

# Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente

**Ossimar Maranhão**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231  
Cidade Universitária  
05508-900 – São Paulo - Brasil  
E-mail: ossimar@cefetpr.br

**Prof. Dr. Amilton Sinatora**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária  
05508-900 – São Paulo - Brasil  
E-mail: sinatora@usp.br

## Abstract

In this work, was studied the influence of the parameters of the high velocity oxygen fuel thermal spray process in the application of the multicomponent white cast iron coatings. The parameters related to the imposed energy in the particles, as oxygen and propane flow rate, oxygen/propane ratio, spraying distance and powder size, had varied. Carbon content, final temperature, thickness, porosity and hardness of the coatings were characterized. For the parameters used in this work the variation of carbon content of coating was insignificant. The coating final temperature increased with greater of the propane flow rate and lower of the spraying distance. The coatings applied with oxygen/propane ratio of 4.6, 200 mm of spraying distance and powder size of  $< 45 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  presented lower porosity, greater hardness and thickness. For levels of until approximately 2% the porosity it influences the values of hardness. The levels of porosity and hardness found for the multicomponent white cast iron are dependents of the variable studied and similar to the levels of other types of materials applied for thermal spraying.

**Key-words:** Thermal spraying, multicomponent white cast iron, porosity and hardness.

**Resumo.** Neste trabalho, estudou-se a influência dos parâmetros do processo de aspersão a chama hipersônica (HVOF) na aplicação de revestimentos de ferro fundido branco multicomponente (FFBMC). Variaram-se os parâmetros relacionados à energia imposta as partículas como: vazão e razão dos gases oxigênio e propano, distância de aspersão e granulometria do pó. Os revestimentos foram caracterizados em relação ao teor de carbono, temperatura final, espessura, porosidade e dureza. Para os parâmetros utilizados neste trabalho, foi insignificante a variação dos teores de carbono dos revestimentos. A temperatura final dos revestimentos aumentou com maior vazão de propano e menor da distância de aspersão. Os revestimentos aplicados com razão oxigênio/propano de 4,6, 200 mm de distância de aspersão e granulometria  $< 45 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  apresentaram menor porosidade, maior dureza e espessura Para níveis de até aproximadamente 2% a porosidade influencia os valores de dureza. Os níveis de porosidade e dureza encontradas para o ferro fundido branco multicomponente são dependentes das variáveis estudadas e semelhantes aos níveis de outros tipos de materiais aplicados por aspersão térmica.

**Palavras- chave:** Aspersão térmica, ferro fundido branco multicomponente, porosidade e dureza,

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos de aspersão térmica apresentam grande versatilidade na deposição de revestimentos. São aplicados revestimentos para proteção de componentes contra desgaste abrasivo, adesivo, erosivo, fadiga superficial e corrosão, além de revestimentos para funcionar como barreira térmica.<sup>1,2</sup> A vantagem desta técnica esta relacionada com a possibilidade de aplicação de revestimentos nos mais diferentes tipos de substratos (material base), pois não ocorre alteração de forma ou microestrutural devido as baixas temperaturas a que são submetidos. Com isso é possível a aplicação de revestimentos em materiais de baixo ponto de fusão, como termoplásticos, e de alto ponto de fusão, como os materiais metálicos.<sup>3,4</sup> Entre os vários processos um que apresenta menor aquecimento do substrato é o processo de aspersão a chama hipersônica (HVOF).<sup>2,3,5;6,7,8</sup>

Para proteção contra desgaste abrasivo são comumente utilizadas ligas de NiCr, contendo B, Si e C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CrO, CrC, WC. No caso do carboneto de cromo a matriz é composta da liga de NiCr e para carbonetos de tungstênio o ligante é o cobalto.<sup>4</sup> Trabalhos recentes mostram estudos de ligas de WC-Co com adição de Carboneto de Vanádio para formação de partículas duras,<sup>9</sup> carbonetos e diboretos de titânio utilizando como fase ligante FeCr ou NiCr.<sup>10,11</sup> Uma nova e importante família de ligas resistentes ao desgaste são os ferros fundidos brancos multicomponentes, também conhecido como aços rápidos.<sup>12</sup> Para a fabricação de componentes utilizando este tipo de material utiliza-se de processos de fabricação que envolvem a fundição seguida de tratamento térmico e, menos freqüentemente, a metalurgia do pó e o spray forming.<sup>13,14,15</sup>

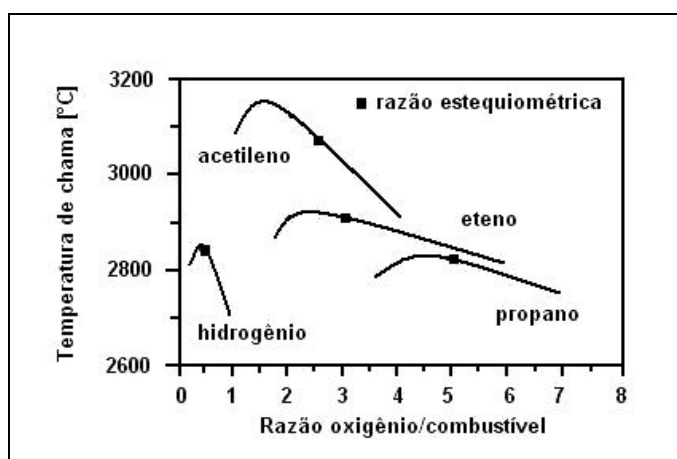
Os ferros fundidos brancos multicomponentes (FFBMC) são ligas do sistema Fe-C-Cr-W-Mo-V empregadas extensivamente na fabricação de cilindros de laminação a quente para a indústria siderúrgica e de corpos moedores para as indústrias de mineração e de cimento.<sup>16</sup> A idéia de empregar ligas deste sistema resultou da percepção de que os requisitos para estes tipos de aplicação, basicamente, resistência a desgaste e capacidade de reter elevada dureza mesmo quando submetido a altas temperaturas. Assim, tomando como base o aço AISI M2, que possui esta característica, projetaram-se ligas cujas principais diferenças em relação a este aço rápido são os teores de carbono e vanádio mais elevados (objetivando aumentar a fração volumétrica de carbonetos eutéticos MC).<sup>17</sup> Desta forma, embora os fabricantes de cilindros e de corpos moedores muitas vezes produzam ligas projetadas especificamente para as condições operacionais de cada usuário, a composição química nominal dos FFBMC comerciais normalmente encontra-se dentro das seguintes faixas: 1,5-2,0 %C; até 5 %W; até 5 %Mo; 3-7 %Cr e 4-8 %V.<sup>18</sup>

Para a aplicação de materiais novos existe a preocupação de se obter revestimentos com aderência suficiente para suportar as solicitações em serviço, sem que ocorra o destacamento. Por outro lado, dependendo do tipo de aplicação é necessário adequar esse revestimento ao tipo de solicitação para a qual será projetado. Os prováveis níveis de aderência são obtidos através da análise da porosidade de um revestimento, pois porosidade acima de determinados níveis é indicação de que as partículas do revestimento não aderiram suficientemente ao substrato, devido à pequena energia imposta pelo processo de aspersão. Além disso, a dureza é um parâmetro adequado para se determinar a resistência ao desgaste abrasivo de um revestimento.<sup>19</sup> Portanto estudando os parâmetros que influenciam na porosidade e dureza de um revestimento tem-se a expectativa do mesmo em relação à aderência e ao desgaste abrasivo.<sup>3,4</sup>

Logo no processo de aspersão térmica por HVOF os parâmetros que influenciam na energia imposta as partículas e, conseqüentemente, na porosidade e dureza dos revestimentos são a razão e vazão dos gases oxigênio/combustível, a distância de aspersão e a granulometria do pó. Pois nesse processo a mistura dos gases ocorre dentro de uma câmara pressurizada com alta pressão, antes de entrar na zona de combustão. Com a ignição da mistura ocorrem reações químicas que liberam energia térmica, aumentando ainda mais a pressão da mistura. A energia liberada na reação da mistura gasosa é convertida em calor e pressão, que servem para aquecer e impulsionar as partículas de pó junto com os gases de arraste.<sup>3,4</sup> Entre os gases utilizados aquele que proporcione alta temperatura da chama, aliado aos maiores calores de combustão, entre os vários gases, é o propano. Para o propano a maior temperatura da chama é obtida quando a razão com o oxigênio é de 4,5<sup>20</sup>, que é próxima da razão estequiométrica da mistura oxigênio/propano.. A variação da temperatura com a razão oxigênio/propano para vários gases é apresentada na figura 1

A relação entre a temperatura e velocidade das partículas com a razão oxigênio/combustível foi determinada por utilizando pó de inconel aplicado por HVOF com gás natural como combustível.<sup>21</sup> Os resultados indicam que houve aumento da velocidade e diminuição da temperatura das partículas com o aumento do percentual da razão estequiométrica. Adicionalmente, as propriedades térmicas e a granulometria interferem na quantidade de energia que as partículas absorvem durante a passagem pela chama, tendo como conseqüência alterações na velocidade e temperatura das partículas com a variação da distância em relação ao bocal da pistola.<sup>21</sup> Realizaram-se pesquisas para verificar a influência da distância em relação ao bocal da pistola, e da faixa granulométrica na temperatura e velocidade das partículas de Ni-Cr.<sup>22</sup> Os resultados indicaram aumento da temperatura com a distância. A maior temperatura para maiores distâncias é devido a reações exotérmicas provocada pela oxidação das partículas. Além disso, a reação também é ativada pela maior proporção de

oxigênio oriundo dos gases atmosféricos, principalmente quando utilizada chama com menor proporção de oxigênio.



**Figura 1** - Relação entre a temperatura e a razão oxigênio/combustível. (adaptada das refs. 23,24)

No caso da velocidade das partículas, ocorrem variações diferentes em função da granulometria do abrasivo, sendo esta variação mais acentuada para menores granulometrias. A faixa granulométrica exerce influência significativa tanto na temperatura como na velocidade das partículas. Observa-se que a diminuição da faixa granulométrica favoreceu o aumento da temperatura com o aumento da distância. No caso da velocidade houve decréscimo acentuado, principalmente para distâncias acima de 120 mm. A análise quanto à granulometria do pó permite dizer que o aporte de calor e velocidade é mais acentuado para menores tamanhos de partícula facilitando a capacidade de deformação plástica dessas partículas.<sup>22</sup>

A porosidade ocorre devido à incompleta cobertura da superfície pelas partículas subseqüentes que são aspergidas. Isto acontece pela incapacidade do material em comprimir os gases existentes nos interstícios entre lamela/lamela e/ou lamela substrato. A formação desses poros está relacionada com a temperatura, a densidade, a tensão superficial, a viscosidade das partículas fundidas, a velocidade de impacto e a distribuição granulométrica. Baixas temperaturas e/ou velocidade de impacto, assim como partículas grandes, tendem a aumentar a porosidade.<sup>25,26</sup> Estudos mostraram a dependência da porosidade com a vazão dos gases onde se verificou aumento da porosidade com o aumento da vazão de propileno, e diminuição com o aumento da vazão de oxigênio. Com o aumento da vazão de propileno, mantendo-se a vazão de oxigênio constante, houve diminuição da razão propileno/oxigênio, de 80 % para 60 %, em relação à razão de maior temperatura da chama. Logo, houve decréscimo na temperatura da chama. Por outro lado, com o aumento da vazão de oxigênio, com propileno constante, ocorreu aumento da razão estequiométrica de 60 % para 80 %, em comparação a razão de maior temperatura, causando também aumento da temperatura da chama.<sup>27</sup> Logo a porosidade está associada a maior temperatura e velocidade da chama e, por conseqüência, das partículas. Estudos analisaram a influência da temperatura e velocidade das partículas na porosidade. Os resultados mostraram que a vazão total dos gases teve influência significativa na porosidade dos revestimentos, pois os maiores percentuais de porosidade foram obtidos nas condições onde se utilizou vazões menores que 780 l/min. Com essas menores vazões, obtiveram-se temperaturas abaixo de 2000 °C e velocidades inferiores a 470 m/s. Além disso a porosidade apresentou relação mais bem definida com a temperatura das partículas. Com a velocidade essa relação não é tão clara.<sup>28</sup>

A dureza de um revestimento tem muitas vezes grande importância prática, pois pode ser correlacionada com a resistência ao desgaste e fadiga. Além disso, a dureza pode servir como parâmetro de referência indireto para fixação de variáveis do processo de aspersão.<sup>3</sup>

A relação entre a dureza e parâmetros de processo, como vazão dos gases, temperatura e velocidade das partículas, é relatada em trabalhos realizados por vários autores<sup>27,28,29</sup>.

Os resultados de trabalho realizado sobre o efeito da vazão dos gases na microdureza indicam aumento da dureza com a vazão de oxigênio, que é devido a maior quantidade de óxido disperso na microestrutura, principalmente no contorno das lamelas. A justificativa da menor dureza para maior vazão de propileno é a diminuição do percentual da razão estequiométrica, considerando os níveis de vazões utilizados para o propileno e oxigênio. Com isso a temperatura da chama foi menor e, conseqüentemente, as partículas chegaram ao substrato com menor energia, diminuindo a capacidade de se deformarem e preencherem os vazios entre as camadas previamente depositadas.<sup>27</sup>

Realizou-se análise semelhante para determinar a relação entre a vazão dos gases e a dureza, porém adotando diretamente a temperatura e velocidade das partículas como parâmetros. Verificou-se relação linear crescente entre a dureza com a temperatura e velocidade das partículas.<sup>28,29</sup> A explicação para o aumento da dureza

com menores distâncias de aspersão é devido ao aumento da precipitação de carbonetos. Essa maior precipitação de carbonetos ocorre pela maior temperatura das partículas que se chocam com o substrato com alta energia cinética.<sup>29</sup>

Pelos resultados apresentados em relação à dureza, verifica-se que a maior razão para o seu aumento é a imposição de maior energia térmica e cinética as partículas, que proporcionam maior coesão entre as lamelas. Pois na aplicação de ligas de NiCrBSi o revestimento que apresentou maior dureza foi o aplicado por HVOF em relação ao aplicado por FS e ASP.<sup>30</sup> Isso também acontece em relação à porosidade dos revestimentos, logo é de esperar uma relação entre a porosidade e a dureza.<sup>27</sup> A influência da porosidade na dureza se verifica para níveis de até 2% de porosidade. Acima desses valores a porosidade tem efeito insignificante na dureza, conforme modelos da mecânica dos sólidos.

Portanto nesse trabalho o objetivo será verificar a influência dos parâmetros de processo na perda de carbono da liga original, na temperatura dos revestimentos ao final da aplicação, na espessura do revestimento e, principalmente, na porosidade e na dureza dos revestimentos. Com isso, pretende-se determinar os melhores parâmetros de processo para aplicação das ligas de ferro fundido branco multicomponente pelo processo de aspersão térmica a chama hipersônica, para obtenção de revestimentos com baixa porosidade e alta dureza.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

O material utilizado como substrato para aplicação do revestimento foi aço ao carbono (0,2 %C) laminado a quente, obtido no mercado sob a forma de chapas planas com dimensões de 150 mm x 75 mm x 12,7 mm.

O material a ser aspergido na forma de pó foi obtido por meio de atomização a gás inerte de uma liga hipereutética de ferro fundido branco multicomponente. A matéria prima utilizada no atomizador, na forma de tarugos vazados, foram fundidos em forno de indução ao ar utilizando sucatas de aço baixo carbono, ferroligas e grafita. A composição química nominal do ferro fundido branco multicomponente utilizado no revestimento é: 2,5 %C, 4 %Cr, 4 %Mo, 2 %W e 8 %V.

### 2.2. Procedimento Experimental

Em função da enorme gama de parâmetros de processo envolvido na aplicação de revestimento por aspersão térmica, limitou-se o estudo àqueles parâmetros que possuem direta relação com a temperatura e velocidade das partículas. Para tanto, foram analisadas a vazão de gás combustível (propano – C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) e gás comburente (oxigênio – O<sub>2</sub>), razão oxigênio/propano, distância de aspersão e granulometria do pó. Para a determinação dos valores mínimos e máximos dos parâmetros a serem estudados levou-se em consideração a operacionalidade do equipamento. Para a vazão dos gases propano e oxigênio foi mantida uma relação que possibilitasse o trabalho sem que houvesse retrocesso ou extinção da chama. A razão oxigênio/propano mínima foi 3,4, abaixo da qual haveria o risco de retrocesso da chama, e a razão máxima foi 7,0 para evitar a extinção da chama. Além disso utilizou-se distâncias de aspersão de 200 mm e 300 mm.

Utilizou-se pó com duas faixas granulométricas, para determinar a influência do tamanho das partículas nas características do revestimento. A faixa granulométrica maior compreendeu partículas de pó com tamanhos < 75 µm e > 20 µm e a faixa menor com tamanhos de partículas de pó < 45 µm e > 20 µm. Foram realizados 20 passes sobrepostos no sentido longitudinal da chapa.

Os níveis dos parâmetros de aplicação das condições 1A até 8A e 7B, utilizados para a deposição do revestimento de FFBMC, são listados na tabela 1.

Ao final da aplicação dos revestimentos, fez-se medições de temperatura para determinar a influência dos parâmetros de aplicação. Realizou-se apenas uma medição para cada condição de aspersão, pois caso contrário haveria grande variação dos resultados devido a dissipação do calor. Utilizou-se um termômetro de contato digital marca SKF, modelo TMDT 900 com ponteira de termopar tipo K(NiCr/NiAl).

Foi feita análise química por combustão em um corpo-de-prova compactado para a determinação do teor de carbono da liga de FFBMC atomizada.

Após a deposição dos revestimentos, conforme condições 1A até 8A e 7B, foram retiradas amostras para análise química dos teores de carbono. As amostras foram obtidas destacando-se o revestimento pelo dobramento dos corpos-de-prova. Os resultados da análise por combustão foram comparados com os valores encontrados no material antes da aplicação.

Efetou-se o controle da espessura durante a aplicação utilizando um micrômetro marca Mitutoyo. Além disso, utilizou-se o analisador de imagem Leica para determinar a espessura em amostras metalográficas da seção transversal dos revestimentos. A amostra para preparação metalográfica, foi retirada da seção transversal e no sentido longitudinal dos cordões nos corpos-de-prova dos ensaios 1A até 8A e 7B. Isso possibilitou medições na região onde houve maior espessura do revestimento, que é o centro do jato. O número de medições em todos os casos foi 5 para cada amostra metalográfica.

Para a medição da porosidade, foram preparadas amostras metalográficas da seção transversal dos revestimentos. As micrografias foram analisadas por um software analisador de imagens marca Leica, com capacidade de identificar e quantificar a fração de poros pela diferença de coloração. Observaram-se para as medições de porosidade recomendações da norma ASTM E-2109<sup>31</sup> sendo realizadas 10 medições por amostra. Neste trabalho a porosidade foi indicada pelo percentual da área ocupada pelos poros dentro de um campo de medição de 200  $\mu\text{m}$  x 100  $\mu\text{m}$ , obtida com aumento de 500x onde 1 pixel equivale a 0,328  $\mu\text{m}$ . Utilizou-se como referência para as medições de dureza a norma ASTM E-384,<sup>32</sup> que recomenda a utilização de cargas de 300 g e no mínimo 10 medições na área analisada. Além disso, a variação máxima permitida entre as medições é de 15 %. Com essas recomendações, efetuaram-se medições na seção transversal de todos os revestimentos aplicados conforme as condições 1A até 8A e 7B.

**Tabela 1** – Níveis dos parâmetros de aspersão para aplicação dos revestimentos

Ensaio	Distância de aspersão (D) [mm]	Vazão de propano (Vp) [l/min]	Vazão de oxigênio (Vo) [l/min]	*Razão Oxigênio/Propano O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Faixa Granulométrica < 75 $\mu\text{m}$ > 20 $\mu\text{m}$				
1A	200	34	107	5,2
3A	200	52	107	3,4
5A	200	34	171	7,0
7A	200	52	171	4,6
2A	300	34	107	5,2
4A	300	52	107	3,4
6A	300	34	171	7,0
8A	300	52	171	4,6
Faixa Granulométrica < 45 $\mu\text{m}$ > 20 $\mu\text{m}$				
7B	200	52	171	4,6

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Análise do teor de carbono

Como o carbono é o elemento principal para a formação dos carbonetos, que funcionam como endurecedores e proporcionam o aumento da resistência ao desgaste desta liga, optou-se por medir o percentual de carbono em todas as condições de aspersão. A variação de carbono foi considerada como uma variável dependente para a determinação da melhor condição de aspersão. Na tabela 2 são apresentados os percentuais de carbono obtidos nos revestimentos aplicados conforme as condições de aspersão 1A até 8A e 7B. Os valores tabelados foram comparados com o percentual de carbono do metal atomizado (pó), que foi de 2,31 % em peso.

**Tabela 2** - Teores de carbono dos revestimentos aspergidos

Ensaio	D [mm]	Vp [l/min]	Vo [l/min]	*Razão O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Teor de Carbono [% em peso]	
					Média	Erro (IC 95%)
Faixa Granulométrica < 75 $\mu\text{m}$ > 20 $\mu\text{m}$						
1A	200	34	107	5,2	2,30	0,01
3A	200	52	107	3,4	2,30	0,01
5A	200	34	171	7,0	2,34	0,02
7A	200	52	171	4,6	2,28	0,05
2A	300	34	107	5,2	2,21	-
4A	300	52	107	3,4	2,33	0,03
6A	300	34	171	7,0	2,18	0,05
8A	300	52	171	4,6	2,26	0,03
Faixa Granulométrica < 45 $\mu\text{m}$ > 20 $\mu\text{m}$						
7B	200	52	171	4,6	2,25	0,03

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

Não se verificaram alterações significativas nos percentuais de carbono com o aumento da distância de aspersão de 200 para 300 mm. A invariabilidade detectada está relacionada com a faixa de distância utilizada nos ensaios. Ou seja, para as distâncias utilizadas o contato do material com o ar atmosférico foi insuficiente para ocorrer a descarbonetação do material.

As vazões de propano e oxigênio não alteraram o percentual de carbono para todas as condições de aspersão. Onde a razão oxigênio/propano foi menor ou igual a 5, portanto, a chama é redutora ou neutra, a perda de carbono foi eliminada pela presença de maior percentual de combustível, que é rico em carbono. Nas

condições onde a chama é oxidante, razão oxigênio/propano maior que 5, o oxigênio da chama e do ar atmosférico não foram suficientes para a descarbonetação do material. A granulometria do pó também não influenciou na perda de carbono do material, como pode ser visto comparando as condições 1A até 7A com a condição 7B. Foram realizados ensaios preliminares para verificar a descarbonetação do FFBMC considerando dois processos de aspersão: HVOF e ASP. Para aplicações por HVOF o teor de carbono inicial foi de 1,85 % e após a aplicação esse teor foi de 1,83%. Para aplicações por ASP o teor final foi de 0,4 %. Portanto, para as condições experimentais desse trabalho o processo de aspersão térmica não causou a descarbonetação do ferro fundido branco multicomponente.

### 3.2. Temperatura final do revestimento

Os resultados da temperatura com a variação da vazão dos gases e distância de aspersão são apresentados na tabela 3. Analisando a influência da vazão de propano na temperatura dos revestimentos, verifica-se que o aumento de 34 l/min para 52 l/min causou variação média de 50 °C na temperatura, tanto para distâncias de 200 mm como para distâncias de 300 mm. Quanto à vazão de oxigênio verifica-se que o aumento de 107 l/min para 171 l/min não provocou variação na temperatura final dos revestimentos, para as duas distâncias. Portanto, elevando-se a vazão de propano e diminuindo-se a distancia de aspersão resultou na diminuição da temperatura final dos revestimentos. A variação da vazão de oxigênio não afetou este parâmetro.

**Tabela 3** - Temperatura após último passe dos revestimentos aspergidos

Ensaio	D [mm]	Vp [l/min]	Vo [l/min]	*Razão O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Temperatura [°C]
Faixa Granulométrica < 75 µm > 20 µm					
1A	200	34	107	5,2	130
3A	200	52	107	3,4	180
5A	200	34	171	7,0	137
7A	200	52	171	4,6	180
Faixa Granulométrica < 45 µm > 20 µm					
2A	300	34	107	5,2	90
4A	300	52	107	3,4	131
6A	300	34	171	7,0	90
8A	300	52	171	4,6	138
7B	200	52	171	4,6	176

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

### 3.3. Espessura do revestimento

As espessuras apresentadas na tabela 4 foram obtidas em função dos parâmetros distância de aspersão, vazão e razão dos gases propano e oxigênio e granulometria do pó, porém o número de passes foi mantido constante.

A espessura média dos revestimentos aplicados com menores distâncias de aspersão foi aproximadamente 75 % superior àquelas aplicadas com maiores distâncias. Para os revestimentos aplicados com menores distâncias, a espessura foi superior em todos os casos onde a razão oxigênio propano foi mais próxima da razão de maior temperatura da chama. Além disso, a condição que apresentou maior espessura foi a 7B, que foi aplicada com maiores vazões dos gases, menor distância de aspersão e menor granulometria.

**Tabela 4** - Espessura dos revestimentos aspergidos

Ensaio	D [mm]	Vp [l/min]	Vo [l/min]	*Razão O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Espessura [µm]	
					Média	Erro (IC 95%)
Faixa Granulométrica < 75 µm > 20 µm						
1A	200	34	107	5,2	253	6
3A	200	52	107	3,4	179	8
5A	200	34	171	7,0	352	12
7A	200	52	171	4,6	403	22
Faixa Granulométrica < 45 µm > 20 µm						
2A	300	34	107	5,2	70	21
4A	300	52	107	3,4	133	7
6A	300	34	171	7,0	122	4
8A	300	52	171	4,6	355	24
7B	200	52	171	4,6	705	15

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

### 3.4. Porosidade

Na tabela 5 são apresentados os níveis de porosidade com a variação da vazão dos gases e distância de aspersão, além da razão oxigênio/propano.

**Tabela 5 - Porosidade percentual dos revestimentos aspergidos**

Ensaio	D [mm]	Vp [l/min]	Vo [l/min]	*Razão O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Porosidade [%]	
					Média	Erro (IC 95%)
Faixa Granulométrica < 75 μm > 20 μm						
1A	200	34	107	5,2	1,8	0,1
3A	200	52	107	3,4	2,3	0,1
5A	200	34	171	7,0	2,4	0,3
7A	200	52	171	4,6	1,4	0,2
Faixa Granulométrica < 45 μm > 20 μm						
2A	300	34	107	5,2	8,7	2,2
4A	300	52	107	3,4	4,0	0,5
6A	300	34	171	7,0	6,5	0,6
8A	300	52	171	4,6	3,3	0,2
7B	200	52	171	4,6	0,9	0,1

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

O efeito dos parâmetros de aspersão sobre a porosidade dos revestimentos pode ser explicado com a ajuda da figura . Na figura a tem-se a variação de propano para duas vazões de oxigênio e distância de aspersão de 200 mm. Verifica-se que o aumento da vazão de propano, mantendo-se constante a vazão de oxigênio em 107 l/min, produz aumento na porosidade dos revestimentos. Efeito contrário ocorre quando se aumenta a vazão de propano com a vazão de oxigênio constante de 171 l/min, ou seja, reduz-se a porosidade do revestimento. Análise semelhante feita na figura b com a vazão de oxigênio também se verifica efeito contrário da vazão de oxigênio na porosidade quando se mantém a vazão de propano em 34 l/min e em 52 l/min. A comparação do efeito da vazão dos gases sobre a porosidade, para distâncias de aspersão de 300 mm, apresenta comportamento diferente em relação as menores distâncias. Na figura c tem-se a variação da porosidade com a vazão de propano para os dois níveis de vazão de oxigênio. Nesse caso, a diminuição da porosidade com o aumento da vazão de propano é semelhante para os dois níveis de vazão do oxigênio. Além disso, o efeito da vazão de oxigênio na porosidade para vazões de propano de 34 l/min e 52 l/min é semelhante.

Considerando que o fator temperatura da chama é o mais influente, o comportamento diferente dos efeitos da vazão dos gases sobre a porosidade tem explicação na razão oxigênio/propano. Na figura tem-se a variação da porosidade com o aumento da razão oxigênio/propano para distâncias de 200 mm. A curva apresenta um ponto de mínimo para a razão oxigênio/propano próxima de 4,5, que é a razão de maior temperatura<sup>20</sup> Para valores menores que 4,5 ocorre diminuição da porosidade com o aumento da razão oxigênio/propano, e para valores maiores que 4,5 a porosidade aumenta. Ou seja, quanto mais próximo a razão oxigênio/propano estiver da razão de máxima temperatura menor será a porosidade.

O aumento da vazão de propano, para os menores patamares da vazão de oxigênio (condição 1A e 3A), causa aumento da porosidade, devido ao distanciamento da razão oxigênio/propano da razão de temperatura máxima da chama, passando de 5,2 na condição 1A para 3,4 na condição 3A. Por outro lado, a diminuição da porosidade com o aumento da vazão de propano para maiores vazões de oxigênio causou a diminuição da porosidade, pois a razão oxigênio/propano diminui de 7,0, para a condição 5A, para 4,6 na condição 7A. O mesmo raciocínio é feito para o aumento da vazão de oxigênio quando se compara as condições 1A com 5A e 3A com 7A. No primeiro caso (1A/5A) a razão oxigênio/propano se distancia da razão de máxima temperatura e no segundo caso (3A/7A) se aproxima. HEARLEY et al<sup>27</sup> detectou comportamento semelhante da porosidade com a maior aproximação da razão oxigênio/propano da razão de maior temperatura da chama. Segundo PLANCHE et al,<sup>21</sup> a temperatura das partículas diminui com o aumento da razão oxigênio/combustível e a velocidade aumenta com essa razão. A condição 3A foi aplicada com maior temperatura e menor velocidade, quando comparada à condição 5A. Como as médias são iguais verifica-se que na condição 3A a temperatura foi mais influente e na condição 5A a velocidade predominou. Isso mostra a interação entre a temperatura e velocidade das partículas na porosidade dos revestimentos.

A análise dos valores de porosidade para maiores distâncias de aspersão confirma a interação entre a temperatura e velocidade das partículas na porosidade. Como determinado por LUGSCHEIDER et al,<sup>22</sup> a velocidade das partículas decresce com o aumento da distância de aspersão e a temperatura aumenta. Comparando as condições de aspersão com distâncias de 200 mm e 300 mm, verifica-se que para as maiores distâncias houve aumento da porosidade. Mais especificamente, a condição 4A com menor razão oxigênio/propano e a condição 8A com razão próxima da razão de maior temperatura apresentam porosidade iguais. Isto indica que, apesar do aumento da temperatura, não houve velocidade suficiente para diminuir a

porosidade.

O efeito da granulometria do material na porosidade pode ser analisado comparando a condição 7A, de maior granulometria, com a condição 7B, de menor granulometria, aplicados com a mesma vazão dos gases e distância de aspersão de 200 mm. Analisando o gráfico apresentado por LUGSCHEIDER et al,<sup>22</sup> verifica-se que se obtêm maiores temperaturas e velocidades das partículas com o uso de menores granulometrias.

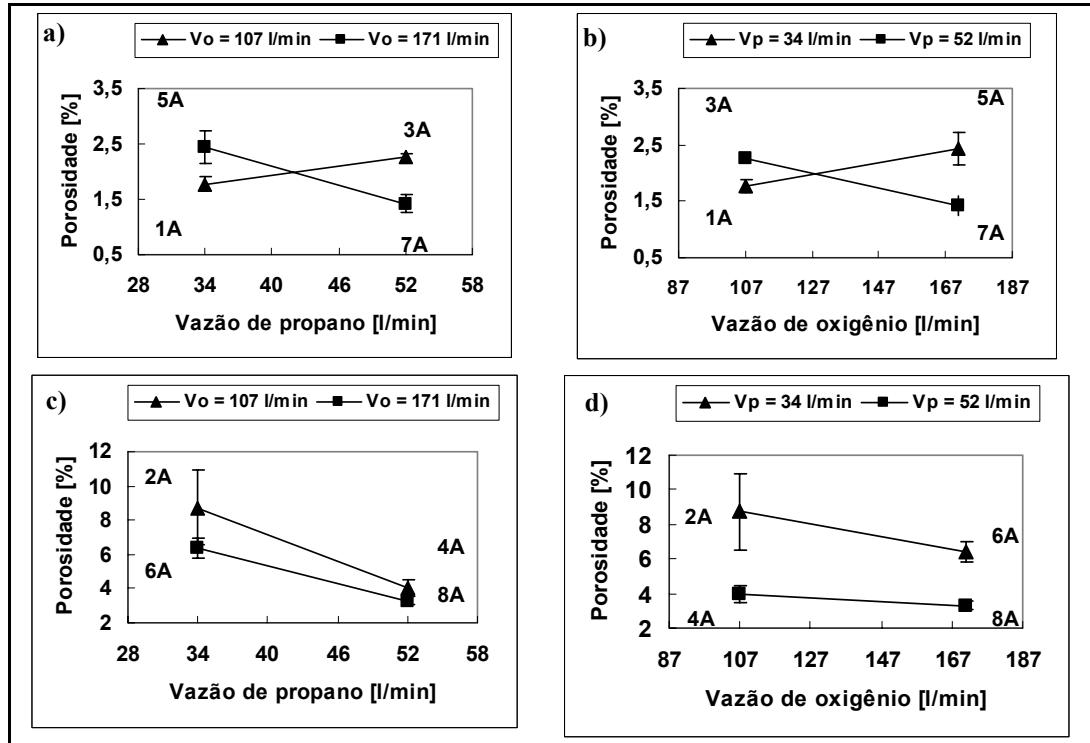


Figura 2 - Efeito da vazão dos gases e distância de aspersão na porosidade dos revestimentos: a e b) distância de 200 mm; c e d) distância de 300 mm-

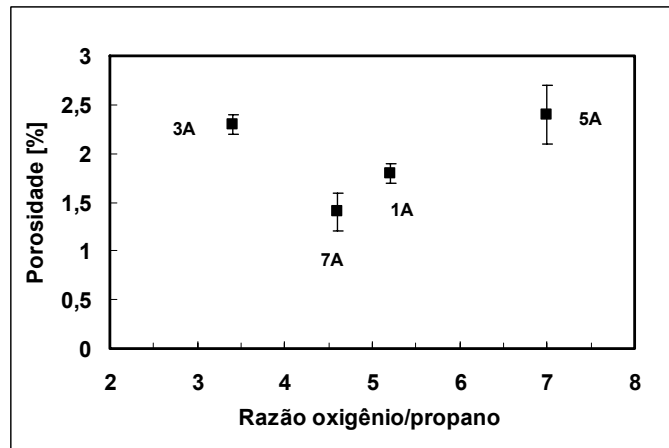


Figura 3 - Relação entre a razão oxigênio/propano e a porosidade dos revestimentos.

Portanto, a elevação da distancia de aspersão de 200 para 300 mm resultou num aumento médio de porosidade de 2 para 5,4%. Além disso, no grupo de amostras com menor porosidade (distancia de aspersão de 200 mm) o aumento da vazão de propano e de oxigênio diminuiu a porcentagem de poros, sempre que esta elevação resultava em razoes oxigênio/propano mais próximas da razão de maior temperatura. Considerando apenas a redução de granulometria de  $< 75 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  para  $< 45 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  resultou na diminuição da porcentagem de porosidade de 1,4 para 0,9 %, resultando na melhor condição de aspersão (7B) desta série de experimentos.



### 3.5. Dureza

As variações de dureza em função dos parâmetros distância de aspersão, vazão de propano e oxigênio, e granulometria do pó são mostradas na tabela 6.

**Tabela 6 - Dureza Vickers (HV<sub>0,3</sub>) dos revestimentos aspergidos**

Ensaio	D [mm]	Vp [l/min]	Vo [l/min]	*Razão O <sub>2</sub> /C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Dureza [Hv0,3]	
					Média	Erro (IC 95%)
Faixa Granulométrica < 75 µm > 20 µm						
1A	200	34	107	5,2	549	44
3A	200	52	107	3,4	526	25
5A	200	34	171	7,0	604	46
7A	200	52	171	4,6	669	32
Faixa Granulométrica < 45 µm > 20 µm						
2A	300	34	107	5,2	462	42
4A	300	52	107	3,4	451	34
6A	300	34	171	7,0	445	30
8A	300	52	171	4,6	553	52
7B	200	52	171	4,6	766	43

\* Considerando o percentual de O<sub>2</sub> da vazão de ar comprimido

A análise dos resultados de dureza com a vazão dos gases e distância de aspersão será realizada pelos gráficos apresentados na figura 4.

Em relação à variação da dureza dos revestimentos com a vazão do propano, verifica-se que, para distâncias de 200 mm (figura 4a), o aumento ocorreu somente quando a vazão de oxigênio foi de 171 l/min. Para vazões de oxigênio de 107 l/min não há variação das médias de dureza.

Na figura 4b é feita a comparação entre as médias de dureza obtidas com a variação da vazão de oxigênio, para vazões de propano de 34 l/min e de 52 l/min. Verifica-se que a dureza aumenta com o aumento da vazão de oxigênio para os dois patamares de vazão de propano.

Na figura 4c tem-se o efeito da variação da vazão de propano, para vazões de oxigênio de 107 l/min e 171 l/min e distâncias de aspersão de 300 mm. Neste caso, houve aumento da dureza com a vazão de propano, quando a vazão de oxigênio manteve-se constante em 171 l/min. Considerando o efeito da vazão de oxigênio (figura 4d) na dureza também se verifica que houve aumento da dureza com o aumento da vazão de oxigênio, porém apenas para vazão de propano de 52 l/min.

HEARLEY et al<sup>27</sup> também verificou aumento da dureza com o aumento da vazão de propileno e com a vazão de oxigênio. Para alterações na vazão de propileno, a variação da dureza foi da ordem de 70 Hv e, para alterações na vazão de oxigênio, a variação foi da ordem de 110 Hv. Segundo os autores, esse maior aumento da dureza com a variação de oxigênio é devido a maior formação de óxidos na superfície das partículas. Neste caso, a razão oxigênio/propileno foi sempre menor que razão estequiométrica. Logo, o aumento da vazão de propileno diminui a temperatura das partículas e o aumento da vazão de propileno aumentou a temperatura das partículas.

Ao contrário do trabalho apresentado por HEARLEY et al,<sup>27</sup> a análise da influência da razão oxigênio/propano deste trabalho analisa tanto razões maiores como menores que a razão estequiométrica. O efeito da variação da razão oxigênio/propano na dureza é apresentado na figura 5. Verifica-se que os revestimentos aplicados apresentaram maior dureza para razão oxigênio/propano de 4,6. Indicando que, além de ser necessária maior vazão de oxigênio para o aumento da dureza, como relatado por HEARLEY et al,<sup>27</sup> é imprescindível que a temperatura esteja em um patamar maior, para que ocorra o aumento da dureza dos revestimentos, como foi determinado por ZHAO et al<sup>28</sup>

A influência da temperatura na dureza é ratificada quando se compara os valores encontrados para diferentes granulometrias do pó. Analisando a condição de aspersão com pó de maior granulometria (7A) com a de menor granulometria (7B) verifica-se aumento significativo na dureza dessa última condição. Como determinado por LUGSCHEIDER et al,<sup>22</sup> a temperatura das partículas para pós mais finos é maior em relação ao pós de maior granulometria. Logo, os pós mais finos com maior temperatura apresentam maior dureza.

A maior dureza dos revestimentos apresentada para aplicações com maiores vazões de oxigênio e maior temperatura esta relacionada a dois fatores. O primeiro fator está relacionado com a maior facilidade de formação de óxidos na superfície das partículas, devido ao maior contato com oxigênio. O segundo fator está relacionado com a maior energia imposta às partículas, que favorece a densificação do revestimento. Com isso, segundo sugerem HEARLEY et al<sup>27</sup> e ZHAO et al,<sup>28</sup> ocorre maior coesão entre as partículas dificultando a deformação do material e, por consequência, aumentando a dureza do revestimento.

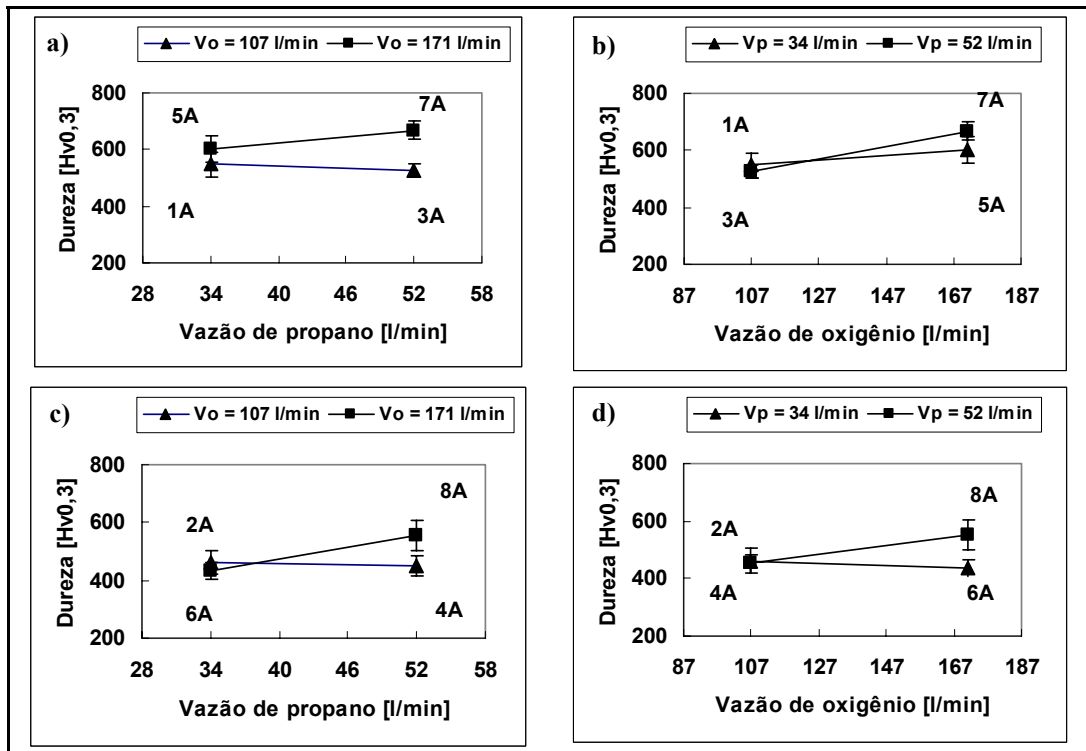


Figura 4 - Efeito da vazão dos gases e distância de aspersão na dureza dos revestimentos: a e b) distância de 200 mm; c e d) distância de 300 mm-

Seguindo o critério sugerido pelos autores, de que a resistência à penetração é dependente do estado em que se encontram as partículas dentro do revestimento, é de se esperar que tenha uma relação entre a dureza e porosidade dos revestimentos. Na figura 6 é apresentado o gráfico da relação entre a dureza e a porosidade. Por este gráfico verifica-se que a dureza diminui com o aumento da porosidade, quando a porosidade encontra-se em pequenos valores. Para grandes valores de porosidade a dureza não é influenciada. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por SUNDARARAJAN et al<sup>19</sup> na análise de revestimentos de TiMo(CN)-NiCo. Este comportamento, da dureza com a variação da porosidade, reforça a idéia da limitação da penetração com maior densificação das camadas, pois para pequenos níveis de porosidade a dureza, ou resistência à penetração, varia dependendo do nível de coesão das camadas. A partir de maiores níveis de porosidade a resistência à penetração não é influenciada pela porosidade.

Portanto, em relação à vazão dos gases pode se dizer que o aumento da vazão de propano e de oxigênio aumentaram a dureza, desde que essa elevação resultava em razões oxigênio/propano mais próximas da razão de maior temperatura.

Além disso, a elevação da porcentagem de porosidades levou a diminuição da dureza. O grupo de amostras com menor porosidade apresentou dureza media maior do que o com maior porosidade (maior distância da aspersão).

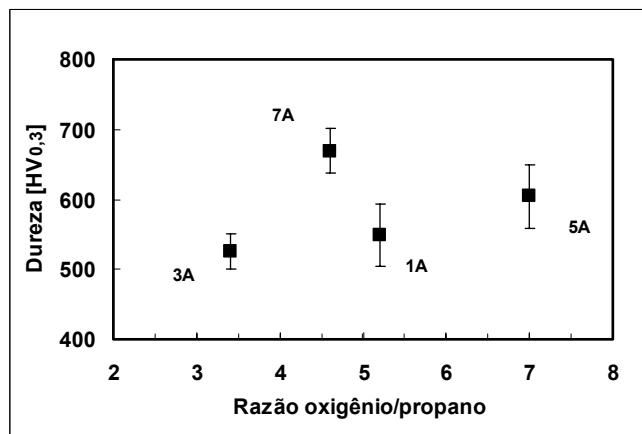


Figura 5 - Relação entre a razão oxigênio/propano e a dureza dos revestimentos

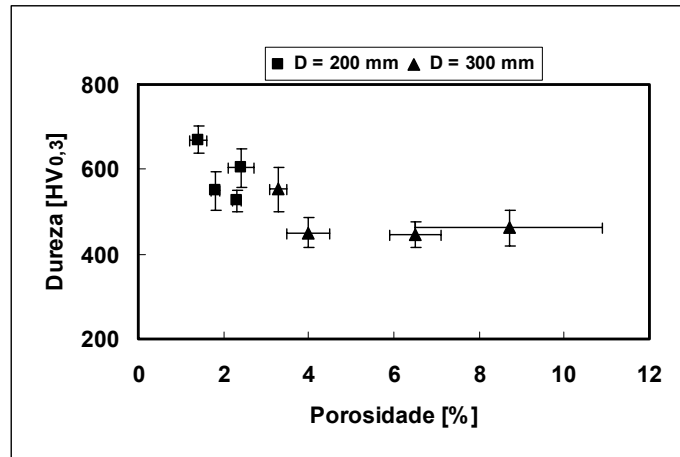


Figura 6 - Relação entre a porosidade e a dureza dos revestimentos

#### 4. CONCLUSÕES

Para as condições experimentais deste trabalho, foi possível concluir que:

- ⇒ O processo de aspersão a chama hipersônica não causou a descarbonetação do ferro fundido branco multicomponente.
- ⇒ Elevando-se a vazão de propano e diminuindo-se a distancia de aspersão resultou na diminuição da temperatura final dos revestimentos. A variação da vazão de oxigênio não afetou este parâmetro.
- ⇒ A espessura média dos revestimentos aplicados com menores distâncias de aspersão foi de aproximadamente 75% superior àquelas aplicadas com maiores distâncias. Para os revestimentos aplicados com menores distâncias a espessura foi superior em todos os casos onde a razão oxigênio/propano foi mais próxima da razão de maior temperatura da chama. Além disso, a condição que apresentou maior espessura foi a 7B, que foi aplicada com maiores vazões dos gases, menor distância de aspersão e menor granulometria.
- ⇒ A elevação da distância de aspersão de 200 para 300 mm resultou num aumento médio de porosidade de 2 para 5,4%.
- ⇒ No grupo de amostras com menor porosidade (distância de aspersão de 200 mm) o aumento da vazão de propano e de oxigênio diminuiu a porcentagem de poros, sempre que esta elevação resultava em razões oxigênio/propano mais próximas da razão de maior temperatura.
- ⇒ Considerando apenas a redução de granulometria de  $< 75 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  para  $< 45 \mu\text{m} > 20 \mu\text{m}$  resultou na diminuição da porcentagem de porosidade de 1,4 para 0,9%, resultando na melhor condição de aspersão (7B) desta série de experimentos.
- ⇒ Em relação à vazão dos gases pode se dizer que o aumento da vazão de propano e de oxigênio aumentaram a dureza, desde que essa elevação resultava em razões oxigênio/propano mais próximas da razão de maior temperatura.
- ⇒ A elevação da porcentagem de porosidades levou a diminuição da dureza.
- ⇒ O grupo de amostras com menor porosidade apresentou dureza média maior do que o com maior porosidade (maior distancia da aspersão).

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lugscheider, E., Eschnauer, H., Muller, U., Weber, TH. Quo vadis, thermal spray technology. Powder metallurgy international. n. 1, v. 23, p. 33 – 39. 1991.
- 2.. Smith, R.W., Novak, R. Advanced and applications in U.S. thermal spray technology. Powder metallurgy international. n. 3, v. 23, p. 147 – 154. 1991.
3. American Welding Society. Thermal spraying technology. Miami, 1985, 184p.
4. American Society of Materials. Handbook of thermal spray technology. Ohio: ed. J.R. Davis, Set/2004. 338p
5. Irving, B., Knight, B., Smith, R.R. The HVOF process – the hottest topic in the thermal spray industry. Welding journal. v.7, p. 25 – 30. 1993.
6. Nestler, M.C., Prenzel, G., Seitz, T. HVOF spraying vs. hard chrome plating – coatings characteristics and aircraft applications. In: Proceedings of the 15th international thermal spray conference. p. 1073 – 1078. 1998

7. Thorpe, M.L. Thermal spray – industry in transition. *Advanced materials and processes*. v.5, p.50 – 61, 1993
8. Friis, M., Persson, C., Wigren, J. Influence of particle in flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO<sub>2</sub>. *Surface and coatings technology*. v. 141, p. 115 – 127. 2001
9. Machio, C.N., Akdogan, G., Witcomb, M.J., Luyckxa, S. Performance of WC-VC-Co thermal spray coatings in abrasion and slurry erosion tests. *Wear*. v. 258, p. 434 – 442. 2005.
10. Jones, M., Horlock, A.J., Shipway, P.H., MacCartney, D.G., Wood, J.V. Microstructure and abrasive wear behaviour of FeCr-TiC coatings deposited by HVOF spraying of SHS powder. *Wear*. v. 249, p. 246 – 253, 2001.
11. Lotfl, B., Shipway, P.H., MacCartney, D.G., Edris, H. Abrasive wear behaviour of Ni(Cr)-TiB<sub>2</sub> coatings deposited by HVOF spraying of SHS derived cermet powders. *Wear*. v. 254, p. 340 – 349, 2003.
12. Boccacini, M.Jr., Sinatora, A., Microstructure and wear resistance of high speed steel for rolling mill roll. In proceedings of International Tolling Conference, Sweden, , p. 426-437. 2002
13. Kasama, A.H., Mourisco, A.J., Kiminami, C.S., Bota Fo. W.J., Bolfarini, C. Microstructure and wear resistance of spray formed high chromium white cast iron. *Materials Science and Engineering A*. v. 375 – 377, p. 589 – 594. 2004.
14. Thümmeler, F., Oberacker, R. An introduction to powder metallurgy. London, Institute of Materials, 1993, 332p
15. Koseki, T., Ichino, K., Kataoka, Y. Development of centrifugal cast roll with high wear resistance for finishing stands of hot strip mill. *Kawasaki Steel Technical Report*. n 37, p. 13 – 18, 1997.
16. Wu, H. Q.; Sasaguri, N.; Matsubara, Y.; Hashimoto, M. Solidification of Multi- Alloyed White Cast Iron: Type and Morphology of Carbides. *Transactions AFS*, v. 140, p. 103- 108. 1996
17. Matsubara, Y.; Hashimoto, M., Metallurgical aspect of multi-component white cast irons for hot rolling mill roll, in *Proceedings of 44th MWSP Conference*, Vol. XL, 2002
18. Boccacini, M. Jr.; Goldenstein, H. Solidification of High Speed Steels. *International Materials Review*, n.2, v. 46, p. 92-115. 2001
19. Sundararajan, G., Sen, D., Sivakumar, G. The tribological behaviour of detonation sprayed coatings: the importance of coatings process parameters. *Wear*. V. 258, p. 377 – 391. 2005.
20. Schwetcke, R., Krömmel, W. Möglichkeiten zur Beurteilung und Optimierung von Schichteigenschaften (Techniques for the evaluation and optimization of coating properties). In: *Proceeding 4. Kolloquium zum Hochgeschwindigkeits Flamspritzen*, GTS, Erding, Deutschland, p. 22 - 33. 1997.
21. Planche, M.P., Normand, B., Liao, H., Rannou, G., Coddet, C. Influence of HVOF spraying parameters on in-flight characteristics of Inconel 718 particles and correlation with the electrochemical behaviour of the coating. *Surface and Coatings Technology*. v. 157, p. 247 – 256, 2002.
22. Lugscheider, E., Herbst, C., Zhao, L. Parameter studies on high-velocity oxy-fuel spraying of MCrAlY coatings. *Surface and Coating Technology*. v. 108 - 109, p.16 – 23. 1998.
23. Freire, F. Avaliação de revestimentos aplicados por aspersão térmica para proteção contra desgaste de ponteiros de “risers”. *Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Mecânica*. 2002. Florianópolis. SC.
24. Heirich, P., Penszior, Ch., Meinaß., Gase zum hochgeschwindigkeits-flamenspritzen (Gase for high velocity oxi-fuel flame spraying). In: *Proceeding 4. Kolloquium zum Hochgeschwindigkeits Flamspritzen*, GTS, Erding, Deutschland, p. 44 – 54. 1997.
25. Sobolev, V.V., Guilemany, J.M., Investigation of coating porosity formation during high velocity oxy-fuel (hvof) spraying. *Materials letters*. v. 18, p. 304 – 308, 1994.
26. Sedláček, V. *Metalic surfaces, films, and coatings*. Elsevier Science Publishers. Amsterdã, 1992.
27. Hearley, J.A., Little, J.A., Surgeon, A.J. The effect of spray parameters on the properties of high velocity oxi-fuel NiAl intermetallic coating. *Surface and Coating Technology*. v. 123, p. 210-218, 2000.
28. Zhao, L., Maurer, M., Fischer, F., Dicks, R., Lugscheider, E. Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of hvof coatings of wc-cocr. *Wear*, v. 257, p. 41-46. 2004.
29. Hamatani, H., Ichiyama, Y., Kobayashi, J. Mechanical and thermal properties of HVOF sprayed Ni based alloys with carbide. *Science and Technology of Advanced Materials*. V. 3, p. 319 – 326. 2002.
30. Planche, M. P., Liao, H., Normand, B., Coddet, C. Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coatings properties using different thermal spraying processes. *Surface and Coating Technology*. v. 200, cap. 7, p. 2465 – 2473. Dezembro/ 2003.
31. American Society for Testing and Materials. ASTM E 2109: Test method for determining area percentage porosity in thermal sprayed coating. West Conshohocken, 2001.
32. American Society for Testing and Materials. ASTM E 384. Test method for microhardness of materials. Philadelphia. 2001.