica de solução sólida rica em cobalto ( $\alpha$ ), e na região interdendrítica pode se encontrar o eutético ( $\alpha$  e carbonetos). Já com corrente elevada esta apresenta grãos grandes com contornos alotropomórficos bem definidos e carbonetos no centro.
- A observação da estrutura junto à interface mostrou também diferenças na cinética de solidificação em função da intensidade de corrente.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho conta com o apoio da Agência Nacional do Petróleo – ANP – e da Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT, com recursos financeiros disponibilizados através do PRH-24. Os autores agradecem também o apoio dos LaMaTS e LORXI - UFPR.

## 6. REFERÊNCIAS

1. Davis METALS HANDBOOK. **Welding, Brazing and Soldering**, Hardfacing, weld cladding, and dissimilar metal joining. Miami: American Welding Society, 10<sup>th</sup>ed., vol 6, 1993.
2. SILVÉRIO, R.B., D'OLIVEIRA, A.S.C.M. Revestimento de liga a base de cobalto por PTA com alimentação de pó e arame. Uberlândia: **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - 2º COBEF**, Maio, 2003.
3. OHNO, A. **Solidificação dos metais**, São Paulo: Livraria Ciência e Tecnologia Editora Ltda., 1988.
4. PORTER, D. A, EASTERLING, K, E. **Phase transformations in metals and alloy**. New York: Van Nostrand Reinhold Co. Ltd., 1981.
5. CAHN, R.W., HAASEN, P. **Physical Metallurgy**, vol I, cap Solidification, 1996.
6. SANTOS, R.L.C, PAREDES R.S.C., D'OLIVEIRA, ASCM. Pulsed current plasma transferred arc hardfacing. Dissertação de mestrado. **Journal of materials processing**, enviado para publicação.
7. YAEDU, A.E., D'OLIVEIRA, A.S.C.M. Co based alloy PTA hardfacing on different substrate steels. **Materials Science and Technology**, enviado para publicação.

**Abstract.** *Coating methods are used to increase life and performance of equipment parts under severe operation conditions. Process equipments are an example of materials that must have to operate in a hostile atmosphere exposed to erosive environments under high temperature. This paper is about the effect of current intensity over stellite 6 coating characteristics. Atomized Co alloy was deposited by PTA over Carbon steel substrates with 70A, 130A, 190A and 250A current intensity. Primarily, the coatings were characterized by visual inspection, followed by microhardness, optical and scanning electronic microscopy and X-ray diffraction. The obtained results confirmed the relevance of current intensity over coating quality, with low current intensities resulting deposits with defects and high current intensities resulting high dilution levels. Hardness measured showed that only highest intensities, 190A and 250A, decreased hardness. The microstructure evaluation shows that there is a change in the solidification kinetic when the current intensity increases.*

**Keywords.** *PTA, hardfacing, dilution, Co alloy, solidification kinetic*