

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE REVESTIMENTO POR PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO

**Wellington Lincoln Chimanski de Souza**

*wellingtonlcs@hotmail.com*

Faculdade de Tecnologia Machado de Assis (FAMA)

Curitiba, PR – Brasil

**Carlos Henrique Marchi**

**Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira**

*marchi@ufpr.br*

*sofmat@ufpr.br*

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Engenharia Mecânica

Curitiba, PR, Brasil

**Resumo.** O processo PTA (Plasma Transferred Arc) é usado para fazer revestimentos em superfícies que necessitam de proteção por estarem sujeitas a condições adversas de operação. No processo PTA existem diversos parâmetros que precisam ser ajustados para se obter o revestimento desejado. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento térmico e dinâmico de partículas de alumina usadas no PTA. São consideradas partículas com diversos diâmetros (50 a 1000  $\mu\text{m}$ ) e ângulos de injeção (30, 45 e 60 graus) na tocha PTA. As equações diferenciais do movimento, de transferência de calor e de mudança de fase são resolvidas utilizando o método Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem. Os principais resultados são: (1) o peso e a radiação térmica não influenciam significativamente o processo, podendo ser desprezados; (2) o tamanho das partículas e o ângulo de injeção influenciam significativamente a temperatura e o estado físico com que as partículas atingem o substrato; e (3) partículas com diâmetro maior do que 250  $\mu\text{m}$  atingem o substrato na forma sólida, independentemente do ângulo de injeção.

**Keywords:** PTA, soldagem, simulação numérica, alumina, trajetória, fenômenos de transporte.

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de Plasma de Arco Transferido (PTA) é um processo de soldagem utilizado para a aplicação de revestimentos sobre superfícies de peças que estão sujeitas a condições adversas de operação, tais como corrosão, desgaste mecânico e elevadas temperaturas. O processo PTA foi inicialmente considerado complexo, tendo em vista os vários parâmetros que se precisa controlar. No entanto, nas últimas décadas, com o advento de tecnologias de controle automático, ele vem se tornando um dos principais processos de soldagem industrial (Yaedu e D'Oliveira, 2005).

Um equipamento PTA (Fig. 1) é composto basicamente por (Yaedu e D'Oliveira, 2005): i) unidade de potência; ii) unidade de controle do plasma; iii) sistema de resfriamento por água; iv) tocha de soldagem; e v) sistema de suprimento de gás para formação e proteção do arco. A unidade de potência fornece a energia necessária para o processo. A unidade de controle do plasma controla o fluxo do gás que é utilizado para formação do plasma. Na tocha é que ocorre a abertura do arco elétrico e a formação do plasma que é utilizado para fundir o metal de adição e o metal base.

O processo PTA funciona basicamente da seguinte maneira: i) o plasma é formado na tocha; ii) o material de adição na forma de pó ou arame é inserido no plasma; iii) o material de adição funde-se e é arrastado pelo plasma até a sua chegada ao substrato (metal base); e iv) o material de adição troca calor com o metal base e solidifica-se, formando o revestimento desejado.

Em um processo de deposição por PTA existem vários fenômenos físicos envolvidos, como a física de plasmas, eletromagnetismo, transferência de calor, mecânica dos fluidos etc. Somam-se a estes fenômenos, os parâmetros de processo como a intensidade de corrente de deposição, as vazões de gás de plasma, transporte e plasma, ângulo de alimentação, e no caso de material de adição atomizado, a granulometria dos pós. Apesar de alguns destes parâmetros já terem sido estudados experimentalmente (Takano *et al.*, 2008; Bond, 2008; Santos *et al.*, 2006), muitos dos fenômenos envolvidos são de difícil execução experimental. Em particular para deposições que utilizam material de adição na forma de pó (liga atomizada ou misturas de pós). Mas a simulação numérica permite otimizar as propriedades dos revestimentos, assim como compreender melhor os fenômenos de solidificação envolvidos, através da análise dos gradientes de temperatura e velocidade das partículas no interior do plasma.

Existem diversos trabalhos a respeito do comportamento de partículas em plasmas térmicos, como os de Pfender e Lee (1985), Lee *et al.* (1985), Xibao e Hua (1998) e Westhoff *et al.* (1992). Nos trabalhos de Pfender e Lee (1985) e Lee *et al.* (1985) são feitos estudos para se verificar quais são os principais fenômenos envolvidos no movimento e na troca de calor entre partículas e o plasma. Os resultados destes trabalhos indicam que a força de arrasto viscoso e a troca de calor por convecção são predominantes no movimento e no aquecimento das partículas, respectivamente. Pfender e Lee (1985) e Lee *et al.* (1985) mostram em seus trabalhos fatores corretivos para o número de Nusselt ( $Nu$ ) e para o coeficiente de arrasto viscoso ( $C_D$ ) que precisam ser incorporadas às equações governantes para se levar em consideração os efeitos dos elevados gradientes de temperatura, pressão e velocidade existentes no plasma.

Muitos trabalhos da literatura consideram a tocha de plasma como sendo do tipo plasma de arco não-transferido (Pfender e Lee, 1985) ou então do tipo *plasma spray* (Westhoff *et al.*, 1992). Poucos trabalhos abordam o comportamento de partículas em um plasma de arco transferido (Xibao e Hua, 1998). Isso deve-se, provavelmente, ao fato de existirem poucos trabalhos na literatura que modelam o escoamento de um plasma de arco transferido. Aithal *et*

al. (1998) resolveram numericamente, com algumas simplificações no modelo, o escoamento de um plasma de arco transferido.

No presente trabalho, através de simulações numéricas, analisa-se a influência da granulometria do material de adição e do ângulo de injeção do material no processo. Estes são dois parâmetros que influenciam diretamente a característica do revestimento (Bond, 2008). São mostrados resultados do movimento e da evolução térmica de partículas injetadas em um plasma. Os resultados podem ajudar na seleção correta dos parâmetros para se otimizar energeticamente o processo, bem como compreender melhor o processo PTA.

O modelo da tocha PTA é baseado nos resultados de Aithal *et al.* (1998) que determinaram numericamente os campos térmico e de velocidades para diferentes níveis de corrente elétrica. O material utilizado nas simulações é o óxido de alumínio, também conhecido como alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). As equações diferenciais ordinárias (EDO's) que modelam o problema são resolvidas com o método de Runge-Kutta de 4ª ordem (Gerald e Wheatley, 1999).

Para solução das equações governantes foi implementado o programa PTA\_40, escrito em linguagem FORTRAN 95. As simulações foram feitas em um computador AMD Duron, 996 MHz com 240 MB de RAM.

## 2. MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

### 2.1 Modelo para a tocha PTA

A Fig. 1 mostra um esquema da geometria da tocha PTA utilizada nas simulações. Os campos de velocidades e de temperaturas do plasma foram obtidos a partir de aproximações dos resultados de Aithal *et al.* (1998). Eles resolveram o problema do escoamento de um plasma em equilíbrio termodinâmico local para uma tocha PTA com distância entre a tocha e a peça (DTP) de 10 mm. Foi considerado como gás-plasma o argônio (Ar). No modelo, as propriedades do argônio foram consideradas dependentes da temperatura.

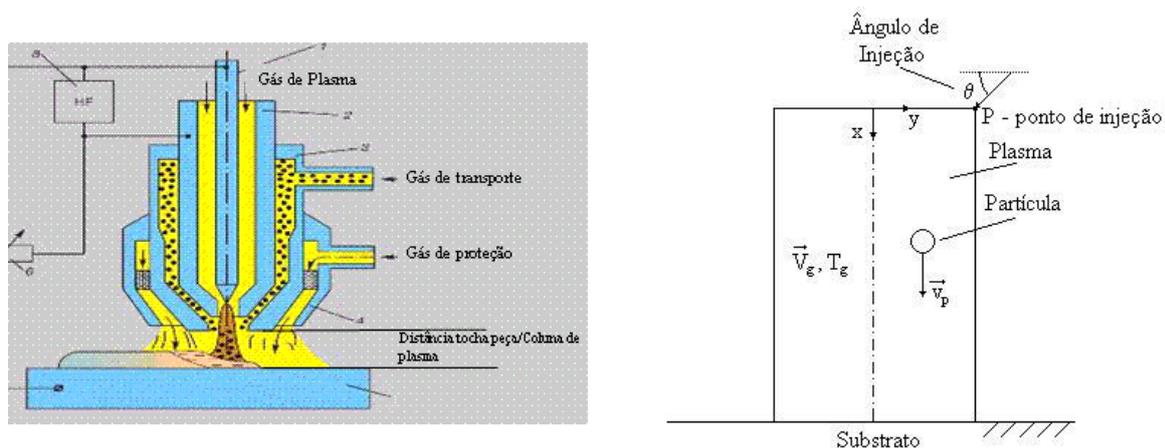


Figura 1 - Esquema de uma tocha PTA utilizada na solução do problema.

A Fig. 2 mostra perfis de temperaturas na direção  $y$  em quatro coordenadas  $x$ . O processo PTA é considerado um processo de alta concentração de energia, por isso, em  $y = 0$ , a temperatura e a velocidade são máximas, diminuindo significativamente ao longo da direção  $y$ .

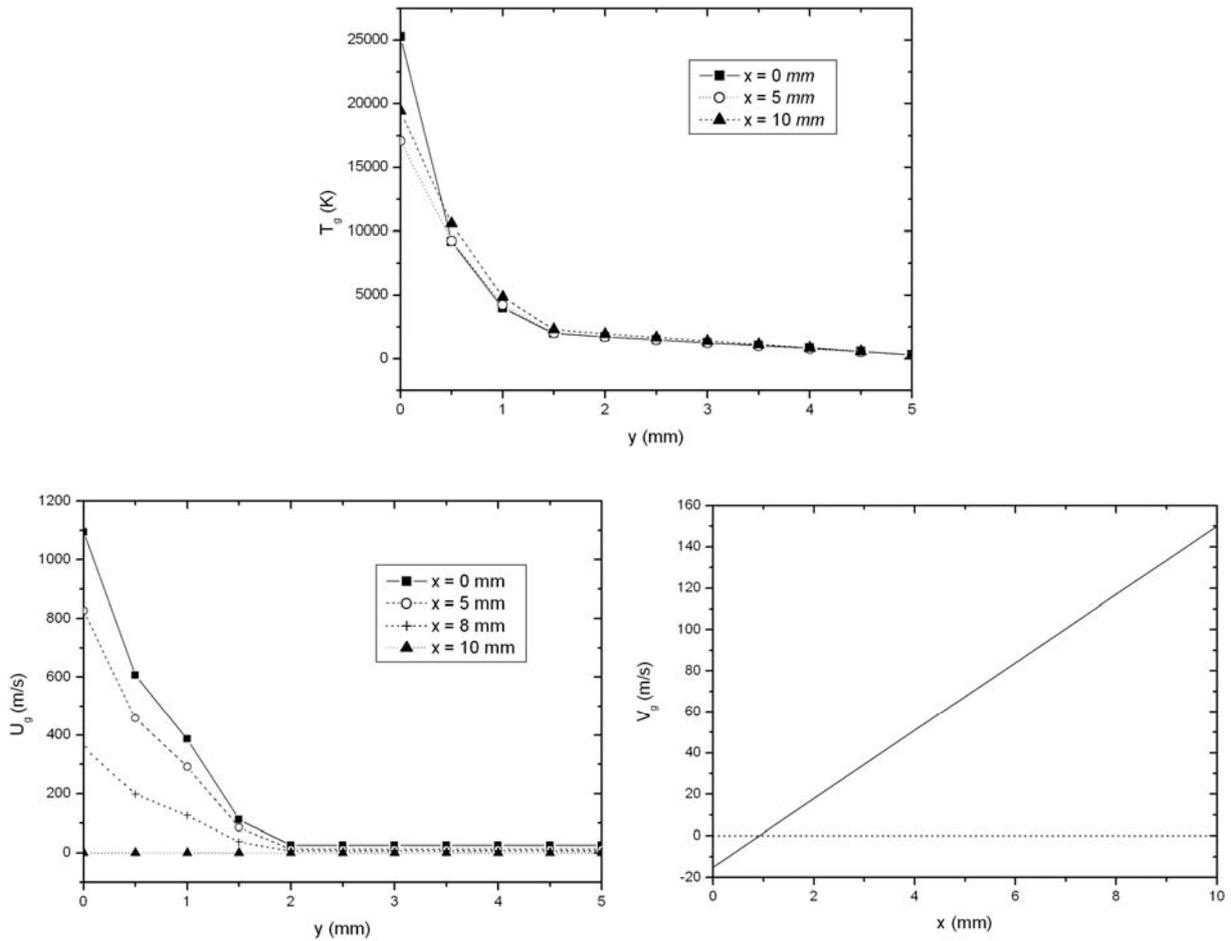


Figura 2 - Perfis de temperaturas e componentes  $x$  e  $y$  da velocidade do plasma.

## 2.2 Equações do movimento

Para a modelagem do movimento do material de adição em forma de pó no interior do plasma, foi considerado que o mesmo se encontra na forma de partículas esféricas. No modelo foi considerado que as forças que atuam sobre as partículas são: força de arrasto viscoso e força peso. As equações diferenciais que governam o movimento da partícula são dadas por (Westhoff *et al.*, 1992)

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3\rho_g(T_g)C_D^f}{4\rho_p(T_p)d_p} (u_g - u_p) V_{rel} + g, \quad u_p(0) = V_i \sin(\theta), \quad (1)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{3\rho_g(T_g)C_D^f}{4\rho_p(T_p)d_p} (v_g - v_p) V_{rel}, \quad v_p(0) = -V_i \cos(\theta), \quad (2)$$

onde  $u_p$  é a componente  $x$  da velocidade da partícula,  $v_p$  é a componente  $y$  da velocidade da partícula,  $t$  é a coordenada temporal,  $u_g$  é a componente  $x$  da velocidade do plasma,  $v_g$  é a componente  $y$  da velocidade do plasma,  $\rho_p$  é massa específica da partícula,  $\rho_g$  é a massa específica do plasma,  $d_p$  é o diâmetro da partícula,  $T_p$  é a temperatura da partícula,  $T_g$  é a temperatura do plasma,  $V_i$  é o módulo da velocidade inicial com a qual a partícula é injetada

no plasma,  $\theta$  é o ângulo de injeção da partícula e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ).  $V_{rel}$  é o módulo da velocidade relativa dado por (Westhoff *et al.*, 1992)

$$V_{rel} = \sqrt{(u_g - u_p)^2 + (v_g - v_p)^2}. \quad (3)$$

O coeficiente de arrasto viscoso  $C_D^f$  é obtido multiplicando-se um fator de correção pela correlação do coeficiente de arrasto viscoso de um fluido isotérmico. Este fator contabiliza os efeitos do ambiente plasma nos cálculos e foi proposto por Pfender e Lee (1985). A expressão para o cálculo de  $C_D^f$  é dada por

$$C_D^f = \left( \frac{\rho_g(T_g)\mu_g(T_g)}{\rho_g(T_p)\mu_g(T_p)} \right)^{-0.45} \left( \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \right), \quad (4)$$

onde  $\mu_g$  é a viscosidade dinâmica do plasma e  $Re$  é o número de Reynolds, calculado através de

$$Re = \frac{\rho_g(T_g)V_{rel}d_p}{\mu_g(T_g)}. \quad (5)$$

No movimento da partícula é considerado que a distância máxima na direção  $x$  que a partícula pode atingir é de  $10 \text{ mm}$ , o que corresponde à distância entre a tocha e a peça (*DTP*).

### 2.3 Comportamento térmico

A evolução térmica do material de adição foi modelada considerando que o mesmo encontra-se na forma perfeitamente esférica. O balanço de energia para uma única partícula se movendo no interior de um plasma, considerando que ela troca calor pelos mecanismos de convecção e radiação térmica e utilizando a metodologia conhecida como *Método da Capacitância Global* (Incropera e Dewitt, 2003), resulta em

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{6}{\rho_p(T_p)c_{p,p}(T_p)d_p} \left[ h(T_g - T_p) - \varepsilon(T_p)\sigma T_p^4 \right], \quad T_p(0) = T_0, \quad (6)$$

onde  $c_{p,p}$  é o calor específico do material,  $h$  é o coeficiente de troca de calor por convecção térmica,  $\varepsilon$  é a emissividade total do material e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

A Eq. (6) é válida para o aquecimento da partícula até o instante em que se inicia o processo de fusão. Na modelagem da fusão, foi usada a Eq. (7), cuja variável dependente é a fração líquida ( $\zeta$ ). Durante todo o processo de fusão o calor é absorvido na forma de calor latente e a temperatura da partícula permanece constante.

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{6}{\rho_p(T_p)d_p L_f} \left[ h(T_\infty - T_{p,\text{fusão}}) - \varepsilon(T_p)\sigma T_{p,\text{fusão}}^4 \right], \quad \zeta(0) = 0. \quad (7)$$

Na Eq. (7),  $\zeta$  é a fração líquida e  $L_f$  é o calor latente de fusão.

Nas Eqs. (6) e (7) o coeficiente de troca de calor por convecção foi obtido a partir de uma correlação proposta por Lee *et al.*, (1985) dada por

$$h = \frac{k_g(T_g)Nu_f}{d_p} = \frac{k_g(T_g)}{d_p} (2 + 0,6Re_f^{1/2} Pr_f^{1/3}) \left( \frac{\rho_g(T_g)\mu_g(T_g)}{\rho_g(T_p)\mu_g(T_p)} \right)^{0,6} \left( \frac{c_{p,g}(T_g)}{c_{p,g}(T_p)} \right)^{0,38}, \quad (8)$$

onde  $k_g$  é a condutividade térmica do plasma,  $Nu$  é o número de Nusselt,  $Pr$  é o número de Prandtl e o subíndice  $f$  indica que a propriedade é calculada na temperatura de filme. O modelo matemático considera que a partícula é levada no máximo até a temperatura de vaporização ( $T_{p,vapor}$ ), pois a partir deste instante ocorre a perda de massa por evaporação do material, o que não é levado em conta no modelo utilizado.

Para o aquecimento da partícula a partir da temperatura de fusão ( $T_{p,fusão}$ ), isto é, após a partícula ter se fundido completamente, até a temperatura de vaporização ( $T_{p,vapor}$ ), foi utilizada a Eq. (6) com alterações na condição inicial e nas propriedades da partícula, devido ao fato do material se encontrar no estado líquido.

Em resumo, o modelo matemático considera os seguintes fenômenos:

- Partículas completamente esféricas.
- Força de arrasto viscoso e força peso agindo sobre a partícula.
- Distância entre a tocha e a peça de 10 mm.
- Troca de calor por convecção e radiação térmica.
- O processo é levado até o início da vaporização do material.

Alguns fenômenos que não foram considerados no modelo são:

- Movimento turbulento e efeito da não-continuidade do plasma no movimento da partícula. Estes efeitos foram abordados por Pfender e Lee (1985) que concluíram que tais efeitos são importantes apenas para partículas com diâmetros menores do que 5  $\mu m$ , e tais partículas não são abordadas no presente trabalho.
- Perda de massa por vaporização do material.

### 3. MODELO NUMÉRICO

As Eqs. (1), (2), (6) e (7) foram resolvidas com o método de Runge-Kutta de 4ª ordem (Gerald e Wheatley, 1999). Os passos de tempo utilizados nas simulações foram de  $\Delta t = 10^{-9}$  s para partículas com diâmetro inferior a 100  $\mu m$  e  $\Delta t = 10^{-8}$  s para partículas com diâmetro superior a 100  $\mu m$ . A escolha destes passos de tempo resultou da análise da diferença entre os tempos de fusão ( $t_{fusão}$ ) para simulações feitas com diversos valores de passos de tempo e considerando uma tolerância de  $10^{-5}$  ms.

O algoritmo usado no programa computacional implementado é:

1. Ler os dados do problema e parâmetros numéricos.
2. Inicializar as variáveis dependentes:  $T_p$ ,  $u_p$ ,  $v_p$  e  $\zeta$ .
3. Obter as propriedades do plasma, da partícula e os parâmetros adimensionais.
4. Avançar para o próximo passo de tempo, isto é, fazer  $t = t + \Delta t$ .
5. Calcular novos valores para as variáveis dependentes  $T_p$ ,  $u_p$  e  $v_p$ , com as Eqs. (6), (1) e (2).
6. Atualizar as propriedades do plasma, da partícula e os parâmetros adimensionais.
7. Verificar se a partícula iniciou a fusão. Se não, voltar ao passo (4). Se sim, ir para o próximo passo.
8. Calcular variáveis secundárias ( $t_{fusão,0}$ ,  $x_{fusão,0}$ ,  $y_{fusão,0}$ ,  $u_{fusão,0}$  e  $v_{fusão,0}$ ) no início da fusão da partícula.
9. Avançar para o próximo passo de tempo, isto é, fazer  $t = t + \Delta t$ .

10. Calcular novos valores para as variáveis dependentes  $\zeta$ ,  $u_p$  e  $v_p$ , com as Eqs. (7), (1) e (2).
11. Atualizar as propriedades do plasma, da partícula e os parâmetros adimensionais.
12. Verificar se a partícula finalizou a fusão (fração líquida igual a 100%). Se não, voltar ao passo (9). Se sim, ir para o próximo passo.
13. Calcular variáveis secundárias ( $t_{fusão}$ ,  $x_{fusão}$ ,  $y_{fusão}$ ,  $u_{fusão}$  e  $v_{fusão}$ ) no final da fusão da partícula.
14. Avançar para o próximo passo de tempo, isto é, fazer  $t = t + \Delta t$ .
15. Calcular novos valores para as variáveis dependentes  $T_p$ ,  $u_p$  e  $v_p$ , com as Eqs. (6), (1) e (2).
16. Atualizar as propriedades do plasma, da partícula e os parâmetros adimensionais.
17. Verificar se a partícula iniciou a vaporização. Se não, voltar ao passo (14). Se sim, ir para o próximo passo.
18. Calcular variáveis secundárias ( $t_{vapor,0}$ ,  $x_{vapor,0}$ ,  $y_{vapor,0}$ ,  $u_{vapor,0}$  e  $v_{vapor,0}$ ) no início da vaporização da partícula.

A solução das equações foi feita com iterações internas onde para cada instante de tempo as propriedades termofísicas da partícula e do plasma, bem como os parâmetros adimensionais são atualizados. Entre os passos 3 e 6, 8 e 11 e 13 e 16 foram feitas 10 iterações.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos para partículas de óxido de alumínio, também conhecido como alumina ( $Al_2O_3$ ). As propriedades termofísicas da alumina foram consideradas dependentes da temperatura. Os valores para o calor específico foram obtidos de Auerkari (1996) e Shpil'rain *et al.* (1972). E os valores para o coeficiente de dilatação térmica e para a condutividade térmica foram obtidos de Auerkari (1996). Como gás plasma, foi utilizado o argônio e suas propriedades também foram consideradas dependentes da temperatura. Os valores para o calor específico à pressão constante, massa específica, viscosidade dinâmica e condutividade térmica foram obtidos de Wen (2003).

### 4.1 Propriedades constantes *versus* variáveis

Na primeira etapa do trabalho foram feitas simulações visando determinar a importância de considerar as propriedades da partícula dependentes da temperatura. Primeiramente o modelo matemático composto pelas Eqs. (1), (2), (6) e (7) foi resolvido para as propriedades do material constante e o resultado foi comparado com a solução obtida para o modelo com propriedades dependentes da temperatura. A simulação foi feita para partículas de diâmetro de 50  $\mu m$  e utilizou-se como parâmetro de análise o tempo necessário para que a partícula se fundisse completamente. A diferença entre as soluções obtidas foi de 35%. As simulações não apresentaram diferenças entre os tempos de cálculo, por isso optou-se por realizar as demais simulações do trabalho utilizando o modelo que considera as propriedades do material dependentes da temperatura.

### 4.2 Força gravitacional e radiação térmica

Foram feitos testes para verificar a relevância da força gravitacional na Eq. (1) e da troca de calor radiativo nas Eqs. (6) e (7). Os resultados indicam que se a força gravitacional agir sobre a partícula, a posição onde a partícula estará completamente líquida ( $x_{fusão}$ ) é  $4,2 \times 10^{-6}$  mm maior do que  $x_{fusão}$  sem a ação da força, para partículas com diâmetro de 50  $\mu m$ . Para partículas com 1000  $\mu m$  de diâmetro, esta diferença é de  $1,7 \times 10^{-4}$  mm. Dessa forma,

verificou-se que a força gravitacional não influencia consideravelmente o sistema e a força de arrasto viscoso é predominante sobre o movimento da partícula.

O resultado das simulações indicou também que a radiação térmica afeta o início do processo de fusão do material em, na média,  $1,3 \times 10^{-6}$  s para partículas na faixa de 50 a 1000  $\mu\text{m}$ . Assim, a troca de calor por convecção é predominante sobre a radiação térmica. Estas conclusões estão de acordo com os resultados obtidos por Pfender e Lee (1985).

### 4.3 Influência do ângulo de injeção e da granulometria do material

Foram feitas simulações para partículas com diâmetros de 50, 100, 250, 500 e 1000  $\mu\text{m}$ . Estes valores foram usados porque para partículas menores outros efeitos precisariam ser incorporados ao modelo, tais como dispersão turbulenta e efeitos da não-continuidade do plasma. Os ângulos de injeção estudados foram 30°, 45° e 60°. Vale lembrar que estudos experimentais mostram que o ângulo de injeção pode alterar as características do revestimento (Bond, 2008).

As Tabs. 1, 2 e 3 mostram algumas variáveis de interesse obtidas das simulações feitas para ângulos de injeção de 30°, 45° e 60°, respectivamente. Nestas tabelas,  $t_{\text{fusão}}$  é o tempo necessário para fundir completamente a partícula,  $x_{\text{fusão}}$  é a posição que a partícula se encontra quando isso ocorre,  $t_{\text{vôo}}$  é o tempo decorrido da injeção até a chegada da partícula ao substrato,  $T_L$  é a temperatura da partícula no momento da chegada ao substrato,  $EF_L$  é o estado físico no momento da chegada e  $\xi_L$  é a fração líquida também no momento da chegada da partícula ao substrato. Lembra-se que a distância tocha-peça ( $DTP$ ) é de 10 mm.

Nas Tabs. 1, 2 e 3 quando as partículas iniciam o processo de vaporização, são feitos comentários a respeito da posição e do tempo decorrido até este instante. Isto porque em alguns casos a partícula começa a vaporizar antes de chegar ao substrato. Da mesma forma, em alguns casos a partícula chega ao substrato antes de iniciar o processo de fusão, neste caso não são mostrados os valores de  $t_{\text{fusão}}$  e  $x_{\text{fusão}}$ .

As Tabs. 1 e 2 mostram que partículas com diâmetro de até 100  $\mu\text{m}$  injetadas sob ângulos de 30° e 45° tornam-se líquidas muito antes de chegar no substrato e, inclusive, começam a vaporizar. A vaporização de material é um efeito indesejado no processo, pois pode contaminar o equipamento, e o material é desperdiçado porque não ocorre a formação de revestimento.

Para partículas com diâmetro de 250  $\mu\text{m}$  injetadas com ângulo de 30° a chegada destas ao substrato ocorre estando o material quase que totalmente líquido. Para partículas com diâmetros de 250 a 1000  $\mu\text{m}$ , injetadas sob ângulos de 45° e 60°, a chegada delas ao substrato ocorre estando as partículas completamente sólidas apenas com variações de temperatura. Essa é uma situação que influencia na qualidade do revestimento, pois a presença de material de adição sem estar fundido altera o nível de diluição do revestimento.

Para uma partícula com diâmetro de 100  $\mu\text{m}$  injetada sob um ângulo de 60° a chegada ao substrato se dá antes da fusão. Isto pode ser visto na Tab. 3. Logo, para o ângulo de 60° o diâmetro da partícula deve ser entre 50 e 100  $\mu\text{m}$  para que a partícula colida com o substrato na forma líquida.

O modelo contribui para entender o desenvolvimento de revestimentos soldados quando se utiliza material de adição particulado. Partículas de diferentes granulometrias atingem o substrato com temperaturas diferentes, sendo que quanto maior o diâmetro da partícula menor a temperatura com que a partícula atinge o substrato. Assim partículas de menor diâmetro que atingem uma maior temperatura tendem a se integrar à poça de fusão no substrato enquanto que partículas de granulometria maior podem chegar sólidas ao substrato. O que dita estas granulometrias são os parâmetros de deposição selecionados, que por sua vez determinam as características da coluna de plasma.

Tabela 1 - Resultados obtidos para a simulação feita com ângulo de injeção de 30°.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	$t_{\text{fusão}}$ (ms)	$x_{\text{fusão}}$ (mm)	$t_{\text{vôo}}$ (ms)	$T_L$ (K)	$EF_L$	$\xi_L$ (%)
50	0,1283	3,468	Começa a vaporizar em $t=0,1313$ ms em $x=3,754$ mm			
100	0,1598	4,741	Começa a vaporizar em $t=0,1706$ ms em $x=5,683$ mm			
250	-	-	0,3173	2323	Sólido/Líquido	97
500	-	-	0,3794	695,2	Sólido	0
1000	-	-	0,4063	417,3	Sólido	0

Tabela 2 - Resultados obtidos para a simulação feita com ângulo de injeção de 45°.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	$t_{\text{fusão}}$ (ms)	$x_{\text{fusão}}$ (mm)	$t_{\text{vôo}}$ (ms)	$T_L$ (K)	$EF_L$	$\xi_L$ (%)
50	0,1562	5,632	Começa a vaporizar em $t=0,1594$ ms em $x=5,913$ mm			
100	0,1883	7,056	Começa a vaporizar em $t=0,1993$ ms em $x=7,878$ mm			
250	-	-	0,2794	1096	Sólido	0
500	-	-	0,2928	490,1	Sólido	0
1000	-	-	0,2973	357,2	Sólido	0

Tabela 3 - Resultados obtidos para a simulação feita com ângulo de injeção de 60°.

Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	$t_{\text{fusão}}$ (ms)	$x_{\text{fusão}}$ (mm)	$t_{\text{vôo}}$ (ms)	$T_L$ (K)	$EF_L$	$\xi_L$ (%)
50	0,2257	9,359	Começa a vaporizar em $t=0,2302$ ms e $x=9,574$ mm			
100	-	-	0,2422	1965	Sólido	0
250	-	-	0,2443	476,1	Sólido	0
500	-	-	0,2447	349,9	Sólido	0
1000	-	-	0,2448	314,2	Sólido	0

A Fig. 3 mostra a trajetória e a temperatura de partículas com diâmetro de 50  $\mu\text{m}$  para três diferentes ângulos de injeção. Na Fig. 3 as partículas foram levadas até o início da vaporização (lembrado que o modelo é válido até este instante). Para o ângulo de 30° a partícula penetra antes na região de maior energia do plasma e isso faz com que ela comece a vaporizar antes de chegar ao substrato. Para a partícula injetada com ângulo de 60° o início da vaporização ocorre quando a partícula está próxima do substrato, pois ela demora mais para penetrar na região de maior energia do plasma.

O diâmetro da partícula influencia a evolução térmica da partícula no plasma, ocasionando que, mesmo sob as mesmas condições de operação do plasma e sob o mesmo ângulo de injeção, partículas com diâmetros diferentes tenham evoluções de temperatura diferentes, e, conseqüentemente, formem revestimentos com características diferentes. A Fig. 4 mostra a evolução da temperatura de partículas injetadas sob um ângulo de 45° para diâmetros diferentes. As partículas com diâmetros maiores do que 100  $\mu\text{m}$  chegam ao substrato completamente sólidas, podendo agir como nucleantes contribuindo para o refino da estrutura do revestimento, como já sugerido por Bond (2008) em seu trabalho experimental. Por outro lado, se as partículas forem excessivamente grandes, significa que uma maior energia é necessária para evitar a formação de defeitos no revestimento.

A Fig. 5 mostra a taxa de transferência de calor para partículas com diâmetros de 50 e 500  $\mu\text{m}$ , respectivamente, injetadas sob as mesmas condições, durante suas trajetórias no

interior do plasma. Na Fig. 5 a partícula com diâmetro de 50  $\mu\text{m}$  é levada até o início da vaporização do material. E a partícula com diâmetro de 500  $\mu\text{m}$  é levada até sua chegada ao substrato estando ela à temperatura de 490,1 K. Através da integração das curvas mostradas na Fig. 5, obteve-se a energia fornecida às partículas durante o processo, que é 0,28 mJ para a partícula com diâmetro de 50  $\mu\text{m}$  e 38,3 mJ para a partícula com diâmetro de 500  $\mu\text{m}$ . Logo, ao aumentar a granulometria do material é necessário um aumento no fornecimento de energia para o processo, para obter um revestimento semelhante àquele produzido por partículas com granulometria inferior.

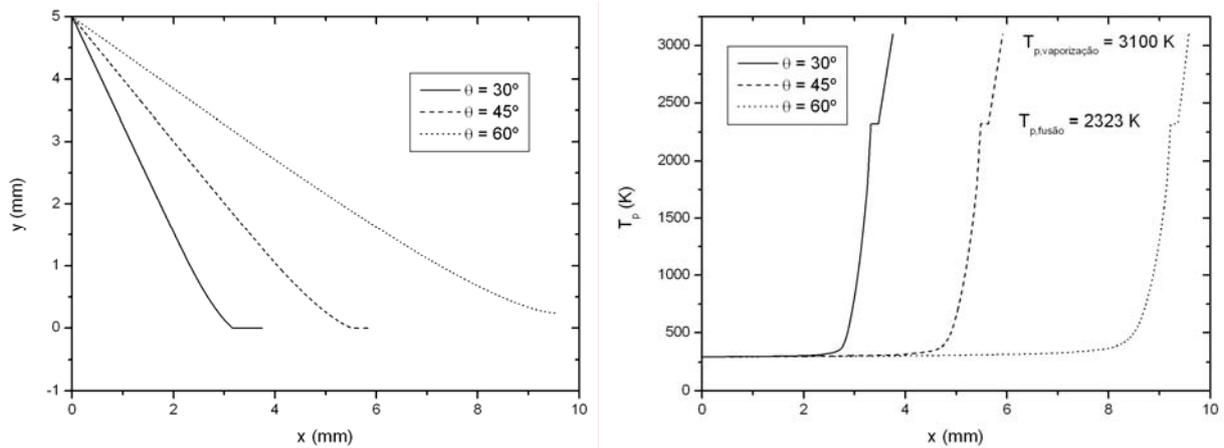


Figura 3 – Trajetórias e temperaturas de partículas com diâmetro de 50  $\mu\text{m}$ .

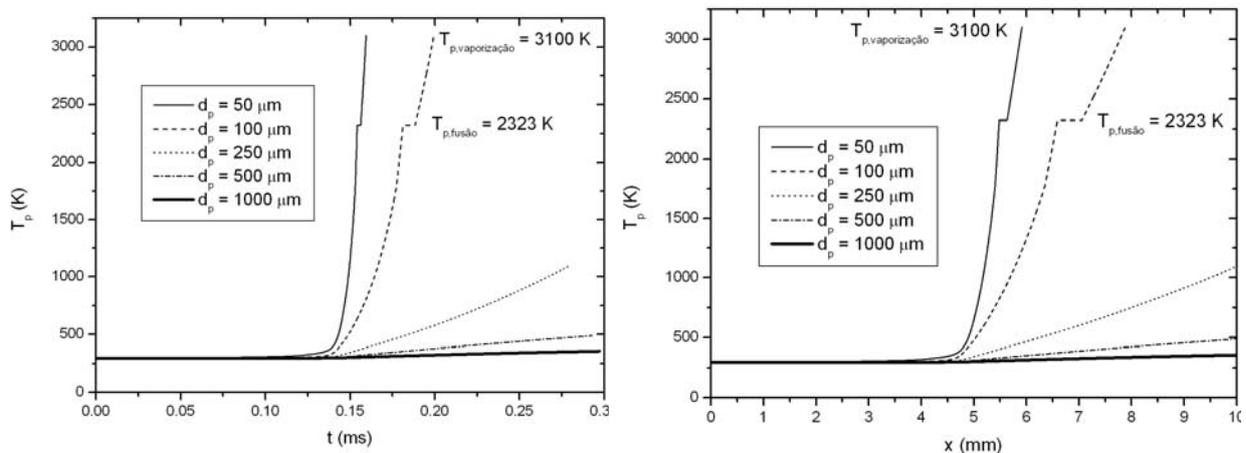


Figura 4 – Evolução da temperatura de partículas injetadas sob ângulo de 45°.

## 5. CONCLUSÃO

A seleção dos parâmetros de deposição é de extrema importância para a obtenção de um revestimento de qualidade em um processo PTA. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo que permitiu o estudo do comportamento de partículas num processo PTA através de simulações numéricas. Nas simulações as propriedades do material foram consideradas variáveis, o que proporciona uma melhor aproximação do modelo para o fenômeno real. Embora a tecnologia de arcos elétricos seja altamente utilizada em processos de soldagem, existem poucos trabalhos na literatura versando sobre a modelagem de arcos.

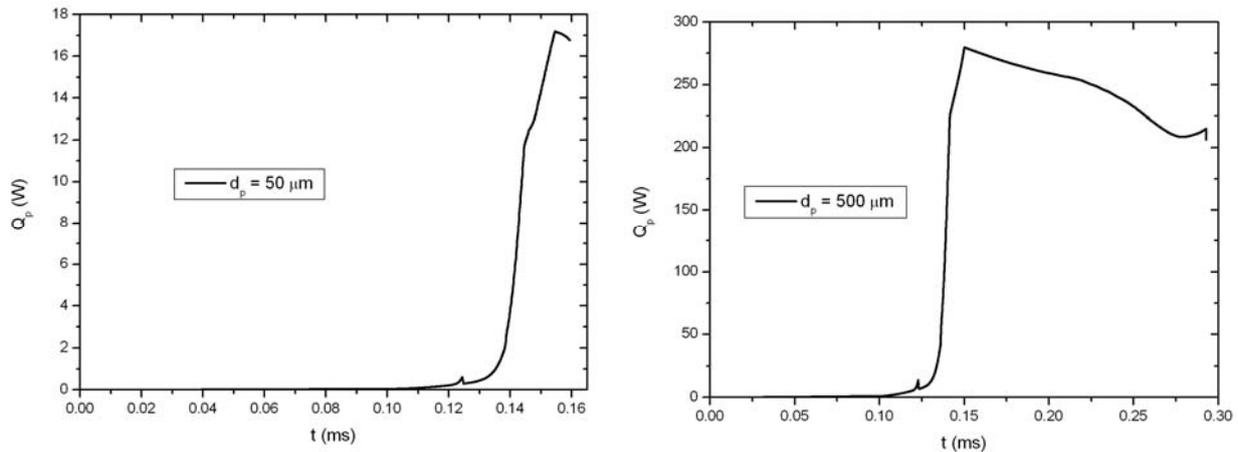


Figura 5 – Taxa de transferência de calor para partículas com diâmetros de 50 e 500  $\mu\text{m}$ .

Com a realização deste trabalho, verificou-se principalmente que:

- 1) A força peso não é relevante no movimento das partículas. Mesmo para partículas grandes, a força de arrasto viscoso é predominante no processo.
- 2) A radiação térmica não é relevante no processo. Mesmo para partículas com diâmetros maiores, onde a área total da partícula é maior, a convecção térmica é o processo predominante na transferência de calor.
- 3) Partículas com diferentes granulometrias chegam ao substrato com diferentes temperaturas sob as mesmas condições de operação. Partículas com granulometrias maiores do que 250  $\mu\text{m}$  atingem o substrato na forma sólida, independentemente do ângulo de injeção.
- 4) Quanto maior é a partícula, maior é a necessidade de energia para que ela consiga se fundir.
- 5) A trajetória da partícula é influenciada pelo seu ângulo de injeção. Partículas de mesmo tamanho injetadas sob ângulos menores têm mais energia ao chegar ao substrato do que aquelas injetadas sob ângulos maiores.

O modelo matemático adotado no presente trabalho poderia ser aperfeiçoado com a inclusão de modelos para resolver a tocha do plasma, e os campos de velocidades e temperaturas do plasma.

### ***Agradecimentos***

Os dois últimos autores são bolsistas do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, do Brasil).

### **REFERÊNCIAS**

- Aithal, S. M., Subramaniam, V. V., Pagan, J. & Richardson, R. W., 1998. Numerical model of a transferred plasma arc. *Journal of Applied Physics*, vol. 84, n. 7, pp. 3506-3517.
- Auerkari, P., 1996. *Mechanical and physical properties of engineering alumina ceramics*. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita, Research Notes 1792.26.

- Bond, D., 2008. Revestimentos Soldados Processados com Materiais Atomizados, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Gerald, C.F. & Wheatley, P.O., 1999. *Applied Numerical Analysis*, 6 ed., USA: Addison-Wesley.
- Incropera, F.P. & Dewitt, D.P., 2003. *Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa*, 5 ed., Rio de Janeiro: LTC.
- Lee, Y.E., Chyou, Y.P. & Pfender, E., 1985. Particle Dynamics and Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. Part II. Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 5, pp. 391-414.
- Pfender, E. & Lee, Y.E., 1985. Particle Dynamics and Particle Heat and Mass Transfer in Thermal Plasmas. Part I. The Motion of a Single Particle without Thermal Effects. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 5, pp. 211-237.
- Santos, R. L. C., Paredes, R. S. C. & D'Oliveira, A. S. C. M., 2006. Plasma Transferred Arc Hardfacing Using Pulsed Current. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, n. 2, pp. 167-174.
- Shpil'rain, E. E., Kagan, D. N. & Barkhatov, L. S., 1972. Thermodynamic properties of condensed phase of alumina near the melting point. *High Temperatures – High Pressures*, vol. 4, pp. 605-609.
- D'Oliveira, A. S. C. M., Queiroz, D., & Takano, E. H., 2008. Avaliação dos parâmetros de processamento por PTA nas superfícies. *Soldagem e Inspeção* (aceito).
- Wen, Y., 2003. *Numerical Study of Variable Property Plasma Flow over Non-spherical Particles*, Thesis of Master, Division of Research and Advanced Studies, University of Cincinnati.
- Westhoff, R., Trapaga, G. & Szekely, J., 1992. Plasma-Particle Interactions in Plasma Spraying Systems. *Metallurgical Transactions B*, vol. 23B, pp. 683-693.
- XIBAO, W. & HUA, L., 1998. Metal Powder Thermal Behaviour During the Plasma Transferred-arc Surfacing Process, *Surfaces and Coatings Technology*, vol. 106, pp. 156-161.
- Yaedu, A.E. & D'Oliveira, A. S. C. M., 2005. Co Based Alloy PTA Hardfacing With Different Dilution Levels. *Material Science and Technology*, United Kingdom, vol. 21, n. 4, pp. 459-466.