

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones Generales

El dispositivo construido para la medición de deformaciones, deflexiones y curvaturas de probetas tratadas con recubrimientos térmicos demostró tener alta eficiencia y repetibilidad. La eficiencia se pudo cotejar a partir de la comparación hecha con los datos de curvatura obtenidos de Stony Brook. El error en la comparación de los datos obtenidos en los laboratorios de Stony Brook University versus los datos obtenidos con el dispositivo construido fue menor al 8% lo cual es un valor bajo dado la alta sensibilidad del proceso de medición. Además, se analizaron los módulos de Young *in-plane* obtenidos con ambos métodos. Se encontró que los módulos eran muy parecidos con un 1,6% de error entre los valores referenciales (Stony Brook) y experimentales. Esta alta similitud permitió garantizar la validez de los datos. Por otro lado, todos los datos de curvatura vs temperatura obtenidos durante la adquisición de datos mostraron tener una linealidad alta siendo en todos los casos superior al 97%. Ésto corrobora no solo el modelo teórico -que ya ha sido verificado anteriormente- sino que permite confirmar la validez del método de medición.

En general, los análisis y estudios acerca del método de la curvatura pa-

ra determinar el módulo del recubrimiento siempre se han limitado al detalle unidimensional dejando de la lado la parte bidimensional y tridimensional. Los resultados obtenidos a través de este estudio permiten concluir que el módulo teórico se puede extender a dos y tres dimensiones sin dificultad y que el módulo de Young *in plane* obtenido para una pieza unidimensional (cuyo ancho 10 veces menor al largo) es el mismo independientemente de la geometría de la pieza. Es decir, el módulo de Young del recubrimiento de dos piezas de diferentes geometría será el mismo siempre que éstas se hayan realizado bajo el mismo proceso. Esto garantiza que se puedan utilizar muestras unidimensionales para pronosticar o prever, mediante simulaciones, las deformaciones y perfiles de esfuerzo en piezas de geometrías más complejas y diversas. Esto se concluye a partir del hecho de que lo módulo de elasticidad obtenidos para las diversas probetas fue relativamente el mismo con una media de $96GPa$ una desviación estándar menor a $3GPa$. Además, a esto se suma el hecho de que tanto las deformaciones como los perfiles de esfuerzos teóricos y experimentales coinciden con los obtenidos por la simulación de elementos finitos. En el caso de las probetas cuadradas y alargadas, la simulación corrobora que el esfuerzo σ_{xx} fuese igual al σ_{zz} . En la práctica, esto se corroboró al tener curvas temperatura-curvatura iguales en todos los ejes de medición. Esto permite, de alguna manera, validar el modelamiento de piezas con TR en Elementos Finitos como una técnica para determinar las deformaciones y condiciones de esfuerzos a partir del conocimiento del módulo de Young *in-plane* obtenido por métodos experimentales. Se deberá tener especial cuidado con las condiciones de borde y los cambios bruscos de geometría que son concentradores de esfuerzos que pueden generar condiciones de carga elevados que pueden llevar a la falla del material.

A partir de la simulación de P-3D recubierta por ambos lados se pudo advertir el efecto del recubrimiento completo de la pieza. En las aplicaciones más usuales,

el recubrimiento se realiza sobre todas las caras de la pieza. Al hacerlo, se producen una reducción en la deformación de las piezas compensado por un aumento de los esfuerzos. Es decir, el recubrir la pieza por ambos lados hace que los esfuerzos durante operación se eleven considerablemente. Se debe entonces tener en cuenta este factor durante el procesamiento de tal modo que se pueda encontrar una combinación de materiales y de variables físicas del proceso que permitan reducir esfuerzos residuales y favorecer el desempeño de la pieza en condiciones de operación.

5.2. Limitaciones y Recomendaciones

Si bien los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios no hay dudas que llegar a ellos no fue del todo sencillo por diversos factores que valen la pena mencionar.

1. En primer lugar, el primer inconveniente que se tuvo fue durante la calibración del dispositivo debido a las diferentes referencias a tierra que se tenían entre los componentes y de modo especial, en la termocupla. La termocupla es un instrumento que genera una diferencia de potencial que no es inmune a efectos parásitos; además, al exponerla directamente al contacto con otro material metálico se generan potenciales no deseables que afectan la precisión de la medición. Para evitar estos inconvenientes, se decidió aislar eléctricamente la punta de la termocupla utilizando una capa delgada de cemento de alta temperatura. Esto permitía tener un aislamiento eléctrico sin afectar al referencia térmica. En muchas ocasiones, tras el uso, este aislamiento se pierde y tiene que ser reemplazado ya que de lo contrario los valores de temperatura medidos por la termocupla fluctúan considerablemente. Se sugiere tener siempre en cuenta este factor para evitar problemas.
2. Por otro lado, se debe cuidar siempre que las piezas estén sujetas firmemente

y que los resortes estén pre-cargados por igual. Caso contrario al elevarse la temperatura se generan movimientos que pueden afectar la medición. Especialmente, se debe tener cuidado de no calentar directamente los resortes ya que su expansión puede generar un par de torsión y desplazar la pieza. En cuanto a la medición de piezas irregulares se debe asegurar que el anclaje esté muy bien dispuesto ya que las deformaciones son irregulares y pueden generar desplazamiento y rotaciones de magnitudes considerables.

3. Además, se debe tener cuidado al calentar las piezas, de hacerlo de modo uniforme y a una tasa de calentamiento lenta para mantener el proceso controlado. Es necesario además, buscar que las condiciones del ambiente sean favorables evitando la generación de convección forzada o de cambios de luminosidad brusca durante el proceso de adquisición de datos.
4. Asimismo, se debe comenzar el proceso de adquisición de datos cuando la temperatura de la probeta ha disminuido por lo menos $10C^{\circ}$ por bajo del máximo alcanzado. Esto permitirá que los gradientes de temperatura se hayan dispersado y que la temperatura a lo largo de toda la placa sea aproximadamente la misma.
5. Por último, el factor más importante radica en la calidad de la probeta. Las dimensiones de las probetas deben ser menores que el espacio de trabajo del dispositivo y deben mantener una uniformidad en el espesor del recubrimiento. Si el recubrimiento no es uniforme a lo largo de la pieza, la medición de curvatura resultará complicada ya que obligará a buscar una trayectoria de espesor constante y por ende, reducirá eficiencia al proceso. Además, los valores de curvatura perderán linealidad y precisión. En el caso de que el método directo de medición de curvatura no presente un desempeño adecuado, se podrá probar con los otros métodos detallados en la parte introductoria. La falta de regularidad u homogeneidad tiene una

alto efecto sobre el método directo pero no sobre los métodos de curvatura a partir de uno o tres puntos. Se sugiere usar estos métodos alternativamente según se presenten las circunstancias.

Capítulo 6

Bibliografía

- [Beer and Johnston(2009)] Beer and Johnston. *Mechanics of materials*. 2009.
- [Chung(1990)] et. al. Chung, C. Realistic modeling of edge effect stresses in bimaterial elements. *Department of Mechanical and Aerospace Engineering. North Carolina State University.*, 1990.
- [Davis(2004)] Joseph R. Davis. *Handbook of Thermal Spray Technology*. TSS, 2004.
- [Dictionary(2014)] Dictionary. Gui, 2014. URL <http://dictionary.reference.com/browse/GUI>.
- [Intelitek(2008)] Intelitek. *Controller USB-Pro User manual*, 2008.
- [Kanthal(2002)] Kanthal. *Thermostatic bimetal handbook*, 2002.
- [Martinez(2013)] Daniel De Leon Martinez. *Stress tensor*, 2013.

- [Matejicek and Sampath.(2002)] J. Matejicek and Sampath. In situ measurement of residual stress and elastic moduli in thermal sprayed coatings. (part i and ii). *actamat-journals*, 2002.
- [MatWeb(2014)] MatWeb. Matweb: Material properties, 2014. URL <http://www.matweb.com/>.
- [Montgomery(2009)] Douglas Montgomery. *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería*. Limusa Wiley, 2009.
- [Princeton(2014)] Princeton. Cte, 2014. URL http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Coefficient_of_thermal_expansion.html.
- [Stasa(1986)] F.L y B.J. Torby Stasa. *Applied Finit Element Analysis for Engineers*. CBS Publishing Japan Ltda, 1986.
- [Stewart(2012)] James Stewart. *Cálculo de una Variable*. Cengage Learning, 2012.
- [y J. Keith(2011)] Richard Budynas y J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 2011.
- [Zhu(2011)] Jianguo Zhu. Residual stress in thermal spray coatings measured by curvature based on 3d digital image correlation technique. *Surface and Coating Technology.*, 2011.

