

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO
Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Análisis Termomecánico de Esfuerzos Residuales en Muestras
Recubiertas con Termorociado**

Daniel Efrén Gaona Erazo

Alfredo Valarezo, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de grado presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Quito, mayo 2014

Universidad San Francisco de Quito
Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Análisis Termomecánico de Esfuerzos Residuales en Muestras Recubiertas
con Termorociado

Daniel Efrén Gaona Erazo

Alfredo Valarezo, PH.D.
Director de Tesis

Alfredo Valarezo, PH.D.
Miembro del Comité de Tesis

Carlos Luis Pérez, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

Omar Aguirre, M.Sc.
Miembro del Comité de Tesis

Ximena Córdova, PH.D.
Decana de la Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, mayo 2014

Ⓢ DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

Nombre:

Daniel Efrén Gaona Erazo

CI:

171992615-4

Fecha:

Quito, mayo 2014

DEDICATORIA

A mis padres, mi hermana y mis amigos.
Fuentes de motivación y de alegría inagotables.

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores que durante mi camino académico supieron guiarme, apoyarme y orientarme siempre en el camino de la ética profesional y la excelencia académica y personal.

RESUMEN

El presente trabajo es un análisis experimental de las deformaciones causadas por los esfuerzos térmicos residuales en materiales que han sido recubiertos por termorociado. Esta técnica sugiere la deposición por capas de materiales de diferentes características sobre sustratos diversos con el fin de mejorar las propiedades del conjunto. El proceso implica el calentamiento sobre el punto de fusión de partículas de material de deposición y el posterior impacto de dichas partículas a altas velocidades sobre un material base para producir la junta. Los cambios de temperatura y la diferencia de propiedades, específicamente, expansión térmica y módulo de elasticidad, entre el material base y el de deposición producen esfuerzos sobre el conjunto que pueden degenerar en fractura, delaminación, etc. Estos esfuerzos generan proporcionalmente esfuerzos sobre el material base y de recubrimiento. La medición de estas deformaciones como herramienta para entender y controlar la calidad del proceso de termorociado es un tema de alto interés académico e industrial. Varios estudios se han realizado sobre el tema. Sin embargo, el alcance de este proyecto es escalar el modelo unidimensional predictivo de deformaciones y analizarlos sobre superficies en 2 y 3 dimensiones. Para esto se diseñó y construyó un dispositivo de medición en base a un sensor láser de distancia y un brazo robótico. El dispositivo tiene la capacidad de realizar barridos sobre la pieza para medir la deformación, curvatura y deflexión de la misma. Al comparar los valores experimentales junto con los obtenidos por equipos más sofisticados, el dispositivo mostró un alto desempeño en la medición de curvatura y predicción del módulo de Young. Se analizaron probetas de aluminio como material base con recubrimiento de alambre 100MXC (aleación de Fe, Cr, B, Mo, etc.) y se obtuvieron resultados de su deformación y esfuerzos térmicos. En primer lugar, el comportamiento elástico de los materiales sometidos a un ciclo térmico producen un comportamiento lineal. La linealidad de las rectas curvatura vs. temperatura alcanzó valores superiores al 97 % en todos los casos como predice el modelo teórico desarrollado en 1D, con probetas más largas que anchas. Además, el módulo de Young obtenido por todas las probetas tuvo una media de 96GPa con una desviación estándar cercana a 2GPa . Además, se midieron las curvaturas de probetas cuadradas en diversos ejes dando como resultado un valor alto de correlación y linealidad. Esto, sumando al hecho de que todas las probetas hayan mantenido valores de módulo de Young cercanos con una media de 95GPa aproximadamente, garantiza la validez del modelo teórico para dos dimensiones. Finalmente, se compararon los valores de deformación de las diversas probetas -incluyendo piezas en forma del álabe de un turbocompresor (cortesía ABB)- con los valores de simulaciones en elementos finitos hechas en ABAQUS. La similitud de la magnitud de las deformaciones obtenidas el método experimental y por modelado permite concluir que es factible determinar la deformación y distribución de esfuerzos a través del conocimiento del módulo de Young del recubrimiento (obtenido experimentalmente) y simulaciones en Elementos Finitos. Este módulo de Young puede determinarse de un análisis unidimensional sin pérdida de generalidades.

ABSTRACT

The present work is an experimental analysis of the thermo-mechanical deformations caused by thermal residual stresses in materials that have been Thermal Sprayed. This technology is based on the deposition of several layers of a coating material over a substrate in order to improve its properties. The process involves heating the feedstock above its melting point, pulverizing it into small particles, and subsequently accelerate them toward the base material. Temperature gradients and the difference in properties (specifically Young's Modulus and CTEs) between materials produce stresses can produce cracking, delamination, etc. On the other hand, these stresses generate deformations that can be measured in order to understand and characterize the process of Thermal Spray. Several studies have been conducted on the subject. However, the scope of this project focuses on the deformation model itself. The objective was to prove whether or not the linear model of a bimaterial could be scale up to two and three dimensions. For this purpose, a special setup was designed and built based on a displacement sensor and a robotic arm. The setup is capable of scanning the surface of any specimen and measuring its deformation and curvature. The performance of the setup was comparable to a more sophisticated one placed in Stony Brook University. The curvature measurement error was less than 8 % and the Young's Modulus error was less than 2 %. Also, several samples fabricated with aluminum as substrate and 100MXC (Fe, Cr, B, Mo alloy) based as deposit were analyzed. The results behave according to the theoretical model. First of all, the elastic linear behavior during heating/cooling cycles was proved. The linearity of all curvature-temperature curves was over the 97 % confirming a linear tendency in one and two dimensions. On the other hand, the Young's Modulus had a value was approximately equal for 1D and 2D analysis with a media of $96GPa$ and a standard deviation close to $2GPa$. Moreover, the curvature measured over different axis in the square samples vs temperature showed high linearity and correlation. These results confirm the validity of the model in two dimensions. Finally, the experimental deformation of the two and three-dimensional specimens was compared to several simulations carried on in ABAQUS. The errors for all the specimens were less than 6 %. The similarity between the experimental results and the simulated ones allowed to conclude that it is possible to predict the deformation and stress distribution in a coated specimen subjected to a heating cycles by using FE modeling and obtaining the *in plane* Young's Module from the Curvature-Temperature experimental method. Furthermore, It was concluded that it is possible to obtain the Young's Modulus of the coating from 1D specimens and use this modulus for the two and three-dimension analysis without loss of generality.

Índice general

Resumen	7
Abstract	8
Definición de Variables	20
1. Introducción	21
1.1. Antecedentes	21
1.2. Justificación e Importancia	22
1.3. Visión	24
1.4. Objetivo General	24
1.4.1. Objetivos específicos	25
2. Revisión de Literatura y Marco Teórico	27
2.1. Revisión de Literatura	27
2.2. Marco Teórico	34
2.2.1. Definición de Términos	34
2.2.2. Fundamento Teórico	38
2.2.3. Supuestos de Estudio	46
3. Metodología	49
3.1. Estructura Física	50
3.2. Filosofía de control	52
3.3. Hardware de Control	53

	10
3.4. Software de Control MATLAB	57
3.4.1. Unidimensional	58
3.4.2. Bidimensional	62
3.5. Software de Control SCORBASE	64
3.5.1. Script	66
3.5.2. Scorbace	68
3.6. Software de Análisis de Datos (MATLAB)	73
3.6.1. Unidimensional	73
3.6.2. Bidimensional	78
3.7. Procesos de Escaneo	82
3.7.1. Proceso de Escaneo Unidimensional	82
3.7.2. Proceso de Escaneo Bidimensional	88
3.7.3. Proceso de Escaneo Tridimensional	93
3.8. Análisis de Homogeneidad de Temperaturas	95
3.8.1. Análisis de Homogeneidad Térmica Unidimensional	95
3.8.2. Análisis de Homogeneidad Térmica Bidimensional	97
3.8.3. Análisis de Homogeneidad Térmica Tridimensional	98
4. Desarrollo	101
4.1. Verificación	101
4.1.1. Placa de Recubrimiento de Cromo sobre Sustrato de Aluminio	102
4.1.2. Placa de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero	104
4.1.3. Placa de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre Sustrato de Acero Inoxidable SS316	106
4.2. Fabricación de Probetas	109
4.2.1. Conformación del Sustrato	109
4.2.2. Proceso de Termorociado	111
4.3. Análisis de Probetas	115

4.3.1. Placa Unidimensional con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-1D)	115
4.3.2. Placa Bidimensional con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-2D)	124
4.3.3. Álabe con Recubrimiento de Alambre 100MXC sobre sustrato de Aluminio (P-3D)	142
5. Conclusiones	163
5.1. Conclusiones Generales	163
5.2. Limitaciones y Recomendaciones	165
6. Bibliografía	168
Anexos	171

Índice de figuras

1.1. Diagrama de Flujo del Proyecto.	26
2.1. Dispositivo de medición de curvatura. Esquemático del Dispositivo [Matejicek and Sampath.(2002)]	30
2.2. Dispositivo de medición de curvatura. Procedimiento General. [Matejicek and Sampath.(2002)]	30
2.3. Esquemático del dispositivo creado por la <i>Tsinghua University</i>	32
2.4. Resultados obtenidos bajo la metodología de <i>Tsinghua University</i> . (a) Imagen Izquierda (b) Imagen Derecha; (c) reconstrucción tri- dimensional (d) Vista lateral de la reconstrucción tridimensional.	33
2.5. Resultados de la Simulación en ABAQUS. (a) Post-Deposición (b) Post-enfriamiento.	34
2.6. Tensor de Esfuerzos [Martinez(2013)]	35
2.7. Proceso de <i>Thermal Spray Coating</i> [Davis(2004)]	38
2.8. Diagrama de fuerzas Modelo de Timoshenko [Chung(1990)].	41
2.9. Diagrama de fuerzas Modelo de Timoshenko [Chung(1990)].	42
2.10. Modelo Geométrico y Matemático de la deflexión. [Kanthal(2002)].	45
2.11. Relación Tempertura vs. Deflección. [Kanthal(2002)].	46
3.1. Modelo Tridimensional de la Estructura Física. (El modelo del ro- bot se obtuvo de la página del fabricante [Chung(1990)]).	51
3.2. Esquema del circuito de control diseñado en Proteus.	53

3.3. Esquema del circuito de control para PCB diseñado en Proteus. . .	56
3.4. Esquema del circuito de control diseñado en Proteus - Modelo 3D.	56
3.5. Curva de Calibración de la termocupla.	57
3.6. GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Control. . .	58
3.7. GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Control- Escaneo Superficial.	63
3.8. Interfaz SCORBASE.	64
3.9. Interfaz SCORBASE.	65
3.10. Interfaz SCORBASE.	65
3.11. GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Análisis de Datos.	74
3.12. Graficación de las Curvas Teóricas.	75
3.13. Cuadro de diálogo.	76
3.14. Graficación de las Curvas Teóricas y Experimentales. Extrapolación de los módulo de Young.	77
3.15. GUI (Graphic User Interface) MATLAB. Software de Análisis de Datos-Escaneo superficial.	79
3.16. Graficación tridimensional de las probetas.	80
3.17. Graficación de las Curvas Teóricas.	81
3.18. Graficación de las Curvas Teóricas y Experimentales. Extrapolación de los módulo de Young.	82
3.19. Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.	83
3.20. Selección del método de Escaneo.	83
3.21. Ingresar el largo de la pieza.	84
3.22. Calibración de la posición inicial.	84
3.23. Adquisición de Datos.	85
3.24. Modelo de Escaneo unidimensional sobre placa delgada.	85
3.25. Posiciones iniciales y finales de escaneo. Ubicación de termocuplas.	86

	14
3.26. Procesamiento de Datos.	87
3.27. Calentamiento.	87
3.28. Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.	89
3.29. Selección del método de Escaneo.	89
3.30. Ingresar propiedades de de la pieza.	90
3.31. Modelo de Escaneo bidimensional sobre placa cuadrada delgada. .	91
3.32. Patrón de Escaneo bidimensional sobre placa cuadrada delgada. .	91
3.33. Procesamiento de Datos.	92
3.34. Calentamiento.	93
3.35. Ubicación de la probeta sobre la mesa de trabajo.	94
3.36. Modelo de Escaneo Tridimensional sobre álabe de Turbocargador.	94
3.37. Temperatura tomada por las termocuplas A y B	96
3.38. Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.	96
3.39. Temperatura tomada por las termocuplas A y B	97
3.40. Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.	98
3.41. Temperatura tomada por las termocuplas A y B	98
3.42. Histograma de la diferencia entre las Termocuplas A y B.	99
4.1. Resultados de la medición de la P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Aluminio.	102
4.2. Resultados de la medición de la P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero.	104
4.3. Resultados de la medición de la placa P-1D P-1D de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre S316.	106
4.4. Placa de Carburo de Tungsteno sobre Acero Inoxidable SS316. Curvatura vs.Temperatura.	107
4.5. Comparación: Variación de Curvatura vs. Variación de Tempera- tura. Stony Brook y USFQ.	108
4.6. Álabe de Turbocargador ABB.	110

4.7. Recreación del Álabe de Turbocargador ABB.	110
4.8. Probetas de aluminio previo al <i>Thermal Spray Coating</i>	111
4.9. Proceso de Sand Blasting.	112
4.10. Material de Recubrimiento y Equipo de TR.	113
4.11. Proceso de TR sobre las diversas probetas.	114
4.12. Probetas luego del proceso de TR.	115
4.13. Proceso de Medición de curvatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	116
4.14. Variación de Curvatura vs. Variación en Temperatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	116
4.15. Variación de Curvatura vs. Variación en Temperatura (P-1D de 100MXC sobre Aluminio Probeta II).	117
4.16. Resultado de la medición P-1D. Distribución de Esfuerzos.	118
4.17. Variación de Deflexión vs. Variación en Temperatura (P-1D de 100MXC sobre Aluminio).	119
4.18. Modelo Tridimensional de la Pieza Alargada hecho en INVENTOR.	120
4.19. Condiciones de Borde ABAQUS.	121
4.20. Resultados de ABAQUS. Deformación con $\Delta T = 75^{\circ}C$	122
4.21. Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos σ_{xx} con $\Delta T = 75^{\circ}C$	123
4.22. Proceso de Medición de curvatura (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	124
4.23. Esquema del método de Medición de Curvatura a partir de la medición de la deflexión en tres puntos).	125
4.24. Variación de Temperatura vs. Deflexión. Método de los 3 puntos para la probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	126
4.25. Variación de Temperatura vs. Curvatura. Método de los 3 puntos para la probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	127

4.26. Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta I y II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	128
4.27. Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta I. (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	128
4.28. Variación de Temperatura vs. Deflexión en los todos los ejes. Probeta II (Placa de 100MXC sobre Aluminio).	129
4.29. Resultados de la medición de Curvatura. Probeta I placa alargada de 100MXC sobre Aluminio. Curvatura vs. Temperatura.	131
4.30. Resultados de la medición de Curvatura. Probeta II placa alargada de 100MXC sobre Aluminio. Curvatura vs. Temperatura.	132
4.31. Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Probeta I (0,3mm) a 100°C.	134
4.32. Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Probeta II (0,18mm) a 100°C.	134
4.33. Resultados de la medición de la Deflexión. Probeta I P-2D de 100MXC sobre Aluminio. Deflexión vs. Temperatura.	136
4.34. Resultados de la medición de la Deflexión. Probeta II P-2D de 100MXC sobre Aluminio. Deflexión vs. Temperatura.	137
4.35. Modelo Tridimensional de la Pieza Cuadrada diseñado en INVENTOR PROFESSIONAL 2013.	138
4.36. Resultados de ABAQUS. Deformación con $\Delta T = 75^\circ C$	139
4.37. Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos σ_{xx} con $\Delta T = 75^\circ C$	140
4.38. Resultados de ABAQUS. Deformación con $\Delta T = 75^\circ C$. Los valores de esfuerzos están expresados en <i>MPa</i>	141
4.39. Resultados de ABAQUS. Comparación de la distribución de Esfuerzos σ_{xx} con $\Delta T = 75^\circ C$	142
4.40. Proceso de Deformación (álabe de 100MXC sobre Aluminio).	143

4.41. Álabe a $28C^{\circ}$. Probeta I.	144
4.42. álabe a $275C^{\circ}$. Probeta I.	144
4.43. álabe a $25C^{\circ}$. Probeta II.	145
4.44. álabe a $277C^{\circ}$. Probeta II.	145
4.45. Deformación con $\Delta T = 250C^{\circ}$. Probeta I.	146
4.46. Deformación con $\Delta T = 250C^{\circ}$. Probeta II.	146
4.47. Modelo Tridimensional de la Pieza en forma de álabe hecho en INVENTOR.	147
4.48. Modelo Tridimensional de la Pieza en forma de álabe hecho en INVENTOR vs. la pieza escaneada.	148
4.49. Condiciones de borde modelamiento álabe.	149
4.50. Resultados de ABAQUS. Deformación en el eje Y con un delta de $\Delta T = 250^{\circ}C$	149
4.51. Resultados de ABAQUS. Deformación Total con un delta de $\Delta T =$ $250^{\circ}C$	150
4.52. Resultados de ABAQUS. Esfuerzos σ_{Mises} Cara Frontal con $\Delta T =$ $250^{\circ}C$	151
4.53. Resultados de ABAQUS. Esfuerzos σ_{Mises} Cara Posterior con $\Delta T =$ $250^{\circ}C$	152
4.54. Resultados de ABAQUS. Esfuerzos σ_{xx} Cara Frontal con $\Delta T =$ $250^{\circ}C$	152
4.55. Resultados de ABAQUS. Esfuerzos σ_{xx} Cara Posterior con $\Delta T =$ $250^{\circ}C$	152
4.56. Distribución de esfuerzos en la parte más alejada de anclaje.	153
4.57. Predicción de la Distribución de Esfuerzos en el espesor de la Placa de 100MXC sobre Aluminio. Caso ideal ($0,4mm$).	154
4.58. Distribución de esfuerzos al interior de la pieza.	155

4.59. Deformaciones Absoluta en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	157
4.60. Deformaciones en el eje Y en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	157
4.61. Distribución de esfuerzos de Von Mises (Vista Superior) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	158
4.62. Distribución de esfuerzos de Von Mises (Corte Lateral) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	158
4.63. Distribución de esfuerzos de principales (σ_{11}) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	158
4.64. Distribución de esfuerzos de principales (σ_{22}) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	159
4.65. Distribución de esfuerzos de principales (σ_{33}) en la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	159
4.66. Distribución de esfuerzos de esfuerzos (σ_{11}) en el espesor de la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	160
4.67. Distribución de esfuerzos de esfuerzos (Von mises) en el espesor de la Probeta P-3D recubierta en ambas caras con alambre 100MXC sobre un sustrato de Aluminio.	160

Índice de cuadros

4.1. Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Aluminio. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	103
4.2. Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Cromo Duro sobre Sustrato de Acero. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	105
4.3. Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de Carburo de Tungsteno sobre Sustrato de Acero Inoxidable SS316. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	107
4.4. Propiedades de las probeta P-1D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio.	111
4.5. Composición del material de Recubrimiento de alambre 100MXC marca TAFE.	112
4.6. Propiedades de la probeta P-1D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	115
4.7. Propiedades de la probeta alargada de 100MXC sobre Aluminio.	120
4.8. Propiedades de la probeta P-2D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	124
4.9. Propiedades de la probeta P-3D de Recubrimiento de alambre 100MXC sobre Sustrato de Aluminio. ⁺ :Valores de literatura [MatWeb(2014)].	143

Definición de Variables

A Deflección del Centro de la Placa [mm]. 13

E_D Módulo de Young del recubrimiento [Pa]. 13

E_S Módulo de Young del sustrato [Pa]. 13

R_T Radio de Curvatura a una cierta temperatura [mm]. 13

R_o Radio de Curvatura Inicial [mm]. 13

Δ_T Variación Instantánea de temperatura [deg]. 13

α_D Espesor del recubrimiento [mm]. 13

α_S Espesor del sustrato [mm]. 13

k Curvatura [mm^{-1}]. 13

k Curvatura Específica [mm^{-1}]. 13

s Espesor total de la probeta [mm]. 13

t_D Espesor del recubrimiento [mm]. 13

t_S Espesor del sustrato [mm]. 13

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Los primeros registros de procesos de termorociado se remontan a 1882 en Suiza [Davis(2004)]. Las primeras patentes describen procesos de fundición de latón y la aplicación de estas partículas sobre sustrato. En años siguientes se modificaron los dispositivos originales para aceptar polvos metálicos. Para 1908, se tenía la primera patente de *Electric Arc Spray* que permitía realizar recubrimiento de acero y zinc. La evolución tuvo un proceso de estancamiento que cesó una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial con la introducción de la tecnología de *plasma spray* y *powder spray*. A partir de ese año un sinnúmero de mejoras sobre los equipamientos se han realizado; sin embargo, los principios de operación se han mantenido intactos. La metodología de mayor popularidad para aplicaciones de gran confiabilidad fue el *plasma spray* por su calidad de recubrimientos [Davis(2004)]. El interés despertado en la industria motivó un sinnúmero de investigaciones acerca de los fenómenos físicos y mecánicos que hacen parte del proceso. El análisis de bi-metales en general, se remonta a inicios del siglo XX, con uno de los papers sobre bimetales más famosos escrito por Timoshenko en 1925. Varias décadas más tarde Bogy, en 1970, y Hess en 1969, determinaron

formas de describir la distribución de dichos esfuerzos utilizando métodos mucho más complejos que incluían la teoría de elasticidad. En 1990, un equipo de investigación de North Caroline State University comparó las dos metodologías antes mencionadas junto con el método de elementos finitos que en su momento estaba en apogeo. Desde entonces, se han realizado varias investigaciones con la finalidad de determinar con mayor precisión los esfuerzos [Chung(1990)]. En las últimas décadas, se ha dado especial importancia a extrapolar las propiedades mecánicas del recubrimiento con el objetivo de poder predecir las propiedades del conjunto como tal. Matejicek y Sampath en el 2002, diseñaron un instrumento que permitiría obtener el módulo de Young a partir del análisis de la curvatura del material, analizar la evolución del esfuerzo durante todo el proceso de *Plasma Spray* y separar esfuerzos térmicos de esfuerzos de templado (quenching) que constituyen el tan conocido esfuerzo residual. Decenas de investigaciones más sigue toda en proceso con el objetivo de entender completamente el proceso y lograr optimizarlo y controlarlo por completo. La investigación presente busca continuar con la tendencia y ayudar a complementar el conocimiento acumulado sobre esta técnica. [Davis(2004)]

1.2. Justificación e Importancia

Los procesos de recubrimiento con termorociado son ampliamente usados en la industria. En general, se usan en elemento mecánicos para prevenir su desgaste o corrosión. Sin embargo, aún cuando sea confirmado la funcionalidad del recubrimiento, existen limitaciones en la confiabilidad del recubrimiento y la repetibilidad del proceso que han alentado la expansión en la aplicabilidad de estos tratamientos. Esta incertidumbre ha causado que se guarde cierta cautela en el uso de recubrimiento por termorociado en piezas claves de maquinarias, vehículos, etc.

En el proceso de recubrimiento térmicos se ven involucradas diversas variables entre las que se incluyen la potencia de la torcha, la tasa de deposición de recubrimiento, la velocidad del flujo de plasma, la distancia entre el sustrato y la torcha, el patrón geométrico de roseado, etc. Cada una de estas variables ingenieriles tienen traducción sobre variables físicas del proceso como la temperatura de las partículas de deposición, velocidad de impacto, tasa de deposición temperatura del sustrato, etc. Estas variables tienen diversos efectos sobre las propiedades finales del recubrimiento [Matejicek and Sampath.(2002)].

Dentro de este contexto, resulta evidente la necesidad de entender a fondo el proceso de termorociado como una forma de optimizar su desarrollo y promover su aplicabilidad. Un entendimiento de los fenómenos físicos envueltos y de la relación entre proceso y efecto, incrementaría el control sobre los esfuerzos residuales y la calidad del recubrimiento; entre otras cosas, sería posible controlar el desempeño del recubrimiento y ajustar el proceso de manufactura garantizando calidad y repetibilidad.

Si bien la deformación por esfuerzos térmicos y residuales han sido ampliamente estudiada, poco se ha hecho en cuestión de entender las deformaciones bidimensionales y tridimensionales. Como parte del entendimiento del proceso de termorociado en general, se espera que los modelos predictivos de deformaciones y esfuerzos se puedan aplicar a cualquier pieza por más compleja que fuese su geometría. Es así que resulta implícito el extender la teoría de una dimensión a dos y tres dimensiones teórica y experimentalmente. Lo que esta investigación propone, entonces, es una variación de la Metodología de Matejicek y Sampath para obtener la curvatura en cuerpos tridimensionales en general con el objetivo de corroborar si el sustento teórico desarrollado para una dimensión sigue sien-

do válido para dos y tres dimensiones. Como subproducto de este proyecto, se podrá disponer de una estación de análisis de deformaciones que se podrá usar en futuro para nuevas y más avanzadas investigaciones.

1.3. Visión

Esta investigación busca extender el entendimiento de la teoría de TR hacia dos y tres dimensiones con el objetivo de validar los modelos teóricos en piezas de geometría complejas y diversas. Se espera que los resultados permitan entender de mejor manera los procesos de deformación en recubrimiento térmicos y los esfuerzos debidos a los gradientes de temperatura. Consecuentemente, se espera que los resultados de esta investigación amplíen la confiabilidad que se tiene en el proceso y su aplicabilidad en la Industria nacional e internacional. Además, como derivado de este proyecto, se busca crear una estación de medición de deformaciones térmicas que permita desarrollar investigaciones posteriores en la Universidad San Francisco de Quito en el campo de recubrimientos térmicos. Se espera que este proyecto sirva de punto de partida para el desarrollo de investigaciones importantes a futuro. Parte del proyecto entonces, se concentrará en la funcionalidad y operatividad de la estación de medición con la validación de muestras y calibración de dispositivos que aseguren una funcionalidad prolongada.

1.4. Objetivo General

Construir una estación de medición de deformaciones térmicas que permita extraer de la relación *curvatura vs. deformación* las propiedades mecánicas de piezas termorociadas (módulo de elasticidad y distribución de esfuerzos) y comparar dichos resultados con similares obtenidos por otros laboratorios y mediante simulaciones en Elementos Finitos, con el fin de extender el modelo teórico a dos y tres dimensiones.

1.4.1. Objetivos específicos

1. Construir una estación de medición de deformaciones haciendo uso de las instalaciones del laboratorio de robótica de la Universidad San Francisco de Quito.
2. Desarrollar el sistema de control con una interfaz gráfica de tal modo que la estación de medición sea multifuncional y amigable con el usuario.
3. Calibrar los instrumentos y realizar pruebas que corroboren la precisión y el buen funcionamiento de la estación tomando como punto de partida muestras analizadas previamente por laboratorios especializados.
4. Extraer curvas curvatura-temperatura para probetas de diversas geometría con el objetivo de validar y extender los modelos teóricos a dos y tres dimensiones.
5. Comparar los resultados de módulo de elasticidad obtenidos con simulaciones hechas en ABAQUS para validar las conclusiones obtenidas de los datos experimentales.

Estos objetivos son secuenciales como se muestra en la Figura 1.1:

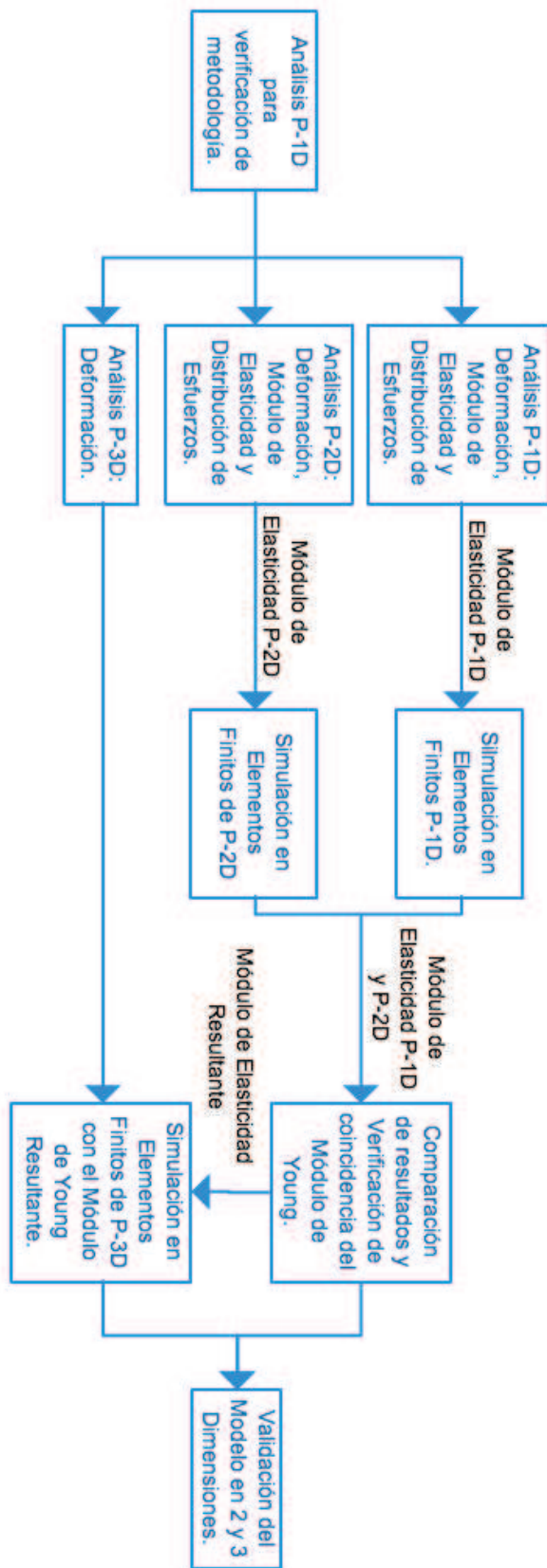


Figura 1.1: Diagrama de Flujo del Proyecto.

Capítulo 2

Revisión de Literatura y Marco Teórico

2.1. Revisión de Literatura

Los recubrimiento por termorociado (TR) despiertan gran interés a nivel mundial por el gran número de aplicaciones que se derivan de los mismos. Es por esto, que durante las últimas décadas se han unidos esfuerzos para entender de manera complexiva y profunda los fundamentos teórico-prácticos del proceso. Si bien el análisis de bi-metales se remonta a inicios del siglo XX, la evolución de su estudio hace que hoy en día se tenga un extenso banco de información acerca de recubrimiento por TR. Será entonces necesario analizar con detenimiento las investigaciones que se han realizado, especialmente aquellas que se orientan en la misma dirección que la investigación presentada.

Uno de los papers sobre bimetales más famosos es el escrito por Timoshenko en 1925. Este paper analiza los esfuerzos térmicos en las juntas bimetálicas y es ampliamente usado para el diseño de estructura laminares y, en la actualidad, para el diseño de dispositivos electrónicos. Aunque el método era, por sobre demás,

bastante cercano a la realidad, era incapaz de predecir la distribución de esfuerzos cortantes y normales en la capa intersticial. Varias décadas más tarde Bogy, en 1970, y Hess en 1969, determinaron formas de describir la distribución de dichos esfuerzos utilizando métodos mucho más complejos que incluían la teoría de elasticidad. El método fue conocido como "*Theory of Elasticity via an eigenfunction expansion approach*". En 1986, Suhir propondría una nueva forma de calcular esfuerzos intersticiales mediante un método aproximativo. Esta metodología se conoció como "*Extended strength o materials theory*". En 1990, un equipo de investigación de North Caroline State University comparó las dos metodologías antes mencionadas junto con el método de elementos finitos que en su momento estaba en apogeo. Sus conclusiones fueron claras. Cuando las capas de sustrato y depósito eran de aproximadamente el mismo espesor, los métodos aproximativos acertaban en el cálculo de los valores de esfuerzo máximos (lo cual era útil para el diseño), pero carecían de certidumbre respecto a la distribución de los esfuerzos. Por el otro lado, cuando la capa de recubrimiento era muy fina en comparación a la del sustrato, los métodos fallaban en describir los valores máximos de esfuerzos al igual que su ubicación. Desde entonces, se han realizado varias investigaciones con la finalidad de determinar con mayor precisión los esfuerzos [Chung(1990)].

Si bien las propiedades del material base (*bulk*) pueden ser conocidas, ésto no garantiza las propiedades del recubrimiento. De hecho, se conoce que el módulo de Young, por poner un ejemplo, disminuye considerablemente respecto al valor del *bulck*. En general, las propiedades del recubrimiento difieren de las del *bulck* como consecuencia de la porosidad, anisotropía y esfuerzos residuales. Es por este motivo, que en las últimas décadas, se ha dado especial importancia a extrapolar las propiedades metálicas del recubrimiento con el objetivo de poder predecir las propiedades del conjunto como tal. Matejicek y Sampath en el 2002, diseñaron un

instrumento que permitiría obtener el módulo de Young a partir del análisis de la curvatura del material, analizar la evolución del esfuerzo residual durante todo el proceso de *Plasma Spray* y separar esfuerzos térmicos de esfuerzos de templado (quenching) que constituyen el tan conocido esfuerzo residual.

Los esfuerzos residuales se originan por gradientes de temperatura de gran magnitud generados durante el proceso de TR. Las partículas que se impactan sobre el sustrato sufren un proceso de templado debido a la diferencia abrupta de temperatura entre el sustrato y el depósito. Este templado crea esfuerzos conocidos como *quenching stresses*. Por otro lado, durante el proceso tanto el sustrato como el depósito se encuentran a una temperatura elevada comparada con la temperatura ambiente. Durante el proceso de enfriamiento se generan esfuerzos debido a la diferencia de coeficientes de expansión térmica. Dichos esfuerzos son conocidos como esfuerzos térmico (*thermal stresses*) y en conjunto con los *quenching stresses* forman los esfuerzos residuales. Si estos esfuerzos son suficientemente altos, el material podría fallar por superposición de cargas o su resistencia a la fatiga podría disminuir considerablemente. Lo opuesto también es posible, es decir, se puede modificar la condición de esfuerzos residuales y promover que alargue la vida del componente [Matejicek and Sampath.(2002)].

Dentro de este contexto, la determinación del módulo de Young se muestra como una manera de extrapolar las propiedades del conjunto y de determinar los esfuerzos residuales presentes en el material. El módulo, en primer lugar, es un indicador directo de la integridad del recubrimiento (porosidad, adhesión interlaminar y micro-fisuras) y de la calidad de unión entre capas. Por otro lado, la magnitud del módulo es aproximadamente proporcional a la magnitud del

esfuerzo térmico. Por lo tanto, variaciones en el módulo de elasticidad afectan directamente al esfuerzo final soportado por la pieza. Es así que la determinación del módulo de elasticidad se vuelve de vital importancia para entender el proceso como tal y estimar las propiedades del material.

La metodología de la curvatura fue desarrollada por Stony y posteriormente desarrollado por Brenner y Senderoff. Diversas aplicaciones derivaron de esta metodología tanto para mediciones in-situ como ex-situ. El dispositivo diseñado y construido por Matejicek y Sampath para análisis de recubrimiento por TR se muestra en la Figura 2.2:

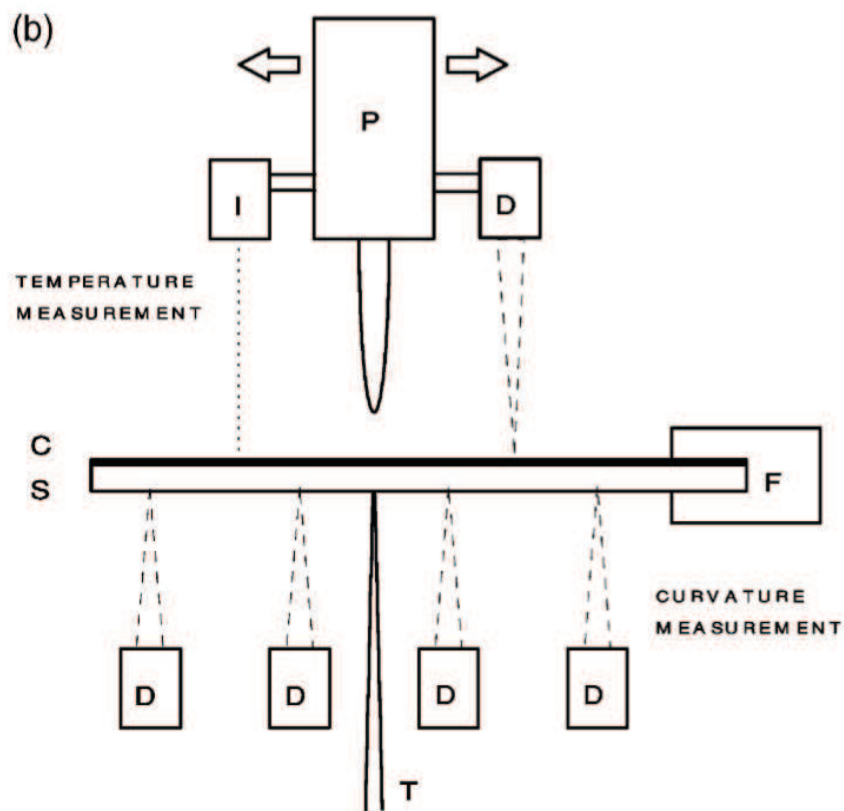


Figura 2.1: Dispositivo de medición de curvatura. Esquemático del Dispositivo [Matejicek and Sampath.(2002)]

donde I se refiere a un termómetro infrarrojo, P se refiere a la torcha de

plasma, T se refiere a la termocupla, D corresponde a los sensores de distancia láser y F al soporte de la pieza. A partir de la Figura 2.2, su funcionamiento es bastante fácil de entender. Se coloca la pieza fija en el soporte. Se colocan los sensores láser distribuidos uniformemente a lo largo de la pieza, se fija la termocupla y se comienza el proceso de deposición de recubrimiento. El termómetro infrarrojo permite medir la temperatura en el punto de deposición y el sensor de distancia colocado a un extremo de la torcha permite controlar la distancia entre la torcha y el sustrato. Todos los sensores adquieren datos tanto durante el proceso de deposición como durante el proceso de enfriamiento. Estos datos permitirán calcular los valores de módulo de Young así como definir esfuerzos residuales [Matejicek and Sampath.(2002)].

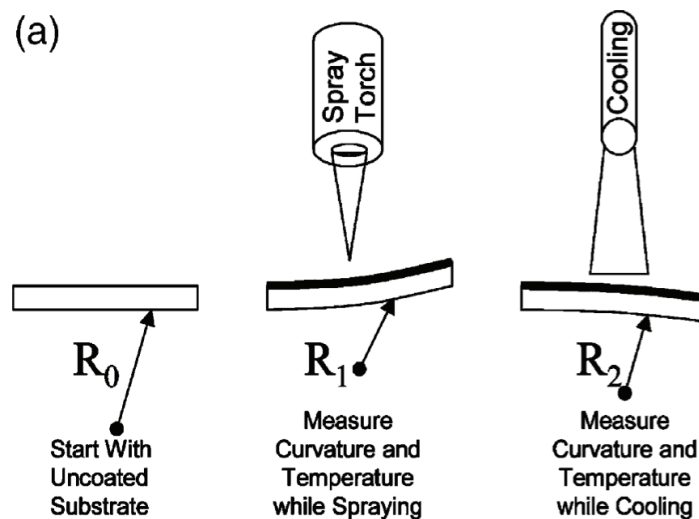


Figura 2.2: Dispositivo de medición de curvatura. Procedimiento General. [Matejicek and Sampath.(2002)]

El esfuerzo por templado, *quenching stress*, se determina, de acuerdo al análisis de la mecánica de sólidos que considera el espesor del recubrimiento y la curvatura causada por el depósito sobre una placa delgada durante el periodo de rociado. Por el otro lado, los esfuerzos térmicos y el módulo de Young fueron determinados por los datos de temperatura y curvatura adquiridos en el periodo de enfriamiento. El esfuerzo residual total es determinado de la superposición de

ambos esfuerzos [Matejicek and Sampath.(2002)]. Los resultados presentados en las dos partes del paper ”*In situ measurement of residual stresses and elastic moduli in thermal sprayed coatings*” mostraron resultados favorables. El instrumento demostró tener alta precisión en la medición de curvatura y la predicción de determinación de esfuerzos[Matejicek and Sampath.(2002)].

Nuevas metodologías han sido desarrolladas en los últimos años. En el 2011, académicos de *Tsinghua University* desarrollaron un método que utilizaba principio ópticos y de cámaras para determinar la curvatura y deformación. El principio de funcionamiento de este sistema se bases en el fenómeno de estereopsis. Este es el principio bajo el cual funciona la vista humana y también los sistemas inteligente de visión. La estereopsis se basa en la percepción de profundidad a partir de la información proveniente de dos fuentes bidimensionales (los ojos, en el caso los seres humano) y el conocimiento de la matriz de cámara (ubicación y ángulo) de las dos fuentes. En el caso análogo del ser humano, el conocimiento de la distancia entre los ojos, y el ángulo de rotación del mismo le proporciona información suficiente al cerebro para reconstruir la imagen vista por ambos ojos y generar una perspectiva de profundidad. El dispositivo diseñado por el grupo de trabajo de Tsinghua se muestra en la Figura 2.3 [Zhu(2011)]:

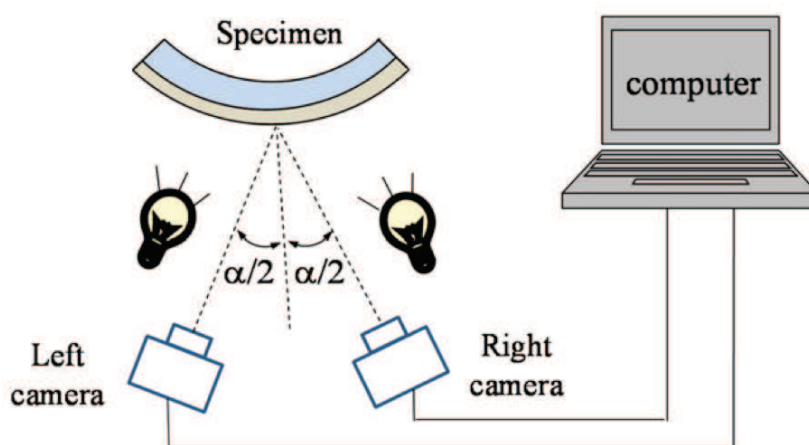


Figura 2.3: Esquemático del dispositivo creado por la *Tsinghua University*

Esta metodología se usó para realizar mediciones de esfuerzos residuales a partir de la curvatura medida del espécimen ex-situ. El objetivo fue usar las imágenes adquiridas por dos cámaras de alta resolución para recrear la curvatura de la pieza una vez que ésta ha sido sometida a un proceso de TR y ha alcanzado temperatura ambiente. Los resultados se muestran en la Figura 2.4 [Zhu(2011)]:

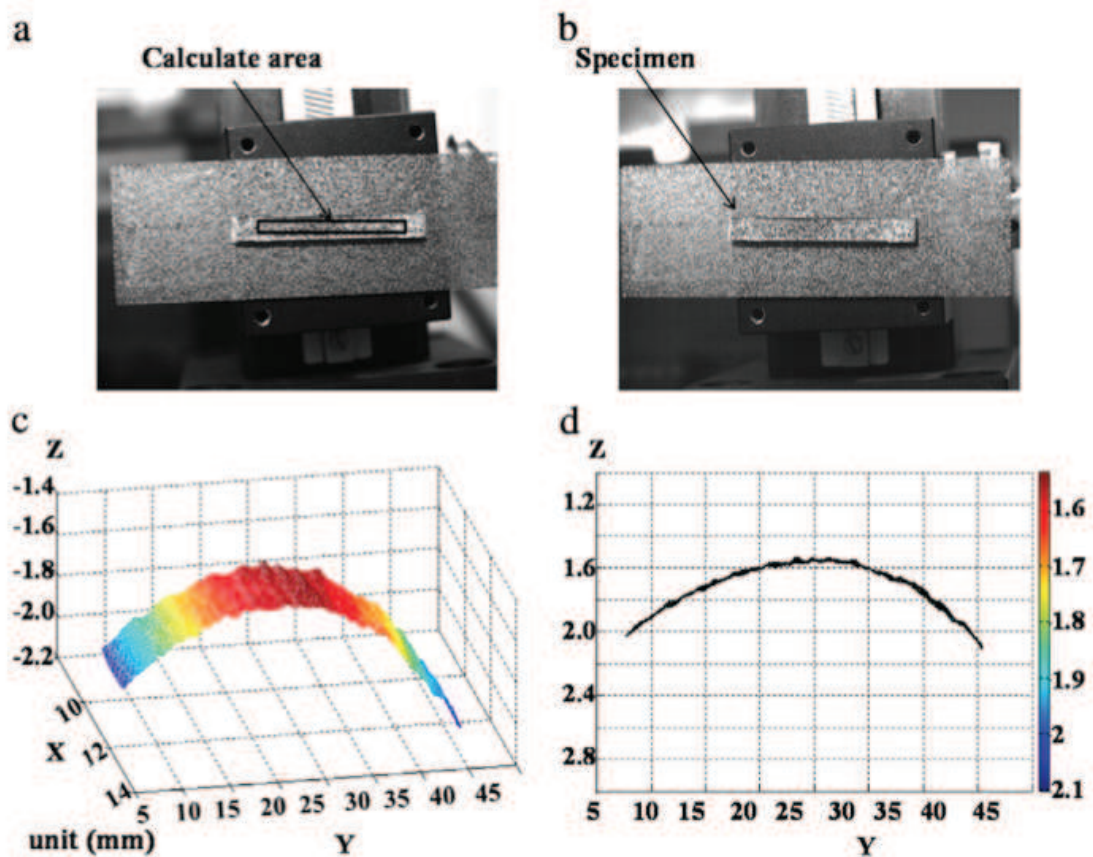


Figura 2.4: Resultados obtenidos bajo la metodología de *Tsinghua University*. (a) Imagen Izquierda (b) Imagen Derecha; (c) reconstrucción tridimensional (d) Vista lateral de la reconstrucción tridimensional.

Estos resultados se cotejaron con simulaciones de elementos finitos desarrolladas en el software especializado ABAQUS. En la Figura 2.5 se muestran dichos resultados. Si se comparan las Figuras 2.4 y 2.5, se logra divisar la proximidad entre ambos resultados. Sin embargo, aún cuando este método presenta resultados favorables, la metodología de Matejicek sigue siendo la más extendida debido a que su uso se puede extender a mediciones in-situ [Zhu(2011)].

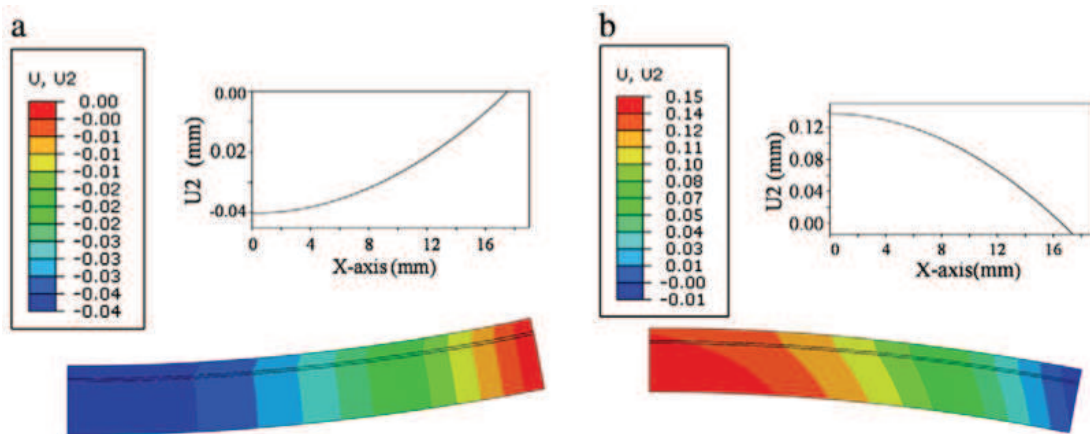


Figura 2.5: Resultados de la Simulación en ABAQUS. (a) Post-Deposición (b) Post-enfriamiento.

2.2. Marco Teórico

2.2.1. Definición de Términos

1. **Esfuerzo.-** Se define como esfuerzo a la fuerza por unidad de área o a la intensidad de las fuerzas distribuida sobre una sección. Se denota con las letras griegas σ y τ y se expresa en unidades de presión (Pa en el sistema Internacional) [Beer and Johnston(2009)]. Se denomina esfuerzo normal (σ) cuando la fuerza es perpendicular al plano de acción de la misma. Por el contrario, se denomina como esfuerzo cortante (τ) cuando la fuerza es paralela al plano de acción de la misma. Los esfuerzos, al depender de la dirección, se pueden clasificar como σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{xz} y τ_{yz} de acuerdo a la siguiente Figura 2.6 :

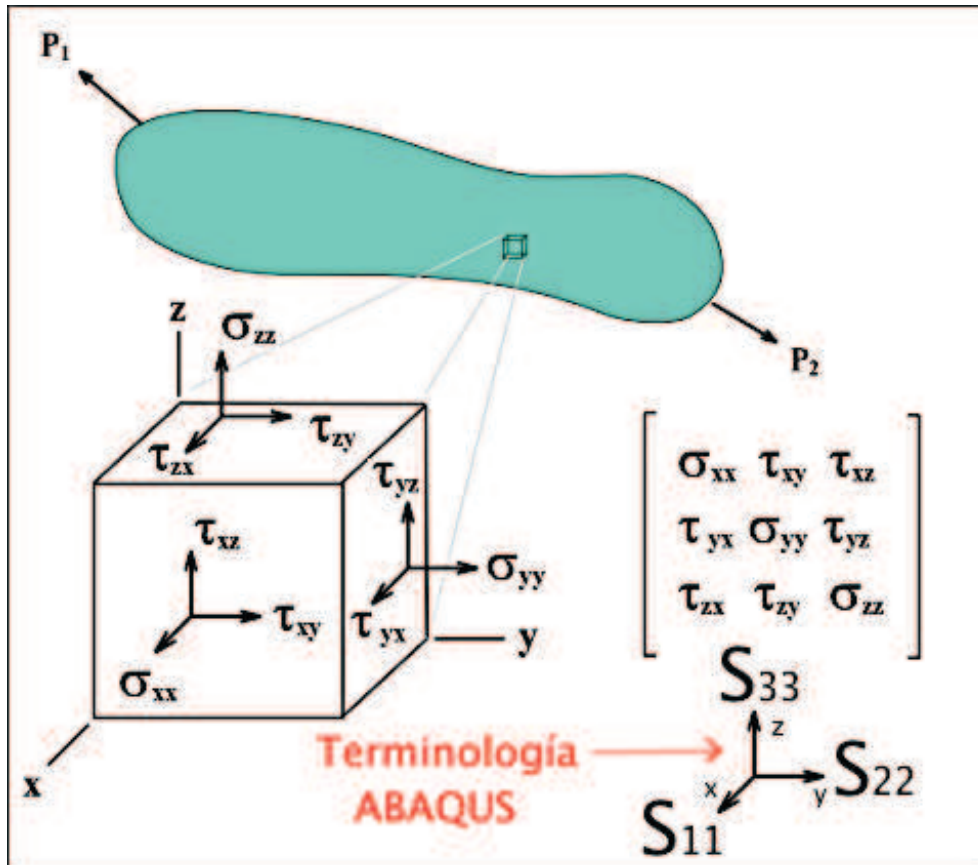


Figura 2.6: Tensor de Esfuerzos [Martinez(2013)] .

A partir de este tensor de esfuerzos se puede determinar un esfuerzo resultante conocido como Von Mises y se calcula a partir de la siguiente ecuación [y J. Keith(2011)]

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}{2}} \quad (2.1)$$

2. **Deformación.-** Se define como el cambio en dimensión de un cuerpo sometido a esfuerzo. Se denomina *deformación unitaria* a la razón entre la deformación y la longitud original de la pieza. [Beer and Johnston(2009)]
3. **Módulo de Young.-** La ley de Hooke establece una relación entre el es-

fuerzo y la deformación unitaria:

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.2)$$

donde E es la constante de proporcionalidad de la curva de esfuerzo deformación y se la conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young. E es una medida de rigidez de un material y dado que ϵ no tiene unidades, entonces E tiene las mismas unidades que el esfuerzo.

4. **Curvatura.-** La curvatura de una función en un punto P se define como:

$$k = \left| \frac{d\phi}{ds} \right| \quad (2.3)$$

donde ϕ es el ángulo de inclinación de la línea tangente en P . Así, la curvatura es el valor absoluto de la tasa de cambio de ϕ con respecto al cambio de longitud de arco [Stewart(2012)].

5. **GUI.-** Interfaz Gráfica de Usuario (*Graphic User Interface*), es una interfaz usada para enviar comandos a un computador por medio de un medio físico (*mouse* o teclado) que activa o manipula imágenes en pantalla [Dictionary(2014)].
6. **HMI.-** Interface Hombre-Máquina (*Human Machine Interface*) es una interfaz gráfica o no que permite realizar control sobre cierta máquina o proceso. Este término es usado en automatización de procesos y control [Dictionary(2014)].
7. **Método de Elementos Finitos.-** La idea fundamental del método de elementos finitos es dividir la estructura, cuerpo o región de análisis in un gran número finito de elementos. Estos elementos pueden ser de una, dos o tres dimensiones. Esta discretización temporal permite aplicar en dominio

pequeños las ecuaciones básicas de continuidad, conservación del campo magnético, estática, fenómenos de transferencia, etc. Este método junto con el de diferencias finitas (discretización del tiempo de análisis) forma parte del FEA (*Finite Element Analysis*) de gran importancia en Ingeniería [Stasa(1986)].

8. **Coefficiente de Poisson (ν).**- Toda deformación en una dirección (ϵ_x) genera deformaciones en los otros ejes. La magnitud de estas deformaciones esta relacionada por el coeficiente de Poisson. Este coeficiente relaciona las deformaciones axiales con las laterales:

$$\nu = -\frac{\text{lateral}_s\text{train}}{\text{axial}_s\text{train}} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (2.4)$$

Este factor se incluye en el modelo de Timoshenko para el análisis de deformaciones en 2 y 3 dimensiones reemplazando el módulo de Young por [Beer and Johnston(2009)]

$$E_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (2.5)$$

9. **Isotrópico.**- Se consideran como materiales isotrópicos a aquellos cuyas propiedades mecánicas son independientes de la dirección [Beer and Johnston(2009)].
10. **Coefficiente de Expansión Térmica - CTE (α).**- La expansión térmica es una tendencia de la materia a cambiar en volumen en respuesta a un cambio de temperatura. El coeficiente de expansión térmica es una medida de la deformación por unidad de temperatura. Este coeficiente tiene unidades de $[C^{-1}]$ [Princeton(2014)].

2.2.2. Fundamento Teórico

Termorociado

Termorociado (*Thermal Spray*, en inglés) es un término genérico para un grupo de procesos de recubrimiento usados para aplicar recubrimientos metálico y no-metálicos. Estos procesos se agrupan en tres grande categorías: *Flame Spray*, *Electric Arc Spray* y *Plasma Spray*; en función de la fuente de energía usada para calentar las partículas del material que formará el recubrimiento. Las partículas en estado de fusión son aceleradas contra la superficie del sustrato sobre la cual se requiere el depósito, como se observa en la Figura 2.7 . Las velocidad que se alcanzan van desde 50 a más de 1000 m/s . Las partículas se deforman formando *splats* que a gran escala forman una lámina sobre el sustrato conocida como recubrimiento. El objetivo del recubrimiento es mejorar las características del material base [Davis(2004)].

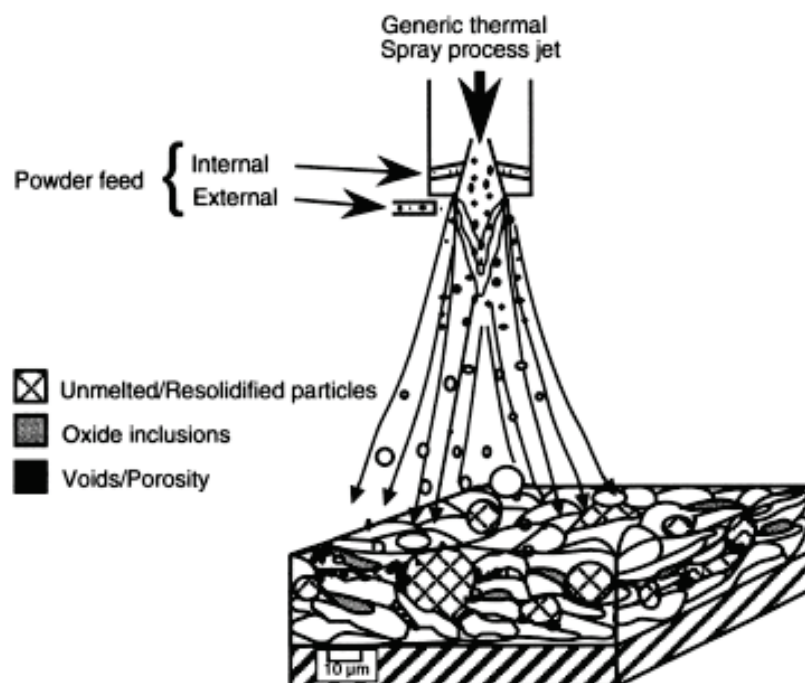


Figura 2.7: Proceso de *Thermal Spray Coating* [Davis(2004)]

Una ventaja del TR es la extremadamente amplia variedad de materiales que

pueden ser usados para recubrimientos. En teoría, cualquier material que se funde puede ser usado en el proceso. Otra ventaja es la cantidad mínima de entrada de calor sobre la pieza base requerida para el proceso. Además, se pueden aplicar recubrimientos a piezas con acabados especiales o piezas que han sido sometidos a tratamiento térmicos sin afectar de sobremanera sus propiedades. Adicionalmente, este tipo de recubrimiento presentan la ventaja de que pueden ser recubiertos o reparados -más de una vez, inclusive- sin afectar las dimensiones de las piezas originales[Davis(2004)].

La elección del tipo de fuente de calor depende del material de deposición, de los requerimientos de desempeño de la capa, del costo y de los límites de tamaño y movilidad de la pieza. A continuación se ahondará en el proceso usado para la fabricación de las probetas de estudio:

Electric Arc Processes En este proceso, dos electrodos consumibles se conectan a una fuente de energía DC. Al establecerse un arco eléctrico entre ellas, el metal de los electrodos se funde y es disparado por medio de aire a presión. Este proceso tiene alta eficiencia energética ya que toda la energía introducida en el sistema es usada para fundir el material de depósito. Otra ventaja de este proceso es que mantiene baja la temperatura del sustrato[Davis(2004)].

Cálculo de la Curvatura de una Función

El radio de curvatura formado al someter una pieza a un momento flector se define por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2.6)$$

donde ρ es el radio de curvatura, M es el momento aplicado, E corresponde al módulo de Young e I corresponde al momento de inercia.

Del cálculo elemental se conoce que la curvatura $\frac{1}{\rho}$ se define como:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (2.7)$$

Debido a que el término $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2$ es despreciable, entonces se tiene

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2.8)$$

como se puede ver de la ecuación anterior, el desplazamiento sobre el eje transversal y depende de los momentos aplicados, el tipo de material y la geometría del mismo. El cálculo de la curvatura y el conocimiento de la geometría y de las fuerzas generadas tras una deformación permitiría encontrar las propiedades del material. [Beer and Johnston(2009)]

Modelo de Timoshenko

El modelo matemático que predice los esfuerzos de compresión o tensión que experimentan tanto el sustrato como el depósito cuando a una placa bi-metálica se la somete a un gradiente de temperatura fue desarrollado por Timoshenko en el año 1925 [Chung(1990)]. Esta ecuación predice el esfuerzo a una distancia y sobre el plano de simetría de área. A partir de este modelo, es posible determinar los esfuerzos máximos y con éstos calcular espesores y materiales adecuados para cada tipo de aplicación. Además, se puede determinar gradientes máximo de temperatura que matengan la deformación del bi-metal dentro del rango elástico. Según el modelo de Timoshenko, la deformación del bi-metal a un gradiente de temperatura se puede representar por una fuerza de tracción o compresión y un par de fuerzas generando un momento en los extremos como se muestra en la Figura 2.8 :

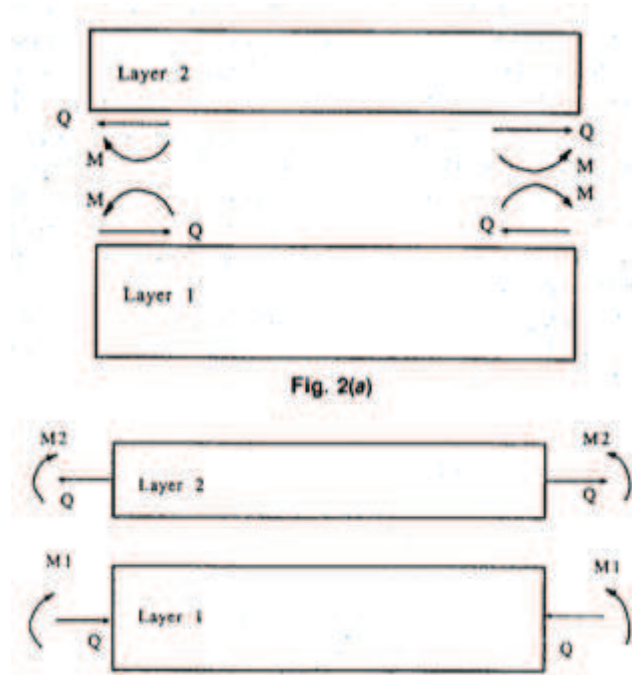


Figura 2.8: Diagrama de fuerzas Modelo de Timoshenko [Chung(1990)].

Debido a que las condiciones estáticas se deben mantener, las fuerzas sobre el sustrato y el depósito deben ser iguales y opuestas aún cuando los momentos sean en el mismo sentido. Ahora, conociendo los valores la fuerza Q y de los momentos M , se pueden obtener los esfuerzos de tracción. Las siguientes ecuaciones muestran estas relaciones:

$$Q = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{\left[\frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} + \frac{(h_1 + h_2)^2}{4(E_1 I_1 + E_2 I_2)} \right]} \quad (2.9)$$

$$M_1 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{\left[\frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} + \frac{(h_1 + h_2)^2}{4(E_1 I_1 + E_2 I_2)} \right]} \cdot \frac{(h_1 + h_2)E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \quad (2.10)$$

$$M_2 = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{\left[\frac{1}{A_1 E_1} + \frac{1}{A_2 E_2} + \frac{(h_1 + h_2)^2}{4(E_1 I_1 + E_2 I_2)} \right]} \cdot \frac{(h_1 + h_2)E_2 I_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \quad (2.11)$$

donde α corresponde al coeficiente de expansión térmica; ΔT corresponde al gradiente de temperatura; el módulo de young se denota por E , mientras que el ancho de las barras se denota por b y la altura de cada segmento (sustrato

o depósito) se denota por h . Asumiendo secciones transversales rectangulares, el área de cada segmento (sustrato o depósito) se define como $A = b \cdot h$. Del mismo modo, el valor del segundo momento de área se calcula con la siguiente expresión $I = b \cdot h^3/12$. En el caso de que la relación $b \ll h$ no se cumpla, entonces, se deberá reemplazar E por $E/(1 - \nu^2)$ y α por $(1 + \nu)\alpha$ [Chung(1990)].

A partir del conocimiento de Q y M_i se pueden calcular los esfuerzos a una distancia y sobre o bajo el plano de simetría de área, tal como lo muestra la Figura 2.9:

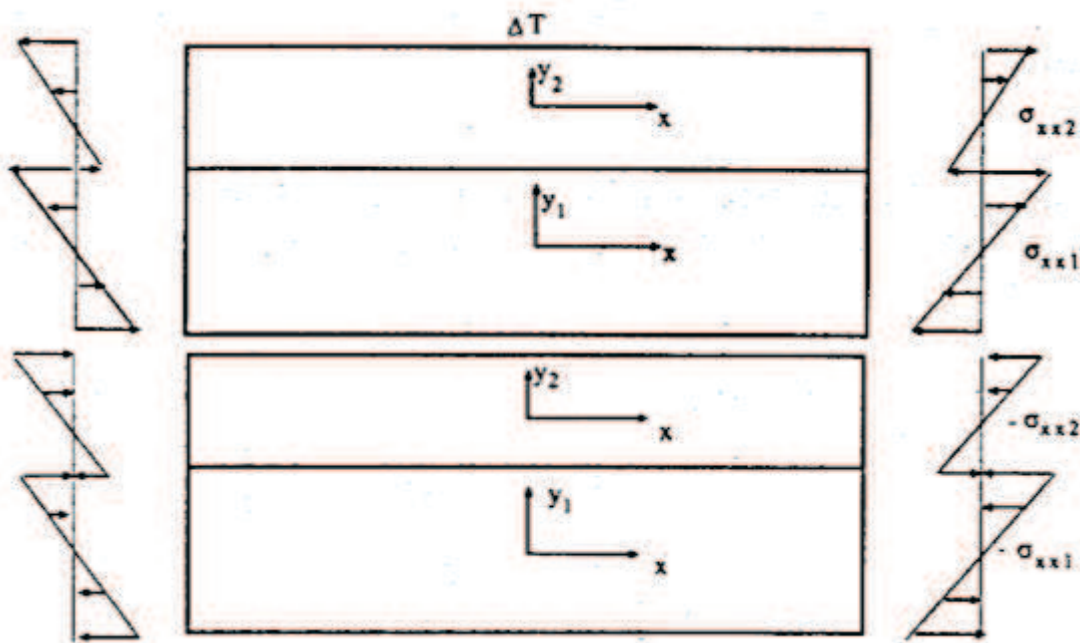


Figura 2.9: Diagrama de fuerzas Modelo de Timoshenko [Chung(1990)].

$$\sigma_{xx1} = -\frac{Q}{A_1} - \frac{M_1 y_1}{I_1} \quad (2.12)$$

$$\sigma_{xx2} = \frac{Q}{A_2} - \frac{M_2 y_2}{I_2} \quad (2.13)$$

Relación Curvatura vs. Temperatura (Matecijek-Sampath)

Ha sido comprobado por diversas fuentes la relación de linealidad existente entre la curvatura de una placa bi-metálica expuesta a un gradiente de temperatura. Diversas metodología de medición tanto in situ como ex situ de procesoscon TR han confirmado la relación de dependencia entre la curvatura y la temperatura. La constantes de linealización son factores que se definen en función de los espesores, coeficientes de expansión térmica y módulos de elasticidad (*Young's Modulus*) propios tanto del sustrato como de la capa de recubrimiento. [Matejicek and Sampath.(2002)]. La siguiente expresión fue desarrollada por Matejicek y Sampath y predefine con alta exactitud el comportamiento de la curvatura debido a un gradiente de temperatura:

$$\Delta k = \frac{6 \cdot E_D \cdot E_S \cdot t_D \cdot t_S \cdot (t_D + t_S) \cdot \Delta T \cdot \Delta \alpha}{E_D^2 \cdot t_D^4 + 4 \cdot E_D \cdot E_S \cdot t_D^3 \cdot t_S + 6 \cdot E_D \cdot E_S \cdot t_D^2 \cdot t_S^2 + 4 \cdot E_D \cdot E_S \cdot t_D \cdot t_S^3 + E_S^2 \cdot t_S^4} \quad (2.14)$$

donde Δk es el cambio en la curvatura debido a un cambio de temperatura ΔT ; $\Delta \alpha$ es la diferencia en coeficientes de expansión térmica entre el recubrimiento y el sustrato; t_S y t_D corresponden a los grosores del sustrato y del depósito, respectivamente, y por último, los valores de E_S y E_D corresponden a los módulos de Young del sustrato y del depósito respectivamente [Matejicek and Sampath.(2002)].

Relación Curvatura vs. Temperatura (Kanthal)

Kanthal propone una expresión diferente para el cálculo de la curvatura en función de la tempertura. La expresión es similar a la de Matecijek- Sampath exceptuando por ciertas simplificaciones hechas en base a supuestos específicos. La ecuación 2.15 muestra dicha expresión [Kanthal(2002)]:

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_o} = \frac{6 \cdot (\alpha_D - \alpha_S)(1 + m)^2 \Delta T}{3 \cdot (1 + m)^2 + (1 + m \cdot n) \left(m^2 + \frac{1}{m \cdot n}\right) s} \quad (2.15)$$

Donde:

$m = \frac{t_S}{t_D}$, relación entre espesores Sustrato-Recubrimiento.

$n = \frac{E_S}{E_D}$, relación entre módulos de Young Sustrato-Recubrimiento.

$s = T_D + T_S$, Espesor total de la probeta.

Bajo el supuesto de similitud entre los espesores y los módulos ($m \approx 1$ y $n \approx 1$) entonces la expresión anterior se reduce a:

$$\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_o} = \frac{3(\alpha_D - \alpha_S)}{2} \cdot \frac{DT}{s} \quad (2.16)$$

La constante $\frac{3}{2}(\alpha_D - \alpha_S)$ se conoce como la *flexibilidad* en Estados Unidos y como *curvatura específica* en Europa (κ) [Kanthal(2002)]. Sustituyendo κ en la expresión anterior y asumiendo un radio de curvatura inicial infinito (∞), se tiene la expresión final:

$$\frac{1}{R_T} = \kappa \frac{DT}{s} \quad (2.17)$$

Determinación de la curvatura específica (flexibilidad)

La deflexión, en general, se mide de acuerdo al estándar ASTM B 106. Este estándar muestra el desarrollo geométrico-matemático de la deflexión en función del radio de curvatura. La Figura 2.10 muestra la deformación de una placa simplemente apoyada como la de la Figura 2.10. De la Figura 2.10 se puede extrapolar la siguiente ecuación:

$$\left(R_T - \frac{s}{2}\right)^2 = \left(R_T - A - \frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (2.18)$$

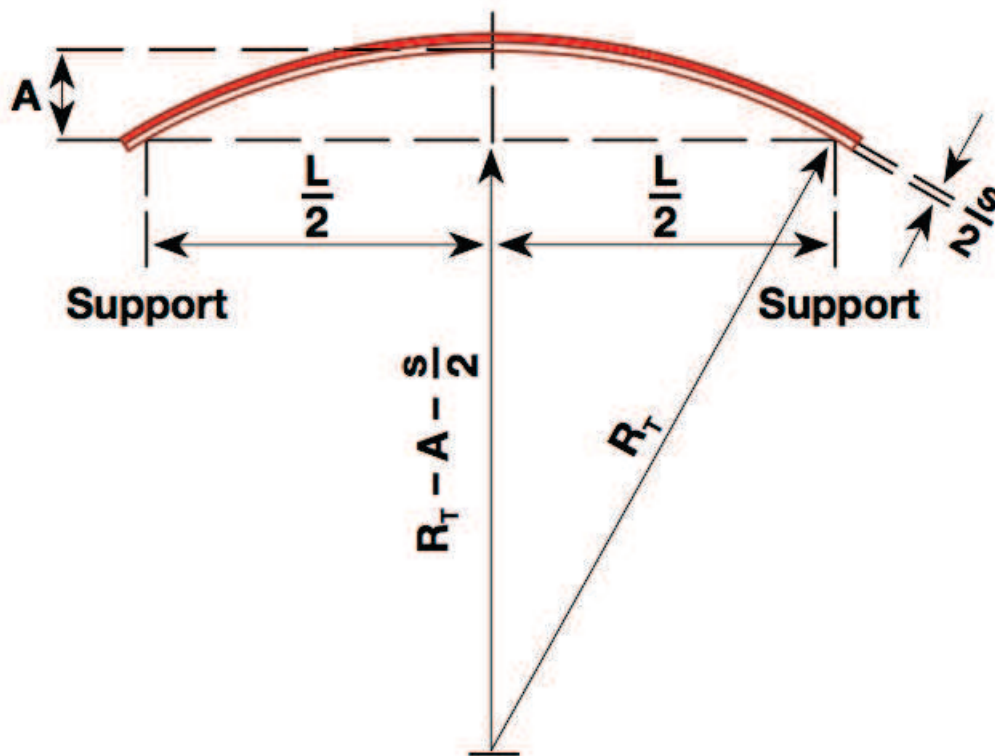


Figura 2.10: Modelo Geométrico y Matemático de la deflexión. [Kanthal(2002)].

Reduciendo dicha ecuación (2.18) se obtiene:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{8A}{L^2 + 4A^2 - 4A \cdot s} \quad (2.19)$$

Sustituyendo la ecuación 2.20 se puede obtener una relación entre la curvatura específica (κ) vs. la variación de temperatura:

$$\kappa = \frac{s}{T - T_o} \cdot \frac{8A}{L^2 + 4A^2 - 4A \cdot s} \quad (2.20)$$

Bajo la asunción de que el valor de A es mucho menor que el valor de L , entonces se puede obtener una aproximación válida dada por:

$$\kappa = \frac{8A \cdot s}{(T - T_o)L^2} \quad (2.21)$$

Rango de Temperatura para Deformación Lineal

El modelo establecido de la deflexión como una función lineal de la temperatura se cumple con alta veracidad para un determinado rango de temperatura. Fuere de este rango, efectos varios como plasticidad y efectos de tratamientos térmicos deben ser considerados. El rango de linealidad se asume como el intervalo en el cuál la deflexión experimental no varía en más del 5 % de la deflexión teórica. La Figura 2.11 muestra el comportamiento de la deflexión experimental en función de la temperatura:

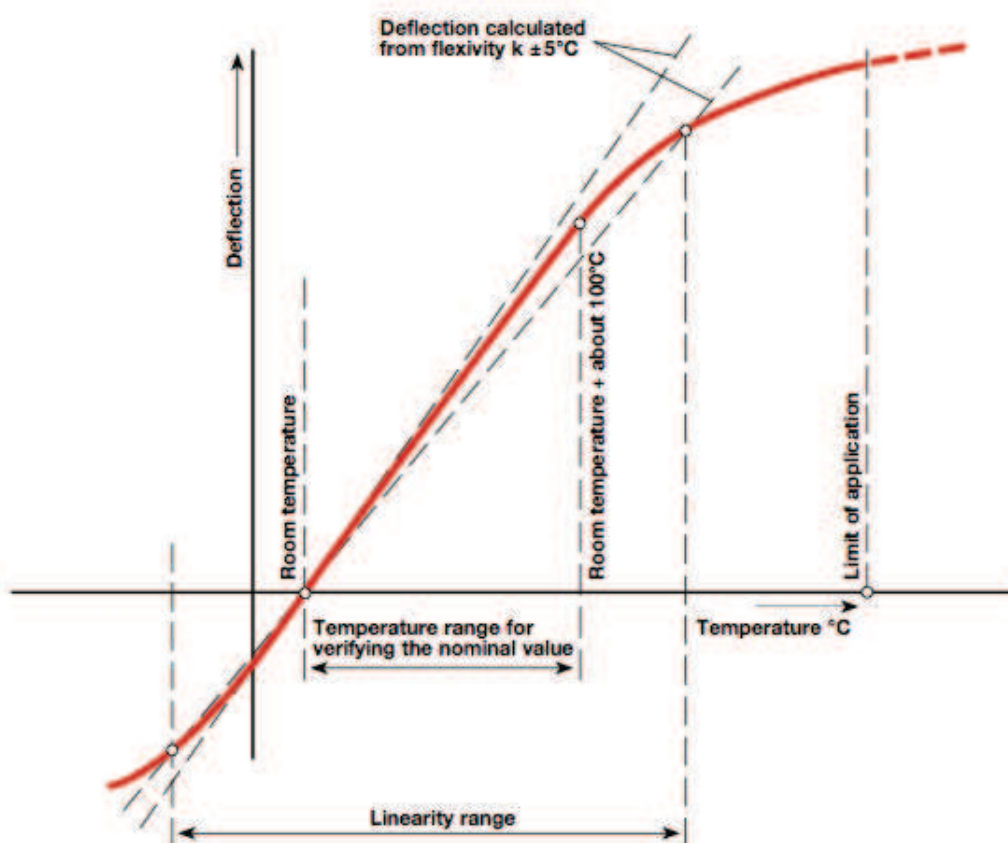


Figura 2.11: Relación Temperatura vs. Deflección. [Kanthal(2002)].

2.2.3. Supuestos de Estudio

La investigación presentada a continuación y sus consecuentes resultados estarán sujetos a los siguientes supuestos. Estos supuestos establecen un marco de

referencia para el desarrollo adecuado de la investigación. En primer lugar, se considerará que el recubrimiento aplicado sobre las probetas es uniforme en toda el área. Esto garantizará que las propiedades sean las mismas independientemente del plano de análisis. En segundo lugar, se asumirá que los materiales son isotrópicos; es decir, que sus propiedades mecánicas son independientes de la dirección o plano de análisis. Respecto a la temperatura, se asumirá que el proceso de enfriamiento se debe únicamente a conductividad con el aire y a convección natural. Esto asegura que no existirá ninguna fuente de enfriamiento externa como ventiladores, flujos de aire conducción con otros materiales. Además, se asumirá que la temperatura en las probetas es uniforme durante el proceso de enfriamiento; de hecho, esta última suposición será justificada como parte de la investigación al hacer un análisis estadístico de la distribución de temperatura en las probetas. Siguiendo esta misma lógica, se asumirá que el tiempo de escaneo de la pieza es muy pequeño en comparación con la tasa de enfriamiento de las probetas. Esto garantizará que el error de muestreo de la curva temperatura vs. curvatura sea mínimo. En lo referente a la metodología de escaneo, se asumirá que:

1. El ambiente de medición será controlado por lo que efectos adversos como variación de la luminosidad del entorno y ruido lumínico externo producido por otras fuentes de luz no afectarán la medición de distancia del sensor láser.
2. Se garantizará que la referencia de tierras (*grounding*) de los instrumentos diseñados y construidos esté dispuesta de tal manera que no presente efectos parásitos sobre las mediciones, especialmente de la temperatura.
3. Se supondrá que las probetas son continuas y sin defectos mayores por lo que valores demasiado alejadas de la media o la tendencia serán error discretos que se eliminarán con filtros tanto analógicos como digitales.
4. Se asumirá que el análisis no sobrepasará el rango elástico de los materiales

con el fin de garantizar una respuesta lineal entre la curvatura y la temperatura (como se muestra en la Figura 2.11) y que no existan deformaciones permanentes. Para esto, se utilizó el modelo de Timoshenko para estimar el intervalo de temperaturas que genere esfuerzos menores a los de cedencia (*yield strenght*).