

Efecto de los parámetros de aplicación en recubrimientos de Ni-Cr-B-Fe-Si obtenidos por Flame Spray

Effect of application parameters in Ni-Cr-B-Fe-Si coatings obtained by flame spray

Alejandro Oscar Miranda ¹, Hernan Gabriel Svoboda ²

¹ GTSyCM3, INTECIN, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Las Heras 2214, Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

e-mail: mirandaalejandro@gmail.com

² CONICET, Godoy Cruz 2290, Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: hsvobod@fi.uba.ar

RESUMEN

El daño superficial de componentes en servicio es un aspecto de gran interés industrial debido a los gastos asociados al recambio de ciertos componentes críticos y a los riesgos asociados a fallas. Existen diversas técnicas para generar recubrimientos que provean una mayor resistencia a un tipo determinado de daño, protegiendo de esta forma a los materiales base de sollicitaciones como temperatura, desgaste por abrasión, erosión, corrosión, etc., logrando extender su vida útil. Las técnicas de Aspersión Térmica (TS) son muy empleadas en la actualidad para la producción de recubrimientos con espesores de entre 100 y 2000 micrones. Una de las más utilizadas por su sencillez y bajo costo es la aspersión térmica por llama o Flame Spray (FS). Los parámetros de proyección, así como las condiciones de refusión, pueden afectar sensiblemente las características del recubrimiento obtenido. Las aleaciones base níquel son muy empleadas en recubrimientos que deben estar sometidas a desgaste, corrosión y/o alta temperatura [3]. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de las condiciones de proyección sobre las características microestructurales y la resistencia al desgaste de recubrimientos obtenidos por FS de una aleación Ni-Cr-B-Fe-Si. Probetas de acero al carbono se recubrieron mediante FS variando la distancia de aplicación y la cantidad de capas. Asimismo, se aplicó una refusión en horno 1060°C por 10 minutos. Sobre las muestras recubiertas bajo las distintas condiciones se analizó la microestructura, la densidad de defectos, se determinó la microdureza Vickers, se midió el espesor de recubrimiento y se realizaron ensayos de desgaste abrasivo del tipo ASTM G-65. Se observó una disminución de la cantidad de defectos al disminuir la distancia de aplicación y aumentar la cantidad de capas. El comportamiento al desgaste abrasivo mejoró al disminuir la distancia de aplicación, al aumentar la cantidad de capas y al refundir.

Palabras clave: Recubrimientos, Aspersión Térmica, aleaciones base Ni, refusión, desgaste abrasivo.

ABSTRACT

Surface damage of components in service is an issue of great industrial interest because of the costs associated to the replacement of certain critical components. There are several techniques to generate coatings, which provide increased resistance to a particular type of surface damage. In this way, it is achieved surface protection to different sollicitation such as temperature, abrasion, erosion, corrosion, etc., obtaining an extension of the useful life. Thermal spray techniques are used today for the production of coatings with thicknesses between 100 and 2000 microns. One of the most commonly used because of its simplicity and low cost is the Flame Spray (FS). The projection parameters and refusion conditions can significantly affect the characteristics of the obtained coating. Nickel base alloys are used in coatings subjected to wear, corrosion and/or high temperature. The aim of this study was to analyze the effect of projection conditions on the microstructural characteristics and wear resistance of coatings of a Ni-Cr-Fe-B-Si alloy obtained by FS. For this purpose on

steel carbon specimens, coating were obtained by varying the distance of application and the number of layers. Refuse in a furnace at 1160°C for 10 minutes was also apply. On coated samples the defect level, thickness and microstructure were analyzed. Vickers microhardness was determined and rubber wheel abrasion test ASTM G-65 type were performed. Obtaining a decrease in defect levels and better wear performance with decreasing distance of application and increase the number of layers.

Keywords: Coatings, Thermal Spray, Ni base alloys, refusion, abrasive wear.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de la industria de aumentar la productividad, existe un gran interés en el estudio de procesos y materiales, con el fin de conseguir componentes más livianos y/o de mayor vida útil, pudiendo someterlos a condiciones más severas [4], logrando sistemas de mayor rendimiento, como así también, recuperar piezas y componentes degradados. De esta forma se logran disminuir los costos de producción y mantenimiento. En este sentido el daño superficial de los distintos componentes en servicio, es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta debido a los riesgos asociados. Una de las soluciones más utilizadas a fin de minimizar este tipo de degradación es la generación de recubrimientos que provean una mayor resistencia a un tipo determinado de sollicitación, logrando proteger a los distintos componentes del sistema de sollicitaciones como temperatura, desgaste por abrasión, erosión, corrosión, etc [1].

En las últimas décadas ha tomado una gran importancia un conjunto de procesos, denominados aspersión térmica o Thermal Spray (TS), mediante los cuales un material metálico o no metálico es proyectado, en estado fundido o semi fundido, hacia una superficie, obteniendo un recubrimiento sobre la misma. De esta forma se logran recubrimiento de una amplia gama de materiales y combinaciones de ellos, con espesores de entre 100 y 2000 micrones. Dentro de las distintas técnicas de TS, una de las más utilizadas es la aspersión térmica por llama o Flame Spray (FS), debido a su sencillez, bajo costo, la posibilidad de depositar una gran cantidad de materiales sin aumentar en forma significativa la temperatura de la pieza a recubrir [2]. Ciertos materiales requieren una vez realizada la primera etapa de aplicación, una segunda etapa de refusión, mejorando de esta forma la adherencia al material base y disminuyendo la porosidad del recubrimiento, así como también mejorando las características del recubrimiento, tanto en su comportamiento al desgaste, como a la corrosión [5] [6]. Si bien estos procesos son relativamente simples, tanto los parámetros de aplicación como los de refusión tienen una gran influencia en las características finales del recubrimiento. En este sentido son escasos los estudios sistemáticos sobre el efecto de los parámetros de aplicación y refusión sobre las características del recubrimiento obtenido.

Las aleaciones en base níquel son muy utilizadas por medio de estas técnicas para lograr recubrimientos que deben estar sometidos al desgaste, corrosión y/o alta temperatura [3,7]. En particular las aleaciones Ni-Cr-B-Si-Fe, presentan un buen comportamiento al desgaste abrasivo y adhesivo con aplicaciones en equipos para perforación de petróleo, pistones y cilindros hidráulicos, entre otros [8].

El objetivo del presente trabajo fue analizar el efecto de las condiciones de proyección sobre las características microestructurales y la resistencia al desgaste de recubrimientos obtenidos por FS de una aleación Ni-Cr-B-Fe-Si.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizó un equipo de FS "Rototec 800" marca Eutectic-Castolin®, se utilizaron acetileno y oxígeno como gases de combustión con presiones de 0,7 y 3,0 bar, respectivamente. El avance fue mecanizado mediante el uso de un carro Miggytrac 1001 ESAB®, fijando la velocidad de avance en 1,1 m/min. Se recubrieron probetas de acero al carbono de 90x25x3mm previamente blastinadas, con el fin de mejorar el anclaje mecánico de las partículas proyectadas [8]. En la Figura 1 se muestra el montaje experimental utilizado.



Figura 1: Dispositivos y equipos utilizados para la aplicación del recubrimiento.

La rugosidad superficial de las probetas de acero al carbono sobre las cuales se efectuaron los recubrimientos en promedio fue de $4,8\mu\text{m}$.

Se utilizaron polvos de una aleación de Ni-Cr-B-Si-Fe como material de proyección (Eutectic Castolin 13495). En la Figura 2 se muestra una imagen SEM del polvo empleado y la microestructura de un corte transversal de las partículas del mismo.

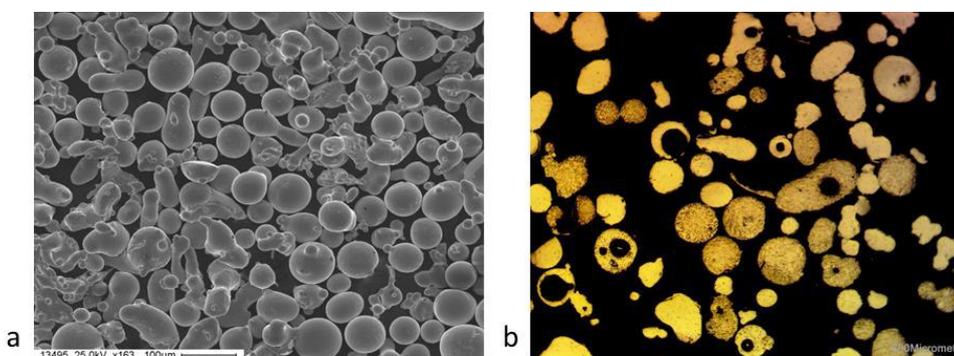


Figura 2: Imágenes del polvo empleado: a- SEM y b- corte metalográfico.

Se recubrió una serie de probetas con una distancia entre el pico de proyección y la superficie a recubrir de 35cm con 2, 4 y 6 capas. La segunda serie de probetas se recubrió con 4 capas, variando la distancia de aplicación entre 20, 25, 30 y 35 cm.

Luego las probetas se refundieron en horno a 1060°C durante 10 min, siendo esta la temperatura óptima de refundición determinada en trabajos anteriores de los autores [9,10].

Sobre el recubrimiento aplicado en las distintas probetas se realizaron mediciones de rugosidad superficial empleando un rugosímetro portátil Schwyz RU-2. Se prepararon cortes transversales para observación metalográfica sobre los cuales se realizaron las mediciones del espesor, se cuantificó la cantidad de defectos presentes empleando un software de análisis de imágenes y se caracterizó la microestructura. Asimismo, se midió la microdureza Vickers mediante un microdurómetro EmcoTest Durascan 10. Sobre la superficie se realizó un análisis mediante Difracción de Rayos-X (XRD) para identificar las fases presentes. A su vez, se realizaron ensayos de flexión en tres puntos con la superficie recubierta en la zona traccionada, a fin de analizar la adherencia del recubrimiento. Finalmente se realizaron ensayos de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65, siguiendo el método E [11].

3. RESULTADOS

3.1 Aspecto superficial

En la Figura 3a y 3b se muestran las probetas recubiertas en condición AS y RF, respectivamente.

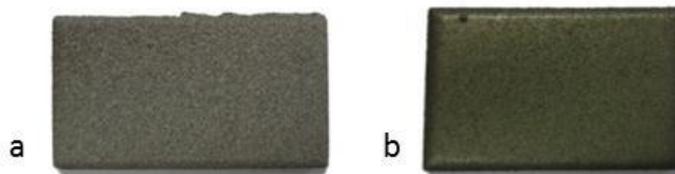


Figura 3: Aspecto superficial de las muestras analizadas: a- AS y b- RF.

Se obtuvieron recubrimientos de buen aspecto superficial. La rugosidad de la superficie de los recubrimiento en condición AS resultó entre 15-20 μ m, sin encontrar una relación con los parámetros de aplicación. Las probetas refundidas en todos los casos presentaron un buen aspecto superficial y se obtuvo un valor de 4,8 μ m como promedio de las mediciones de rugosidad superficial, mostrando una reducción significativa respecto de la condición AS.

3.2 Caracterización microestructural

La Figura 4 muestra las micrografías de los recubrimientos en condición AS, con 4 capas y variando la distancia de aplicación de 20 a 35 cm.

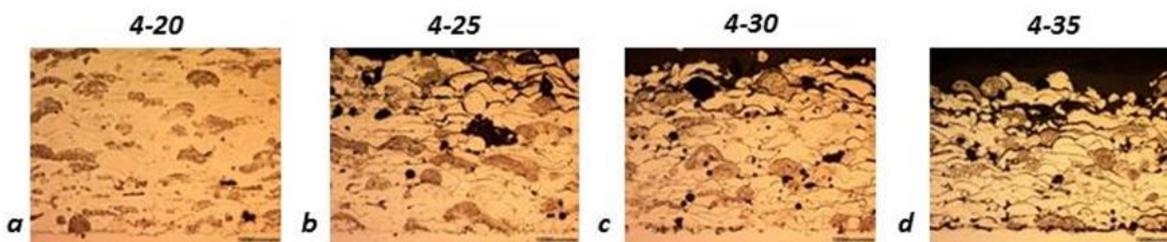


Figura 4: Micrografías de un corte transversal de los recubrimiento con 4 capas en condición as spray, aplicados a: a- 20, b- 25, c- 30, d- 35 cm de distancia de aplicación.

En todas ellas se observan los splats, pudiendo distinguirse dos fases, como así también la presencia de defectos (oxidación y/o porosidad). Estos defectos se observan en mayor proporción en las capas superiores del recubrimiento. Asimismo, se observa que el nivel de defectos disminuye y el espesor aumenta al disminuir la distancia de aplicación.

En la Figura 5 se muestran las micrografías de los recubrimientos aplicados a 35 cm de distancia de aplicación con 2, 4 y 6 capas en condición AS.

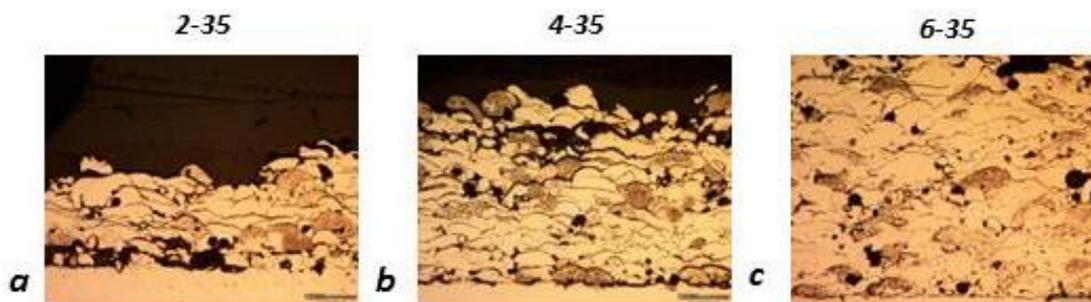


Figura 5: Micrografías de un corte transversal de los recubrimientos aplicados a 35 cm de distancia con: a- 2 capas, b- 4 capas y c- 6 capas.

Se puede observar que el espesor aumenta y la cantidad de defectos disminuye con la cantidad de capas aplicadas.

En la Figura 6 se muestra una imagen SEM donde se identifican los splats del recubrimiento en detalle.

Puede observarse que se diferencian dos tipos de partículas como las observadas en el polvo, pero en este caso deformadas por la proyección. Una de ellas presenta precipitados finos en su interior, mientras que la otra se observa libre de precipitados.

Las partículas con precipitados presentan una dureza de alrededor de 1000 HV y presentan un mayor contenido de Cr (20%), mientras que en las otras se alcanzan valores de 550 HV, con contenidos de Cr del orden del 9%. Estas observaciones son consistentes con lo determinado inicialmente en las partículas del polvo antes de ser proyectado. Esto indicaría que el mismo, no varía significativamente como consecuencia de la proyección térmica. Asimismo, no se observa una estructura de solidificación, lo que indica que no habría sido fundido.

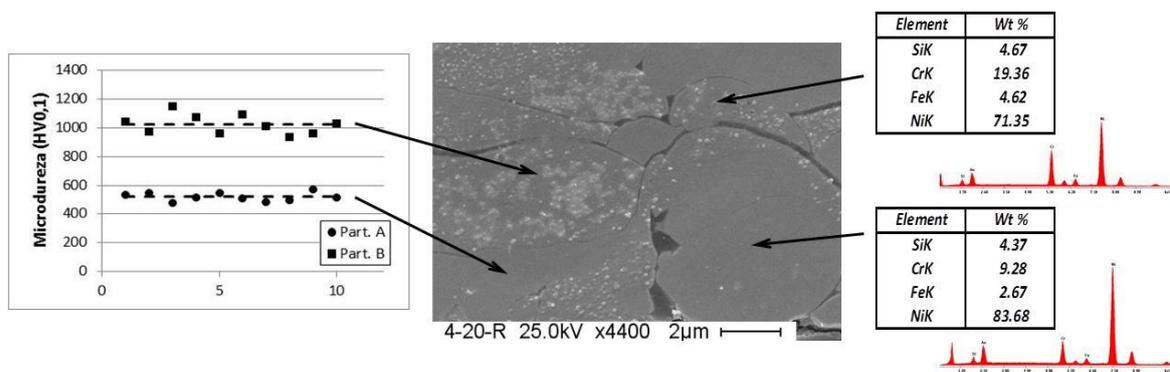


Figura 6: Detalle de los splats del recubrimiento en condición AS: microdureza, estructura y composición.

En la Figura 7 se presentan las micrografías del recubrimiento antes y después de realizar la refundición, donde se observa una reducción importante en la cantidad de defectos presentes, así como también se observa una mejora en la integridad de la interfase con el sustrato y una evolución en la microestructura.

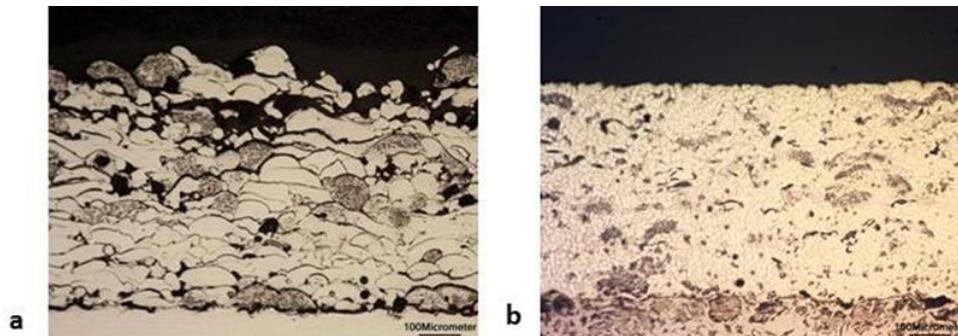


Figura 7: Micrografías de recubrimientos: a. as spray (AS) y b- refundido a 1060°C (RF).

El espesor promedio de la probeta en condición as spray resulto de 0,56mm, mientras que en la refundida fue de 0,48mm. La cantidad de defectos se redujo de un 20% en la probeta AS a un 1,7% en la probeta refundida. Esta reducción del espesor estaría asociada a la disminución de la cantidad de defectos (porosidad) lo cual generaría un recubrimiento más compacto. Desde el punto de vista microestructural, se observa la pérdida de las interfaces entre splats observada en la condición AS y la coalescencia de los precipitados, formado partículas de mayor tamaño.

En la Figura 8 se observan los espectros de XRD de las muestras en condición AS y RF.

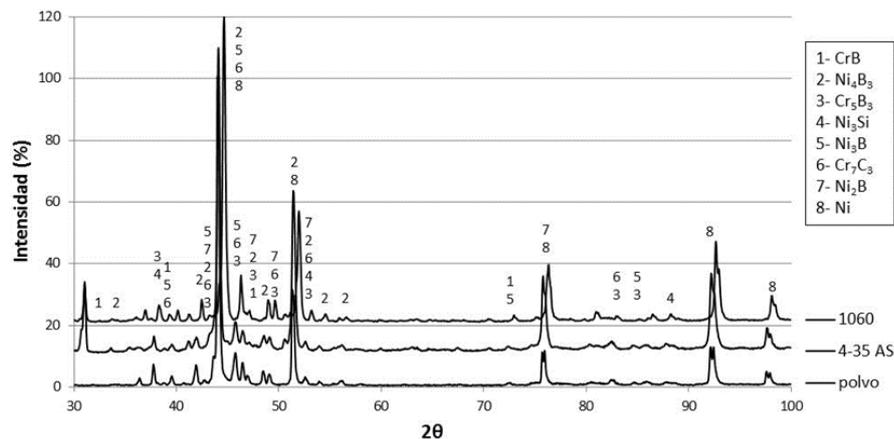


Figura 8: Espectros XRD del polvo y de la muestra 4-35 en las condiciones AS y RF.

En las diferentes condiciones analizadas se identificaron diversas fases como Ni- γ , Ni_3B , FeNi_3 , Cr_{23}C_6 , Ni_3Si y CrB . No se observaron variaciones significativas de las fases presentes entre el polvo y las muestras recubiertas en ambas condiciones (AS y RF). Las fracciones de Ni_3B , CrB y Ni_3Si aumentarían con la refusión. Asimismo, se observa un leve corrimiento de los picos hacia la derecha en la condición RF, respecto del polvo y la condición AS. Esto estaría asociado a una variación en el estado de tensiones residuales del recubrimiento.

Debido a la baja adherencia entre los splats no fue posible medir microdureza en forma global en el recubrimiento en condición AS, la microdureza medida en cada uno de los splats promedian los 1000 y 500HV para los dos tipos de partículas observadas, semejante a los valores medidos en el polvo antes de ser proyectado. En el recubrimiento refundido la microdureza medida fue de 343HV, observándose una fuerte reducción de la dureza en la condición RF.

3.3 Ensayo de flexión

En la Figura 9 se observa el ensayo de plegado realizado sobre el recubrimiento en condición AS y sobre la probeta RF. Se observa una mejora sustancial en la adherencia del recubrimiento con el sustrato al realizar la refusión.



Figura 9: Ensayo de plegado realizado sobre probetas as spray y refundida a 1060°C.

Esta observación estaría asociada a lo observado en el corte metalográfico (Figura 7), donde se observa una eliminación de defectos en la interfase entre el recubrimiento y el material base. Asimismo, se considera la existencia de interdifusión en dicha zona, fortaleciendo la interacción metalúrgica entre ambos materiales.

3.4 Desgaste abrasivo

En la Figura 10 se observan los resultados de los ensayos de desgaste abrasivo en función de la distancia de

aplicación.

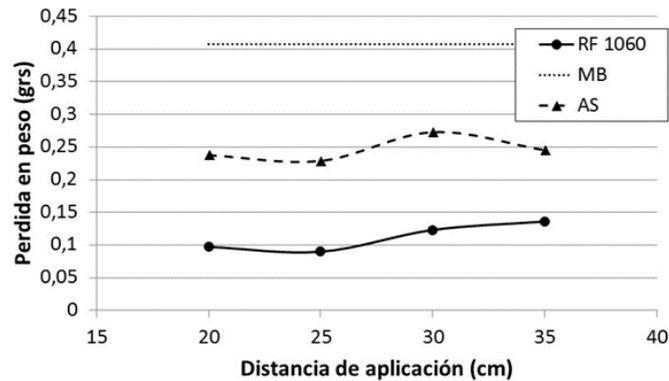


Figura 10: Pérdida en peso en el ensayo de desgaste abrasivo ensayos de desgaste en función de la distancia de aplicación, para probetas con 4 capas en condición AS y RF.

Puede verse una mejora en las propiedades con respecto al material base para la condición AS, la que luego es mejorada para la condición RF. En general se observa que la resistencia al desgaste mejora al disminuir la distancia de aplicación.

En la Figura 11 muestra los resultados en función de la cantidad de pasadas, en ambos casos se presentan los valores de referencia para el material base y los recubrimientos en condición AS.

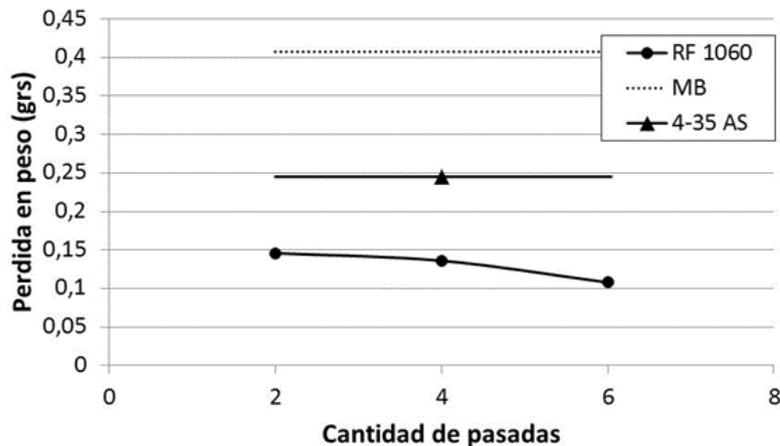


Figura 11: Pérdida en peso en el ensayo de desgaste abrasivo en función de la cantidad de capas, para probetas con 35 cm de distancia de aplicación en condiciones AS y RF.

Nuevamente puede verse una mejora en las propiedades con respecto al material base para la condición AS, la que luego es mejorada para la condición RF. En general se observa que la resistencia al desgaste mejora al aumentar la cantidad de capas aplicadas.

En la Figura 12 se muestran las superficies de desgaste generadas durante los ensayos de desgaste abrasivo de las distintas configuraciones analizadas.

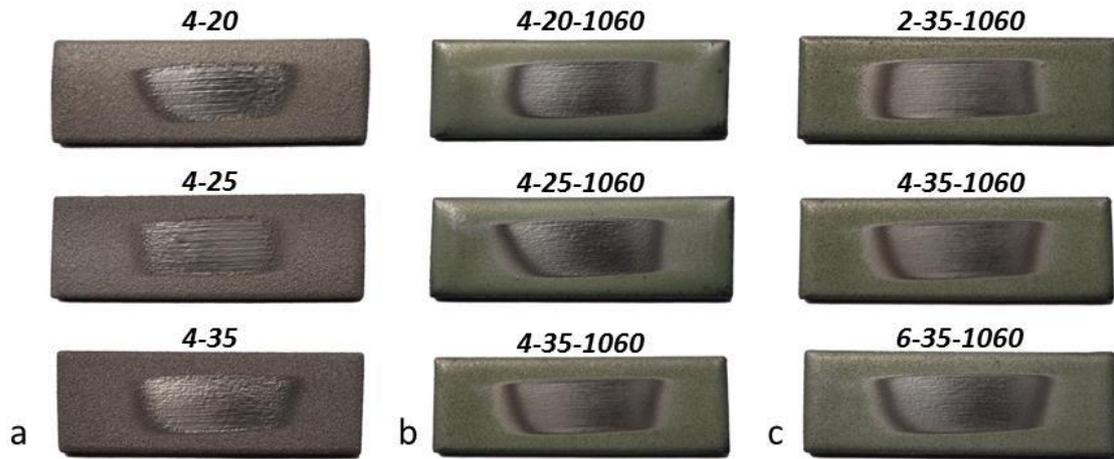


Figura 12: Superficies de desgaste de probetas ensayadas con distintas distancias de aplicación y cantidad de capas en las condiciones AS y RF.

4. DISCUSIÓN

4.1 Efecto de los parámetros de aplicación

En las Figuras 13 y 14 se pueden observar la evolución del espesor del recubrimiento y del nivel de defectos con la distancia de aplicación.

Puede verse que el espesor varía entre 0,58 para 35 cm y 0,90 mm para 20 cm de distancia. En cuanto al porcentaje de defectos medidos, los mismos disminuyeron de 20% para 35 cm a 1% para 20 cm, mostrando una fuerte mejora para esta última condición. El aumento de defectos al aumentar la distancia de aplicación estaría asociado, a la disminución de energía con la que las partículas llegan a la superficie [5].

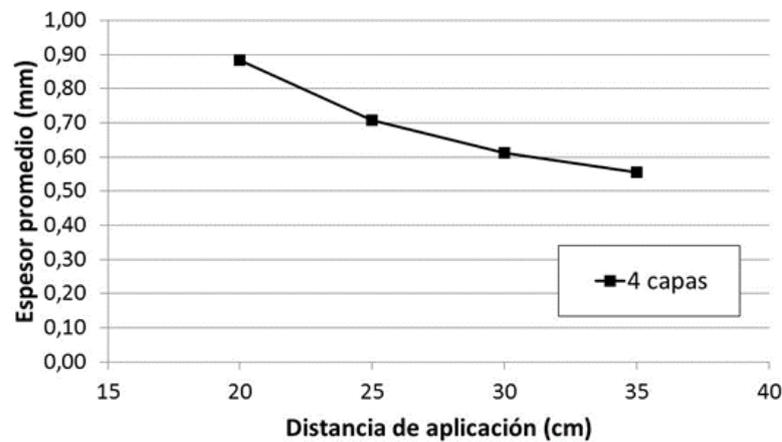


Figura 13: Espesor promedio del recubrimiento en función de la distancia de aplicación, para 4 capas de recubrimiento.

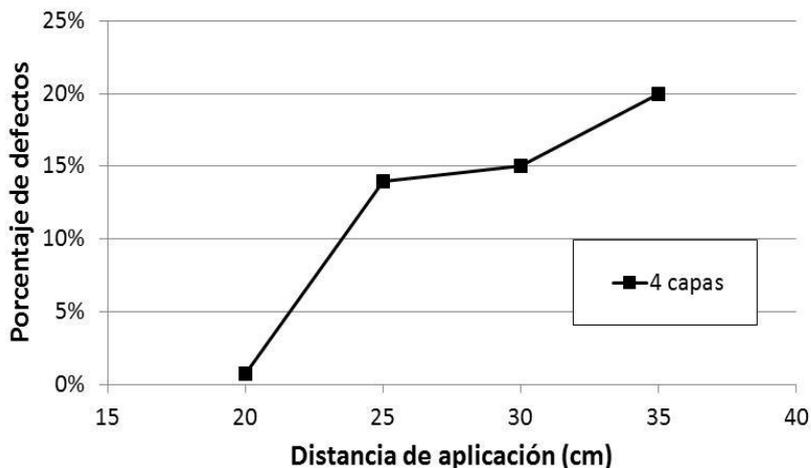


Figura 14: Porcentaje de defectos del recubrimiento en función de la distancia de aplicación, para probetas con 4 capas de recubrimiento.

En las Figuras 15 y 16, se puede ver la evolución del espesor del recubrimiento y del nivel de defectos en función de la cantidad de capas aplicadas.

El espesor varió de 0,39 mm para 2 capas, hasta 0,84 mm para 6 capas, obteniéndose una tasa de deposición de unos 0,15 mm por capa. Por otro lado el nivel de defectos disminuyó de 25% para dos capas hasta 15% para 6 capas. Este efecto estaría asociado al efecto de recalentamiento de la capa base al aplicar una nueva capa, lográndose un recubrimiento cada vez más compacto.

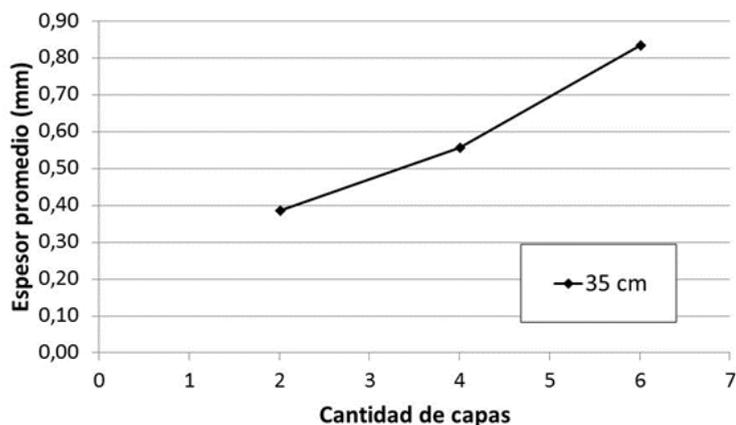


Figura 15: Espesor promedio de recubrimiento en función de la cantidad de capas aplicadas, para 35 cm de distancia de aplicación en condición AS.

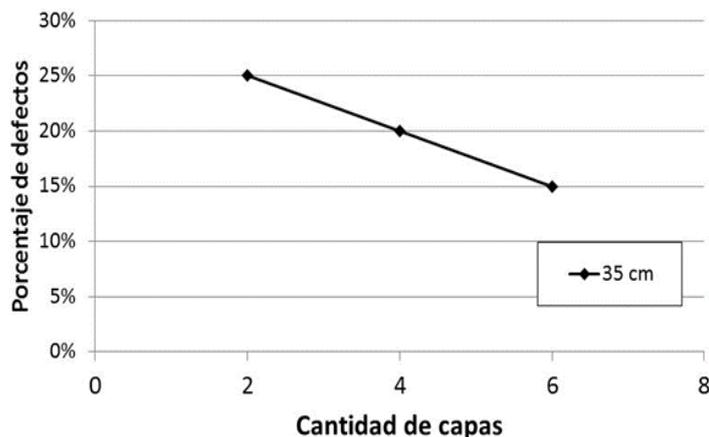


Figura 16: Porcentaje de defectos en función de la cantidad de capas para aplicadas, para 35cm de distancia de aplicación en condición AS.

En cuanto al comportamiento frente al desgaste abrasivo en condición AS se observa que es significativamente mejor que el material base, reducción de la pérdida en peso prácticamente a la mitad.

Asimismo, dicho comportamiento mejora levemente al disminuir la distancia de aplicación. Dicha mejora estaría asociada a la mayor integridad que presenta el recubrimiento al disminuir el nivel de defectos. El mismo efecto se observa en función de la cantidad de capas aplicadas. Sin embargo la mejora significativa se logra al realizar la refusión de dichos recubrimientos, reduciendo en un factor 4 la pérdida en peso respecto del material base. En esta condición se observa nuevamente la influencia favorable de la reducción de la distancia de aplicación. Es de hacer notar que la dureza del recubrimiento en condición RF es menor que para la condición AS. Esta mejora estaría asociada a la formación de una capa más compacta y homogénea, con una mayor y mejor vinculación al material base, con una matriz relativamente blanda y partículas duras de mayor tamaño dispersas, sin defectos. En cuanto al efecto de la cantidad de capas aplicadas, nuevamente se observa la mejor configuración para la condición RF con mayor cantidad de capas aplicadas.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se obtuvieron recubrimiento por FS de una aleación Ni-Cr-Si-B-Fe sobre probetas de acero al carbono, bajo distintas condiciones de aplicación.

Se observó que la reducción de la distancia de aplicación (35 a 20 cm) produce una mejora en la calidad del recubrimiento (disminución de defectos de 20 hasta 1%) y un aumento en el espesor del recubrimiento. Esto estaría asociado a la mayor energía de las partículas al disminuir la distancia de aplicación en el rango analizado. Asimismo, el aumento de la cantidad de capas aplicadas también mejora la calidad del recubrimiento, generando un efecto similar al observado al reducir la distancia de aplicación, pudiendo producirse recubrimientos del orden de 1 mm. En este caso las capas sucesivas generarían un racalentamiento del material subyacente mejorando sus características. El comportamiento frente al desgaste abrasivo en la condición AS presentó una mejora significativa respecto del material base, reduciendo a la mitad la pérdida en peso. Adicionalmente, se observó una mejora leve de dicho comportamiento al reducir la distancia de aplicación, lo que estaría asociado a la disminución del nivel de defectos del recubrimiento (hasta 15%), sin embargo se conservan las interfases entre los splats.

La refusión presenta un fuerte efecto sobre la disminución del nivel de defectos del recubrimiento, logrando una mayor homogeneidad del mismo, la coalescencia de los precipitados y una mejor interacción con el material base. La dureza disminuye hasta unos 350HV, sin embargo el comportamiento al desgaste abrasivo presenta los mejores resultados reduciendo en un factor 4 la pérdida en peso del material base. Se observó un efecto favorable del aumento de la cantidad de capas aplicadas y de la reducción de la distancia de aplicación también para la condición refundida.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Eutectic-Castolin por la donación de los polvos, a la Universidad de Buenos Aires por el apoyo económico y al Laboratorio de sólidos amorfos (INTECIN) por la realización de los es-

pectros de XRD. Asimismo, agradecen al Laboratorio de Microscopia Electrónica – INTI Mecánica por las imágenes SEM.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] KEELER, S., KIMCHI, M. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0*, World Auto Steel, 2014.
- [2] BEAUMONT, R.A. *Determining the Effect of Strain Rate on the Fracture of Sheet Steel*, PhD Thesis, Universidad de Warwick, 2012.
- [3] SCOTTI, A., REIS, R.P. *Fundamentos e prática da soldagem a plasma*, 1 ed, Artliber, 2007.
- [4] DAVIS, J.R. *Handbook of thermal spray technology*, ASM international, 2004.
- [5] BERGANT, Z., TRDAN, U., GRUM, J. “Effect of high-temperature furnace treatment on the microstructure and corrosion behavior of NiCrBSi flame-sprayed coatings”, *Corrosion Science*, v.88, pp.372-386, noviembre 2014.
- [6] NAVAS, C., COLAÇO, R., DAMBORENEA, J., *et al.*, “Abrasive wear behaviour of laser clad and flame sprayed-melted NiCrBSi coatings”, *Surface & Coatings Technology*, v.200, pp.6854-6862, Agosto 2006.
- [7] PAWLOWSKI, L. *The science and engineering of thermal spray coatings*, 2 ed., Francia, 2014.
- [8] CASTOLIN EUTECTIC. Data Sheet “Eutectic 13495”, 2007.
- [9] MIRANDA, A., SVOBODA, H., “Efecto de la temperatura de refusión sobre las características de recubrimientos por Proyección Térmica de una aleación Ni-Cr-B-Si-Fe”, In: *5º Encuentro de Jóvenes Investigadores en Ciencia y Tecnología de Materiales*, 104-G-4, Tandil, Octubre 2015.
- [10] MIRANDA, A., SVOBODA, H. G. “Efecto de la temperatura de refusión de recubrimientos por aspersión térmica sobre la resistencia al desgaste abrasivo”, In: *3º International Workshop on Tribology*, Asociación Argentina de Tribología, Mar del Plata, Mayo de 2015.
- [11] ASTM G 65-00, “Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus”, ASTM International (2000).