

# Capítulo 4

## CONCLUSIONES

Las conclusiones están organizadas de acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización morfológica, mecánica, tribológica, corrosiva y térmica de los recubrimientos.

### **4.1 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y MICROESTRUCTURAL DE LOS RECUBRIMIENTOS**

Los recubrimientos de “circona-alúmina”, “8YSZAglomerada” y “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>Aglomerada” fueron elaborados, los primeros, a partir de polvos comerciales, y los otros dos a partir de polvos comerciales nanométricos aglomerados en el laboratorio. Se depositaron sobre una capa de anclaje de una aleación base Ni y sustratos de acero AISI 1020 por la técnica de proyección térmica por combustión. Lo más importante se concluye en los siguientes puntos:

- El recubrimiento de “circona-alúmina” que exhibió el menor espesor con respecto a los otros recubrimientos fue el obtenido con una llama oxidante a 10 cm (O10), lo cual se debe a que a esta distancia de proyección las partículas tienen una mayor interacción con la llama, lo que ocasiona que gran parte de ellas sean fundidas o semifundidas y al colisionar con el sustrato se aplanen formando *splats* muy delgados. Mientras que el que exhibió un mayor espesor fue el obtenido con una llama superoxidante a 8 cm, debido a que la distancia en la cual las partículas interactúan con la llama, es muy corta y pocas partículas alcanzan su punto de fusión, la

presencia de un mayor porcentaje de partículas semifundidas hace que el recubrimiento tenga un espesor mayor.

- En todos los casos se observaron zonas bimodales dentro de los recubrimientos, formadas por partículas totalmente fundidas y partículas más pequeñas semifundidas. Este resultado es importante porque los parámetros elegidos permiten mantener las estructuras nanométricas de los polvos, las cuales beneficiarán su comportamiento en ambientes agresivos de temperatura y desgaste.
- El recubrimiento que presenta una mayor uniformidad es el obtenido con una llama superoxidante a 10 cm, en él se observan *splats* en forma de discos pequeños que corresponden a las partículas más pequeñas que se fundieron completamente, dando lugar a un recubrimiento más liso, tal como lo predijo el valor de K-Sommerfeld obtenido a partir de la simulación con el *software* Jets et Poudres.
- La morfología del recubrimiento de  $Al_2O_3$  *Aglomerada*, muestra un ordenamiento en los *splats*, lo que a su vez se ve reflejado en las lamelles. Exhibe una morfología bimodal, la cual es evidente en la superficie del recubrimiento, de donde se concluye que el método y los parámetros de aglomeración fueron los adecuados para conseguir los polvos aglomerados y que los parámetros de proyección elegidos para la obtención de los recubrimientos permiten preservar las estructuras nanométricas de los polvos de partida.
- La morfología del recubrimiento 8YSZ *Aglomerada*, evidencia la presencia de zonas bimodales, lo que permite concluir que los parámetros de aglomeración fueron los adecuados, sin embargo la presencia de muchas partículas parcialmente fundidas no facilitó la mojabilidad de las partículas con el sustrato y no permitió el ordenamiento de los *splats*.
- La porosidad disminuye con la distancia de proyección para recubrimientos obtenidos con llamas SO, lo cual se justifica por el hecho de que a una menor distancia, menor es el tiempo que tiene la partícula para interactuar con la llama, y por tanto un mayor número de partículas parcialmente fundidas que, al acomodarse sobre el sustrato o las capas previamente depositadas forman porosidad dentro del recubrimiento debido a la mala acomodación, dan como resultado una mayor porosidad y un mayor número de estructuras bimodales..

- La microestructura de los recubrimientos de circona-alúmina presentaron lamellas de color gris oscuro, claro y blanco que corresponden a la presencia de alúmina, circona y a una mezcla entre circona-alúmina respectivamente. De igual forma aparecen partículas de circona sin fundir o semifundidas. El refinamiento de los espectros de difracción de rayos-X DRX, permitió establecer y cuantificar la presencia de las fases  $m - ZrO_2$ ,  $t - ZrO_2$ ,  $c - ZrO_2$ ,  $\alpha - Al_2O_3$ ,  $\gamma - Al_2O_3$  y  $\eta - Al_2O_3$  en los recubrimientos, donde las fases t y c de la circona son retenidas gracias a la presencia de óxidos de itrio y hafnio, además permitió determinar la presencia de las zonas de amorficidad en los recubrimientos.
- El refinamiento del recubrimiento de 8YSZ<sub>Aglomerada</sub>, evidenció una estructura totalmente cristalina, resultado que es reportado también por otros investigadores.
- Los recubrimientos que presentan mayor porcentaje de fase cúbica y tetragonal de la circona son O9 y SO9, lo que permite concluir que la distancia de 9 cm es apropiada para retener estas fases en la circona a la temperatura ambiente. Los recubrimientos que presentan mayor porcentaje de la fase gamma de la alúmina son O10 y SO10, de donde se concluye que a una distancia de proyección de 10 cm ocurre una mayor transformación de la fase alpha a la gamma de la alúmina. En los recubrimientos conseguidos con llamas SO se observa que la fase  $\gamma - Al_2O_3$  aumenta con la distancia de proyección, lo que se justifica por una mayor permanencia de los polvos en la llama y, por tanto, una mayor transformación de fase. En general, los recubrimientos SO9 y SO10 muestran menor porcentaje de fase  $m - ZrO_2$  y de fase  $\alpha - Al_2O_3$ , lo que indica que, para estas condiciones, un mayor porcentaje de partículas alcanzó el punto de fusión y por lo tanto una mayor transformación en la fase.

## 4.2 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS RECUBRIMIENTOS

- El recubrimiento SO8 presenta el mayor porcentaje de fase alpha, que es la fase más dura de la alúmina, y mayor grado de porosidad, lo que hace que el valor efectivo de la dureza baje. En el caso del recubrimiento SO10, este

tiene el porcentaje de fase gamma más bajo, sin embargo es 64 % menos poroso que el SO8, lo que hace que la dureza aumente, de esta manera se compensa la porosidad y el porcentaje de fase blanda y dura de la alúmina, lo que da como resultado valores de dureza similares.

- El módulo de Weibull muestra que la microdureza para este tipo de recubrimientos es bastante uniforme, pues en todos los casos se obtiene una constante de Weibull superior a 10, teniendo en cuenta que para cerámicos avanzados esta constante está entre 10 y 20. No ocurre lo mismo con el módulo de elasticidad y la tenacidad a la fractura, aunque el recubrimiento SO8, tiene un módulo cercano a 10, lo que indica que esta propiedad es más uniforme que en los otros recubrimientos.

### 4.3 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS RECUBRIMIENTOS

- De acuerdo con los resultados de la difusividad y conductividad térmica, se concluye que el recubrimiento con mayor porosidad SO8, es el que indica una menor difusividad térmica y una conductividad térmica más baja con respecto a los otros recubrimientos, lo que es de esperarse, ya que la porosidad produce una disminución en la conductividad térmica.
- En conclusión, al comparar la conductividad térmica del acero AISI 1020 de 51,9 ( $W/mK$ ), con la conductividad más alta del recubrimiento SO10 de 13,98 ( $W/mK$ ), se encuentra que este último aísla al sustrato 3.7 veces y el recubrimiento que tiene una menor conductividad térmica, el SO8 de 5,94 ( $W/mK$ ), aísla al sustrato 8.7 veces.
- Con respecto a los recubrimientos  $Al_2O_3$ *Aglomerado* y 8YSZ*Aglomerado*, el de circonita presenta una mayor conductividad térmica, lo cual se debe a que este recubrimiento tiene muchos defectos de apilamiento y de mojabilidad y muestra grietas que atraviesan las lamelas desde el sustrato hasta la superficie, además es delgado y poco uniforme, mientras que el recubrimiento de  $Al_2O_3$ *Aglomerado*, indicó una buena conductividad térmica de 7,23  $W/mK$ , gracias a la uniformidad de su morfología.

#### 4.4 CONCLUSIONES RELACIONADAS CON LA CARACTERIZACIÓN CORROSIVA DE LOS RECUBRIMIENTOS

- Para los recubrimientos realizados con llama superoxidante, la resistencia a la polarización se incrementa notablemente al aumentar la distancia de proyección, lo que indica un mejoramiento en la capacidad de protección a la corrosión del material, hecho que se observa en la morfología de los recubrimientos, donde a mayor distancia de proyección, mejor es la morfología superficial y, por ende, menor porosidad. Caso contrario se infiere para los recubrimientos realizados con llama oxidante, donde se aprecia que a menor distancia de proyección mayor es la resistencia a la polarización. Además, se nota el efecto de los dos tipos de metal (Ni y Acero), ya que se aprecian dos elementos de fase constante, el primero entre 100 y 1  $kHz$  y el segundo entre 1 y 0  $Hz$ , esto indica que el Ni está formando su propio elemento de fase constante.
- El recubrimiento de  $Al_2O_3$  *Aglomerado*, logró una buena conductividad térmica de 7,23  $W/mK$ , y una impedancia electroquímica de 194  $k\Omega$ , gracias a su morfología uniforme. Estas propiedades lo dejan ver como un recubrimiento con potencial para ser usado como aislante térmico en ambientes corrosivos.

