

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***CARACTERIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE TENSIONES
RESIDUALES EN TITANIO AERONÁUTICO***

Estudiante	<i>Robles, Ampudia, Ainhoa</i>
Director/Directora	<i>Plaza, Pascual, Maria Soraya</i>
Departamento	<i>Departamento de Ingeniería Mecánica</i>
Curso académico	<i>2020-2021</i>

Bilbao, a 21 de septiembre del 2021

DATOS DEL PROYECTO

Alumno: Ainhoa Robles Ampudia

Directora: Maria Soraya Plaza Pascual

Departamento: Departamento de Ingeniería Mecánica

Título del proyecto: Caracterización y predicción de tensiones residuales en titanio aeronáutico.

Plazo de ejecución: febrero 2021 – septiembre 2021

Resumen: En el mundo de la aeronáutica el mecanizado de componentes de titanio con paredes de poco espesor es una práctica habitual. Sin embargo, esta práctica no es un trabajo sencillo, ya que es muy común la aparición de distorsiones generadas por el efecto de las tensiones residuales, las cuales son procedentes de las altas cargas mecánicas y térmicas inducidas en la superficie por el mecanizado. Por esta razón, este informe plantea un modelo empírico centrado en realizar predicciones de las tensiones residuales que se generarían tras la realización de un método de acabado de un proceso de fresado frontal en la aleación de titanio Ti6Al4V.

Para llevar a cabo dicho estudio, se han realizado unos estudios previos donde una comparativa de dos métodos de medición de tensiones residuales determina el método más correcto para este estudio. En concreto, estos dos métodos son el del orificio perforado y el de difracción de rayos-X. De la misma manera, para evaluar la calidad de los datos se ha analizado la variabilidad del sistema de medición seleccionado mediante un estudio de repetibilidad y reproducibilidad. Realizados ambos estudios preliminares, se han llevado a cabo unos ensayos de fresado de los que se han obtenido las medidas de las tensiones residuales necesarias para construir el modelo y realizar la validación de éste.

Haciendo uso de ajustes polinómicos y de la función cosenoidal de decaimiento exponencial, se ha modelizado la tensión residual en función de la profundidad de penetración de las tensiones desde la superficie y de dos parámetros de corte, es decir, la velocidad de corte y el avance por diente. Obtenido el modelo, éste ha sido validado mediante datos experimentales distintos de los empleados para la elaboración del modelo.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo empírico basado en la función cosenoidal con decaimiento exponencial y regresiones polinómicas de primer grado puede predecir los perfiles de tensión residual que se generan en el proceso de mecanizado. Por consiguiente, la posibilidad de predecir la tendencia de estas tensiones permite una futura implementación de métodos de minimización de distorsiones a través del control de las mismas.

Palabras clave: mecanizado, fresado, titanio, tensiones residuales, difracción de rayos-X, método del orificio perforado, modelo empírico.

Ikaslea: Ainhoa Robles Ampudia

Zuzendaria: Maria Soraya Plaza Pascual

Saila: Ingeniaritza Mekanikako saila

Proiektuaren izenburua: titanio aeronautikoko hondar-tentsioen karakterizazioa eta iragarpena.

Iraupena: 2021ko otsaila – 2021ko iraila

Laburpena: Aeronautikaren munduan, lodiera txikiko paretak dituzten titaniozko osagaien mekanizazioa ohikoa da. Hala ere, praktika hori ez da lan erraza, oso ohikoa baita hondar-tentsioen eraginez sortutako distortsioak agertzea. Tentsio horiek mekanizazio gainazalean ematen diren karga mekaniko eta termiko handietatik sortzen direlarik. Hori dela eta, txosten hau Ti6Al4V titanio aleazioan fresaketa prozesu baten akabera metodo bat egin ondoren sortuko liratekeen hondar-tentsioen iragarpenean oinarritutako eredu enpiriko bat proposatzen du.

Azterketa hori egiteko, aldez aurreko azterlan batzuk egin dira, zeintzuetan hondar-tentsioak neurtzeko bi metodo konparatu diren, proiektu hau aurrera eramateko metodorik egokiena aukeratzeko asmoz. Zehazki, bi metodo horiek zulo zulatuaren metodoa eta X izpien difrakzioa dira. Era berean, datuen kalitatea ebaluatzeko aukeratutako neurketa sistemaren errepikagarritasun eta erreproduzigarritasun azterketa bat egin da. Azaldutako bi azterketak egin ondoren, fresaketa saiakuntza batzuk egin dira, eta horietatik lortu dira eredu eraikitze eta balioztatze beharrezkoak diren hondar-tentsioen neurketak.

Doitze ekuazio polinomikoak eta beheratze esponentzialeko funtzio kosenoidala erabiliz, hondar tentsioa modelizatu da gainazaletik tentsioen sartze-sakoneraren eta bi ebaketa parametroen arabera, hau da, ebaketa abiadura eta hortzeko aitzinapena. Eredua lortu ondoren, eredu sortzeko erabili ez diren datu esperimenteren bidez balioztatu da.

Lortutako emaitzen arabera, beheratze esponentzialeko funtzio kosenoidala eta lehen mailako erregresio polinomikoetan oinarritutako eredu enpirikoak mekanizazio prozesuan sortzen diren hondar-tentsioaren profilak aurreikus ditzake. Beraz, tentsio horien joera aurreikusteko aukerari esker, etorkizunean distortsioak minimizatzeko metodoak ezar daitezke, tentsio horiek kontrolatuz.

Hitz gakoak: mekanizazioa, fresaketa, titanioa, hondar-tentsioak, X izpien difrakzioa, zulo zulatuaren metodoa, eredu enpirikoa.

Student: Ainhoa Robles Ampudia

Director: Maria Soraya Plaza Pascual

Department: Department of Mechanical Engineering

Project name: Characterization and prediction of residual stresses in aeronautical titanium.

Execution time: February 2021 – September 2021

Abstract: In the world of aeronautics, the machining of titanium components with thin walls is a common practice. However, this practice is not a simple job, since it is very common the appearance of distortions generated by the effect of residual stresses, which are generated by the high mechanical and thermal loads induced on the surface by the machining. For this reason, this report proposes an empirical model focused on making predictions of residual stresses that are generated after the performance of a finishing method of a face milling process on Ti6Al4V titanium alloy.

In order to carry out this study, previous studies have been done where a comparison of two methods of measuring residual stresses determines the most appropriate method for this study. In fact, these two methods are Hole Drilling and X-ray diffraction. In the same way, to evaluate the quality of the data, the variability of the selected measurement system has been analyzed by a study of repeatability and reproducibility. After both preliminary studies, milling tests were carried out to obtain the residual stress measurements required to build the model and validate it.

By using an exponentially decaying cosine function and polynomial fits, the residual stress has been modelled as a function of the stress penetration depth from the surface and two cutting parameters, i.e., cutting speed and feed rate per tooth. Once the model was obtained, it was validated using experimental data different from those used for the development of the model.

The results obtained show that the empirical model based on an exponentially decaying cosine function and first degree polynomial regressions can predict the residual stress profiles generated in the machining process. Therefore, the possibility of predicting the trend of these stresses allows a future implementation of distortion minimization methods through the control of these stresses.

Keywords: machining, milling, titanium, residual stresses, X-ray diffraction, Hole Drilling, empirical model.

ÍNDICE

DATOS DEL PROYECTO	i
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE ILUSTRACIONES	vi
ÍNDICE TABLAS.....	ix
ACRÓNIMOS, ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. CONTEXTO	2
3. OBJETIVOS	4
3.1. Objetivo principal	4
3.2. Objetivos secundarios	4
4. ALCANCE.....	5
5. BENEFICIOS.....	6
5.1. Beneficios técnicos	6
5.2. Beneficios económicos.....	6
5.3. Beneficios medioambientales	6
6. ESTADO DEL ARTE.....	7
6.1. El titanio.....	7
6.2. Tensiones residuales	8
6.2.1. Tipos de tensiones residuales.....	9
6.2.2. Origen de las tensiones residuales.....	10
6.2.3. Efectos de las tensiones residuales	11
6.3. Tensiones residuales inducidas por mecanizado	13
6.3.1. Tensiones residuales en rectificado	15
6.3.2. Tensiones residuales en torneado.....	16
6.3.3. Tensiones residuales en fresado	17
6.4. Relación entre las tensiones residuales y distorsiones	18
6.5. Métodos de medición de las tensiones residuales	21
6.5.1. Difracción de rayos-X.....	21
6.5.2. Método del orificio perforado (Hole Drilling).....	28
6.6. Modelos de predicción de las tensiones residuales.....	32
6.6.1. Modelos empíricos	33
6.7. Coeficientes de correlación	35
7. METODOLOGÍA DEL TRABAJO	36
7.1. Material sometido a estudio	37

7.2.	Proceso de mecanizado – Fresado	38
7.2.1.	Maquinaria y equipos utilizados.....	38
7.2.2.	Ensayos de mecanizado.....	40
7.3.	Medición de las tensiones residuales.....	45
7.3.1.	Maquinaria y equipos utilizados.....	45
7.3.2.	Instrucciones de adquisición de medidas de tensiones residuales.....	48
7.3.3.	Comparativa entre dos métodos de medición de tensiones residuales: Hole Drilling y Difracción de Rayos-X.....	54
7.3.4.	Estudio de repetibilidad y reproducibilidad del difractómetro de rayos-X.....	64
7.3.5.	Obtención de datos para la construcción del modelo empírico	69
7.4.	Desarrollo del modelo empírico	72
7.4.1.	Identificación	72
7.4.2.	Simulación	80
7.4.3.	Validación	82
8.	DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	92
8.1.	Evaluación del modelo	92
8.2.	Validación del modelo.....	94
9.	PLANIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE TAREAS	99
9.1.	Tareas	99
9.2.	Hitos	103
9.3.	Diagrama de Gantt	104
10.	DESCARGO DE GASTOS.....	105
11.	ANÁLISIS DE RIESGOS	108
12.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	110
	BIBLIOGRAFÍA.....	112
	ANEXOS	115
	Anexo I. Tiempos del proceso de electropulido.....	115
	Anexo II. Informe del proceso de Hole Drilling (Stresscraft)	117
	Anexo III. Estudio del efecto del valor de las propiedades del material en la obtención de las tensiones residuales.....	128
	Anexo IV. Análisis de los métodos de ajuste del pico de difracción	130
	Anexo V. Parámetros de los modelos empíricos.....	132
	Modelización polinómica	132
	Modelización mediante la FCDE.....	132
	Anexo VI. Normativa aplicada	137

ÍNDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tendencia de los viajes aéreos en función del tiempo [3].	3
Ilustración 2. (izq.) Motor aeronáutico [8] y (dcha.) componente estructural aeronáutico [9].	8
Ilustración 3. Los diferentes tipos de tensiones residuales en un material bifásico después de un tratamiento de temple [15].	10
Ilustración 4. Superposición de las tensiones residuales y las tensiones de servicio [17].	11
Ilustración 5. Efectos de las tensiones residuales en el rendimiento de los materiales.	12
Ilustración 6. Tensiones generadas en la superficie y en las capas próximas a la superficie [4].	13
Ilustración 7. El efecto de la deformación mecánica y la temperatura en la superficie.	14
Ilustración 8. Perfil típico de la tensión residual inducida por el mecanizado [20].	14
Ilustración 9. Parámetros para la descripción del perfil de tensiones residuales inducidas por el mecanizado [21].	15
Ilustración 10. Tensiones residuales de una superficie rectificada a diferentes condiciones [19].	16
Ilustración 11. Ángulos de herramienta de torneado [22].	17
Ilustración 12. Tensiones residuales en fresado [19].	17
Ilustración 13. Fresado en concordancia (down milling) y fresado en oposición (up milling).	18
Ilustración 14. Hipótesis para la caracterización de las tensiones residuales.	19
Ilustración 15. Discretización del material en capas y las tensiones residuales en plano XZ.	19
Ilustración 16. Efecto del momento flector derivado de la fuerza de amarre.	20
Ilustración 17. Tensiones residuales de inducidas por el mecanizado.	20
Ilustración 18. Difracción de rayos-X por un cristal [24].	22
Ilustración 19. Efecto de las tensiones en los picos de difracción.	23
Ilustración 20. Deformación medida por difracción de rayos-X en las coordenadas de la muestra [25].	24
Ilustración 21. Ejemplos esquemáticos de curvas $d\phi\psi - \sin^2\psi$.	26
Ilustración 22. Giros posibles de la muestra.	27
Ilustración 23. Diseños típicos de las galgas extensométricas.	28
Ilustración 24. Imagen esquemática de la galga extensométrica típica.	28
Ilustración 25. Profundidad de agujero y de tensiones correspondientes a los coeficientes a .	30
Ilustración 26. Diagrama esquemático de la estructura de los modelos empíricos.	33
Ilustración 27. Diagrama de los apartados y subapartados de la metodología del trabajo.	36
Ilustración 28. Probeta de la aleación de titanio Ti6Al4V sometida a estudio.	37
Ilustración 29. Microestructura de la aleación de titanio Ti6Al4V [21].	37
Ilustración 30. Centro de mecanizado Soraluze FMT.	38
Ilustración 31. Proceso de fresado, estrategia Zig en concordancia.	40
Ilustración 32. Parámetros de corte recomendados para la herramienta HTA II.	41
Ilustración 33. Diseño del ensayo realizado para obtener los datos que construirán el modelo empírico.	41
Ilustración 34. Diseño del ensayo realizado para la validación del modelo y el estudio R&R.	42
Ilustración 35. Utillaje seleccionado para amarrar el tocho en la máquina-herramienta.	42
Ilustración 36. Tipos de filos de la HTA II.	43
Ilustración 37. Desgaste de la herramienta en el filo 1 tras el mecanizado de limpieza.	43
Ilustración 38. Goniómetro (izq.) y unidad principal (drcha.) del difractómetro de Rayos-X Xstress 3000.	46
Ilustración 39. Electropulidora MoviPol-5 (izq.) y electrolito A3-I (drcha.).	46
Ilustración 40. Detectores y colimador del difractómetro.	48
Ilustración 41. Selección de parámetros para realizar una medida de tensiones residuales.	49

Ilustración 42. Método de alineación del goniómetro.....	49
Ilustración 43. Parámetros del método de electropulido (izq.) y componentes de la electropulidora (drcha.)	51
Ilustración 44. Huella generada tras un electropulido a 0,12 mm de profundidad.....	51
Ilustración 45. Esquema de los tipos de métodos globales más habituales.....	52
Ilustración 46. Ajustes del método de ajuste de pico (Peak fit).....	52
Ilustración 47. Ejemplo de un perfil de tensiones corregida (C) y sin corregir.....	53
Ilustración 48. Deformaciones generadas tras el mecanizado en el eje longitudinal (arriba) y transversal (abajo).....	54
Ilustración 49. Puntos en los que se va a medir la tensión residual por los métodos de XRD y HD.	54
Ilustración 50. Montaje para la medición de las tensiones residuales en el difractor de rayos-X (izq.) y huellas generadas tras el proceso de electropulido (drcha.).....	56
Ilustración 51. Medición de tensiones residuales por HD: P3 (izq.) y P1 y P2 (drcha.).....	57
Ilustración 52. Sistemas de coordenadas de las tensiones principales de los métodos de XRD y HD..	59
Ilustración 53. Perfil de tensión residual del P1 (XRD) y P1 (HD).....	60
Ilustración 54. Perfil de tensión residual del P2 (XRD) y P2 (HD).....	61
Ilustración 55. Perfil de tensión residual del P3 (XRD) y P3 (HD).....	61
Ilustración 56. Curvas obtenidas para comparación de los métodos de XRD y HD.....	62
Ilustración 57. Representación gráfica del concepto de repetibilidad (izq.) y de reproducibilidad (drcha.) [48].....	64
Ilustración 58. Imagen esquemática de los puntos medidos para el estudio de R&R.....	65
Ilustración 59. Variabilidad de las medidas realizadas en diferentes puntos y por diferentes operadores.....	68
Ilustración 60. Preparación de la probeta mecanizada para obtener las tensiones residuales del modelo.....	69
Ilustración 61. Proceso de medición de XRD (izq.) y huellas de electropulido (drcha.).....	69
Ilustración 62. Picos de intensidad no definidos (Punto 3B – profundidad 0,18 mm – rotación 90° – inclinación -39°).....	71
Ilustración 63. Diferencia de una regresión de primer y segundo grado de las medidas obtenidas para los parámetros de corte $V_c = 60$ m/min y $f_z = 0,02$ mm.....	73
Ilustración 64. Primera regresión (R1) - Tensión [MPa] en función de la profundidad [mm].....	74
Ilustración 65. Segunda regresión (R2) - Coeficientes de R1 [-] en función de f_z [mm].....	75
Ilustración 66. Tercera regresión (R3) - Coeficientes de R2 [-] en función de V_c [m/min].....	76
Ilustración 67. Primera regresión (R1) - Tensión [MPa] en función de la profundidad [mm].....	78
Ilustración 68. Segunda regresión (R2) - Parámetros de la función de ajuste en función de f_z [mm].	79
Ilustración 69. Tercera regresión (R3) - Coeficientes de R2 [-] en función de V_c [m/min].....	79
Ilustración 70. Evaluación visual de cada uno de los tipos de modelo utilizados a lo largo de este estudio.....	82
Ilustración 71. Validación de los modelos realizados mediante el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación.....	83
Ilustración 72. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización polinómica - Rotación=-90°).....	86
Ilustración 73. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización polinómica - Rotación=0°).....	87
Ilustración 74. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización mediante la FCDE - Rotación=-90°).....	90
Ilustración 75. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización mediante la FCDE - Rotación=0°).....	91

Ilustración 76. Validación de los modelos mediante el coeficiente de Pearson.....	93
Ilustración 77. Error medio obtenido de los modelos construidos.....	93
Ilustración 78. Validación de los modelos mediante el coeficiente de Pearson y coeficiente de determinación.....	94
Ilustración 79. Validación de los modelos mediante el error medio.....	95
Ilustración 80. Validación de los modelos polinómicos (rotación=-90°).....	95
Ilustración 81. Validación de los modelos polinómicos (rotación=0°).....	96
Ilustración 82. Validación de los modelos obtenidos mediante la FCDE y polinomios (rotación=-90°).	97
Ilustración 83. Validación de los modelos obtenidos mediante la FCDE y polinomios (rotación=0°)...	97
Ilustración 84. Coeficiente de Pearson y de determinación según el tipo de modelo.....	98
Ilustración 85. Capacidad de predicción del modelo empírico construido.....	98
Ilustración 86. Diagrama de Gantt del proyecto.....	104
Ilustración 87. Imagen 3D de la forma de la huella obtenida mediante un escaneo mediante una máquina de medición por coordenadas.....	115
Ilustración 88. Relación lineal de la profundidad y el tiempo de electropulido.....	116
Ilustración 89. Comparativa de los perfiles de tensión residual obtenidos mediante el ensayo 1 y el ensayo 2.....	129

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Ventajas, desventajas y limitaciones de los diferentes tipos de modelos.	32
Tabla 2. Composición química de la aleación de titanio Ti6Al4V.....	37
Tabla 3. Propiedades de la aleación de titanio Ti6Al4V.	37
Tabla 4. Especificaciones del centro de mecanizado Soraluze FMT.	38
Tabla 5. Herramientas empleadas a lo largo del proyecto.	39
Tabla 6. Desgastes de la herramienta HTA II tras el mecanizado para el modelo y validación y R&R..	44
Tabla 7. Características del difractor de Rayos-X.	45
Tabla 8. Características de la Electro-pulidora.....	46
Tabla 9. Composición química del electrolito A3-I.....	47
Tabla 10. Mesa XY y Láser.	47
Tabla 11. Comparación de los datos de teóricos y experimentales del patrón de alta tensión de titanio.	50
Tabla 12. Parámetros para obtener las medidas de XRD para la comparativa entre HD y XRD.....	55
Tabla 13. Mediciones de tensión residual proporcionadas por el equipo de difracción de rayos-X. ...	56
Tabla 14. Parámetros para obtener las medidas de HD para la comparativa entre HD y XRD.....	58
Tabla 15. Mediciones de tensión residual proporcionadas por Stresscraft.....	58
Tabla 16. Adaptación de las medidas de tensión residual obtenidas mediante el método de HD.	60
Tabla 17. Parámetros para obtener las medidas de XRD para el estudio de R&R.....	65
Tabla 18. Tensiones residuales superficiales medidas en 3 puntos diferentes por dos operadores....	66
Tabla 19. Rango de cada operador.....	66
Tabla 20. Valor de las constantes K_1 y K_2	67
Tabla 21. Parámetros para obtener las medidas de XRD para el desarrollo del modelo empírico.	70
Tabla 22. Evaluación del modelo construido mediante funciones polinómicas.....	80
Tabla 23. Evaluación del modelo construido mediante la FCDE y funciones polinómicas.	81
Tabla 24. Validación del modelo construido mediante funciones polinómicas.....	83
Tabla 25. Validación de la modelización polinómica (Rotación=-90°).	84
Tabla 26. Validación de la modelización polinómica (Rotación=0°).....	85
Tabla 27. Validación del modelo construido mediante la FCDE y funciones polinómicas.....	88
Tabla 28. Validación de la modelización mediante la FCDE (Rotación=-90°).....	88
Tabla 29. Validación de la modelización mediante la FCDE (Rotación=0°).....	89
Tabla 30. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 0.....	99
Tabla 31. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 1.....	99
Tabla 32. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 2.....	100
Tabla 33. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 3.....	100
Tabla 34. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 4.....	101
Tabla 35. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 5.....	101
Tabla 36. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 6.....	102
Tabla 37. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 7.....	102
Tabla 38. Horas internas para la realización del proyecto.	105
Tabla 39. Gastos generados para la realización del proyecto.....	105
Tabla 40. Amortizaciones del proyecto.....	106
Tabla 41. Descargo de gastos total de proyecto.	107
Tabla 42. Análisis de riesgos del proyecto.	108
Tabla 43. Matriz de probabilidad-impacto de los riesgos del proyecto.....	109
Tabla 44. Medidas de profundidad obtenidas por la empresa Zeiss.	116

Tabla 45. Condiciones de los diferentes ensayos para el estudio del efecto del valor de las propiedades del material.	128
Tabla 46. Valores de tensiones obtenidos mediante diferentes valores de las propiedades del material (P1-rotación=0°).	128
Tabla 47. Datos del método de medición de HD y de XRD obtenidos mediante diferentes métodos de ajuste.	130
Tabla 48. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante regresiones polinómicas (rotación=-90°).	133
Tabla 49. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante regresiones polinómicas (rotación=0°).	134
Tabla 50. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante la FCDE y regresiones polinómicas (rotación=-90°).	135
Tabla 51. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante la FCDE y regresiones polinómicas (rotación=0°).	136

ACRÓNIMOS, ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

TFM/MAL: Trabajo de Fin de Máster / Master Amaierako Lana

CAV: Comunidad Autónoma Vasca

AFM: *Advanced Manufacturing Technologies*

PIB: Producto interno bruto

Eurostat: Oficina Europea de Estadística

I+D: investigación y desarrollo

RS: *Residual Stress* / tensión residual

σ^{RS} : tensión residual

$\sigma^{RS.I}, \sigma^{RS.II}, \sigma^{RS.III}$: tensión residual de tipo I, II y III

σ^R : tensiones residuales elásticas

σ^S : tensiones de servicio

$\sigma_{r,sur}$: tensión residual superficial

$\sigma_{C,ax}$: máxima tensión residual compresiva

h_{r0} : ubicación de la máxima tensión residual compresiva

h_{ry} : profundidad de respuesta en la que se estabilizan las tensiones residuales inducidas

CBN: Nitruro de boro cúbico

Al_2O_3 : óxido de aluminio

SiC: carburo de silicio

γ : ángulo de desprendimiento

H : espesor de una placa

b_x, b_y : anchura de una placa en las direcciones X e Y

σ_z : tensión en la dirección del eje Z

$Mb_{x,y}$: momento flector total que actúa en la sección transversal en las direcciones X e Y

$Mb_{x,y}^{RS}$: momento flector de las tensiones volumétricas en direcciones X e Y

$Mb_{x,y}^0$: momento flector proveniente de las fuerzas de amarre en las direcciones X e Y

$Mb_{x,y}^{sup}$: momento flector procedente de las cargas termomecánicas del mecanizado sobre la superficie en las direcciones X e Y

E : módulo de Young

I : momento de inercia

ν : coeficiente de Poisson

χ : curvatura

e : espesor de capas de una placa

k_{ij} : distancia del centro de gravedad de cada una de las capas (i) al centro de gravedad del tocho tras el mecanizado de cada capa (j)

$\sigma_{x,y}^i$: tensión en las direcciones X e Y

XRD: *X-Ray Diffraction* / Difracción de rayos-X

d : distancia interplanar

λ : longitud de onda

n : orden de reflexión

θ : ángulo de incidencia

FWHM: *Full Width at Half Maximum* / anchura del pico a media altura

ε : deformación elástica

d_0 : espacio interplanar libre de tensiones

θ : posición del pico de difracción con tensiones

θ_0 : posición del pico de difracción sin tensiones

ϕ : ángulo de rotación alrededor de la normal de la muestra (S_3)

ψ : ángulo de inclinación desde la normal de la muestra dentro de un plano definido por L y S_3 .

$\varepsilon_{\phi\psi}$: deformación medida en función de los ángulos ϕ y ψ

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$: componentes del tensor de deformación en las coordenadas de la muestra S_1, S_2 y S_3 .

$h_{\phi\psi}$: vector de unidad

$\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{33}$: componentes normales y tangenciales de tensión.

$\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}}$: deformación medida del plano reticular específico $\{hkl\}$ en la dirección definida por ϕ y ψ

$S_1^{\{hkl\}}, \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}$: constantes elásticas de los rayos-X para el plano reticular.

σ_ϕ : tensión normal

τ_ϕ : tensión cortante

m : pendiente de la deformación medida en la gráfica $\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}} - \sin^2 \psi$

Δm : masa de material eliminado

k : equivalente electroquímico del material de muestra

ΔI^+ : intensidad

Δt : margen de tiempo

D: diámetro del círculo de medición

\bar{A}, \bar{B} : dos constantes de calibración

β : ángulo en el que se encuentra la tensión máxima

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$: tensión máxima y mínima

\bar{a}, \bar{b} : constantes adimensionales

p : relación de la deformación volumétrica

q, t son componentes de la deformación tangencial

P : representa la presión media de las tensiones residuales

Q, T representan los componentes de la tensión tangencial

$\sigma(x)$: tensión residual en función de la profundidad

x : profundidad de bajo la superficie

C_0 : amplitud de la exponencial

ζ : coeficiente de amortiguación

ω_d : frecuencia de amortiguación

φ : ángulo de fase

r : coeficiente de correlación de Pearson

R^2 : coeficiente de determinación

$\bar{\sigma}$: promedio de las tensiones residuales medidas

$\hat{\sigma}$: tensión residual predicha con el modelo

$\bar{\hat{\sigma}}$: promedio de las tensiones residuales predichas

Vc : velocidad de corte

fz : avance por diente

R&R: repetibilidad y reproducibilidad

a_p : profundidad de pasada axial

a_e : profundidad de pasada radial

Vb : promedio del desgaste de flanco

HD: *Hole Drilling*

R : rango

\bar{R} : rango promedio

n : número de mediciones realizadas por cada operador

m : número de operadores.

$\bar{\bar{R}}$: rango promedio de todos los rangos

K_1 : constante relacionada con el número de mediciones realizadas por cada operador

K_2 : constante relacionada con el número de operadores

T : tolerancia de la magnitud medida.

X : valor de las medidas realizadas

\bar{x} : medición promedio de cada operador

r : número de repeticiones por medida

FCDE: función cosenoidal de decaimiento exponencial

1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo se presenta la memoria del Trabajo de Fin de Máster (TFM) titulado “*Caracterización y predicción de tensiones residuales en titanio aeronáutico*”, realizado por la alumna Ainhoa Robles Ampudia, estudiante de 2º año del Máster en Tecnología Industrial, con especialización en Diseño y Fabricación y del Máster Propio en Aeronáutica y Máquina-Herramienta.

Este proyecto se ha llevado a cabo en el departamento de Procesos de Fabricación del centro tecnológico IDEKO el cual se especializa en tecnologías de fabricación y producción industrial. Este estudio ha sido dirigido por Soraya Plaza Pascual, profesora del TFM en la Universidad, y María Aurrekoetxea Totorikaguena, directora en la empresa.

Para dar comienzo al contenido de este trabajo se introduce el contexto en el que se desarrolla el proyecto, donde se menciona el estado actual de la industria en el País Vasco como en España. De esta manera, se hace una breve explicación del estudio que se realiza y se justifica la necesidad de este proyecto. El objetivo principal del informe es presentar un modelo empírico para predecir las tensiones residuales que se generan tras un proceso de fresado en la aleación de titanio Ti6Al4V. Para ello, se realizaron unos ensayos de mecanizado y se midieron las tensiones residuales generadas. Obtenidos los datos de las tensiones residuales se desarrolló el modelo y se validó mediante otra serie de ensayos experimentales. Una vez obtenidos los resultados de la validación estos fueron debidamente analizados.

Posteriormente, se presenta la planificación y la descripción de las tareas realizadas, seguido de un descargo de gasto donde se reflejan los costes totales del proyecto. Tras haber identificado los posibles riesgos que se puedan dar a lo largo del trabajo, se plantea un plan de medida para prevenir, minimizar y corregir fatales consecuencias que pudieran generarse a lo largo de estudios de este tipo.

En modo de sumario, se finaliza con una serie de conclusiones que tratan de vincular los resultados obtenidos a lo largo del trabajo con los objetivos marcados. Además, se mencionan algunas cuestiones que han surgido a lo largo del desarrollo del proyecto, con el fin de que puedan ser investigadas en un futuro y poder introducir las en este modelo de cara a acercar este modelo al propio proceso de producción del producto.

2. CONTEXTO

El sector de la fabricación en la Comunidad Autónoma Vasca (CAV) juega un papel muy importante en su economía. De hecho, según los datos de la *Advanced Manufacturing Technologies* (AFM), el sector de la máquina herramienta creció un 5,4% en el año 2018. Este crecimiento se debió, principalmente a la producción de máquinas de arranque y a los procesos de mecanizado y sus servicios. Además, en relación con el PIB, según la Oficina Europea de Estadística (Eurostat), el gasto en I+D interna en el territorio vasco alcanzó el 1,86% en 2019, por lo que sigue liderando el ranking nacional a pesar de que aún está por debajo de la media europea, la cual alcanza el 2,19% [1].

Sin embargo, las dificultades e incertidumbre provocadas por la pandemia del COVID-19 han ocasionado una importante caída de la demanda, siendo las severas restricciones para viajar y realizar ventas, instalaciones y mantenimiento de los equipos las principales causantes de esta caída.

Según AFM, los datos del sector de máquinas-herramienta, reflejan un descenso de facturación del 21,4%, y del 22,4% en el caso de las exportaciones. A pesar de este gran impacto para el sector, esta asociación avanza que este último trimestre está mostrando una cierta recuperación atenuando así el impacto del confinamiento. La caída ha sido generalizada en todos los subsectores, aunque las máquinas de deformación las cuales ya arrastraban descensos en los dos últimos años son las que más esperan el inicio de la recuperación. Por otro lado, en los procesos de arranque de viruta, especialmente, el fresado, los componentes y las herramientas, no se han visto tan afectadas [2].

Otros grandes sectores con alta importancia en la CAV, como es el sector aeronáutico o el automovilístico, tienen estrecha relación con la máquina herramienta ya que, muchos de los componentes destinados a estos sectores, se fabrican en empresas vascas como son ITP Aero, fabricantes de las turbinas de baja presión de los motores aeronáuticos de Rolls-Royce o MAIER, líder europeo en la decoración de piezas de plástico y fabricantes de subconjuntos técnicos para la industria del automóvil.

Centrando atención en el sector aeronáutico, al igual que otros tantos, éste se ha visto afectado en gran medida debido a la pandemia global que estamos sufriendo. Partiendo de la estimación realizada hace varios años, donde se mostraba un aumento exponencial en cuanto a los viajes aéreos, en la actualidad, se calcula que aproximadamente se tardará tres años en volver a los niveles del 2019, y pasaran algunos años más para que el sector vuelva a las tendencias de crecimiento a largo plazo (*Ilustración 1*). Sin embargo, la aviación sigue siendo una parte fundamental de los sistemas de transporte de todo el mundo por lo que no debe quedarse atrás en cuanto a las mejoras que se puedan realizar [3].

El sector de la fabricación está en constante evolución y cada vez es más difícil ser competitivo y cumplir los requisitos que exige el mercado. En el sector aeronáutico, estos requisitos, en cuanto a tolerancias y calidades superficiales, tienen mayor importancia debida a la relación de estos parámetros con la seguridad de la aeronave. Esto exige tener mayor conocimiento de las características de los procesos, los materiales y su comportamiento para diseñar procesos más eficientes y competitivos.

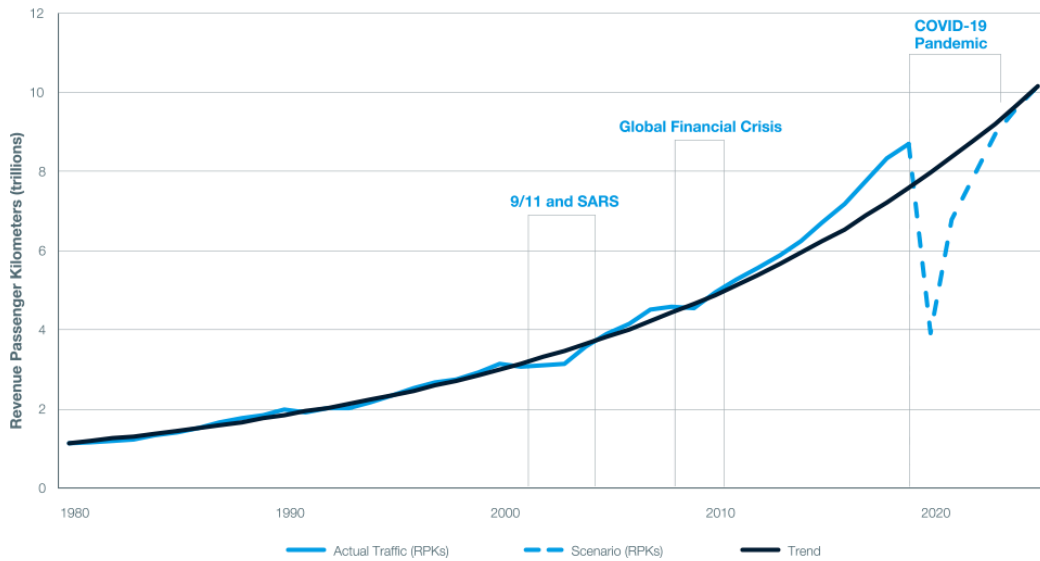


Ilustración 1. Tendencia de los viajes aéreos en función del tiempo [3].

En cuanto al material empleado en las aeronaves, los materiales utilizados en las aero-estructuras se fabrican principalmente en aluminio y titanio. En cuanto al titanio, la importancia de este ha aumentado a medida que las capacidades y las posibilidades de mecanizado han ido creciendo, por lo que se estima un aumento en el uso de éste a pesar de su alto coste. Por otro lado, la aparición de distorsiones en los componentes de titanio o aluminio tras el mecanizado es un problema industrial recurrente que genera importantes costes y desperdicios de material, pudiendo llegar a hacer imposible el uso de un componente. Por ejemplo, en la fabricación de elementos con paredes finas, existe un 50% de posibilidades de que aparezca una disconformidad dimensional o geométrica debido a las distorsiones.

Las principales fuentes de las distorsiones que se generan en los componentes aeronáuticos son el estado de tensión residual de la materia prima y las tensiones residuales generadas en las superficies tras el proceso de mecanizado. Tanto una fuente como otra son un gran problema, ya que una pequeña variación del estado de la materia prima o de la herramienta y la aparición de imprevistos durante los procesos de mecanizado puede provocar una distorsión final imprevisible. Así, los procesos de mecanizado suelen emplear estrategias específicas para disminuir las distorsiones en lo posible, sin embargo, dichas estrategias dan lugar a tiempos de mecanizado muy elevados y, en consecuencia, un incremento en el coste de fabricación.

En los últimos años se están realizando diferentes investigaciones con el objetivo de predecir las tensiones residuales que se generarían en un componente al ser mecanizado y así poder implementar en la propia máquina un control de corrección, evitando de esta manera la distorsión del elemento. En la actualidad, existen algunas herramientas para modelización de tensiones residuales [4]–[6], pero éstas no son suficientemente precisas y, por lo general, son bastante caras para las organizaciones. Además, el uso de estas herramientas es bastante complejo por lo que sería necesario un personal cualificado y formado.

Por último, la modelización de las tensiones residuales producidas por el mecanizado puede realizarse mediante diferentes técnicas de cálculo. Sin embargo, son los modelos empíricos los modelos más prácticos y rápidos para diagnosticar de forma fácil las tensiones residuales que están presentes en la pieza acabada y, de esta manera, integrar esta herramienta en el proceso de mecanizado.

3. OBJETIVOS

Habiendo descrito el contexto sobre el que se desarrolla el proyecto, este trabajo tiene como objetivo la caracterización y predicción de las tensiones residuales generadas tras un proceso de fresado frontal. Gracias a la predicción de estas tensiones residuales inducidas tras realizar el proceso de mecanizado se puede analizar la deformación generada en los componentes mecanizados y, así, desarrollar métodos de control para evitar dicha deformación. Este punto resulta de gran interés debido a la potencial reducción de derroche de material y tiempo en la fabricación de piezas defectivas, así como asegurar el comportamiento de componentes durante su ciclo de vida.

3.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este estudio se centra en la construir un modelo empírico capaz de predecir las tensiones residuales que se inducen en una aleación de titanio tras un proceso de mecanizado, en concreto, un proceso de fresado frontal.

3.2. Objetivos secundarios

A la hora de alcanzar el objetivo principal del proyecto se llevaron a cabo una serie de objetivos secundarios, los cuales hicieron posibles la realización completa del trabajo. Entre ellos se encuentran los siguientes objetivos:

- Caracterización y análisis de los perfiles de tensión residual en profundidad que se generan tras un proceso de fresado, incluyendo el efecto de los parámetros de corte y el desgaste de herramienta sobre la evolución de la curva de los perfiles de tensiones.
- Estudio del método de medición de tensiones mediante la difracción de rayos-X con el fin de lograr un entendimiento del propio sistema de medición y del proceso que realiza para obtener la tensión residual de la distancia interplanar medida.
- Analizar la influencia de la obtención de las tensiones residuales mediante diferentes métodos. En concreto, la realización de una comparativa entre el método de *Hole Drilling* Incremental y Difracción de Rayos-X.
- Evaluación de fiabilidad del propio sistema de medición de tensiones residuales mediante un estudio de repetibilidad y reproducibilidad. Analizar el efecto del propio sistema de medición en los datos que se usan para la elaboración de modelo matemático.
- Optimización del proceso de obtención de perfiles de tensiones residuales. Búsqueda de un proceso de obtención de datos en el que el operario realice la menor manipulación, en el menor tiempo posible y obteniendo la profundidad exacta en la que se incide para obtener el perfil de tensiones residuales.

4. ALCANCE

Una vez definidos los diferentes objetivos de este proyecto, en el siguiente apartado se definirá el alcance del trabajo que se redacta en este informe.

Las tensiones residuales generadas durante el mecanizado se ven influenciadas por un gran número de factores, entre otros, los parámetros de corte, las tensiones residuales volumétricas las cuales son procedentes de la fabricación del tocho del material, el desgaste de la herramienta y la temperatura generada al realizar el mecanizado. Por lo que, el presente proyecto se centra en el efecto del desgaste de la herramienta y en el efecto de dos parámetros de corte seleccionados, en concreto, la velocidad de corte y el avance por diente.

Mientras que este proyecto queda enmarcado dentro de las problemáticas de la aparición de distorsiones en componentes mecánicos, este trabajo está centrado en la predicción de las tensiones residuales generadas por el mecanizado, dejando de lado las distorsiones que generarían las mismas y posibles estrategias para minimizarlas.

5. BENEFICIOS

Hoy en día, la industria tiene como uno de los objetivos principales la optimización de los procesos de fabricación, con el fin de obtener un producto que cumpla los con todas las especificaciones de calidad y funcionalidad, en el menor tiempo posible y al mínimo coste. De cara a lograr dicho objetivo, la medición, análisis y predicción de las tensiones residuales de los componentes juega un rol bastante importante, ya que es un fenómeno inevitable que provoca resultados normalmente indeseados. A continuación, se resumen los principales beneficios de este proyecto.

5.1. Beneficios técnicos

La problemática de las tensiones residuales es un gran enigma para el mundo de la industria que requiere la colaboración de varios departamentos como, por ejemplo, control de calidad, fabricación y diseño para evitar resultados indeseados.

En los últimos años el sector de la fabricación está centrando grandes esfuerzos en la investigación de las tensiones residuales, ya que poder predecir dichas tensiones evitaría la rotura por la corrosión bajo tensión, los fallos por distorsiones y problemas en la estabilidad estructural de los componentes. Además, examinando las tensiones que se generarían tras el mecanizado en los componentes, se podrían controlar o transfórmalas en tensiones compresivas aumentando así la fiabilidad y funcionalidad de los componentes aeronáuticos durante su ciclo de vida.

5.2. Beneficios económicos

Un estudio realizado por Boeing, el cual fue basado en cuatro programas de aeronaves, estimó que los costes de reelaboración y desecho relacionados con la distorsión de las piezas superaban la cantidad de 290 millones de dólares. Además, el mismo estudio demostró que, al fabricar las piezas en paredes con poco espesor la probabilidad de que aparezcan desconformidades dimensionales o geométricas alcanza aproximadamente el 50%. En otra investigación, se calculó que la distorsión de las piezas causa una pérdida económica de 850 millones de euros al año a las industrias alemanas de la automoción, la máquina-herramienta y la transmisión de potencia [7].

Dicho esto, desarrollar modelos de predicción de las tensiones residuales permitiría generar herramientas para minimizar las distorsiones generadas por efecto de las tensiones residuales inducidas tras el proceso de mecanizado de los componentes aeronáuticos. De esta manera, además de la ganancia económica que supondría la eliminación de piezas defectivas, también se disminuirá el tiempo de producción, pudiendo incluso duplicar la producción.

5.3. Beneficios medioambientales

Como se ha mencionado, las tensiones residuales generadas por el proceso mecanizado son la fuente de parte de las distorsiones generadas en los componentes aeronáuticos. Debido a estas distorsiones, las piezas no cumplen las tolerancias especificadas por los clientes, por lo que se desechan tras el proceso de control de calidad.

De esta manera, si se estudia cómo evitar o minimizar estas distorsiones mediante el control de las tensiones residuales, se disminuirá el consumo de materiales, energía y contaminantes, los cuales están asociados a la propia máquina-herramienta y al uso de fluidos de corte. De esta manera, teniendo en cuenta todos los factores, se podría lograr una reducción notable de la huella ecológica.

6. ESTADO DEL ARTE

En el siguiente apartado, de cara a introducir la temática principal del proyecto, se presenta el concepto de las tensiones residuales, desde la generalidad hasta conceptos más detallados. De la misma manera y siguiendo la trayectoria explicativa, se realizará un análisis bibliográfico de los antecedentes científicos e industriales más relevantes. Analizado el campo de estudio mediante este apartado, quedará justificada la realización de dicho proyecto.

Para ello, en primer lugar, se introducirá el material aeronáutico sometido a estudio, es decir, la aleación de titanio Ti6Al4V. A continuación, se realizará una breve explicación de las tensiones residuales, y más en concreto en las generadas mediante el mecanizado de los componentes. De esta manera, se mostrarán los diferentes métodos de medición de las tensiones residuales y, en concreto, en las utilizadas para medir las tensiones residuales de mecanizado. Finalmente, dado que este trabajo tiene como fin desarrollar un modelo para la predicción de las tensiones residuales de mecanizado, se describirán de forma general los diferentes tipos de modelos que se pueden realizar, centrandó el interés en los modelos empíricos y en las diferentes funciones que se han empleado hasta el momento para modelizar las tensiones residuales.

6.1. El titanio

La calidad y el rendimiento de un producto están directamente relacionados con la integridad superficial adquirida por el mecanizado del componente final, especialmente la vida a fatiga. Cuando nos referimos a integridad superficial, se están incluyendo las propiedades mecánicas (tensiones residuales, dureza, etc.), el estado metalúrgico (transformación de fases, microestructura, etc.) del material de trabajo durante el procesado y los parámetros topológicos (acabado superficial y otras características topográficas de la superficie) [8].

En la industria aeronáutica, los materiales más utilizados son el titanio y las superaleaciones de base níquel, los cuales representan una gran parte de los componentes críticos estructurales y del motor de la aeronave. Su criticidad reside en que la aparición de un fallo prematuro de dichos componentes puede poner en juego la seguridad y las vidas de cientos de pasajeros. Con el objetivo de asegurar la fiabilidad en los componentes mecanizados, la integridad superficial de estas aleaciones es uno de los parámetros más relevantes para evaluar la calidad de la superficie mecanizada. En concreto, la vida a fatiga de estos componentes se ve afectada de manera muy significativa por las tensiones residuales y las alteraciones superficiales producidas por el mecanizado de las aleaciones de titanio y níquel [8].

El uso del titanio y de sus aleaciones ha incrementado en los últimos años debido a sus propiedades y sus mejoras en cuanto a maquinabilidad. Las ventajas principales que ofrecen este tipo de aleaciones, es la combinación de una baja densidad con una alta resistencia a elevadas temperaturas, además de una alta resistencia a la corrosión y buena compatibilidad biológica. Sin embargo, la calidad de la integridad superficial se ha identificado como una de las cuestiones más importantes en el mecanizado del titanio, ya que es también uno de los principales retos, además de la maquinabilidad de las piezas y del desgaste de las herramientas.

Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, en una aeronave podemos diferenciar dos tipos de titanio dependiendo de su aplicación, es decir, el titanio estructural y el del motor. Esta clasificación es necesaria, ya que no cuentan con la misma problemática. Dichas problemáticas se describen en los siguientes párrafos.



Ilustración 2. (izq.) Motor aeronáutico [8] y (dcha.) componente estructural aeronáutico [9].

Centrando la atención en el titanio estructural, las aleaciones como Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo y Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al son unas de las más comunes que se encuentran en la estructura de la aeronave. En el caso de los componentes monolíticos aeronáuticos de aleación de titanio, la distorsión por el mecanizado es el efecto común de varios factores y está estrechamente relacionada con la tensión residual que se encuentra en el componente. Cuando se elimina una gran cantidad de material, se rompe el equilibrio entre la tensión inducida y la tensión residual inicial. Para reequilibrarlos, estos dos tipos de tensiones residuales se redistribuyen, y la acción común de estas tensiones residuales causa la distorsión del mecanizado [10].

En el caso de los motores aeronáuticos, donde la seguridad es primordial, la vida a fatiga de sus componentes es de gran importancia, ya que estos se ven sometidos a elevadas cargas termomecánicas de naturaleza cíclica. Hace tiempo que se reconoce que las grietas por fatiga suelen iniciarse en las superficies libres y que, por lo tanto, el rendimiento depende de la topografía y de la integridad superficial producida por el mecanizado. Por ello, además el estado metalúrgico del material y de la presencia de irregularidades superficiales inducidas por el mecanizado, la fatiga está influenciada en gran parte por las tensiones residuales [11]. En este grupo se encuentran las aleaciones como Ti-6Al-4V y Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1 [12].

De esta manera, debido a la gran influencia de las tensiones residuales del titanio en el mundo de la aeronáutica, ya sea en el motor como en componentes estructurales de la aeronave, el análisis de las tensiones residuales generadas durante el mecanizado de titanio de grado aeronáutico resulta de gran interés para la industria.

6.2. Tensiones residuales

Las tensiones residuales son tensiones que permanecen en los materiales o componentes en ausencia de fuerzas externas u otras fuentes de tensiones, como pueden ser los gradientes térmicos. De manera que no son necesarias para mantener el equilibrio entre el cuerpo y su entorno [13].

En algunos casos estas tensiones dan lugar a importantes deformaciones, provocando así la flexión y la distorsión de un objeto. En otros casos, afectan a la susceptibilidad a la fractura y la fatiga, pudiendo llegar a ser inservibles para su aplicación [14].

Las tensiones residuales pueden ser clasificadas en diferentes categorías según diferentes criterios, como puede ser el origen de estas, según el método con el que se miden o el rango espacial en el cual las tensiones se auto-equilibran.

6.2.1. Tipos de tensiones residuales

Esta clasificación es la más utilizada para clasificar las tensiones residuales en tres diferentes tipos, dependiendo del rango de distancias sobre el que se muestran las variaciones significativas [13], [15]:

- Tensiones residuales de tipo I: son tensiones que son aproximadamente homogéneas en grandes áreas, por ejemplo, varios granos en un material, y se equilibran con respecto a todo el cuerpo. Cualquier intervención en el equilibrio de fuerzas y momentos de un elemento de volumen que contenga tales tensiones residuales modificara sus dimensiones macroscópicas.
- Tensiones residuales de tipo II: son aquellas tensiones que son aproximadamente homogéneas en zonas microscópicamente pequeñas (un grano, o regiones subgranulares) y están en equilibrio en un número suficiente de granos. Los cambios macroscópicos en las dimensiones de un elemento de volumen que posea estas tensiones solo pueden hacerse evidentes si se producen claras alteraciones de este equilibrio.
- Tensiones residuales de tipo III: son aquellas que tensiones heterogéneas en zonas submicroscópicamente pequeñas de un cuerpo (es decir, regiones con dimensiones de varias distancias atómicas dentro de un grano) y están en equilibrio en secciones subgranulares. No se producen cambios macroscópicos en las dimensiones del material sometido a tensión si se perturba dicho equilibrio.

Las tensiones macroscópicas o de tipo I son debidas a heterogeneidades en la deformación plástica, en transformaciones de fase o en distribuciones de temperatura. Cualquier cambio de este tipo de tensiones resultará en un cambio en las dimensiones macroscópicas. Por otro lado, las tensiones de tipo II y III son también denominadas microtensiones. Estas pueden darse entre distintas fases con diferentes propiedades físicas o entre matriz e inclusiones.

En el caso de que se analizara las tensiones de un componente o un material, se podría ver que cuenta con los tres tipos de tensiones residuales. De esta manera, usando la abreviación de RS para las tensiones residuales, existe la siguiente relación:

$$\sigma^{RS} = \sigma^{RS.I} + \sigma^{RS.II} + \sigma^{RS.III} \quad (1)$$

Es decir, la tensión residual total de un cuerpo se puede designar como la suma de cada uno de los tipos de tensiones residuales.

Definidos los diferentes tipos de tensiones residuales, la *Ilustración 3* muestra gráficamente los tres tipos de tensiones residuales en un material con dos fases después de un tratamiento de templado.

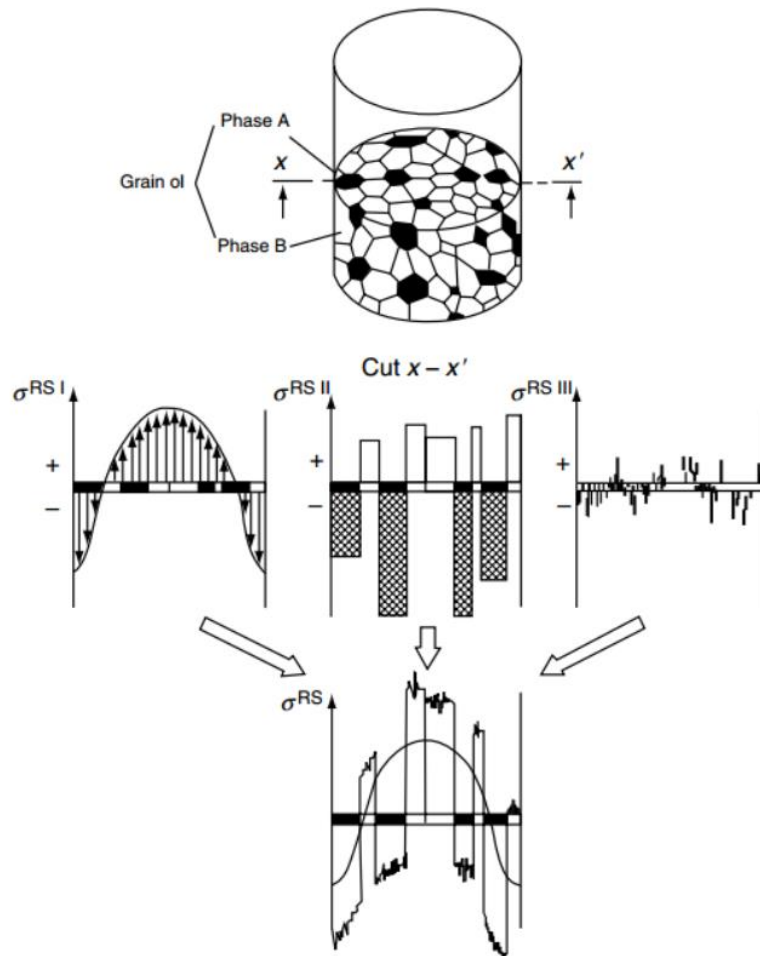


Ilustración 3. Los diferentes tipos de tensiones residuales en un material bifásico después de un tratamiento de temple [15].

6.2.2. Origen de las tensiones residuales

Los orígenes de las tensiones residuales son diversos, entre ellos podemos encontrar procesos de conformado, mecanizado o acabado; uniones; tratamientos térmicos, químicos o termoquímicos; o tras la aplicación de recubrimientos. Sin embargo, todos estos procesos se pueden agrupar de cierta manera en los siguientes tres grupos, siendo estas las tres razones las principales por las que surgen estas tensiones [16]:

- **Variaciones térmicas:** cuando un material se enfría desde una temperatura elevada, la velocidad de enfriamiento no suele ser homogénea en todo el volumen, por lo que da lugar a diferentes contracciones térmicas y a su vez a tensiones no uniformes. En concreto en el proceso de enfriamiento, dado que la superficie se enfría a mayor velocidad, el material calentado en el centro de la pieza se ve comprimido. Cuando el material del centro intenta enfriarse, se ve limitado por la capa superficial del material ya enfriada. En consecuencia, la parte interior tendrá una tensión residual de tracción, mientras que la parte exterior tendrá una tensión de compresión.
- **Transformaciones de fase:** cuando un material sufre una transformación de fase, se produce una diferencia de volumen entre la fase recién formada y el material que lo rodea esa zona, la cual aún no ha sufrido la transformación de fase. Esta diferencia de volumen provoca la expansión o la contracción del material, dando lugar a una tensión residual.

- **Transformaciones mecánicas:** la tensión residual también se produce cuando la deformación plástica no es uniforme a través de la sección transversal de un objeto sometido a un proceso de fabricación, como el doblado, el estirado, la extrusión y el laminado. Cuando un material sufre una deformación, una parte es elástica y otra plástica. Una vez se retira la carga, el material intenta recuperar la parte elástica de la deformación, pero se ve inhibido de la recuperación total debido la parte del material deformada plásticamente.

6.2.3. Efectos de las tensiones residuales

Todos los procesos de fabricación introducen tensiones residuales en los componentes, lo que influye en su comportamiento a la fatiga, la resistencia a la fractura e incluso a la resistencia a la corrosión. Son pocos los métodos de trabajo del metal que no producen tensiones. De esta manera, el papel de las tensiones residuales es muy importante a la hora de diseñar los procesos de fabricación.

Cuando una pieza está sometida a un campo de tensiones residuales elásticas (σ^R), al que se superpone un campo de tensiones de servicio (σ^S), la tensión real a la que se ve sometido el material será una combinación de ambas tensiones [17]. En el caso de que no se tengan en cuenta estas dos componentes, existirá la posibilidad de que el componente falle a condiciones normales de servicio, por lo que para componentes críticos el estudio de estas tensiones es de vital importancia [18].

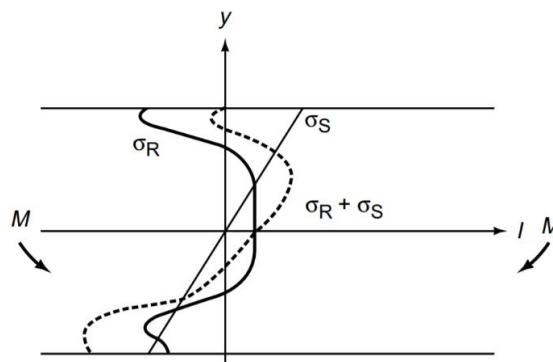


Ilustración 4. Superposición de las tensiones residuales y las tensiones de servicio [17].

Sin embargo, esta posibilidad se ve influenciada dependiendo de si se trata de tensiones residuales positivas o negativas. Si las tensiones residuales de tracción se añaden a las tensiones de servicio, siendo estas de naturaleza tractiva, la pieza se sobrecarga, siendo la tensión real que soporta mayor que la tensión nominal aplicada. Si, por el contrario, se utiliza una operación de acabado adecuada introduciendo tensión residual de compresión como, por ejemplo, granallado o bruñido, la pieza estará soportando una carga real menor que la aplicada externamente, por lo que la pieza se aliviaría localmente de la carga y, por lo tanto, aumentaría la capacidad de rendimiento mecánico del material.

En resumen, se podría decir que se diferencian dos tipos de tensiones, las tensiones residuales de tracción, de signo positivo, las cuales se conocen como tensiones residuales perjudiciales o indeseables, y las tensiones residuales de compresión, de signo negativo, que se conocen como beneficiosas o deseables.

En la siguiente imagen se muestran las propiedades de los materiales que están influenciadas por las tensiones residuales. En los siguientes párrafos se explicará brevemente cada una de ellas [17].

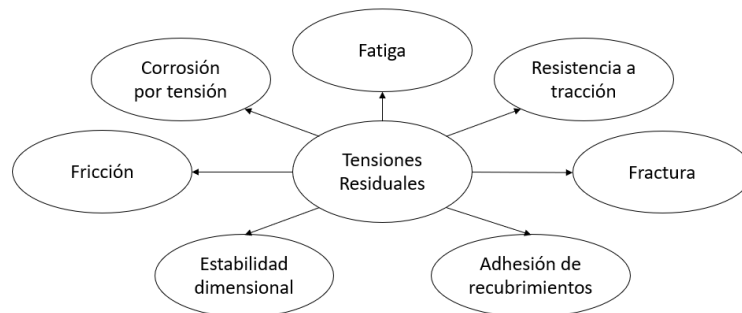


Ilustración 5. Efectos de las tensiones residuales en el rendimiento de los materiales.

- **Influencia de las tensiones residuales en la resistencia a fatiga:** la tensión residual desempeña un papel muy importante con respecto a la resistencia a la fatiga de los materiales. Esta tensión residual puede considerarse como una tensión media o estática superpuesta a la tensión cíclica. A medida que la tensión media aumenta, la resistencia a fatiga disminuye.
- **Influencia de las tensiones residuales en la resistencia a tracción:** al igual que la resistencia a fatiga, la resistencia a tracción disminuye cuando el material presenta tensiones residuales de tracción.
- **Influencia de las tensiones residuales en la fractura:** en el caso de una fractura frágil, la rotura se inicia en la zona donde la tensión local alcanza un valor crítico y generalmente se propaga sin dificultad. Las tensiones residuales de tracción, sumadas a la tensión de servicio, facilita la fractura, incluso a pequeñas cargas.
- **Influencia de las tensiones residuales en las propiedades de fricción y desgaste:** a pesar de que su efecto suele quedar enmascarado por otros parámetros, se ha analizado que el aumento de dureza durante el tratamiento y los cambios de tenacidad y adherencia de los revestimientos antidesgaste debidos a la tensión residual puede afectar considerablemente a la resistencia al rozamiento.
- **Influencia de las tensiones residuales en la adhesión de recubrimientos:** la mayoría de los revestimientos se producen especialmente para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste del material base, o para proporcionar una barrera térmica para su uso a altas temperaturas. Sin embargo, la presencia de tensiones residuales perjudica la correcta adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.
- **Influencia de las tensiones residuales en la corrosión por tensión:** la corrosión bajo tensión es un fenómeno de agrietamiento mecánico y químico que puede producir la fractura bajo el efecto combinado de la tensión de tracción y un entorno corrosivo. Por lo que la introducción de tensiones residuales de compresión podría aumentar considerablemente la vida a fatiga de los elementos sometidos a la corrosión bajo tensión.
- **Influencia de las tensiones residuales en la estabilidad dimensional:** cuando una pieza que contiene tensiones residuales es mecanizada, la forma de la pieza puede cambiar debida a la relajación de las tensiones residuales. Por ello, para evitar este tipo de problemas, se utilizan con frecuencia tratamientos de relajación de tensiones.

6.3. Tensiones residuales inducidas por mecanizado

Los procesos de mecanizado como el fresado, torneado o rectificado, se aplican con el objetivo de dar a un componente una forma y calidad superficial deseada. Debido a que la calidad de la pieza está estrechamente relacionada con el estado de la superficie, ésta deberá tenerse en consideración a la hora de llevar a cabo el mecanizado del elemento.

La caracterización de una superficie viene dada por las propiedades geométricas y físicas, por lo que un estudio de éstas determinaría el estado superficial. Sin embargo, mientras que las propiedades geométricas son conocidas para todas las condiciones de mecanizado, no ocurre lo mismo con las propiedades físicas, tales como, tensiones residuales, dureza o la estructura de las capas superficiales. La integridad superficial generada durante un proceso de mecanizado, como se ha mencionado en líneas anteriores, viene determinada por la interrelaciones mecánicas, térmicas y químicas entre la herramienta y la pieza de trabajo, de manera que esta afecta tanto a la funcionalidad de la pieza como a sus propiedades físicas. Por lo general, debido a que estos impactos actúan al mismo tiempo, los efectos que estos provocan son superpuestos, dando lugar a distribuciones de tensiones residuales que no pueden correlacionarse con un solo impacto [19].

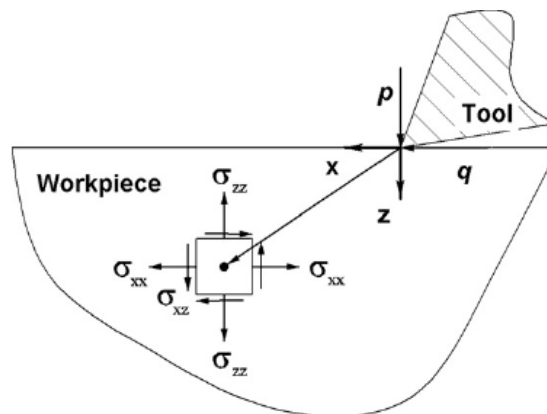


Ilustración 6. Tensiones generadas en la superficie y en las capas próximas a la superficie [4].

Centrando la atención en el aumento de temperatura y la deformación plástica generado por la energía de los procesos de mecanizado, estos son los factores fundamentales que dan lugar a tensiones residuales [13]:

- La fuerza aplicada por la herramienta genera una deformación plástica local, la cual da lugar a unas tensiones residuales de compresión en la superficie y en las capas bajo la superficie mecanizada.
- La fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo y la energía de deformación disipada provocan tensiones residuales y deformaciones y un aumento de temperatura en la pieza de trabajo. En cuanto a la temperatura, este aumento genera una expansión momentánea en la superficie o transformaciones de fase que generan un cambio de volumen, ambas limitadas por el material restante de la pieza. Dependiendo de la temperatura alcanzada, estas tensiones residuales térmicas pueden sobrepasar el límite elástico del material, alterando la superficie mecanizada. Por último, durante el enfriamiento de la superficie, se genera un estado de contracción del material el cual puede generar tensiones residuales de tracción.

En la siguiente imagen se pueden observar de forma esquemática los efectos que provocan estos dos factores fundamentales de manera individual en la superficie y en las capas próximas a la superficie.

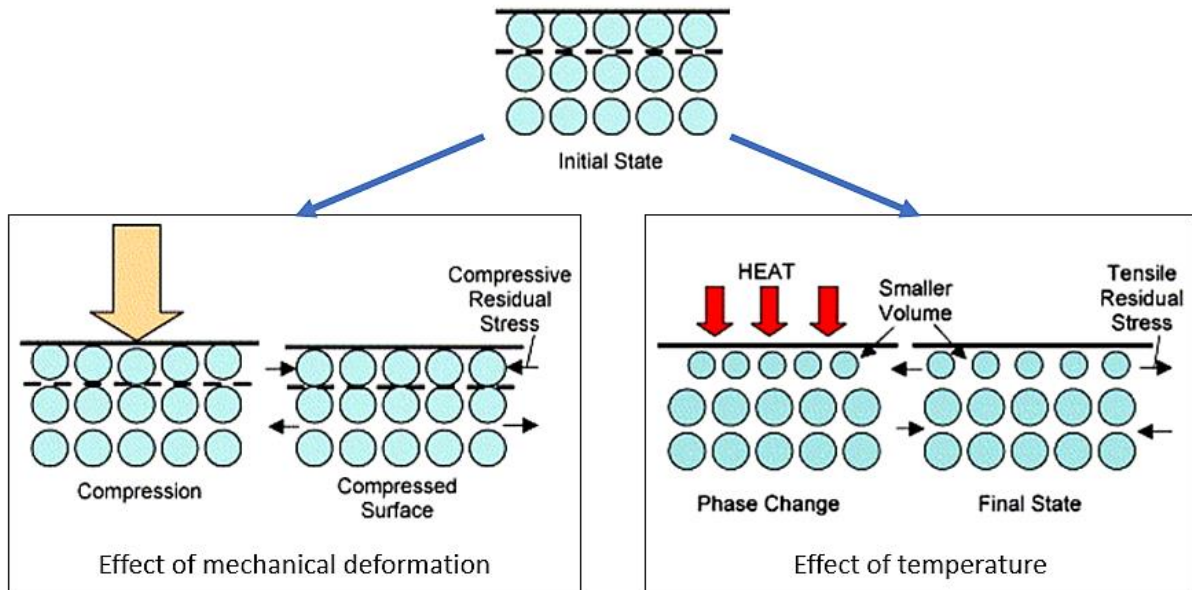


Ilustración 7. El efecto de la deformación mecánica y la temperatura en la superficie.

Mencionadas las principales fuentes de efecto en la superficie y en las capas próximas, en el siguiente párrafo se muestra el perfil de tensiones residuales que se produce en el material en profundidad. Bajo la acción de las cargas de corte, se forma una deformación plástica y un estado de compresión en el interior de la pieza. A medida que se retira la fuerza el material sufre una recuperación parcial, pero no total, debido a la deformación permanente que se ha producido. En consecuencia, el material más alejado de la superficie mecanizada, que solo se deforma elásticamente, vuelve a salir del estado de compresión y obliga al material deformado plásticamente más cercano a la superficie mecanizada a entrar en tracción.

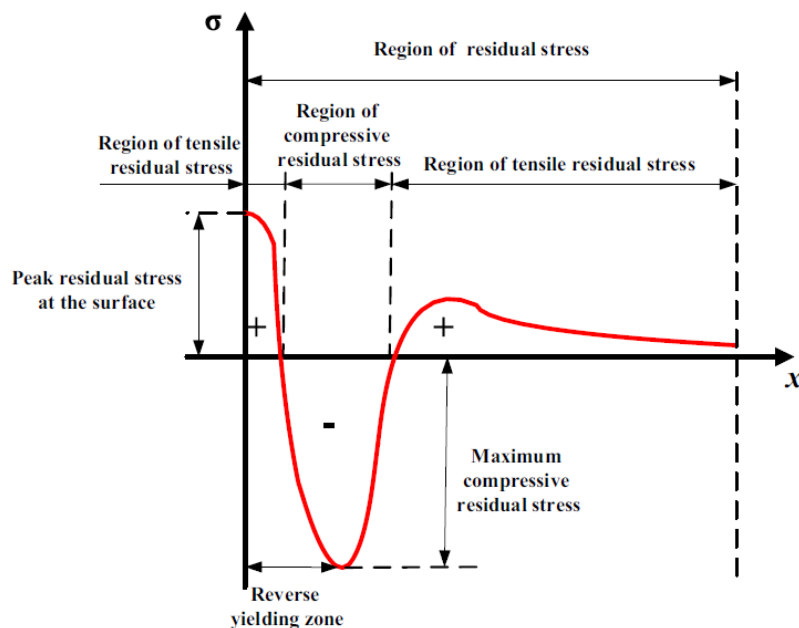


Ilustración 8. Perfil típico de la tensión residual inducida por el mecanizado [20].

Por ello, el perfil de las tensiones residuales inducidas por el mecanizado convencional sigue un patrón similar. En la siguiente imagen se pueden identificar cuatro factores claves del perfil de tensión residual como la tensión residual superficial ($\sigma_{r, Sur}$), máxima tensión residual compresiva ($\sigma_{C, ax}$) y su ubicación (h_{r0}), y la profundidad de respuesta en la que se estabilizan las tensiones residuales inducidas (h_{ry}).

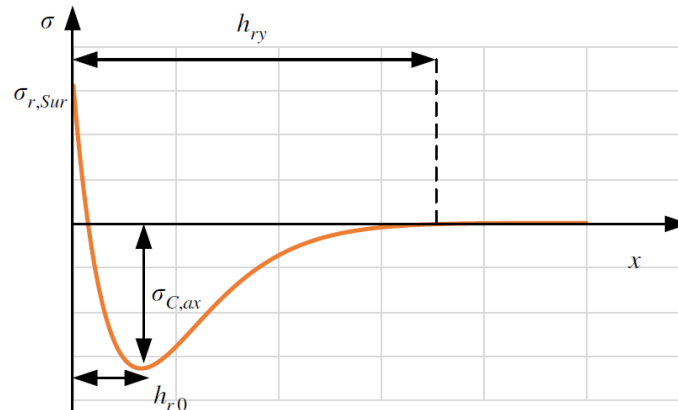


Ilustración 9. Parámetros para la descripción del perfil de tensiones residuales inducidas por el mecanizado [21].

Sin embargo, dado que los diferentes procesos de mecanizado no siguen un idéntico patrón en cuanto a la generación de las tensiones residuales, en los siguientes apartados se describirá de forma resumida las características de los diferentes procesos de mecanizado, como el torneado, taladrado y rectificado. Por último, se centrará atención en las tensiones residuales inducidas por el fresado, ya que es el proceso de mecanizado que se va a estudiar en este proyecto.

6.3.1. Tensiones residuales en rectificado

En operaciones de rectificado, las partículas abrasivas, las cuales tienen una geometría variable y están distribuidas de forma aleatoria, producen una deformación plástica en la superficie de la pieza. La presión que se genera mediante el proceso de rectificado es superior a otras operaciones de mecanizado. Altas temperaturas y presiones en la zona de interacción entre los granos y la pieza y la fuerte deformación plástica de esta última, produce cambios en las propiedades físicas. En concreto, la aparición de tensiones residuales se ve influenciada por las condiciones del mecanizado, la topografía de la muela de rectificado, las características de la muela y de las condiciones de refrigeración [19].

En rectificado la tasa de arranque de material es el producto de la velocidad de la pieza y la profundidad de pasada. Centrando atención en los efectos de estos dos parámetros se ha obtenido que tienen efectos similares en cuanto a tensiones residuales. En concreto, un aumento de la profundidad de corte implica mayor fuerza tangencial, produciendo así tensiones residuales más tractivas. Por otro lado, el aumento de la velocidad de la pieza o de la muela genera una mejor difusión del calor generado en la pieza, sin embargo, también genera mayores tensiones residuales, que tienden a ser más tractivas.

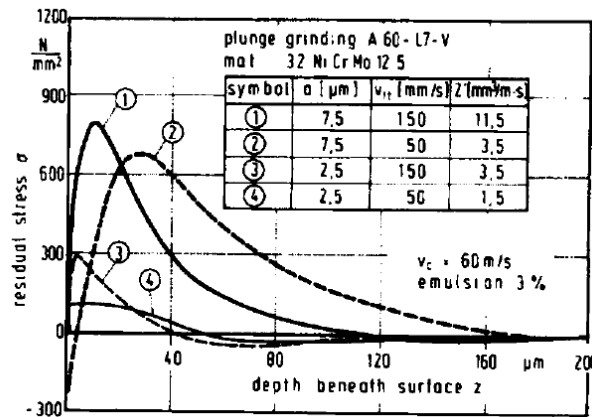


Ilustración 10. Tensiones residuales de una superficie rectificada a diferentes condiciones [19].

Este proceso también se ve influenciado en gran medida por el tipo de muela seleccionada para el mecanizado. Las muelas de Nitruro de boro cúbico (CBN), a diferencia de las convencionales de óxido de aluminio (Al_2O_3) o carburo de silicio (SiC), generan menos calor en la zona de corte, lo que a lleva un menor daño térmico y a tensiones compresivas. No obstante, el acabado superficial obtenido con las muelas de CBN es algo peor.

El acabado de la muela también es un parámetro de gran impacto en la topografía de la muela, así como en el calor generado en el proceso de corte. En el caso de tamaños de grano finos, la muela contará con mayor número de filos cortantes, lo que conlleva a un aumento de impacto térmico, que a su vez implica mayores tensiones tractivas. Sin embargo, se obtiene un mejor acabado superficial.

Por último, la selección correcta del lubricante es otro factor para tener en cuenta, ya que puede optimizar la estabilidad del proceso, y sobre todo la calidad superficial de la pieza. En concreto, el uso de lubricantes hechos de aceites genera menores tensiones residuales, favoreciendo la integridad superficial.

6.3.2. Tensiones residuales en torneado

En torneado, la energía de corte se transforma en gran parte en la zona de cizallamiento. Esto habilita que la conducción del calor no solo se transfiera únicamente en la pieza, si no que circule también a través de la viruta. A pesar, de que el calor que se evacua a través de la viruta es mayor en torneado que en rectificado, las tensiones tractivas son predominantes en el proceso de torneado. Esto se debe a que la superficie mecanizada no suele ser producida por el filo principal, sino por el flanco secundario de la herramienta [19].

Se ha demostrado que la fricción induce fuerzas y, por lo tanto, las temperaturas de corte aumentan con el radio de punta de la herramienta y con la velocidad de corte [19]. De la misma manera, menor espesor de viruta y ángulos de desprendimiento (γ) negativos de corte producen los mismos resultados debido a mayores fricciones. Por otro lado, un ángulo de corte negativo produce mayor grado de deformación plástica, la cual supone una disminución de las tensiones tractivas de la superficie.

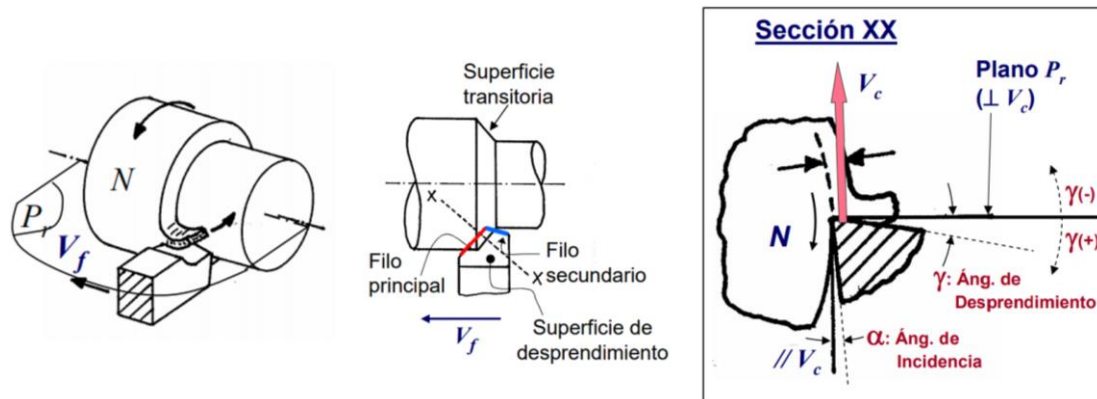


Ilustración 11. Ángulos de herramienta de torneado [22].

A la hora de analizar la velocidad de avance, se ha demostrado que a grandes velocidades un aumento de avance provoca que las tensiones residuales se vuelvan más tractivas. Sin embargo, a menores velocidades las tensiones residuales superficiales tienden a ser más compresivas [13].

El uso del lubricante en torneado, al igual que en otros procesos de mecanizado, disminuye la fricción y elimina el calor de la superficie, con lo que se obtiene un mejor acabado superficial y tensiones residuales compresivas o, al menos, tractivas de menor magnitud.

6.3.3. Tensiones residuales en fresado

En el proceso de fresado, se produce una considerable deformación plástica, por lo que las tensiones residuales generadas suelen ser de compresión. Dado que la profundidad de penetración del efecto térmico en la superficie y en las capas próximas a la superficie son de menor influencia que los impactos mecánicos, las tensiones de compresión se reducen en la superficie, pudiendo convertirse en tensiones de tracción. En la siguiente imagen se ilustran los perfiles típicos de las tensiones residuales del proceso de fresado [19].

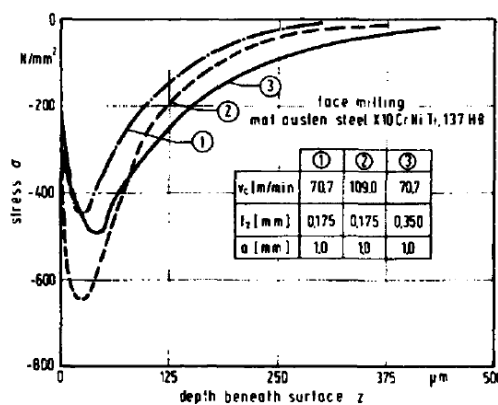


Ilustración 12. Tensiones residuales en fresado [19].

Como podemos observar, mayor velocidad de corte y avance generan un aumento de tensiones de compresión y de la profundidad de penetración. Otro factor que hay que tener en cuenta en el fresado es el desgaste de la herramienta de corte, ya que cuanto más desgastada esté más profunda será la capa de compresión. Por último, otro factor que genera diferencia en el perfil de tensiones residuales es el tipo de fresado que se está realizando, es decir, si se trata de un fresado en concordancia o en oposición.

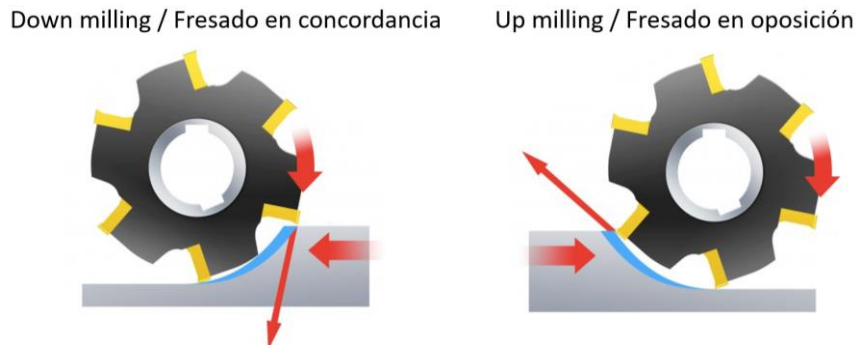


Ilustración 13. Fresado en concordancia (down milling) y fresado en oposición (up milling).

En el fresado en oposición, el filo de la herramienta entra cortando el mínimo espesor de viruta, siendo las deformaciones plásticas en frío dominantes en la superficie mecanizada, y a su vez, generando tensiones de compresión. A medida que se aumenta el contacto entre herramienta de corte incrementa el calor producido en las capas superficiales, las cuales serán eliminadas por el siguiente diente.

Por otro lado, en el fresado en concordancia, el filo entra cortando el máximo espesor de viruta, por lo que decrecerá desde el principio del corte gradualmente hasta desaparecer al final del corte. En este tipo de fresado, al igual que en oposición, durante la longitud de contacto aumenta la temperatura. De esta manera, una vez que el filo sale de la zona de cizalladura, conduce el calor a la superficie mecanizada, produciendo tensiones residuales de tracción.

6.4. Relación entre las tensiones residuales y distorsiones

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la fabricación de componentes estructurales monolíticos de paredes y suelos delgados es un campo importante de cara al sector de la aeronáutica que cuenta con varias dificultades debido a las distorsiones que se generan tras el mecanizado del material. La distorsión es el cambio inesperado y desigual de tamaño o de forma causado por las disimilitudes en los procesos de fabricación y los procesos de tratamiento térmico. La distorsión se ve afectada por las propiedades de material, la geometría de la pieza, el tamaño del componente y, lo que es más importante, el estado de tensión residual del componente.

De esta manera, en las siguientes líneas se mostrará de forma analítica la relación entre tensiones y distorsiones. Asimismo, se permite estudiar de forma simple el efecto en las distorsiones de las tensiones volumétricas, de la fuerza de amarre y del propio mecanizado en las superficies de piezas de poco espesor.

El caso que se va a analizar es una placa de espesor (H) y anchura en las direcciones X e Y (b_x , b_y) constantes, donde según la teoría de flexión de placas, los momentos flectores que actúan en ambas direcciones espaciales del plano se asocian a la curvatura medida en cada dirección. De manera simplificada, en este análisis, se va a suponer que las tensiones en la dirección de la profundidad se consideran despreciables, $\sigma_z = 0$, y el material en bruto es isotrópico y homogéneo. Asimismo, en un primer momento las tensiones volumétricas provenientes de procesos previos se encuentran en equilibrio de fuerzas y momentos [23].

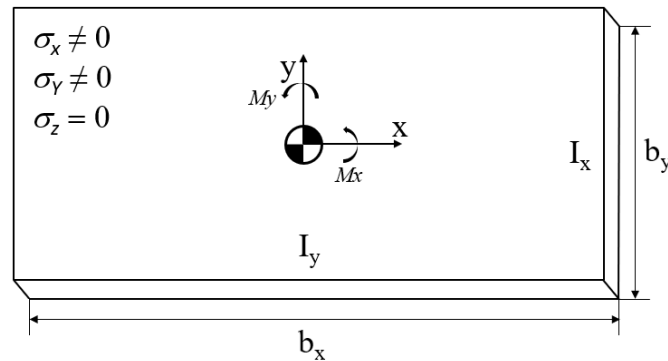


Ilustración 14. Hipótesis para la caracterización de las tensiones residuales.

Volviendo a los distintos efectos que influyen en la distorsión de esta placa, de manera simplificada, el momento flector total que actúa en la sección transversal en las direcciones X e Y ($Mb_{x,y}$) se calcula como la suma de la contribución de los diferentes momentos flectores, el cual también se relaciona con la curvatura de la placa.

$$Mb_{x,y} = Mb_{x,y}^{RS} + Mb_{x,y}^0 + Mb_{x,y}^{sup} = \frac{E \cdot I_{x,y}}{(1 - \nu^2)} \cdot (\chi_{x,y} + \nu \cdot \chi_{y,x}) \quad (2)$$

Donde E [GPa] es el módulo de Young, I [mm⁴] es el momento de la inercia, ν [-] es el coeficiente de Poisson y χ [1/mm] es la curvatura.

En los siguientes puntos, se analiza de forma individual cada uno de los momentos flectores contribuyentes en el momento total.

- Mb^{RS} – Momento flector de las tensiones volumétricas: discretizando el espesor de la placa en n capas con espesor (e), el cual es la profundidad de corte del mecanizado, y formulando el efecto de cada una de capas en el momento flector se obtiene la ecuación (3), siendo k_{ij} la distancia del centro de gravedad de cada una de las capas (i) al centro de gravedad del tocho tras el mecanizado de cada capa (j).

$$Mb_{x,y}^{RS} = \sum_1^n (\sigma_{x,y}^i \cdot b_{y,x}^i \cdot e \cdot k_{ij}) \quad (3)$$

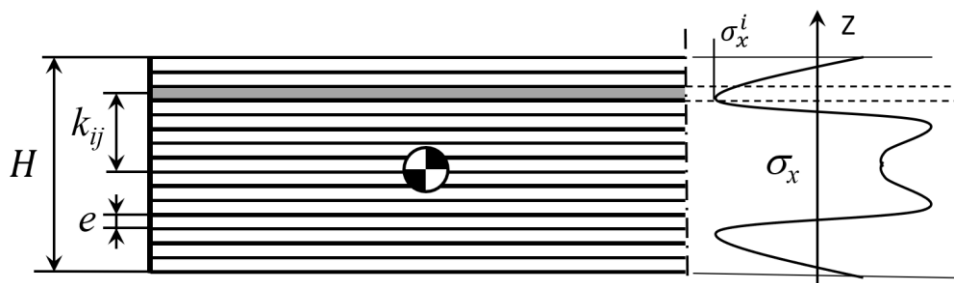


Ilustración 15. Discretización del material en capas y las tensiones residuales en plano XZ.

- Mb^0 – Momento flector proveniente de las fuerzas de amarre: en este caso, el momento flector provocado por las fuerzas de amarre se determina a partir de la deformación inicial medida de la probeta sin amarrar. Su efecto puede añadirse introduciendo el término de la

tensión, relacionado con el momento flector de la fuerza de amarre correspondiente a cada capa. De esta manera, como se observa en la siguiente ilustración el perfil de tensiones pierde su simetría inicial.

$$Mb_{x,y}^0 = \frac{E \cdot I_{0,x,y}}{(1 - \nu^2)} \cdot (\chi_{0,x,y} + \nu \cdot \chi_{0,y,x}) \quad (4)$$

$$\sigma_{Mb_{x,y}^0}^i = \frac{Mb_{x,y}^0 \cdot k_{ij}}{I_{0,x,y}} = \frac{E \cdot k_{ij}}{(1 - \nu^2)} \cdot (\chi_{0,x,y} + \nu \cdot \chi_{0,y,x}) \quad (5)$$

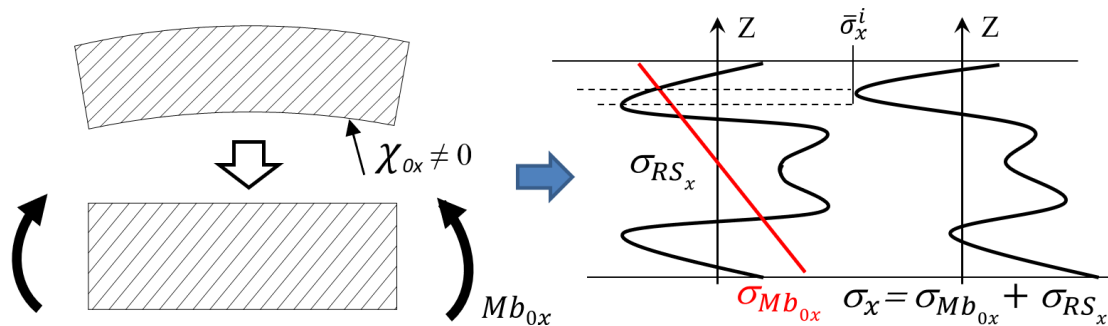


Ilustración 16. Efecto del momento flector derivado de la fuerza de amarre.

- Mb^{sup} – Momento flector procedente de las cargas termomecánicas del mecanizado sobre la superficie: por último, el efecto de las tensiones inducidas por el mecanizado se puede tratar de forma análoga al tratamiento de las tensiones residuales volumétricas. Es decir, discretizando en s capas de espesos (e_s) la profundidad afectada por las cargas termomecánicas durante el proceso de mecanizado. Así, se obtiene la siguiente formula:

$$Mb_{x,y}^{RS} = \sum_1^s (\sigma_{sup_{x,y}}^i \cdot b_{y,x}^i \cdot e_s \cdot k'_{ij}) \quad (6)$$

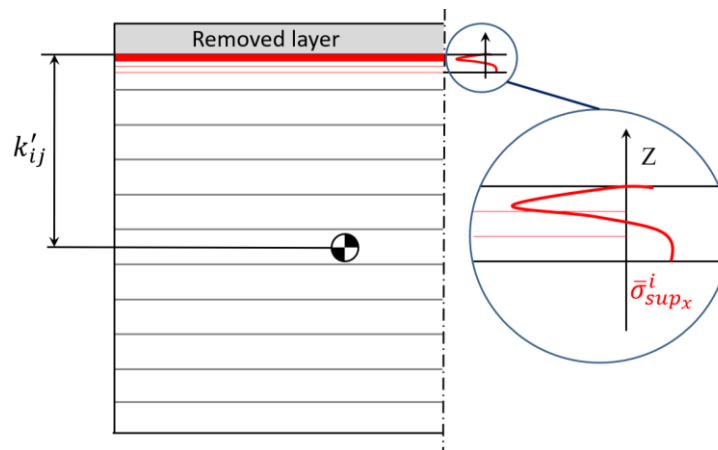


Ilustración 17. Tensiones residuales de inducidas por el mecanizado.

Habiendo mencionado el efecto de los diferentes momentos flectores en la contribución en la aparición de las tensiones residuales, en el siguiente párrafo se analizarán los métodos de medición que se van a llevar a cabo para obtener las tensiones, los cuales tendrán diferente aportación en la medición de las tensiones residuales, ya que tanto unos métodos como otros inducen en cierta medida tensiones residuales.

6.5. Métodos de medición de las tensiones residuales

Hoy en día se pueden encontrar un gran número de métodos para determinar las tensiones residuales existentes en componentes metálicos. Sin embargo, es necesario mencionar que en la medición la tensión no es lo que se mide de forma directa, sino que se mide la deformación elástica resultante de las tensiones residuales o el cambio de deformación elástica que se produce por la relajación de tensiones. De esta manera, realizada la medida de la deformación se puede calcular la tensión utilizando las constantes elásticas del material.

Los métodos de medición de las tensiones residuales presentes en un material se clasifican en tres grandes grupos, ensayos destructivos, semi-destructivos y no destructivos. La elección del método de medición más adecuado depende de diversos factores como, por ejemplo, la naturaleza del material, los tipos de tensiones existentes, la precisión, el tiempo y el coste de la medida [13].

En las siguientes líneas se hará una breve introducción a los tres grupos y se mencionarán algunos de los métodos que pueden utilizar dependiendo si se trata de un ensayo destructivo o no.

- Métodos destructivos: estos métodos se basan en la eliminación de una parte de material de la pieza, destruyendo así el estado de equilibrio de las tensiones residuales presentes en el componente. De esta manera, debido al cambio en la deformación resultante de la relajación de tensiones pueden obtenerse las tensiones residuales. En comparación con los no destructivos estos suelen tener un coste menos elevado. Entre los métodos que pertenecen a este primer grupo, se encuentra el *método de eliminación de capa (Layer Removal)*, el *método de contorno (Contour Method)* y *apertura de grieta (Crack compliance)*.
- Métodos semi-destructivos: las técnicas semi-destructivas son comparables a las técnicas destructivas en el sentido de que los dos se basan en la deformación obtenida de la relajación de tensiones. Sin embargo, estos métodos tienen un efecto muy pequeño en los componentes en los que se realiza la medida, pudiendo ser reparada a una vez realizada la medida, o nulo en algunos casos. Este grupo corresponden los *métodos del orificio perforado (Hole Drilling)* y *del anillo central*, el *método de indentación* y el *método del recocido localizado*.
- Métodos no destructivos: los ensayos, en los que no se daña el componente a medir, se basan en medidas de parámetros cristalográficos o físicos que se ven afectados por la existencia de tensiones residuales. Es decir, la deformación que generan las tensiones provoca cambios en los parámetros de red los cuales son medidos mediante estos métodos. Existen un gran número de técnicas de este tipo, entre ellas, *difracción de rayos-X*, *difracción de neutrones*, *métodos ultrasónicos o acústicos* y *métodos magnéticos*.

En el desarrollo de este estudio, como se ha mencionado en los apartados anteriores, se va a realizar la medición de las tensiones residuales generadas por el mecanizado de un componente de titanio. Por esta razón y debido al instrumental disponible para realizar el proyecto, en las siguientes líneas se describirán los métodos que se van a utilizar para realizar la medición de las tensiones residuales, en concreto, la difracción de rayos-X y el método del orificio perforado.

6.5.1. Difracción de rayos-X

En la medición de las tensiones residuales mediante la difracción de rayos-X, se mide la distancia interplanar de la red cristalina, con la que se calcula la deformación generada en el material y de esta obtiene el valor de la tensión residual a partir de la constante elástica, suponiendo una distorsión

elástica lineal del plano de la red cristalina correspondiente. Los rayos-X inciden en una zona de la probeta a medir, por lo que, un gran número de granos y cristales tendrán efecto en la medición. A pesar de que la medida se considera cercana a la superficie, los rayos X pueden penetrar cierta distancia desde la superficie. Por lo tanto, la deformación medida es la media de unas pocas micras de profundidad bajo la superficie de la muestra.

Este método, como se ha mencionado en párrafos anteriores, es un método de medición no destructivo, el cual puede ser aplicado a materiales cristalinos con un tamaño de grano relativamente pequeño o fino. El material de la probeta puede ser metálico o cerámico, siempre que el pico de difracción alcance cierta intensidad y no se vea interferido por otros picos cercanos [24]. Sin embargo, el uso del electropulido para obtener el perfil de las tensiones residuales en profundidad provoca la destrucción de la superficie mecanizada. Por lo que, la combinación de la difracción de rayos-X y el electropulido provoca que la obtención de los datos de las tensiones residuales del componente se lleve a cabo de manera destructiva.

En este apartado, se va a profundizar en los principios de la difracción de rayos-X, para explicar brevemente el proceso de obtención de las tensiones residuales y en el electropulido, ya que como se ha mencionado anteriormente, se trata un proceso totalmente necesario para poder obtener las tensiones residuales en las capas próximas a la superficie.

6.5.1.1. Principios de la difracción de rayos-X

La medición de la tensión residual mediante la difracción de rayos-X (XRD) se basa en las interacciones entre la onda del haz de los rayos X y la red cristalina, donde un cristal puede definirse como un sólido compuesto de átomos dispuestos en un patrón periódico en tres dimensiones. En este proceso los rayos-X son dispersados por los electrones de los átomos del cristal, sin cambios en la longitud de onda.

En concreto, cuando un haz de rayos-X incide sobre una zona, todos los átomos de esa zona dispersan los rayos-X en todas las direcciones. La distribución periódica de dichos átomos puede causar patrones de interferencia constructiva y/o destructiva de los haces dispersado, en función del espacio interplanar d y de la longitud de onda de la radiación incidente λ .

Para una mejor aclaración, en la siguiente ilustración se puede observar el esquema gráfico del proceso de difracción, es decir, de los rayos-X paralelos incidiendo sobre un cristal cuyos planos $\{hkl\}$ son paralelos a la superficie.

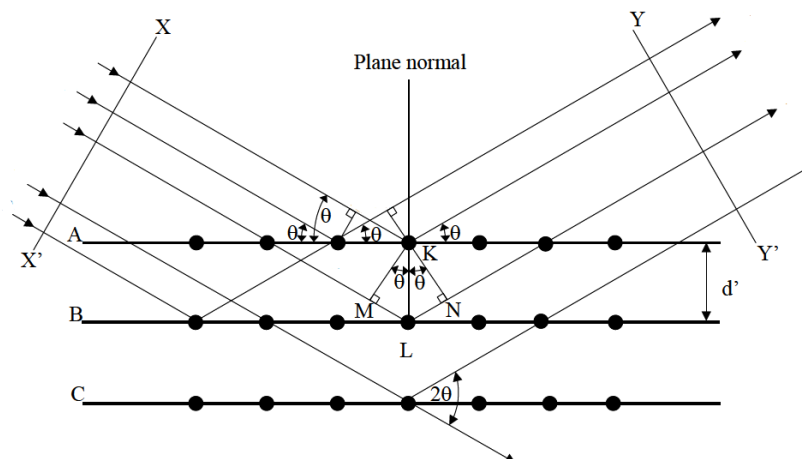


Ilustración 18. Difracción de rayos-X por un cristal [24].

Relacionando geoméricamente, mediante la figura superior, la longitud del haz y la distancia interplanar, se llega a la siguiente ecuación.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (7)$$

Donde n es la orden de reflexión, λ la longitud de onda [nm], d es el espacio interplanar [nm] y θ es el ángulo de incidencia del haz de rayos X [°]. Esta relación recibe el nombre de Ley de Bragg, siendo esta la condición necesaria para que se produzca difracción de rayos-X por un cristal.

De esta manera, al exponer la pieza a los rayos-X interactúan con la red cristalina para generar un patrón de difracción, es decir, en las direcciones en las que la Ley de Bragg se satisface, las ondas dispersadas se encuentran en fase, dando lugar a una interferencia constructiva y por lo tanto hay intensidad difractada. Así, utilizando rayos-X de longitud de onda conocida y midiendo θ pueden determinarse los espacios interplanares de un cristal.

La obtención de las medidas de las tensiones residuales mediante la difracción de rayos-X se basa en la dispersión del pico de difracción. Es decir, si un material se encuentra libre de tensiones el espacio interplanar se mantendrá igual para todas las familias de planos. Sin embargo, cuando el material está bajo tensión, dependiendo del tipo de tensión a la que esté sometida, estaremos ante uno de los siguientes casos [13]:

- Si se trata de tensiones uniformes, ya sean de compresión o de tracción, la distancia interplanar disminuirá o aumentará uniformemente, dando lugar a un desplazamiento del pico de difracción.
- Si se trata de tensiones no uniformes, se produce un ensanchamiento del pico de difracción. Siendo medida la anchura del pico mediante el parámetro FWHM – “Full Width at Half Maximum”, es decir, la anchura del pico a media altura.

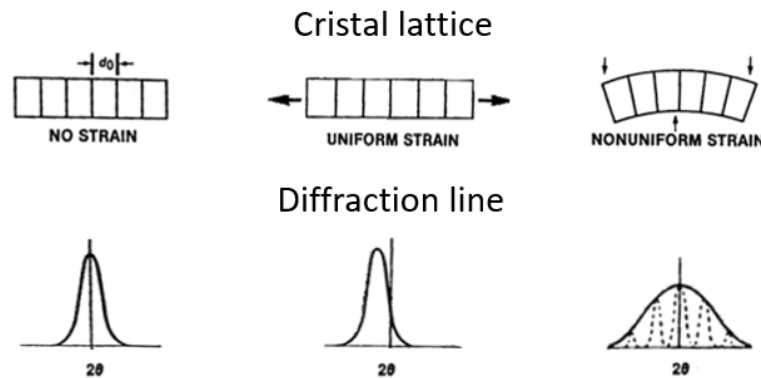


Ilustración 19. Efecto de las tensiones en los picos de difracción.

De esta manera, la deformación elástica se puede definir mediante la variación del espacio interplanar d y del espaciado interplanar libre de tensiones d_0 , donde la variación del espacio interplanar se obtiene de la derivada de la ecuación de la Ley de Bragg.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} = -(\theta - \theta_0) \cdot \cot \theta_0 = -\Delta \theta \cdot \cot \theta_0 \quad (8)$$

Donde θ es la posición del pico de difracción con tensiones y θ_0 posición del pico de difracción sin tensiones.

Del análisis anterior, solo la componente normal de la deformación perpendicular a los planos cristalográficos puede medirse directamente por difracción de rayos-X. Las deformaciones cortantes se calculan a partir de las deformaciones normales medidas en los ángulos 0°, 45° y 90°. Las tensiones, ya sean normales o cortantes, se calculan a partir de las deformaciones medidas [25].

Medición de las deformaciones

La deformación normal a lo largo de la dirección normal del plano cristalográfico puede medirse por el desplazamiento del pico de difracción a lo largo del eje 2θ . Midiendo las deformaciones normales en varias direcciones en las coordenadas de la muestra, puede calcularse la deformación en la dirección deseada. En la *Ilustración 20* se muestra la relación entre la dirección de la deformación normal medida y las coordenadas de la muestra. La ecuación fundamental que relaciona la deformación normal medida y el tensor de deformación expresado en las coordenadas de la muestra se expresa de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \varepsilon_{11} \cos^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{12} \sin 2\phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{22} \sin^2 \phi \sin^2 \psi + \varepsilon_{13} \cos \phi \sin 2\psi + \varepsilon_{23} \sin \phi \sin 2\psi + \varepsilon_{33} \cos^2 \psi \quad (9)$$

Donde $\varepsilon_{\phi\psi}$ es la deformación medida en función de los ángulos ϕ y ψ , y $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{13}$ y ε_{33} son las componentes del tensor de deformación en las coordenadas de la muestra S_1, S_2 y S_3 . Siendo ϕ el ángulo de rotación alrededor de la normal de la muestra (S_3), y ψ el ángulo de inclinación desde la normal de la muestra dentro de un plano definido por L y S_3 .

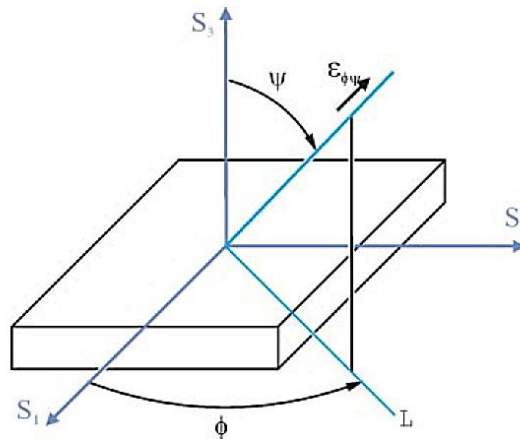


Ilustración 20. Deformación medida por difracción de rayos-X en las coordenadas de la muestra [25].

La ecuación anterior, puede ser obtenida fácilmente por el vector de unidad en la dirección de $\varepsilon_{\phi\psi}$ expresado en las coordenadas de la muestra, siendo el vector de unidad:

$$\mathbf{h}_{\phi\psi} = \begin{bmatrix} h_1^{\phi\psi} \\ h_2^{\phi\psi} \\ h_3^{\phi\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \sin \psi \\ \sin \phi \sin \psi \\ \cos \psi \end{bmatrix} \quad (10)$$

De esta manera, la relación entre la deformación medida $\varepsilon_{\phi\psi}$ y el tensor de deformación se puede expresar de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \varepsilon_{ij} \cdot h_i^{\phi\psi} \cdot h_j^{\phi\psi} \quad (11)$$

Por lo que se puede decir, que esta ecuación es la forma simplificada de la *ecuación (9)*, la cual puede obtenerse mediante la expansión de esta ecuación para los valores 1,2 y 3 en i y j. Además, las deformaciones medidas también pueden expresarse de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{\lambda}{2d_0 \sin \theta} - 1 \approx -\Delta\theta \cot \theta_0 \quad (12)$$

La *ecuación (9)* es una ecuación lineal de los componentes del tensor de deformación. El tensor de deformación puede obtenerse resolviendo la ecuación lineal si las seis deformaciones independientes son medidas o por la regresión lineal de mínimos cuadrados si se tienen más seis medidas independientes. Con el objetivo de obtener una solución fiable de la resolución, la deformación independiente deber ser medida en diferentes orientaciones.

Medición de las tensiones

En general, las tensiones pueden determinarse de las deformaciones medidas mediante la Ley de Hooke. Para materiales con elasticidad homogénea e isotrópica solo hay dos constantes elásticas independientes. Por ello, las tensiones pueden ser obtenidas de las medidas de deformación de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{\phi\psi} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1 + \nu}{E}(\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + \frac{1 + \nu}{E}(\sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi) \sin 2\psi + \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{33} \cos^2 \psi \quad (13)$$

Considerando la naturaleza anisotrópica de los materiales, la ecuación puede expresarse mediante la siguiente función:

$$\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}} = S_1^{\{hkl\}}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}(\sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{12} \sin 2\phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi) \sin^2 \psi + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}(\sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi) \sin 2\psi + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}} \sigma_{33} \cos^2 \psi \quad (14)$$

Donde $\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}}$ es la deformación medida del plano reticular específico $\{hkl\}$ en la dirección definida por ϕ y ψ , y $S_1^{\{hkl\}}$ y $\frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}$ son las constantes elásticas de los rayos-X para el plano reticular.

Siendo la profundidad de penetración de los rayos-X limitada, la deformación normal en la superficie de la muestra se puede considerar nula, $\sigma_{33} = 0$, ya que la superficie se encuentra en tensión plana. Los componentes de la tensión a lo largo de la dirección L (*Ilustración 20*) son la tensión normal σ_ϕ y la tensión cortante τ_ϕ , y son obtenidas por las componentes del tensor de tensión en las coordenadas de la muestra por:

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2 \phi + \sigma_{22} \sin^2 \phi + \tau_{12} \sin 2\phi \quad (15)$$

$$\tau_\phi = \sigma_{13} \cos \phi + \sigma_{23} \sin \phi \quad (16)$$

Entonces se puede simplificar la ecuación de la deformación medida en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}} = S_1^{\{hkl\}}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}\sigma_\phi \sin^2 \psi + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}\tau_\phi \sin 2\psi \quad (17)$$

Para un estado de tensión biaxial, $\tau_\phi = 0$, por lo que:

$$\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}} = S_1^{\{hkl\}}(\sigma_{11} + \sigma_{22}) + \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}\sigma_\phi \sin^2 \psi \quad (18)$$

Para la muestra dada, la deformación medida es una función lineal de $\sin^2 \psi$. Obteniendo la primera derivada respecto a $\sin^2 \psi$, se obtiene:

$$\frac{\partial \varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}}}{\partial (\sin^2 \psi)} = \frac{1}{2}S_2^{\{hkl\}}\sigma_\phi = m \quad (19)$$

Donde m es la pendiente de la deformación medida en la gráfica $\varepsilon_{\phi\psi}^{\{hkl\}} - \sin^2 \psi$. Por lo tanto, de la ecuación (20) podemos obtener la tensión. Con las constantes de elasticidad macroscópicas, también puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_\phi = \frac{m}{\frac{1}{2}S_2} = \frac{mE}{1 + \nu} \quad (20)$$

La gráfica de $d_{\phi\psi}$ frente al $\sin^2 \psi$ para un valor ϕ es una representación característica en el cálculo de tensiones residuales a partir de los rayos-X. Dependiendo del tipo de forma que obtenga la gráfica estaremos ante casos diferentes, entre otros: (a) material isótropo, con estado de tensiones biaxial; (b) material isótropo, con estado de tensiones triaxial; (c) material con textura.

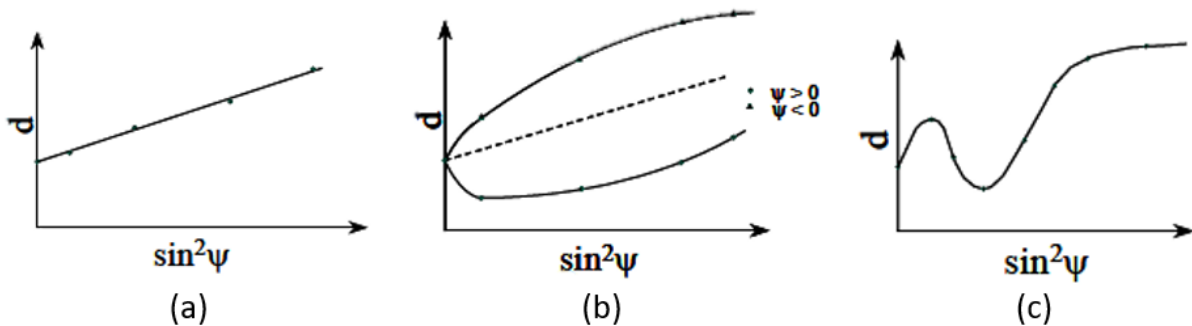


Ilustración 21. Ejemplos esquemáticos de curvas $d_{\phi\psi} - \sin^2 \psi$.

Por último, queda mencionar que hay dos métodos de rotación de la muestra cuando la tensión residual es medida mediante la técnica de $\sin^2 \psi$:

- **Método Omega:** la muestra gira alrededor del eje omega. Es el método más común para la mayoría de los difractómetros convencionales.
- **Método Chi:** la muestra gira alrededor del eje chi. Mecánicamente el método chi es un método más complejo.

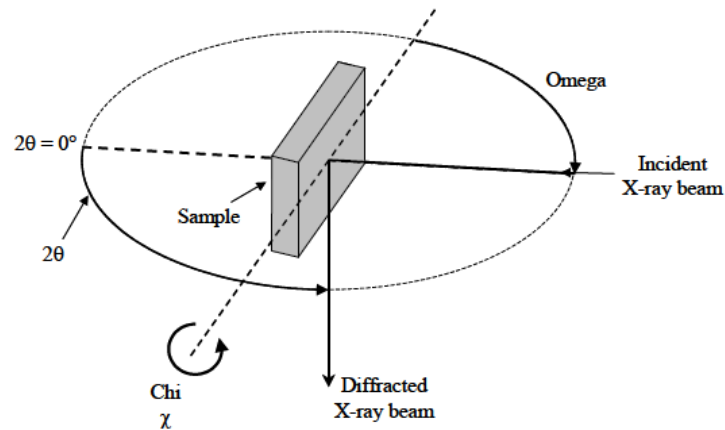


Ilustración 22. Giros posibles de la muestra.

6.5.1.2. Proceso de electropulido

Como se ha mencionado en líneas anteriores, siendo el objetivo la obtención de un perfil de tensiones residuales en profundidad, la eliminación de material de la superficie es un proceso totalmente necesario para poder obtener dichas medidas de tensiones en las capas bajo la superficie mecanizada. Por lo que, este proceso se considera no destructivo siempre que la profundidad en la que se elimina material sea en cierta manera despreciable.

Cualquier mecanizado, ya sea mecánico o por la técnica de la electroerosión, utilizado para eliminar las capas superficiales inducirá tensiones residuales, alterando el campo original de tensiones en la superficie. Por lo que, este tipo de métodos deberían evitarse. Si, por el contrario, es necesaria la eliminación de material, el método recomendado para hacerlo es el ataque químico o electropulido, ya que induce tensiones residuales en menor medida.

En el proceso de electropulido, se aplica una tensión durante un tiempo determinado, de manera que se elimina una determinada cantidad de material según la primera Ley de Faraday. Esta ley establece que la masa de material eliminada es proporcional a la intensidad que hay durante un margen de tiempo.

$$\Delta m = k \cdot \Delta I^+ \cdot \Delta t \quad (21)$$

Donde Δm es la masa del material eliminado, k es el equivalente electroquímico del material de muestra, ΔI^+ es la intensidad y Δt es el margen de tiempo.

El electropulido puede realizarse en casi todos los metales, aunque hay unos metales y aleaciones en los que no se puede realizar la práctica estándar, y por ello, requerirán realizar algunas pruebas antes de conseguir el acabado superficial adecuado. En general, para realizar un buen electropulido, será de vital importancia una correcta selección del electrolito y de los parámetros del pulido, entre ellos, la intensidad y el tiempo de exposición.

6.5.2. Método del orificio perforado (*Hole Drilling*)

El siguiente método, es un método semi-destructivo, donde se realiza un taladrado de un pequeño agujero en la superficie del componente. Este agujero se realiza en el centro de una galga extensométrica especial y, de esta manera, se miden las deformaciones. Una vez obtenidas las deformaciones, se puede realizar el cálculo para obtener las tensiones residuales en el agujero.

En el proceso del *Hole Drilling*, la galga extensométrica se adhiere a la superficie del componente donde se va a realizar la medición. El diseño de estas galgas puede variar depende del fabricante, en la *Ilustración 23* se pueden observar los tres diseños más típicos. Una vez, situada la galga se conecta la galga a un indicador de deformación y se fijan las posiciones de alineación y profundidad cero antes de taladrar el agujero. Debiendo ser la profundidad de penetración del agujero aproximadamente igual a su diámetro, ya que a más profundidad de penetración las galgas extensométricas pierden sensibilidad [26].

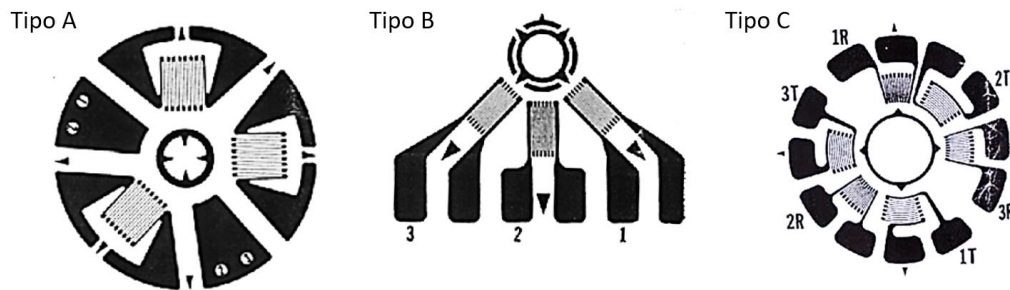


Ilustración 23. Diseños típicos de las galgas extensométricas.

El método básico de *Hole Drilling* se describe en la norma ASTM E837, el cual solo es válido para la medición de las tensiones residuales en materiales isotrópicos elástico-lineales, donde los campos de las tensiones residuales son uniformes y no varían de forma significativa en profundidad. Por lo que, normalmente en el caso de que estemos ante tensiones residuales no uniformes se utiliza el *método de la deformación media* o el *método de la deformación incremental*.

Siguiendo la norma ASTM E837, se utilizan los siguientes cálculos básicos. En la siguiente imagen podemos observar la geometría de la galga extensométrica y la notación para la dirección de las tensiones principales.

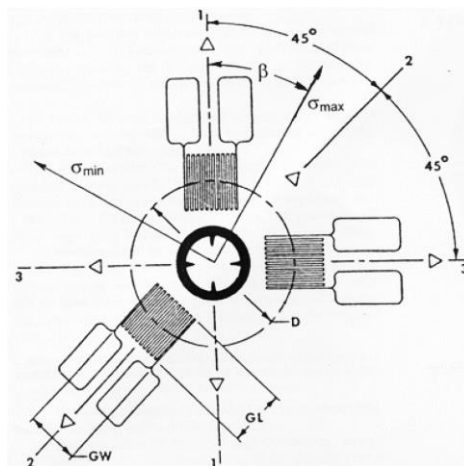


Ilustración 24. Imagen esquemática de la galga extensométrica típica.

En este diseño de tipo A las tres galgas orientadas radialmente están posicionadas a una distancia de $D/2$ desde el centro del agujero, siendo D el diámetro del círculo de medición. Aunque, en teoría, los ángulos entre las galgas pueden ser elegidos arbitrariamente, los cálculos analíticos más sencillos se consiguen con un ángulo de 45° , por lo que, se ha convertido en el estándar para la mayoría de los diseños disponibles en el mercado.

La deformación superficial se relaciona con las tensiones principales de la siguiente manera:

$$\varepsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos 2\beta)\sigma_{min} \quad (22)$$

Los coeficientes \bar{A} y \bar{B} son dos constantes de calibración que dependen de la geometría de la galga, de las propiedades elásticas del material y del radio y penetración del agujero. Para un material con las propiedades elásticas definidas, las constantes se calculan mediante las siguientes formulas:

$$\bar{A} = \frac{-\bar{a}(1 + \nu)}{2E} \quad (23)$$

$$\bar{B} = \frac{-\bar{b}}{2E} \quad (24)$$

\bar{a} y \bar{b} son constantes adimensionales, prácticamente independientes al material que varían con la profundidad del agujero. Los cuales representan las deformaciones medidas para los casos en los que $\sigma_{max} = \sigma_{min} \neq 0$ y $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$, respectivamente. A pesar de que estos valores pueden calcularse experimentalmente, para las galgas de tipo A, B y C (*Ilustración 23*) estos valores están tabulados en la norma ASTM E837.

- Para el caso en que la **muestra sea de poco espesor** o el agujero sea pasante, la relajación de la deformación medida por las tres galgas extensométricas debe ser considerada y se utilizan las siguientes variables de deformación combinada:

$$p = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)/2 \quad (25)$$

$$q = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)/2 \quad (26)$$

$$t = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)/2 \quad (27)$$

Donde p es la relación de la deformación volumétrica y, q y t son componentes de la deformación tangencial.

En este caso no es necesario considerar las correspondientes variables de la tensión combinada, ya que no se está realizando ningún alivio incremental de deformación. El ángulo β puede calcularse de la siguiente manera:

$$\beta = 1/2 \arctan (t/q) \quad (28)$$

Donde se distinguen los siguientes tres casos: a) Si $\varepsilon_3 > \varepsilon_1$ entonces β se refiere a σ_{max} ; b) Si $\varepsilon_3 < \varepsilon_1$ entonces β se refiere a σ_{min} ; c) Si $\varepsilon_3 = \varepsilon_1$ entonces $\beta = 45^\circ$.

Finalmente, las tensiones principales se calculan mediante la siguiente formula:

$$\sigma_{min}, \sigma_{max} = - \left[\left(\frac{p}{\bar{a}(1 + \nu)} \right) \pm \left(\frac{\sqrt{(q^2 + t^2)}}{\bar{b}} \right) \right] E \quad (29)$$

- Para **muestras gruesas** la combinación de tensiones deberá considerarse:

$$P = (\sigma_3 + \sigma_1)/2 \quad (30)$$

$$Q = (\sigma_3 - \sigma_1)/2 \quad (31)$$

$$T = \tau_{13}/2 \quad (32)$$

Donde P representa la presión media de las tensiones residuales y Q y T representan los componentes de la tensión tangencial.

En este caso, al igual que en el caso anterior, el ángulo β puede calcularse de la siguiente manera:

$$\beta = 1/2 \arctan (T/Q) \quad (33)$$

Por lo que, las tensiones principales podríamos calcularlas mediante la siguiente formulas:

$$\sigma_{min}, \sigma_{max} = P \pm \sqrt{(Q^2 + T^2)} \quad (34)$$

6.5.2.1. Método del orificio perforado incremental (Incremental Hole Drilling)

Como se ha mencionado anteriormente, el método de la Tensión Uniforme Equivalente no funciona bien en los casos en que las tensiones residuales varían con la profundidad. La norma ASTM E837 recomienda que, si las deformaciones combinadas se desvían de la distribución de tensiones dada en más de un $\pm 3\%$, la distribución de tensiones debería tratarse como no uniforme y no se podría aplicar los cálculos de la norma ASTM E837 [26]. Para determinar si las tensiones se distribuyen de forma no uniforme, la perforación del agujero debe llevarse a cabo incrementalmente, registrando las tensiones una serie de profundidades de los agujeros.

Durante el proceso de *Incremental Hole Drilling*, la eliminación del material del primer incremento de la perforación da lugar a tensiones superficiales que se relacionan directamente con las tensiones residuales aliviadas en el límite del agujero dentro de ese incremento. La eliminación de material del segundo incremento produce dos efectos. El primer lugar, la rigidez de la probeta se modifica de manera que se produce un nuevo relajamiento de las tensiones dentro de la capa de material correspondiente al primer incremento, produciendo un cambio de deformación en la galga extensométrica. En segundo lugar, las tensiones aliviadas en el límite del agujero del segundo incremento producen un cambio adicional de la deformación en la galga. Por esta razón, la relajación de deformaciones continúa creciendo incluso si no existen tensiones en los nuevos incrementos [27].

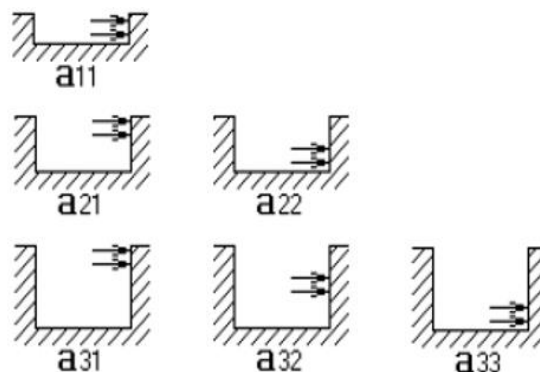


Ilustración 25. Profundidad de agujero y de tensiones correspondientes a los coeficientes \bar{a} .

En consecuencia, se requieren diferentes conjuntos de coeficientes para relacionar los cambios de deformación superficial con las tensiones residuales para cada una de las combinaciones de profundidad de tensión y profundidad de orificio. El siguiente ejemplo de cálculo, como se puede ver en la *Ilustración 25*, se da para tres incrementos; obteniendo los coeficientes \bar{b} de la misma manera.

Para calcular las tensiones residuales de deformaciones aliviadas, se proponen los siguientes pasos[26]:

1. El orificio debe realizarse en pequeños incrementos para que los datos de deformación resultantes puedan ser suavizados o filtrados para reducir el ruido.
2. Se calculan las deformaciones combinadas p , q y t a partir de los datos de deformación suavizados.
3. Las funciones de relajación de la deformación acumulada para el diámetro del agujero medido (A y B) son calculadas, por interpolación, a partir de los conjuntos de matrices triangulares dados en [28], [29].
4. Los coeficientes \bar{a} y \bar{b} son calculados directamente mediante la sustracción de los elementos adyacentes en las matrices de la función de la deformación acumulada.
5. Las tensiones P, Q y T son calculadas para los incrementos sucesivos mediante las siguientes relaciones:

$$\bar{a}P = pE/(1 + \nu) \tag{35}$$

$$\bar{b}Q = qE \tag{36}$$

$$\bar{b}T = tE \tag{37}$$

Por ejemplo, la tensión de presión combinada P se calcula mediante los dos primeros incrementos de la siguiente manera:

$$P1 = \frac{p1 \cdot E}{(1 + \nu) \bar{a}_{11}} \tag{38}$$

$$P2 = \frac{\frac{p2 \cdot E}{(1 + \nu)} - (P1 \cdot \bar{a}_{21})}{\bar{a}_{22}} \tag{39}$$

Las tensiones combinadas Q y T se obtienen de la misma manera, pero excluyendo el término del coeficiente de Poisson.

Finalmente, las tensiones requeridas en cada cálculo de incremento se obtienen a partir de las tensiones combinadas correspondientes como se ha indicado anteriormente en las *ecuaciones (29) y (34)*.

6.6. Modelos de predicción de las tensiones residuales

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la problemática de las tensiones residuales es uno de los problemas más recurrentes en la industria. Por ello, con el objetivo de minimizar este problema, realizar un modelo de tensiones dependiendo del material y de las condiciones de corte le daría a la industria la posibilidad de predecir las tensiones residuales que se generarán en el componente y, de esta manera, poder investigar en cómo invertir los efectos que las tensiones residuales producen.

Hasta el día de hoy, se han diseñado algunas herramientas de modelización de tensiones residuales en piezas acabadas, sin embargo, no son lo suficientemente precisas y, por lo general, son bastante caras para las empresas [4]–[6]. Además, el uso de este tipo de herramientas es bastante complejo, por lo que requieren gente especializada para hacer uso de ellas. Por esta razón, muchos estudios presentan diferentes modelos que resuelvan dicho problema.

Estos modelos pueden tener diferente enfoque, ya que un modelo puede ser numérico, analítico o empírico. En la siguiente tabla se muestran las ventajas, desventajas y limitaciones de los tres tipos de modelos [6],[30]:

Tabla 1. Ventajas, desventajas y limitaciones de los diferentes tipos de modelos.

	Modelo Analítico	Modelo Numérico	Modelo Empírico
Ventajas	Tiempo computacional reducido	No es necesario la compresión completa del problema y conecta los parámetros relevantes de la industria de forma directa	Practico, rápido y directo para la estimación de parámetros relevantes de la industria
Desventajas	Único para cada problema, profundo entendimiento	Largo tiempo computacional y complejo modelado de condiciones de contorno	Experimentación extensa, costoso y requiere mucho tiempo
Limitaciones	Normalmente, limitado a un análisis 2D	Presenta limitaciones para geometrías complejas y para problemas a gran escala	Valido para un rango de experimentación

En resumen, los modelos numéricos o los modelos por método de elementos finitos son versátiles y conectan directamente con los parámetros relevantes de la industria, a pesar de que requieren largos tiempos de computación. Entre los modelos numéricos que se han analizado para modelizar las tensiones residuales inducidas por el mecanizado podemos encontrar los siguientes estudios, da Silva et al. [31], Lin et al. [32] y Rocha D'Oliveira et al. [33].

Por otro lado, los modelos analíticos son herramientas rápidas que revelan los principios de las tensiones residuales inducidas por el mecanizado; sin embargo, cada problema de mecanizado requiere su propio modelo. Autores como Wan et al. [34] y Fergani et al. [35] han realizado estudios mediante modelos analíticos.

Finalmente, los modelos empíricos son prácticos y rápidos, a pesar de que los ensayos requieren tiempo y tienen gran coste, además de que son únicos para cada proceso de mecanizado. Estos son algunos de los autores que han estudiado diversos modelos empíricos: Ulutan et al. [36], Wang et. al [37] y Yang et al. [20].

6.6.1. Modelos empíricos

Los modelos empíricos se basan en las relaciones estadísticamente significativas entre variables. Las ecuaciones que describen un modelo estadístico no son física o dimensionalmente consistentes ni universales, ya que sólo son válidas para el contexto en el que se calibraron. Se caracterizan por un alto poder predictivo, pero a una escasa capacidad explicativa, es decir, reproducen el funcionamiento del sistema razonablemente bien pero no permiten explicar la naturaleza del sistema. Por esta razón, los modelos estadísticos se conocen como modelos de caja negra.

Para este tipo de modelos la falta de conocimiento acerca del sistema se compensa con datos de calidad y cantidad suficiente de las variables de entrada y salida obtenidas experimentalmente. De esta manera, a partir de los datos se puede construir un modelo empírico que permita, posteriormente, obtener las variables de salida a partir de un nuevo conjunto de valores para las variables de entrada.

Sin embargo, realizar una predicción de las tensiones residuales que se van a generar en un material tras su mecanizado no es una tarea fácil, ya que resulta casi imposible predecir con exactitud las tensiones residuales antes de que se realice el mecanizado. Además, los modelos empíricos suelen desarrollarse en determinadas condiciones de mecanizado, por lo que es imposible que cubran todos los parámetros de corte que influyen en las tensiones residuales. Es decir, los modelos empíricos son eficaces para condiciones de corte limitadas.

Muchos investigadores hacen uso de este tipo de modelos, ya que los modelos analíticos suelen ser difíciles de formular y los resultados de los métodos numéricos, que se basan en el método de elementos finitos, necesitan largos tiempos computacionales. En especial para el caso de los valores de las tensiones residuales y rugosidad superficial son experimentados para algunas condiciones de corte y obtenidos estos valores, con diferentes velocidades de corte, avance, pasadas, etc., se busca una ecuación empírica. De esta manera, proporcionan un buen conocimiento sobre los posibles resultados en procesos con similares condiciones de corte, herramientas y materiales [6].

Debido a que este modelo se basa en las variables de entrada, es de suma importancia realizar un diseño correcto de los ensayos que se van a realizar. A la hora de plantear planes de ensayos experimentales, es necesario analizar bien el objetivo y el número de datos que se desean obtener, ya que, de esta manera, permitirá definir las variables de entrada a los ensayos facilitando la obtención de resultados y minimizando las fuentes de incertidumbre.

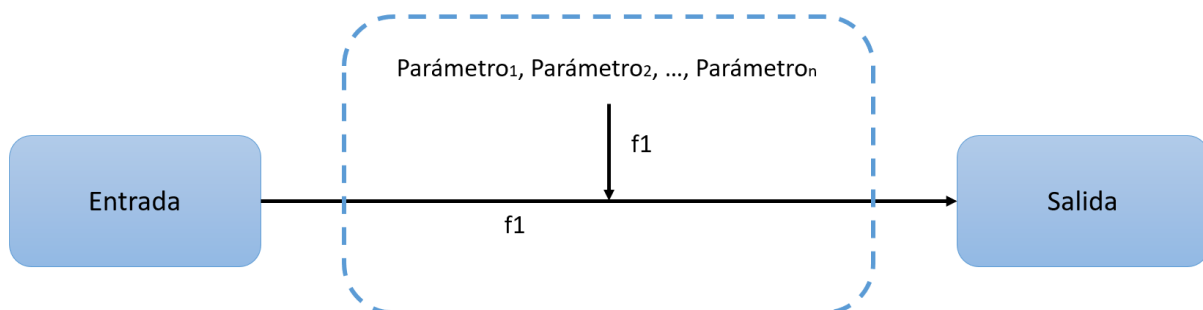


Ilustración 26. Diagrama esquemático de la estructura de los modelos empíricos.

6.6.1.1. Funciones de ajuste para el modelado del perfil de tensiones residuales

Con el objetivo de conseguir una expresión que permita una predicción para perfiles de tensiones residuales en profundidad, muchos autores han centrado su atención en **ajustes polinómicos**. La ventaja de este tipo de ajustes es la libertad en la determinación del número de términos. Es decir, cuando se utilizan con pocos términos puede que la curva no se parezca a un ajuste polinomial, sin embargo, al aumentar este número a pesar de que el ajuste sea bueno, el modelo se vuelve complejo y no es fácilmente aplicable a otros procesos, materiales o condiciones de mecanizado [38].

Dejando a un lado los ajustes polinómicos, otros investigadores han encontrado otro tipo curvas de ajuste, donde se puede representar cualquier perfil de tensión residual sin aumentan la complejidad del modelo matemático.

En primer lugar, uno de los método efectivos para describir las tensiones residuales inducidas por el proceso de fresado, es el método en la que la curva de ajuste se puede modelizar mediante una **función de decaimiento exponencial** (*Exponential decay function*) [39]:

$$\sigma(x) = C_0 e^{-\lambda_1 x} \quad (40)$$

Donde $\sigma(x)$ es la tensión residual, x es la profundidad de bajo la superficie, C_0 es la amplitud de la exponencial y λ_1 es el coeficiente de amortiguación. Estos coeficientes se obtienen mediante el ajuste de los datos recolectados en los ensayos de fresado.

Otros autores como Wang et al., los cuales se centraron en la predicción de la distorsión generada por el fresado en componentes con paredes de poco espesor, observaron que las curvas obtenidas experimentalmente resultaban en una curva de disminución sin amortiguación. De esta manera, diferentes autores le han introducido un seno o coseno a la función de decaimiento exponencial, generando una **función senoidal/cosenoidal de decaimiento exponencial**. Sin embargo, estas ecuaciones se pueden representar como una única ecuación, ya que $\cos(x) = \sin(90 - x)$. A continuación, se muestra la ecuación que modeliza de estos perfiles [37], [20], [30], [36], es decir la función cosenoidal de decaimiento exponencial (*Exponentially decaying cosine function*):

$$\sigma(x) = C_0 e^{-\zeta \omega_d x / \sqrt{1-\zeta^2}} \cos(\omega_d x + \varphi) \quad (41)$$

Donde $\sigma(x)$ es la tensión residual, C_0 es la constante de la amplitud, x es la distancia a la superficie mecanizada, ζ es el coeficiente de amortiguación, ω_d es la frecuencia de amortiguación y φ es el ángulo de fase.

6.7. Coeficientes de correlación

Una vez realizado el modelo, este deberá ser evaluado para estimar su efectividad para predecir las medidas obtenidas de los ensayos. Además de evaluar el propio modelo, también se deberá evaluar la comparativa entre el perfil obtenido mediante el modelo construido y los perfiles experimentales para la validación del modelo.

Por ello, para evaluar tanto el modelo como el perfil de tensiones predicho, se debe hacer uso de los coeficientes de correlación, los cuales reflejan la bondad del ajuste de un modelo. Sin embargo, por su uso habitual, se pueden diferenciar los siguientes coeficientes [40], [41]:

- Coeficiente de correlación de Pearson: este coeficiente mide la relación estadística entre dos variables continuas, el cual puede obtener valores entre 0 y 1.
 - ✓ $r^2 = 0$: los puntos se encuentran muy dispersos.
 - ✓ $r^2 \approx 1$: los puntos están muy cerca de la línea.

$$r^2 = \left(\frac{\sum((\sigma - \bar{\sigma}) \cdot (\hat{\sigma} - \bar{\hat{\sigma}}))}{\sqrt{\sum(\sigma - \bar{\sigma})^2} \cdot \sqrt{\sum(\hat{\sigma} - \bar{\hat{\sigma}})^2}} \right)^2 \quad (42)$$

Donde σ es la tensión residual medida, $\bar{\sigma}$ es el promedio de las tensiones residuales medidas, $\hat{\sigma}$ es la tensión residual predicha con el modelo y $\bar{\hat{\sigma}}$ es el promedio de las tensiones residuales predichas.

- Coeficiente de determinación: a diferencia del coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de determinación mide cómo de bien coinciden los valores predichos con los valores observados.
 - ✓ $R^2 = 1$: indica que la predicción encaja a la perfección.
 - ✓ $R^2 = 0$: en este caso las predicciones son tan buenas como las obtenidas mediante el promedio de las medidas realizadas.
 - ✓ Un R^2 negativo indica que la predicción realizada es peor que la línea obtenida del promedio de los puntos medidos.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\sigma - \hat{\sigma})^2}{\sum(\sigma - \bar{\sigma})^2} \quad (43)$$

En resumen, a la hora de utilizar estos coeficientes, el coeficiente de correlación de Pearson (r) se utiliza para identificar los patrones de los fenómenos, mientras que el coeficiente de determinación (R^2) se utiliza para identificar la fuerza del modelo.

Generalmente, el coeficiente r^2 es completamente diferente al coeficiente de determinación (R^2), excepto en casos muy específicos de regresión lineal.

7. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Definidas las bases teóricas que engloban el proyecto, en el siguiente apartado se explicará la metodología que se ha llevado a cabo para la obtención de los objetivos marcados.

De esta manera, para realizar una descripción coherente de la metodología que se ha seguido a lo largo del proyecto, este se ha segmentado en cuatro subapartados (véase *Ilustración 27*).

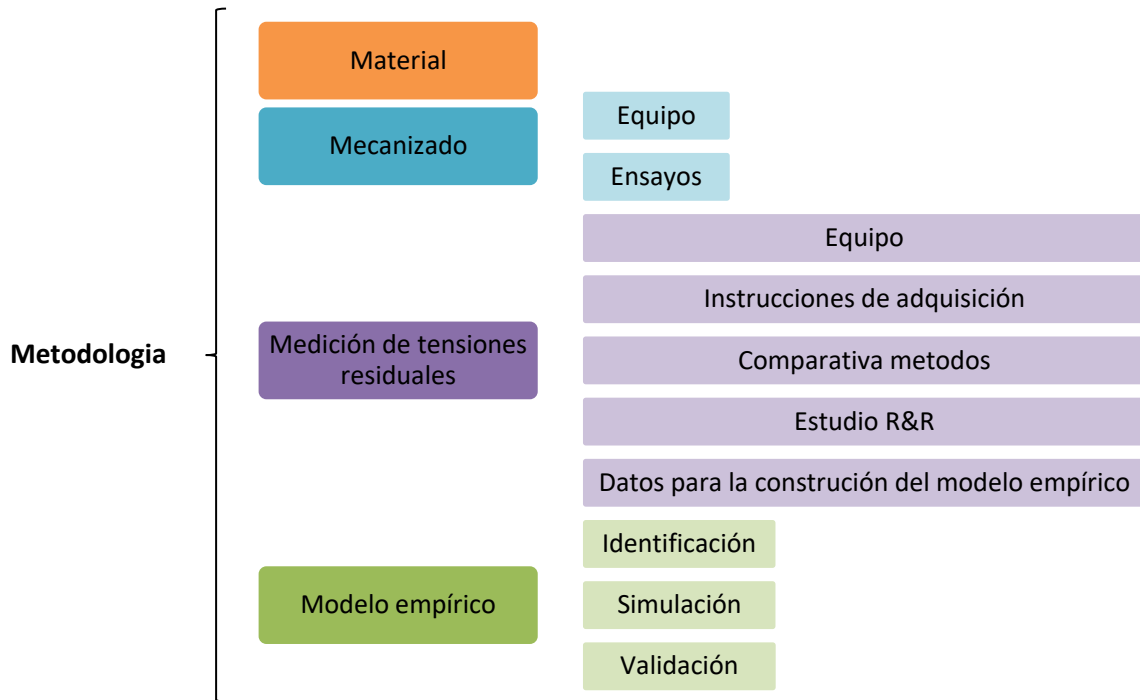


Ilustración 27. Diagrama de los apartados y subapartados de la metodología del trabajo.

Siguiendo el diagrama, se puede ver que, en primer lugar, se mostrarán las características generales de la aleación de titanio, ya que se trata del material que se va a someter a estudio. Seguido se explicará el proceso de mecanizado que se llevará a cabo, así como el equipo y la maquinaria de la que se ha hecho uso. De la misma manera, se describirá el proceso de adquisición de las tensiones residuales y el equipamiento requerido. Asimismo, se ha realizado un estudio comparativo entre dos métodos de medición y un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del método seleccionado para obtener los datos de las tensiones que van a ser utilizados para la construcción del modelo empírico, así como el proceso para la obtención de estos datos.

Por último, se explicará el proceso que se ha efectuado para realizar el desarrollo del modelo empírico de predicción de tensiones residuales. De esta manera, este último apartado ha sido dividido en tres fases, es decir, identificación, simulación y validación. Por lo que, de esta manera, se describe la base teórica de la cual se ha cimentado el modelo, se muestra el modelo en sí mismo, así como la evaluación de este y, finalmente, se expone la validación que se le ha realizado al modelo.

7.1. Material sometido a estudio

La aleación de titanio que se ha utilizado para el estudio es la aleación bifásica Ti6Al4V. Esta aleación de titanio fue desarrollada originalmente para el mercado aeroespacial y es muy utilizada en componentes estructurales aeroespaciales. En concreto, la aleación Ti6Al4V es la más utilizada de todas las aleaciones de titanio. En la siguiente imagen (*Ilustración 28*) se muestra la probeta que se ha sometido a estudio, es decir, una pieza plana de la que se han evaluado las tensiones de las superficies fresadas.



Ilustración 28. Probeta de la aleación de titanio Ti6Al4V sometida a estudio.

Como se puede ver en la *Ilustración 29* este material está compuesto dos tipos de fases denominados α y β , donde la fase α se muestra en negro y la fase β en blanco. La existencia de la transformación α/β significa que se pueden lograr gran variedad de combinaciones en cuanto a microestructura y propiedades de la aleación, de esta manera, mediante el procesado termo-mecánico se permite adaptar las propiedades a la aplicación que se va a dar al componente [21].

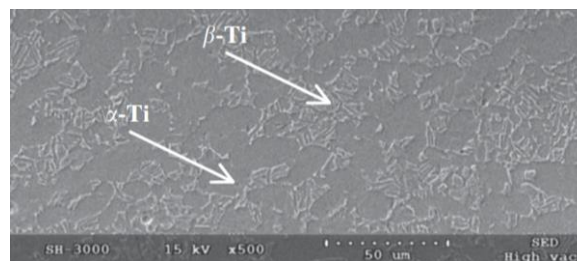


Ilustración 29. Microestructura de la aleación de titanio Ti6Al4V [21].

Esta aleación es una aleación $\alpha+\beta$, con un 6% en peso de aluminio que estabiliza la fase α y un 4% en peso de vanadio que estabiliza la fase β . A temperatura ambiente la microestructura en equilibrio está formada principalmente por la fase α , la cual tiene una estructura HCP (estructura cristalina hexagonal sencilla), y con algo de fase β retenida, esta con una estructura BCC (estructura cúbica centrada). En las siguientes dos tablas se muestra la composición química y las propiedades de esta aleación:

Tabla 2. Composición química de la aleación de titanio Ti6Al4V.

Elemento	Al	V	Fe	O	N	Y	Ti
% peso	5,50-6,75	3,50-4,5	Max. 0,30	Max. 0,20	Max. 0,08	Max. 0,005	Base

Tabla 3. Propiedades de la aleación de titanio Ti6Al4V.

Densidad [g/cm ³]	Dureza [HRC]	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson [-]
4,42	36	120,2	0,36

7.2. Proceso de mecanizado – Fresado

A continuación, se muestra el equipamiento y procedimiento seguido para la ejecución de los ensayos de mecanizado y la obtención de las superficies mecanizadas a analizar dentro del proyecto.

7.2.1. Maquinaria y equipos utilizados

En primer lugar, la máquina-herramienta que se ha utilizado para la realización de los ensayos ha sido el centro de fresado-torneado Soraluze FMT. Esta máquina multifunción permite el mecanizado de piezas de gran complejidad y precisión en una única atada. En la siguiente tabla se muestran algunas de las especificaciones del centro:

Tabla 4. Especificaciones del centro de mecanizado Soraluze FMT.

Centro multifunción SORALUCE FMT	
Nombre y modelo	Soraluce FMT / FMT 4000
Sistema CNC	Heidenhain TNC 640
Número de ejes	3+2 (Modo Fresadora)
Potencia del cabezal	43 kW
Velocidad máxima del husillo principal	4000 rpm
Avance rápido	Eje X: 45000 mm/min Ejes Y/Z: 35000 mm/min



Ilustración 30. Centro de mecanizado Soraluze FMT.

Siguiendo con el equipo utilizado para realizar el mecanizado, como se menciona en el apartado 7.1, el material utilizado se trata de la aleación de titanio Ti6Al4V. Los tochos cuentan con un tamaño de 270×180×30 mm y 260×140×25 mm, un tamaño indicado para facilitar la movilidad de la probeta a mecanizar.

De acuerdo con la norma ISO 513:2004, que tiene como fin regular la “Clasificación y aplicación de materiales de corte duro para la eliminación de metales con filos de corte definidos – designación de los principales grupos y grupos de aplicación”, el material Ti6Al4V pertenece al grupo S donde se encuentran los materiales termorresistentes y el titanio, los cuales cuentan con una baja maquinabilidad (*apartado 6.1*). Es importante destacar que esta normalización está realizada en base al uso de herramientas y no a la composición química de los materiales. Dicho esto, las herramientas que se van a utilizar para realizar el mecanizado de fresado frontal deberán pertenecer al grupo mencionado, ya que son las recomendadas para aleaciones de titanio, sin embargo, esto queda a la elección del usuario. De esta manera, en la *Tabla 5* se muestran las herramientas que se han utilizado a lo largo del trabajo.

Tabla 5. Herramientas empleadas a lo largo del proyecto.

Herramientas		
	HTA I	HTA II
Marca	KENNAMETAL	MITSUBISHI
Referencia	7793VXO12 (Plaquitas X500)	VFMHVRBCHD1600R100
Número de filos	5	4
Diámetro	63 mm	16 mm

Imagen esquemática



En cuanto a la herramienta HTA I, esta herramienta, que cuenta con 5 insertos para realizar el mecanizado, es una herramienta de alto avance adecuada para realizar desbastes, ya que debido a su diámetro no se puede hacer uso en geometrías complejas. En cuanto a su uso a lo largo este trabajo, esta herramienta se ha utilizado únicamente para realizar el mecanizado de una placa para una comparativa entre métodos de medición de tensiones residuales.

Por otro lado, la herramienta HTA II es una fresa integral de metal duro de 4 filos con refrigeración interna, la cual es específica para realizar operaciones de acabado en fresado. En cuanto al diámetro de la herramienta, este ha sido seleccionado de cara a minimizar el radio que se va a dejar en las cajas que se van a realizar en un futuro estudio. Además, esta última herramienta es la que se ha utilizado para realizar los mecanizados de los cuales se van a obtener los datos de las tensiones residuales necesarios para realizar el modelo empírico para la predicción de tensiones residuales.

Por último, se debe mencionar que para medir el desgaste de la herramienta HTA II, para evaluar las tensiones residuales generadas, se hizo uso de un microscopio portable de la marca *ProScope*. Este microscopio, el cual se conecta al ordenador mediante un conector USB, realiza imágenes con 5MP con un zoom ajustable entre 10X y 230X.

7.2.2. Ensayos de mecanizado

Mencionado el herramental empleado en el proceso de mecanizado, en las siguientes líneas se describe los pasos que se han seguido para el mecanizado de las superficies a analizar.

El proceso de mecanizado analizado es un proceso de fresado frontal, donde la estrategia de mecanizado utilizada es un planeado en Zig (Ilustración 31), de manera que todas las pasadas se realizan en concordancia. Esta estrategia ha sido seleccionada dado que es una práctica común en el fresado de las aleaciones de titanio [42]. Haciendo uso de esta estrategia, el filo entra cortando la pieza con el máximo espesor de viruta y sale con un espesor nulo, así la fricción y el rozamiento entre la herramienta y la pieza son mínimos. De esta manera, esta estrategia reduce el calor disipándolo una parte en la viruta y otra en la pieza, por lo que se generan menos tensiones residuales tractivas.

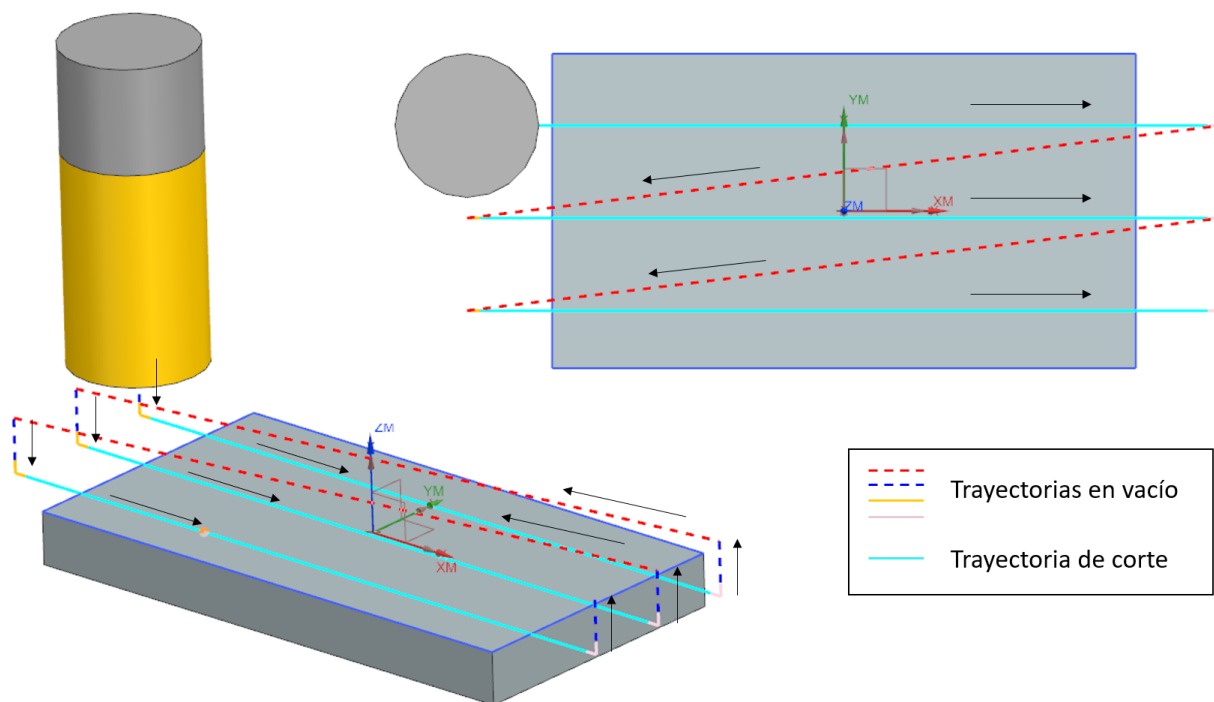


Ilustración 31. Proceso de fresado, estrategia Zig en concordancia.

Los mecanizados se han realizado empleando una emulsión de agua y aceite, denominada taladrina, como fluido de corte. Gracias a esta lubricación se minimiza la generación de desgaste de la herramienta, de manera que se asegura que el estado de los filos se mantiene lo más constante posible durante el mecanizado.

7.2.2.1. Estrategia de mecanizado para la construcción del modelo empírico

Los ensayos de mecanizado se han realizado mediante la herramienta ya mencionada HTA II, la cual ha sido seleccionada en base al material que se desea mecanizar, Ti6Al4V; al método de mecanizado, contorneado; a la estrategia que se va a seguir, acabado; y a su posterior aplicación; predicción de tensiones tras el mecanizado de cajas. En la siguiente imagen, se observan las condiciones de corte recomendadas para esta herramienta:

Shoulder milling			Slotting		
Work material	Austenitic stainless steel, Titanium alloy		Work material	Austenitic stainless steel, Titanium alloy	
	X5CrNi1810, X5CrNiMo17-12-2, Ti6Al4V			X5CrNi1810, X5CrNiMo17-12-2, Ti6Al4V	
Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)	Dia. (mm)	Revolution (min ⁻¹)	Feed rate (mm/min)
16	2000	560	16	1400	170
20	1600	510	20	1100	130
Depth of cut			Depth of cut		

D: Dia.

Ilustración 32. Parámetros de corte recomendados para la herramienta HTA II.

Puesto que la herramienta es de 16 mm de diámetro y que las pasadas se realizaron penetrando con casi el 70% del diámetro de la herramienta, las condiciones recomendadas son las mencionadas en el cuadrante de la derecha de la *Ilustración 32*. Asimismo, aplicando las ecuaciones correspondientes al proceso de fresado, se pueden obtener las variables V_c y f_z recomendadas, las cuales son las variables que se estudian en el trabajo.

Para llevar a cabo el estudio se han mecanizado dos placas con las mismas dimensiones, en concreto, de 260×140×25 mm. En cuanto a la primera placa, se mecanizó para la generación del modelo (*Ilustración 33*), por lo que se seleccionó la superficie en 16 zonas y se mecanizaron empleando diferentes condiciones de corte.

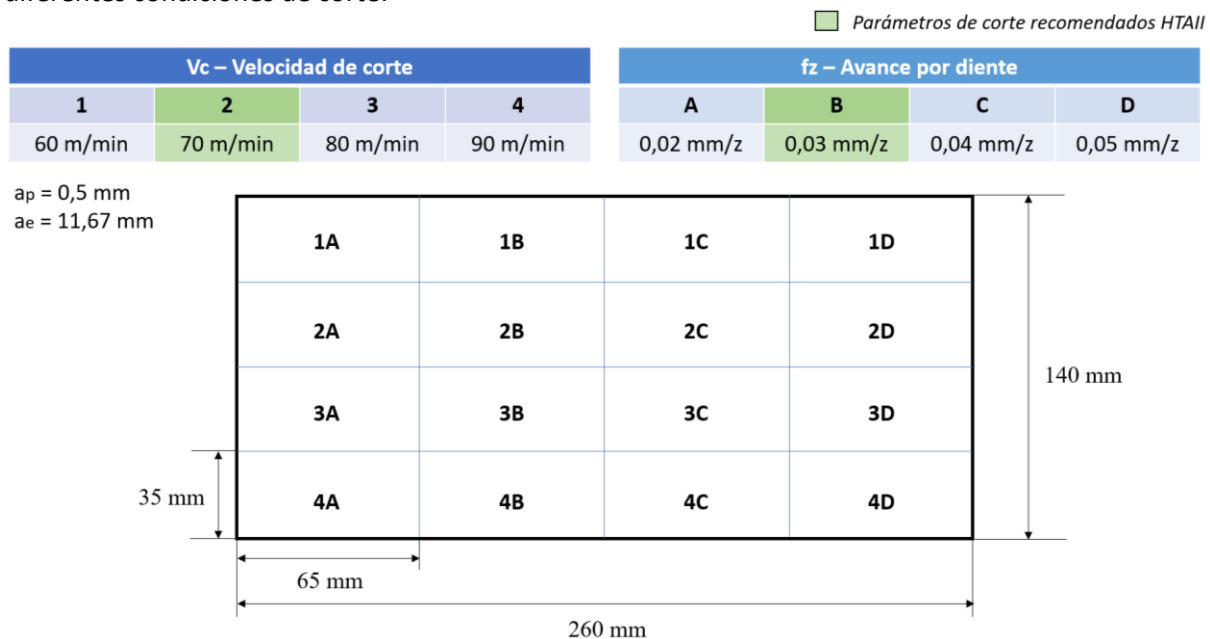


Ilustración 33. Diseño del ensayo realizado para obtener los datos que construirán el modelo empírico.

La otra placa fue mecanizada para realizar tanto la validación del modelo como un estudio de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) del sistema (*Ilustración 34*). En cuanto a esta última, se seccionó en 12 cuadrículas para obtener los datos de validación, al igual que el modelo, mecanizando las secciones empleando diferentes condiciones de corte y se dejó una superficie de 260×35 mm para el estudio de R&R, la cual fue mecanizada con los parámetros de corte recomendados.

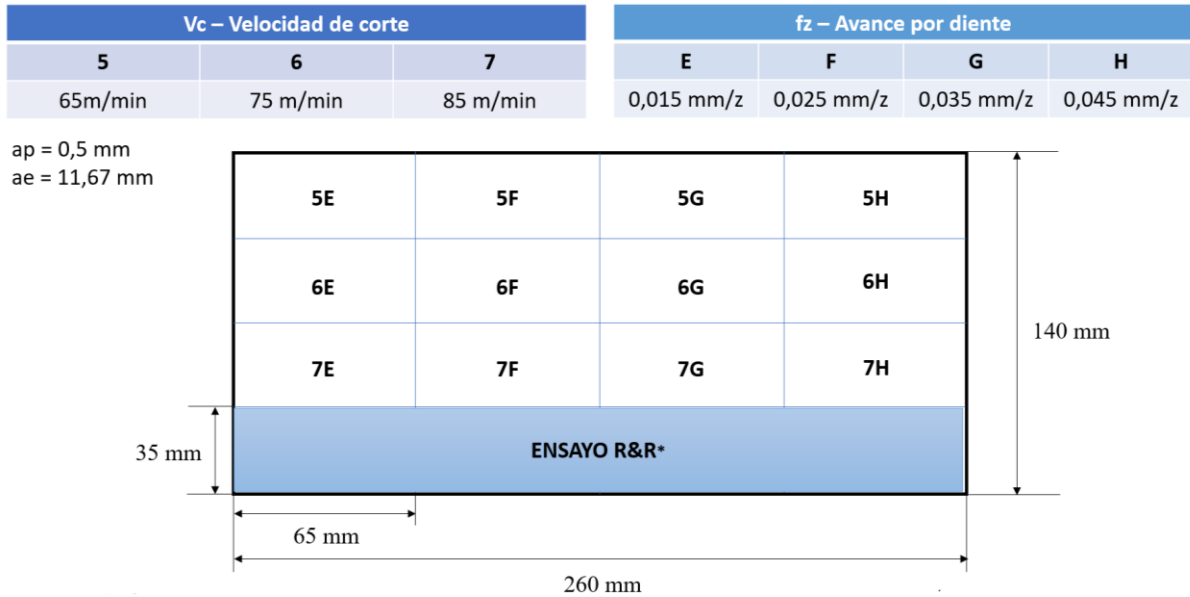


Ilustración 34. Diseño del ensayo realizado para la validación del modelo y el estudio R&R.

Observando las condiciones de corte que se han seleccionado para modelizar y validar el modelo se puede ver que no son las mismas, ya que hacer uso de los mismos datos para ambas acciones supondría influenciar la evaluación del modelo de forma positiva, lo cual ocultaría la efectividad real que tiene el modelo para realizar una buena predicción. Por otro lado, los valores han sido seleccionados para alejarse lo menor posible de los parámetros recomendados por los fabricantes de la HTA II.

Los mecanizados de las placas se llevaron a cabo empleando la configuración de amarre que puede observarse en la *Ilustración 35*. Antes de realizar los ensayos, se realizaron pasadas de limpieza, mediante una estrategia de planeado en las condiciones de corte recomendadas, en ambas placas para asegurar la homogeneidad de las superficies previas a los ensayos y de esta forma garantizar una profundidad de pasada axial (a_p) constante.

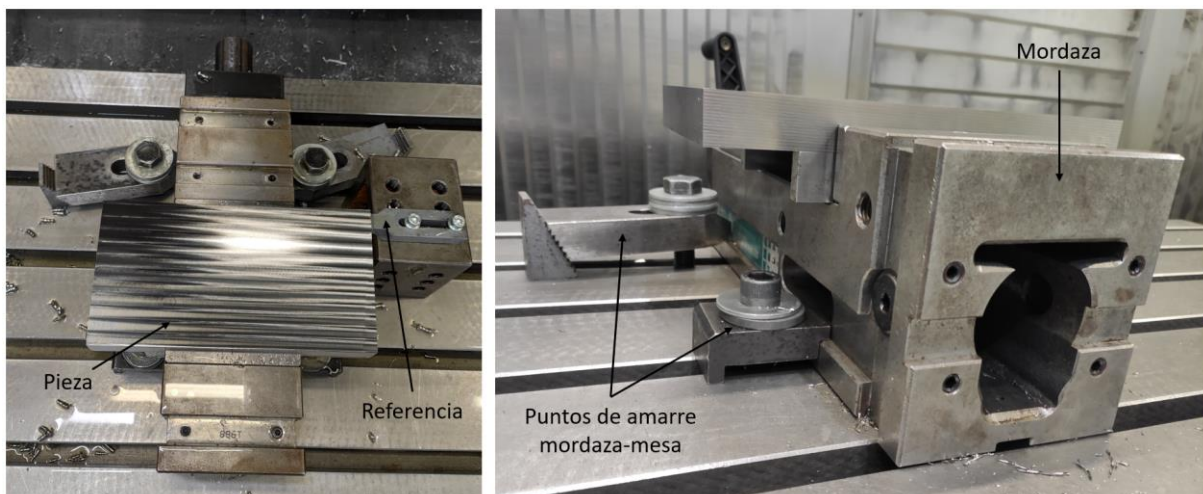


Ilustración 35. Utillaje seleccionado para amarrar el tocho en la máquina-herramienta.

Realizados los mecanizados correspondientes para la construcción del modelo, la validación del modelo y el estudio R&R, se analizó el desgaste que se generó en los fillos de la herramienta tanto en el mecanizado de las pasadas de limpieza, como el generado tras el mecanizado del cual se van a obtener los datos de las tensiones residuales.

Para analizar el desgaste de la herramienta se realizaron fotografías de los fillos de la herramienta mediante un el microscopio mencionado anteriormente (*apartado 7.2.1*), con una magnificación de 93,52. En cuanto a los tipos de fillos que hay en la herramienta, si se observa la *Ilustración 36* se pueden diferenciar dos fillos, el filo largo, el cual se denominara filo 1 a lo largo del informe y el filo corto, denominado filo 2.

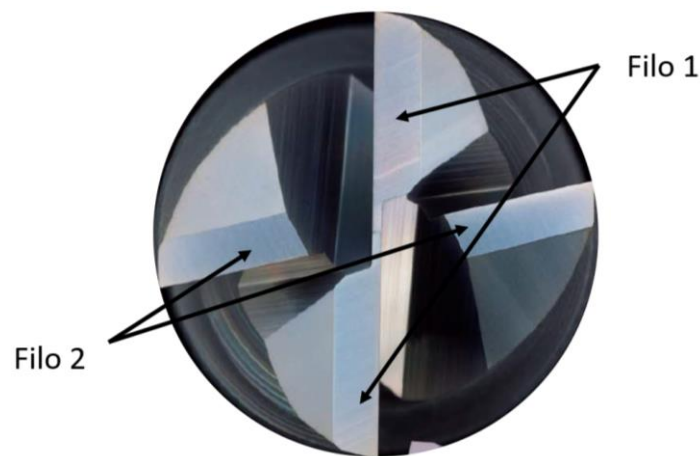


Ilustración 36. Tipos de fillos de la HTA II.

En la siguiente imagen se muestra una de las fotografías que se analizó de uno de los fillos largos de la herramienta tras el mecanizado de limpieza con los parámetros de corte recomendados.

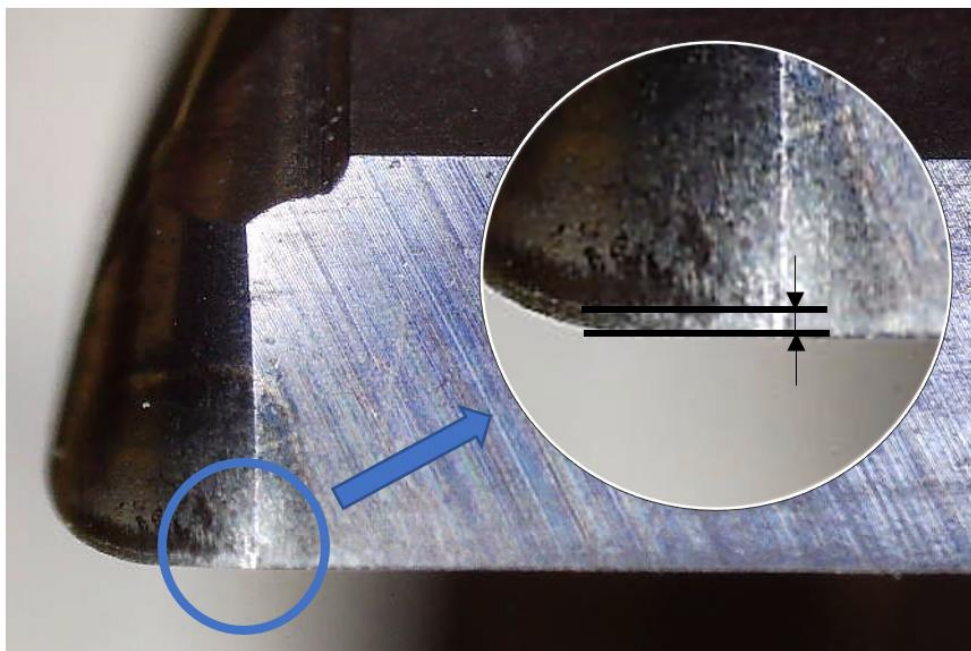


Ilustración 37. Desgaste de la herramienta en el filo 1 tras el mecanizado de limpieza.

La evolución del desgaste a lo largo del tiempo, según la norma ISO 8688 denominada “*Tool Life Testing in Milling*”, se mide utilizando el desgaste de flanco promedio (V_b) y se mide en mm. De esta manera, en la siguiente tabla (Tabla 6) se muestran los valores de los desgastes que se han analizado por cada uno de los tipos de filos que tiene la herramienta en el mecanizado de limpieza y en el mecanizado del ensayo diseñado y tanto para la probeta del modelo como para el de validación y la del estudio de R&R.

Tabla 6. Desgastes de la herramienta HTA II tras el mecanizado para el modelo y validación y R&R.

Desgastes		
Probeta modelo		
Limpieza	Filo 1	0,049 mm
	Filo 2	0,052 mm
Mecanizado diseño	Filo 1	0,057 mm
	Filo 2	0,056 mm
Probeta validación y R&R		
Limpieza	Filo 1	0,059 mm
	Filo 2	0,066 mm
Mecanizado diseño	Filo 1	0,062 mm
	Filo 2	0,069 mm

A partir de los datos obtenidos de los desgastes analizados, y siguiendo el criterio de la norma ISO 8688 se puede concluir que el desgaste generado tras el mecanizado no es relevante, como se confirma en el estudio de J. Caldeiraini et al. [43]. Asimismo, de cara a lo que se ha mencionado en el apartado 6.3.3. sobre el efecto del desgaste de la herramienta en el perfil de tensiones residuales, se puede decir que, acorde a los valores del desgaste de flanco promedio medidos, el pico de compresión del perfil de las tensiones residuales no debería de ser muy pronunciado debido al efecto del desgaste de la herramienta (apartado 6.3.3).

7.3. Medición de las tensiones residuales

A continuación, se muestra el equipamiento y procedimiento empleado para la obtención de los perfiles de las tensiones residuales mediante la difracción de rayos-X. Realizada esta descripción se muestra una evaluación de los resultados obtenidos de dicha técnica en comparación a la técnica de Hole Drilling incremental y un estudio de la repetibilidad y reproducibilidad (R&R) de los resultados.

7.3.1. Maquinaria y equipos utilizados

Una parte importante de este trabajo es la obtención de las tensiones residuales de las probetas que han sido mecanizadas de cara a realizar el modelo de predicción de las tensiones residuales. Por ello, para llevar a cabo la obtención de estas tensiones residuales en profundidad se ha hecho uso de un difractómetro de Rayos-X (*apartado 6.5.1*).

Las mediciones que se han hecho a lo largo de este estudio se han llevado a cabo en las instalaciones de IDEKO con un difractómetro de Rayos-X. Este equipo es el modelo Xstress 3000 G2R portable de la marca Stresstech. En la siguiente tabla se muestra de forma resumida la descripción del instrumento de medición.

Tabla 7. Características del difractómetro de Rayos-X.

Difractómetro de Rayos-X	
Marca	Stresstech
Modelo	Xstress 3000 G2R
Software	XTronic
Unidad de control	- Suministro de Rayos-X: 5-30 kV / 0-6,7 mA
Goniómetro	- Método no destructivo. - Inclinación – ψ : programable desde -45° a 45° . - Oscilación – ψ : programable desde 0° a $\pm 6^\circ$. - Rotación – φ : opcional, $\pm 180^\circ$.
Características	- Método no destructivo*. - Equipo portátil. - La rotación del difractómetro permite el análisis del estado tensional biaxial y triaxial. - Modos de medición: $d\text{-sin}^2X$ y Ω .

*Las mediciones obtenidas mediante el método de difracción de rayos-X se consideran ensayos no destructivos. Sin embargo, si se quieren medir las tensiones en profundidad se debe eliminar material (electropulido), por lo que, la combinación de ambas prácticas originaría un ensayo semi-destructivo.



Ilustración 38. Goniómetro (izq.) y unidad principal (drcha.) del difractómetro de Rayos-X Xstress 3000.

Sin embargo, este instrumento no penetra en el material en profundidad, por lo que para obtener el perfil de las tensiones residuales en profundidad se realiza una eliminación local del material en la superficie. Esta eliminación de material debe realizarse mediante el electropulido, ya que es el método de eliminación que menos tensiones induce al eliminar material [24]. La electropulidora que se ha utilizado para estos ensayos es el equipo de la marca Struers, la cual tiene las siguientes características:

Tabla 8. Características de la Electro-pulidora.

Electropulidora	
Marca	Struers
Modelo	MoviPol-5
Características	<ul style="list-style-type: none"> - Potencia máxima de 180W - Área de electropulido de 9mm de diámetro - Suministro de tensión al transformador: 100-240V / 50-60 Hz - Suministro de tensión del transformador: 30 V DC



Ilustración 39. Electropulidora MoviPol-5 (izq.) y electrolito A3-I (drcha.).

También debe mencionarse, que la electropulidora hace uso de líquido electrolítico para la eliminación del material. En este caso, dado que el estudio está centrado en el análisis del material aeronáutico Ti6Al4V, se ha hecho uso del electrolito A3-I.

Tabla 9. Composición química del electrolito A3-I.

Electrolito A3-I	
Compuesto químico	%
Methanol	55-75
2-Butoxyethanol	25-45

Para la obtención de medidas de tensiones residuales de forma más eficiente, con la intención de minimizar los tiempos de obtención de datos, se ha hecho uso de otros dos equipos. En primer lugar, para evitar el movimiento de la pieza para hacer mediciones en diferentes puntos se ha colocado una mesa de movimiento lineal la cual tiene movimiento en los ejes X e Y.

Por otro lado, debido a que el tiempo que se invierte en electropulido para realizar la eliminación del material en profundidad no es totalmente proporcional a la cantidad de material que se elimina y que la huella que genera el electropulido por la eliminación del material no es uniforme, se ha propuesto hacer uso de un láser para poder medir la profundidad en la que se encuentra el punto que se va a medir.

Tabla 10. Mesa XY y Láser.

Otros equipos adicionales		
	Mesa X-Y	Láser
Marca	Rexroth	Keyence (IL-030)
Descripción	Movimiento lineal en los ejes X-Y	Medición de distancias

Imagen



Además del equipamiento ya presentado, también se ha utilizado un software específico, XTronic, para la puesta a punto del difractor de rayos-X a la hora de realizar las medidas y posterior tratamiento de datos.

7.3.2. Instrucciones de adquisición de medidas de tensiones residuales

En los siguientes puntos se muestran los pasos que se deben realizar para obtener las medidas de las tensiones residuales. Para un mejor entendimiento estos pasos se han dividido en tres fases: preparación del sistema de medición, adquisición de las tensiones residuales y tratamiento de los datos.

7.3.2.1. Preparación del sistema de medición

En esta primera fase se describen los pasos que se deben realizar para preparar el difractómetro de rayos-X adecuadamente y así poder obtener datos fiables y de calidad.

- ✓ Preparación de equipo de XRD: en primer lugar, para realizar las mediciones se deberá seleccionar el material del tubo, en este caso, a pesar de que otros autores hacen uso de un tubo de Cu [21], ya que las medidas se van a realizar en una aleación de titanio el tubo correspondiente será el de titanio. Una vez seleccionado se deberá conectar dicho tubo al goniómetro y a la unidad principal. Además, el ángulo entre los detectores depende del material que se va a medir, por lo tanto, en este caso siendo una aleación de titanio el material a medir el ángulo entre los detectores será de $137,5^\circ$, siendo el plano de medición el plano (110) ([44] pág. 42).

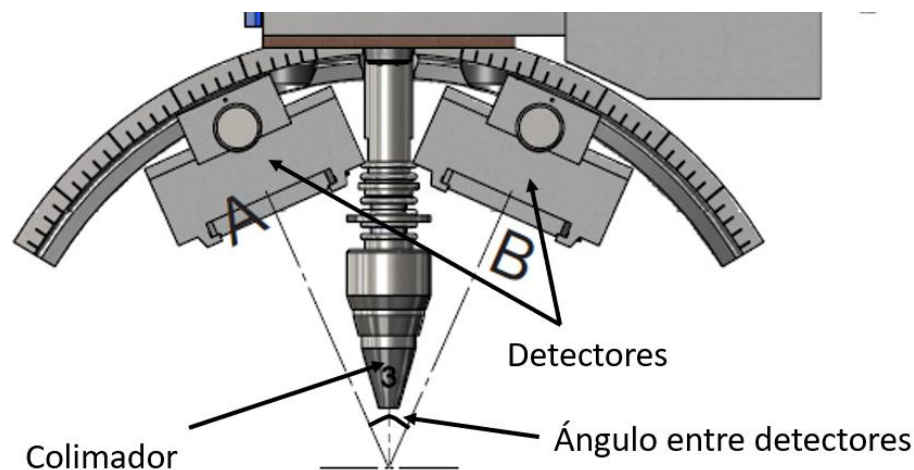


Ilustración 40. Detectores y colimador del difractómetro.

- ✓ Calibración del equipo y alineación: hecha la instalación se deberá hacer una calibración del equipo para determinar la distancia entre la punta del colimador y la superficie de la muestra. Estas medidas de calibración no se realizarán en la pieza que se va a medir si no en una muestra de polvo sin tensión especialmente dedicada a la calibración. Debe mencionarse que, esta también será seleccionada de acorde al material del tubo.

Para realizar esta calibración se deberá fijar un valor de umbral o utilizar el valor que proporciona el software por defecto. Para ello, se fijarán los parámetros que se observan en la *Ilustración 41* y se lanzará la medida. De esta manera, una vez que el valor de la tensión alcanza el valor del umbral establecido ($\leq \pm 8\text{MPa}$) y se encuentra una distancia aceptable entre la pieza y la punta del goniómetro, la calibración se dará por finalizada.

Material/Tube type
 Material Tube type

Measurement Calculation* Results Info

Exposure
 Exposure time (s)
 Measure dark current for tilt rotation

Tilting
 Tilt angles for rotation
 No. of tilts /
 Tilt angle to
 Angles Auto
 Tilt oscillation ±

Measuring mode
 χ Modified χ ω

Other
 Index

Geometry
 Collimator distance (mm) ...
 Detector distance (mm)

Rotations enabled
 No. of rotations
 Rotation angle to
 Angles Auto
 Rotation oscillation ±
 No. of rotation osc.
 Touch down for each rotation

X-ray control
 X-ray voltage (kV)
 X-ray current (mA)

Ilustración 41. Selección de parámetros para realizar una medida de tensiones residuales.

Realizada la calibración se procederá a realizar la alineación del goniómetro si se observa una división entre la línea trazada por los ángulos de inclinación positivos y negativos en las medidas realizadas en la calibración. Como se puede ver en la posterior imagen, esta alineación se efectuará dependiendo del caso de dispersión que se dé.

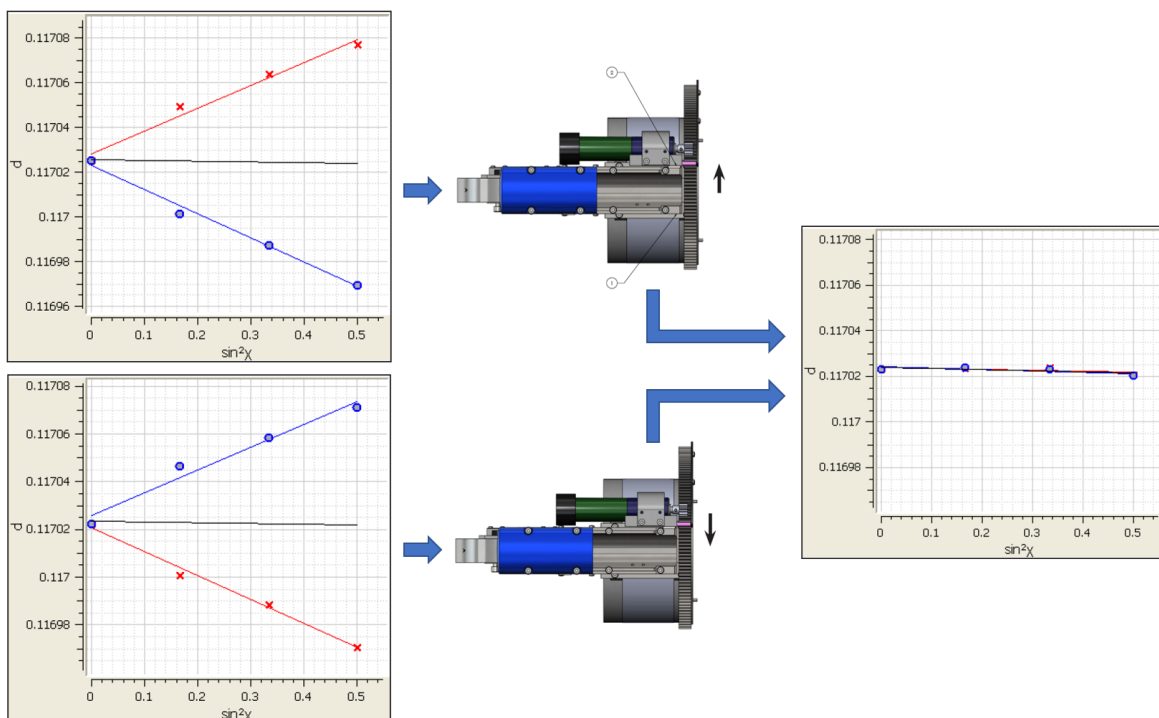


Ilustración 42. Método de alineación del goniómetro.

Tras realizar un ajuste en función de la dispersión, se volverá a proceder con la medición para corroborar que se ha realizado una correcta alineación del goniómetro. Este proceso se deberá hacer de forma iterativa hasta obtener una alineación del goniómetro aceptable.

- ✓ Mediciones en el patrón de referencia: antes de la realización de medidas en titanio se puede realizar una comprobación de las medidas que realiza el sistema de medición con un patrón de tensiones residuales. Al igual que la muestra con tensiones residuales nulas, el material de este patrón deberá concordar con el material del que se van a obtener las tensiones residuales. En concreto, en la siguiente tabla se muestran tanto los valores nominales del patrón de titanio, como los resultados obtenidos del patrón de titanio mediante el difractor:

Tabla 11. Comparación de los datos de teóricos y experimentales del patrón de alta tensión de titanio.

	Rotación [°]	σ [MPa]	τ [MPa]	FWHM [°]
Resultados	0	$-396,1 \pm 9,0$	$-17,4 \pm 1,5$	$3,00 \pm 0,09$
	90	$-393,5 \pm 13,8$	$14,9 \pm 2,5$	$3,00 \pm 0,15$
Valores nominales	0	$-425,0 \pm 26,0$	$1,0 \pm 7,0$	$3,90 \pm 0,17$
	90	$-435,0 \pm 15,0$	$4,0 \pm 2,0$	$3,90 \pm 0,15$

Gracias a las medidas obtenidas exponiendo el patrón a los rayos-X se puede corroborar que los valores que se obtienen mediante el difractor están cerca de las tolerancias definidas por el patrón. En concreto, las diferencias podrían estar relacionadas con el valor de umbral utilizado para la calibración o incluso por la misma calibración la cual podría requerir mayor alineación del goniómetro. A pesar de ello, las diferencias en cuanto a las tensiones principales están por debajo de un 10% del valor nominal y, por lo tanto, las medidas se pueden considerar aceptables [45].

7.3.2.2. Adquisición de las tensiones residuales

En este apartado se va a describir el procedimiento de adquisición de las tensiones residuales tras haber realizado la preparación del equipo de medida.

Como se ha explicado en el apartado anterior, para realizar cualquier medición en una superficie, simplemente se debe colocar el punto que se quiere medir bajo la punta del colimador y fijar los parámetros necesarios para iniciar la medida. Sin embargo, si el objetivo es obtener datos de las tensiones residuales en profundidad se deberá hacer uso del electropulido. Este tendrá como fin eliminar material de un área circular dentro de una boquilla que se encuentra en la pistola de la electropulidora (*Ilustración 43*, dcha.).

Para iniciar con el proceso de electropulido se debe seleccionar el método que se va a utilizar, el cual puede ser uno de los de la base de datos que proporciona el mismo equipo o uno creado por el propio usuario. Como se puede ver en la *Ilustración 43*, el método será definido por el tipo electrolito, el voltaje, el flujo y el tiempo, el cual está proporcionalmente relacionado con la cantidad de material eliminado. En el caso del titanio se ha establecido que aproximadamente si se quiere profundizar en 0,03 mm se deberá electropulir durante 30 segundos (*Anexo I*). Asimismo, seleccionado o creado el método, se colocará el ánodo magnético encima de la pieza y la boquilla de la pistola encima del punto que se desea electropulir. Pulsando el botón de la pistola, ésta se pondrá en marcha y finalizará una vez transcurrido el tiempo definido en el método.

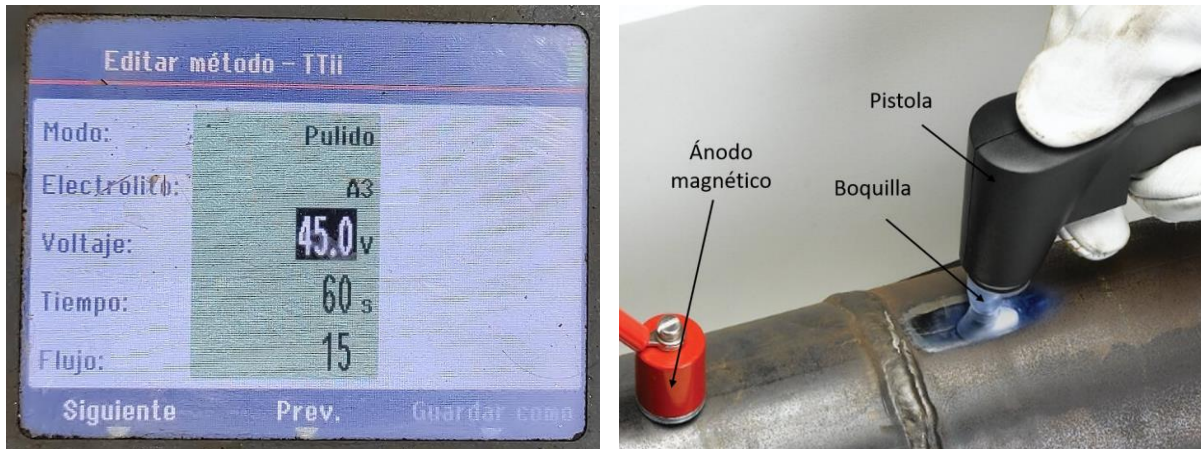


Ilustración 43. Parámetros del método de electropulido (izq.) y componentes de la electropulidora (drcha.).

Una vez realizada la eliminación del material a la profundidad deseada, se limpiará la superficie electropulida y se colocará de nuevo la punta del goniómetro en el centro o en la zona más lisa de la huella formada por la eliminación del material en caso de que esta no fuera uniforme. A continuación, se podrá en marcha el difractor para obtener la tensión en la profundidad obtenida por el electropulido. Realizando este proceso de manera iterativa se obtendrá el perfil de tensiones deseado, es decir las tensiones residuales en función de la profundidad de penetración desde la superficie mecanizada.



Ilustración 44. Huella generada tras un electropulido a 0,12 mm de profundidad.

Por último, observando las huellas generadas por un electropulido consecutivo, se puede ver que al repetir el proceso de electropulido en el mismo punto, con el objetivo de eliminar material en profundidad, se encuentran colores azulados y marrones en el contorno de la huella, lo que significa que el fuerte ataque químico quemó la superficie. Por ello, para obtener unos buenos resultados es importante centrar la punta del goniómetro en el centro de la huella o en la zona más lisa de la huella.

7.3.2.3. Tratamiento de los datos

Tras llevar a cabo el proceso de difracción, resulta necesario realizar un tratamiento de los datos resultantes para la obtención de los valores de tensiones residuales definitivos. Asimismo, haciendo uso del software XTronic se podrán analizar de manera individual los datos obtenidos y hacer ciertas correcciones, siempre que sean necesarias. En los siguientes puntos se muestran unos de los factores a tener en cuenta para realizar el análisis de los datos obtenidos.

- **Ajuste del pico de intensidad:** la precisión del posicionamiento o desplazamiento del pico de intensidad teórico, el cual se utiliza para realizar los cálculos de tensión, es uno de los puntos más importantes en la medición de la tensión residual por difracción de rayos X. Esto se debe a que el valor de tensión residual calculado dependerá del buen ajuste que se haga de este pico de intensidad teórico con el pico real obtenido de las mediciones.

Para realizar este ajuste entre pico de intensidad teórico y real, existen un gran número de métodos, los cuales se dividen en dos grupos; métodos locales, los cuales solo utilizan una parte de la distribución de la intensidad; y métodos globales, los cuales utilizan toda la distribución de la intensidad. Centrando la atención en métodos globales, son los siguientes los que destacan por su habitual uso: correlación cruzada (*Cross correlation*) o ajuste del pico (*Peak fit*). La diferencia más significativa entre estos dos métodos es que el primero se realiza de forma automática, mientras que el segundo método se realiza de manera manual.

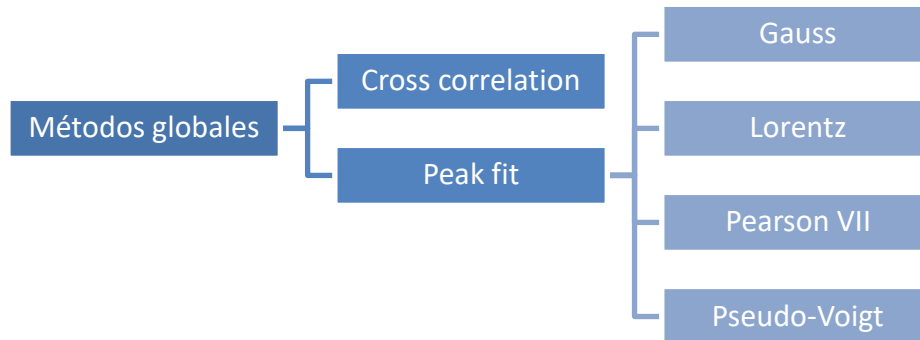


Ilustración 45. Esquema de los tipos de métodos globales más habituales.

En cuanto al método *Peak Fit*, éste se basa en la suposición de que existe una función que describe la distribución del pico de intensidad. Por ello, el software incluye algunas de las funciones para ajustar el pico de intensidad teórico con el real, entre otras, se encuentra las funciones de Gauss, Lorentz, Pearson VII y Pseudo-Voigt. Basándose en la forma de la distribución de la intensidad, se puede suponer que la forma de campana de la función de ajuste gaussiana es similar. Para los resultados obtenidos en este trabajo, la función Pearson VII es la función que describe con mayor precisión los picos de intensidad obtenidos por difracción de rayos-X.

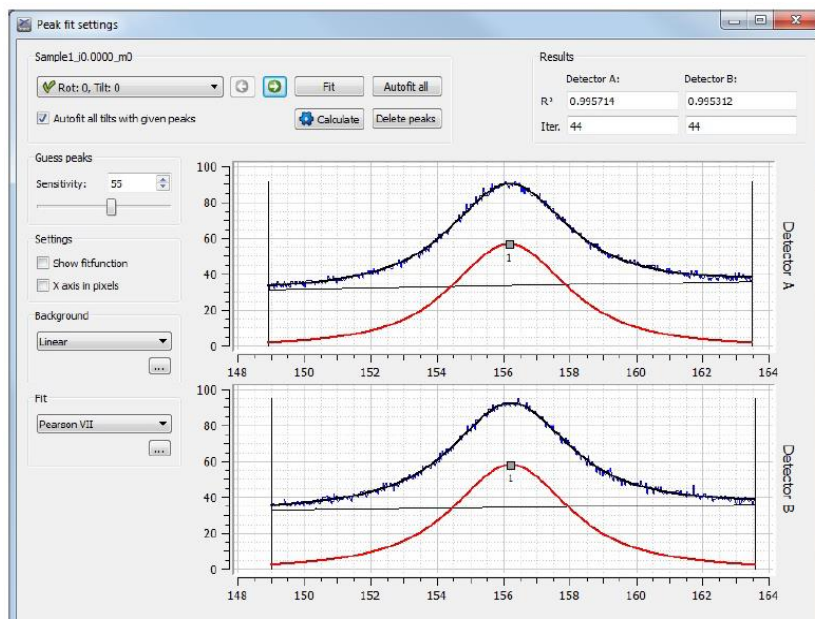


Ilustración 46. Ajustes del método de ajuste de pico (*Peak fit*).

- Desactivación de alguna inclinación o rotación: a la hora asignar los parámetros de medición de las tensiones residuales, se definen las rotaciones y las inclinaciones a las que se desea girar el goniómetro para realizar el cálculo de las tensiones. De esta manera, en el tratamiento de datos el usuario tendrá la posibilidad de desactivar cualquier ángulo de inclinación o rotación del goniómetro, en el caso de que se observe que el pico de difracción para dicho ángulo no sea aceptable (inclusiones, mala difracción, etc.).

Esta opción también suele ser útil en el caso en el que la ratio de intensidad, es decir, la división entre la intensidad máxima y mínima es superior a 3, ya que una ratio superior a 3 hace referencia a un material con textura y no suele ser lo más adecuado para la obtención de las mediciones de las tensiones residuales.

- Correcciones realizadas automáticamente por el software: en una muestra con un gradiente de macrotensiones pronunciado en las capas superficiales, los valores de pico 2θ para cuando $\psi=0$ y $\psi\neq 0$ representarían promedios ponderados para las capas efectivas que produce el haz difractado. Por lo tanto, la tensión residual observada no solo reflejará el promedio debido al gradiente de tensión, sino que también se verá afectada por la diferencia en el espesor de la capa efectiva en los ángulos ψ . Asimismo, los gradientes de tensión residual medidos se corrigen. El efecto de la corrección solo es significativo cuando el gradiente de tensión es superior a $50 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ [44].

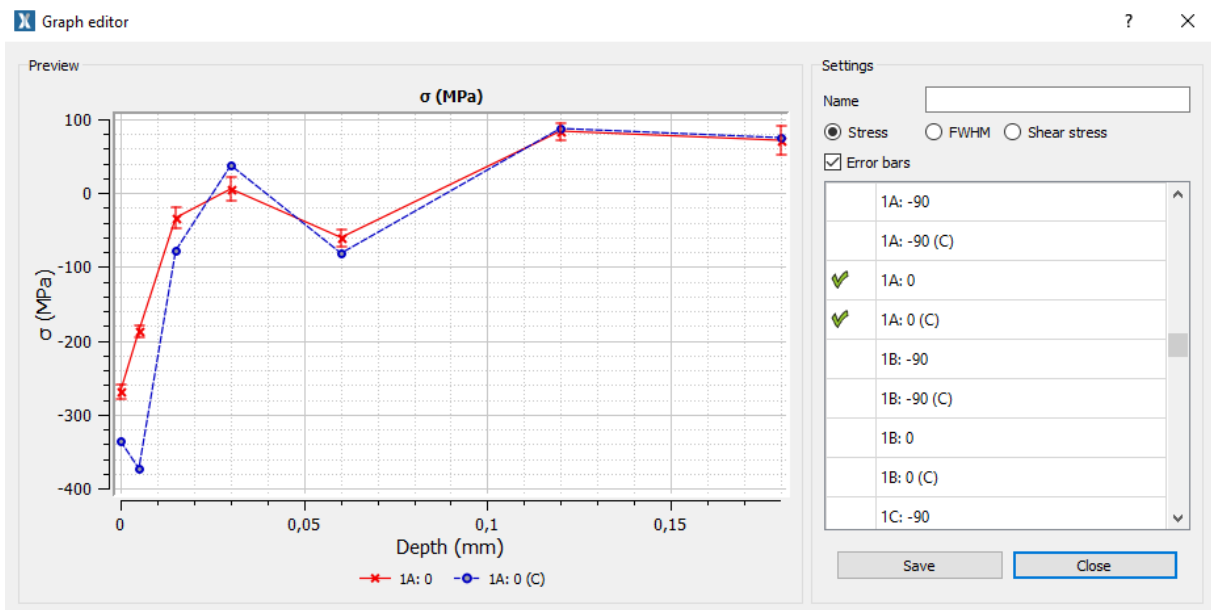


Ilustración 47. Ejemplo de un perfil de tensiones corregida (C) y sin corregir.

Una vez examinados los datos y habiendo realizado las correcciones necesarias, los datos de tensiones estarán listos para poder trabajar con ellos en diferentes aplicaciones. Así, con el objetivo de realizar un modelo empírico para la predicción de las tensiones residuales en piezas de titanio, estos datos serán transferidos al software Matlab para proceder con la programación del modelo.

7.3.3. Comparativa entre dos métodos de medición de tensiones residuales: Hole Drilling y Difracción de Rayos-X

A la hora de evaluar los resultados de tensiones residuales obtenidas con el método de difracción de rayos-X, se ha realizado una comparativa las mediciones realizadas mediante Hole Drilling incremental en un centro de referencia.

7.3.3.1. Obtención de los datos

Para realizar la comparativa de los métodos de medición de las tensiones residuales se mecanizó un tocho de Ti6Al4V con las dimensiones de 270×180×30 mm.

Este mecanizado se realizó mediante la estrategia Zig mencionada, la herramienta HTA I y una velocidad de corte, V_c , de 54 m/min y un avance por diente, f_z , de 0,8 mm. En cuanto a la pasada radial, a_e , y axial, a_p , éstos tienen valor de 37,625 mm y 1 mm respectivamente. Siguiendo esta estrategia se mecanizó el tocho hasta obtener una placa de aproximadamente de 2 mm de espesor. Puede observarse que la probeta mecanizada muestra una deformación significativa tras el mecanizado. Sin embargo, el estudio de la deformación queda fuera del estudio de este proyecto.

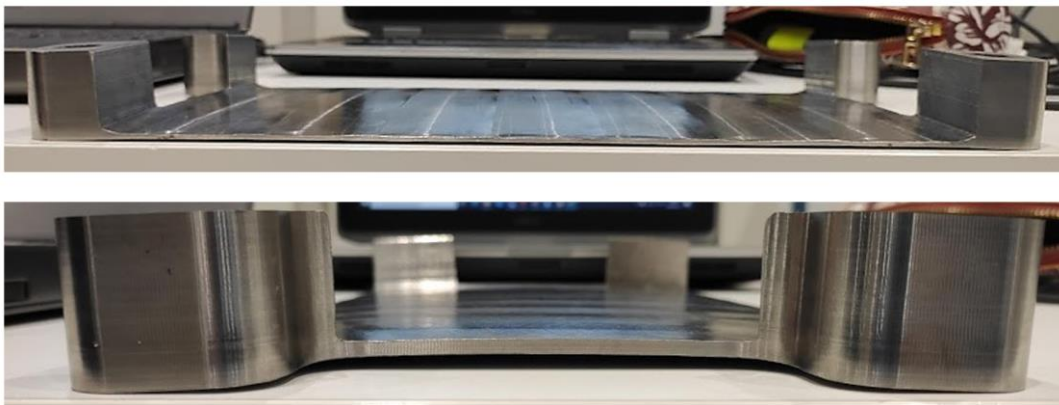


Ilustración 48. Deformaciones generadas tras el mecanizado en el eje longitudinal (arriba) y transversal (abajo).

Mecanizada la superficie, se procedió a hacer las mediciones de las tensiones residuales generadas en la superficie y en las capas bajo la superficie mecanizada. Para ello, se seleccionaron tres puntos de la superficie, véase la Ilustración 49, donde el color naranja hace referencia a las medidas realizada por difracción de rayos-X (XRD) y el amarillo a las de Hole Drilling (HD).

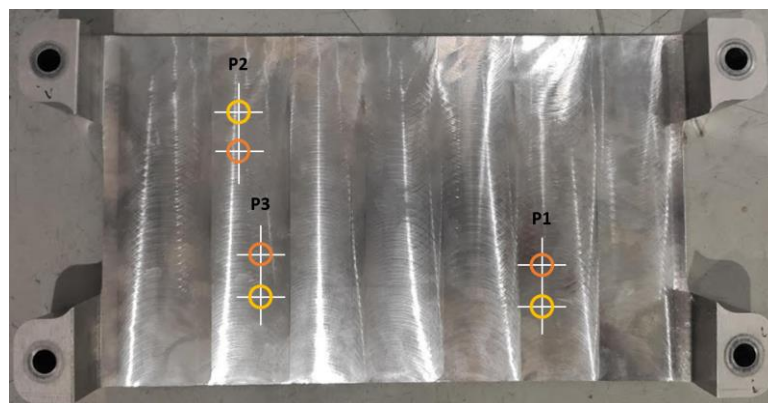


Ilustración 49. Puntos en los que se va a medir la tensión residual por los métodos de XRD y HD.

Se debe mencionar, que la medición de los puntos se realizó de diferente manera, en concreto, los puntos P1 y P2 se midieron con la pieza suelta, mientras que el punto P3 se midió atornillando la placa a la mesa XY, la cual cuenta con movimiento lineal. Asimismo, también se hizo uso de la mesa XY con el objetivo de cambiar el punto de medida sin que el usuario tuviera que manipular la pieza, reduciendo de esta forma las fuentes de error.

Difracción de Rayos-X (XRD)

Las mediciones realizadas mediante el difractómetro de rayos-X se llevaron a cabo en las instalaciones de IDEKO, donde cuentan con un difractómetro de la marca Stresstech.

Para comenzar con la medición de los puntos seleccionados, definió cómo se van a realizar la medición, es decir, si se van a hacer las mediciones con la pieza atada, forzando a la placa a coger una forma plana, o suelta, donde existe la posibilidad de que la fuerza que ejerce el goniómetro al coger la referencia o la del usuario al electropulir muevan la pieza, impidiendo realizar las medidas de las tensiones residuales en profundidad en el mismo punto que los anteriores.

Una vez realizada la alineación y calibración del goniómetro, se decidieron los parámetros de entrada del equipo de XRD para comenzar con la medición de las tensiones residuales, véase la *Tabla 12*. Definidos los valores se procedió a obtener las medidas de las tensiones residuales, las cuales se obtuvieron en profundidad, penetrando hasta una profundidad de 0,39 mm desde la superficie mecanizada. Para ello el proceso de adquisición del perfil se realizó mediante una sucesión de acciones repetitivas de medición de tensión y electropulido.

Tabla 12. Parámetros para obtener las medidas de XRD para la comparativa entre HD y XRD.

Parámetros de medición del método de XRD	
Material / Tipo de tubo	Ti (110) 137,5° / Ti
Propiedades del material	Módulo de Young = 120,2 GPa
	Coefficiente de Poisson = 0,36
Tiempo de exposición [s]	20
Diametro del colimador [mm]	4
Ángulos de rotación	0°, 45° y 90°
Número de ángulos de inclinación	6/6
Rango de los ángulos de inclinación [°]	-39/39
Oscilación de la inclinación [°]	± 6
Ángulo de inclinación [°]	0 / ±16,3 / ± 23,5 / ±29,2 / ±34,3 / ±39 (Auto)
Modo de medida	χ modificado
Tensión de los rayos-X [kV]	30
Intensidad de los rayos-X [mA]	8
Profundidad max. de penetración [mm]	0,39
Incrementos de penetración [μm]	30

En la siguiente imagen se puede observar el montaje que se utilizó para realizar las medidas, así como algunas de las huellas generadas tras el proceso de electropolido para penetrar en profundidad.

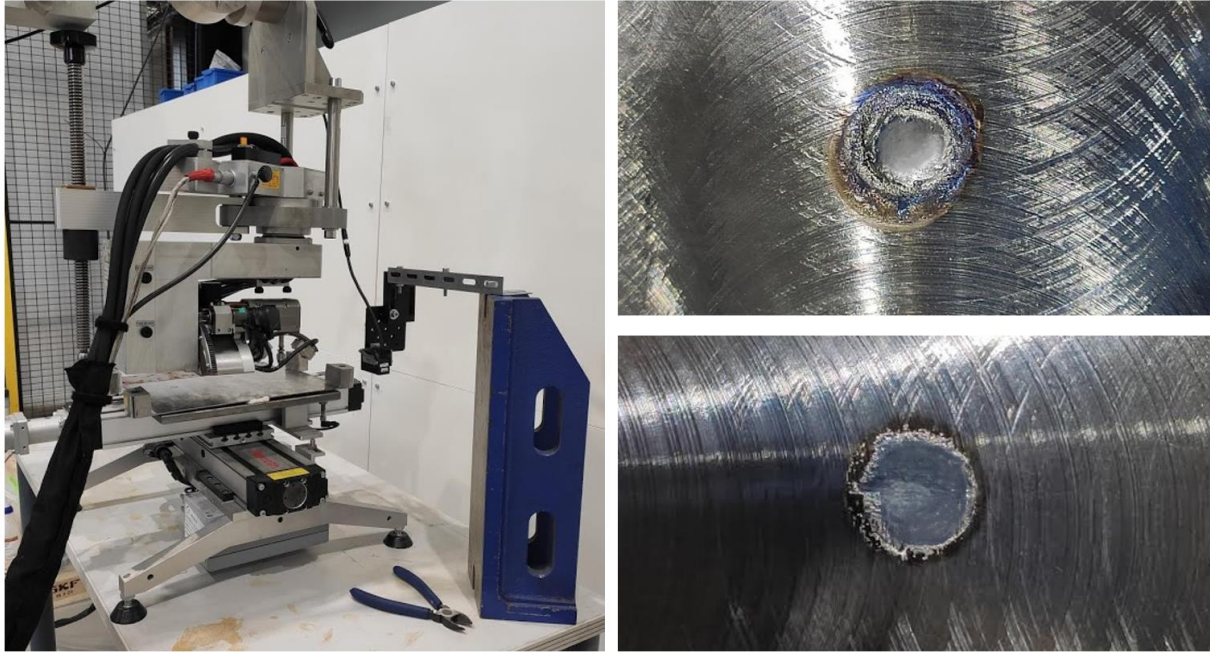


Ilustración 50. Montaje para la medición de las tensiones residuales en el difractor de rayos-X (izq.) y huellas generadas tras el proceso de electropolido (dcha.).

Habiendo seguido el procedimiento descrito, en la *Tabla 13* se pueden visualizar las medidas de las tensiones residuales en las diferentes rotaciones del goniómetro. Con la obtención de estas tres rotaciones es posible realizar el cálculo de las tensiones principales y cortantes.

Los valores que se muestran son los obtenidos directamente del software, a los que se les ha aplicado el método de *Cross correlation* para el ajuste del pico de intensidad, ya que es el método recomendado por los expertos en el área de las mediciones de tensiones residuales por difracción de rayos-X, y a los que no se les ha realizado tratamiento o modificación alguna.

Tabla 13. Mediciones de tensión residual proporcionadas por el equipo de difracción de rayos-X.

Profundidad [mm]	Puntos XRD								
	P1			P2			P3		
	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]
0,000	-76,51	263,47	433,87	-30,53	216,38	363,79	94,06	286,16	263,28
0,030	-191,46	-42,61	-72,89	-324,43	-124,67	-47,79	-376,48	-145,40	-127,78
0,060	-303,30	-152,63	-213,80	-292,09	-185,50	-72,18	-355,99	-100,53	-141,36
0,090	-419,42	-231,28	-316,20	-254,66	-198,66	-116,97	-321,86	-144,29	-271,90
0,120	-434,72	-298,31	-314,32	-237,96	-243,45	-253,56	-279,26	-214,31	-219,81

0,150	-315,92	-273,16	-285,22	-307,36	-296,20	-249,68	-340,15	-274,50	-156,04
0,180	-216,89	-277,17	-363,20	-397,04	-354,33	-301,41	-418,70	-308,84	-88,78
0,210	-142,18	-238,42	-286,10	-321,59	-349,26	-311,35	-402,61	-264,38	-45,48
0,240	-38,14	-139,84	-149,92	-	-	-	-337,98	-200,26	-98,62
0,270	-41,33	-34,58	-97,04	-	-	-	-287,69	-192,51	-76,68
0,300	39,86	-42,53	-77,58	-78,70	-137,42	-38,58	-	-	-
0,330	8,81	-17,23	-40,48	24,18	-9,71	-98,39	-106,85	-61,65	-31,21
0,360	-9,09	45,19	62,13	-	-	-	-	-	-
0,390	24,08	86,82	19,81	-	-	-	43,88	13,05	-49,79

Se debe mencionar que no se han realizado las mediciones a todas las profundidades debido a dos principales razones. En cuanto a la primera, está relacionada con el tiempo de obtención de datos, ya que se trata de una práctica muy tediosa que requiere mucho tiempo, además de un usuario cualificado. Es decir, a la hora de llevar a cabo todas las medidas de tensión residual se ha requerido la colaboración de un usuario titulado para hacer uso del difractor de rayos-X. Por otro lado, a medida que se iban haciendo las medidas en profundidad se iba analizando la evolución de los perfiles para observar si eran necesarios la obtención de las medidas en todas las profundidades realizadas en el punto P1.

Hole Drilling (HD)

Una vez realizadas las mediciones por XRD, se subcontrató un servicio de medición de tensiones residuales por el método de HD Incremental. En concreto, estas mediciones fueron realizadas por la empresa Stresscraft. Esta compañía fue seleccionada para realizar las medidas de las tensiones residuales ya que se trata de un centro de referencia con amplia experiencia en la medición de tensiones residuales mediante el método de *Hole Drilling*.

De esta manera Stresscraft realizó un informe donde se mostró el procedimiento que se siguió y las medidas que obtuvieron de ellas. Por lo que, se anexa el informe redactado por Stresscraft (*Anexo II*).

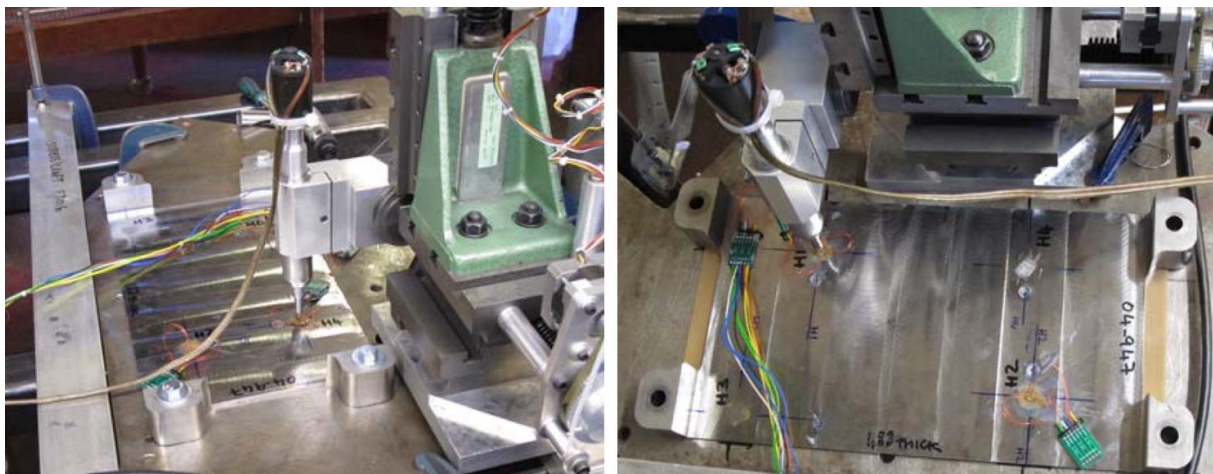


Ilustración 51. Medición de tensiones residuales por HD: P3 (izq.) y P1 y P2 (drcha.).

A modo de resumen y para realizar la comparativa de los métodos, en las siguientes líneas se muestran tanto los parámetros que se definieron para llevar a cabo la medición como los resultados que posteriormente se comparan y analizan.

Tabla 14. Parámetros para obtener las medidas de HD para la comparativa entre HD y XRD.

Parámetros de medición del método de HD	
Material	Ti6Al4V
Propiedades del material	Módulo de Young = 115 GPa
	Coefficiente de Poisson = 0,32
Galgas Extensométricas	Vishay Precision Group EA-06-031RE-120
Tipo de galga (ASTM E837)	Tipo A
Diametro de la perforación [mm]	1
Profundidad max. de penetración [mm]	0,512
Incrementos de penetración [μm]	2

Tabla 15. Mediciones de tensión residual proporcionadas por Stresscraft.

Profundidad [mm]	Puntos HD								
	P1			P2			P3		
	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	τ_{13} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	τ_{13} [MPa]	σ_1 [MPa]	σ_3 [MPa]	τ_{13} [MPa]
0,008	26,72	-56,11	108,47	258,31	65,02	124,25	75,74	-69,49	18,67
0,024	28,93	-107,25	97,40	140,13	-52,72	16,92	82,59	-60,09	22,87
0,040	50,26	-147,98	99,00	49,58	-108,84	-3,69	59,30	-57,28	14,63
0,056	69,67	-175,89	105,98	16,72	-141,00	20,78	5,98	-89,50	-20,91
0,080	61,71	-228,12	98,34	-3,85	-209,26	27,46	-49,15	-143,44	-62,28
0,112	-8,16	-281,85	70,91	-72,32	-256,45	15,91	-86,70	-177,62	-66,73
0,144	-82,91	-340,39	48,52	-151,03	-302,03	-7,22	-118,26	-217,93	-59,53
0,176	-118,46	-345,03	18,96	-201,26	-279,28	-44,18	-135,42	-228,10	-32,31
0,224	-102,82	-296,58	4,15	-173,29	-178,94	-62,44	-113,45	-190,47	7,56
0,256	-71,94	-221,26	7,95	-128,41	-102,90	-49,39	-80,68	-134,11	14,19
0,320	-41,07	-145,94	11,75	-83,52	-26,86	-36,34	-47,91	-77,76	20,82
0,384	-2,57	-39,51	10,87	-55,00	-1,22	-23,28	7,21	1,23	14,12
0,448	16,68	13,71	10,43	-40,74	11,60	-16,75	34,77	40,72	10,77
0,512	35,93	66,92	9,99	-26,48	24,42	-10,22	62,32	80,21	7,42

7.3.3.2. Análisis de los resultados

En primer lugar, se ajustaron los datos para que ambos métodos fueran comparables. Es decir, mediante el método de XRD se han obtenido las tensiones en las rotaciones 0° , 45° y 90° , donde el ángulo 0° estaba orientado en sentido de la velocidad de corte de la herramienta, mientras que el ángulo 90° hacía referencia a la dirección perpendicular. Por otro lado, en el método HD, será σ_3 la que este en la misma dirección que la velocidad de corte de la herramienta. Además, los datos proporcionados por la empresa subcontratada solo cuentan con dos de las direcciones, por lo que se deberá calcular la restante, la equivalente a la tensión σ_{45° .

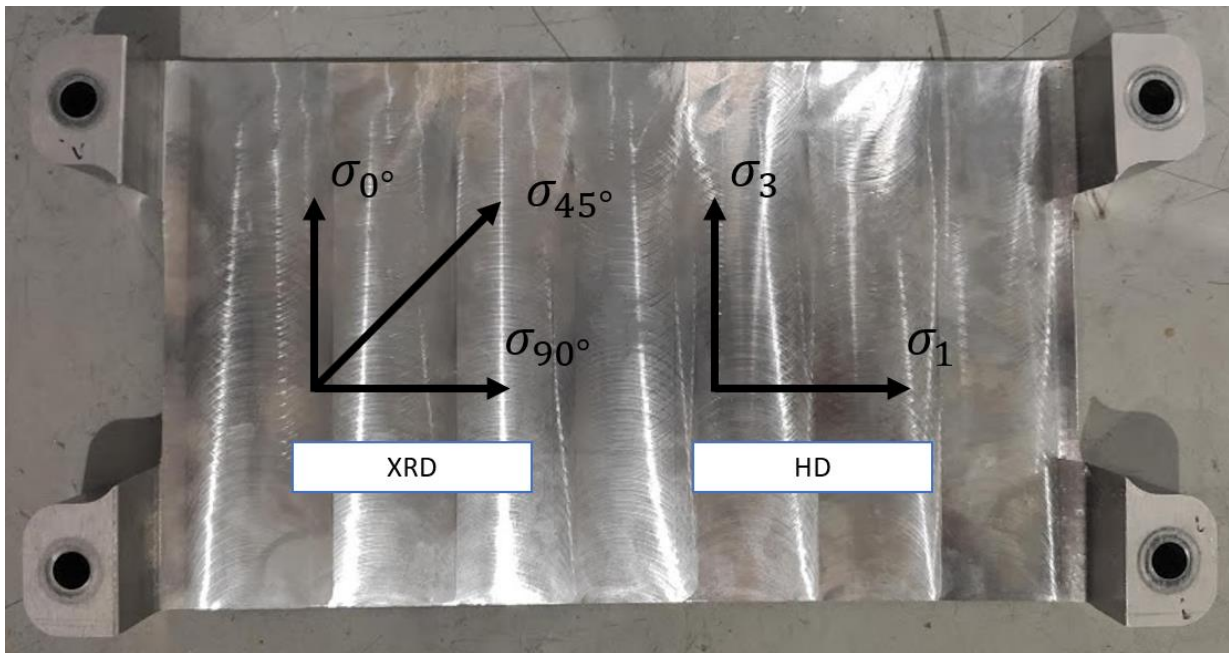


Ilustración 52. Sistemas de coordenadas de las tensiones principales de los métodos de XRD y HD.

Con el objetivo de igualar dichos sistemas de coordenadas se adaptará el sistema de coordenadas utilizado en el método de HD al utilizado en XRD siguiendo las ecuaciones que se muestran a continuación, donde la ecuación (46) se obtiene a partir de círculo de Mohr.

$$\sigma_{0^\circ}(HD) = \sigma_3 \quad (44)$$

$$\sigma_{90^\circ}(HD) = \sigma_1 \quad (45)$$

$$\sigma_{45^\circ}(HD) = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \tau_{13} \quad (46)$$

De esta manera, actualizando los valores de la Tabla 16 con las ecuaciones mencionadas, se obtienen los siguientes valores de las tensiones residuales obtenidas mediante el método de HD. Por lo que, el siguiente paso será realizar la comparación de los métodos.

Tabla 16. Adaptación de las medidas de tensión residual obtenidas mediante el método de HD.

Depth [mm]	Puntos HD								
	P1			P2			P3		
	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]	σ_{0° [MPa]	σ_{45° [MPa]	σ_{90° [MPa]
0,008	-56,11	-123,17	26,72	65,02	37,41	258,31	-69,49	-15,54	75,74
0,024	-107,25	-136,56	28,93	-52,72	26,78	140,13	-60,09	-11,62	82,59
0,040	-147,98	-147,86	50,26	-108,84	-25,94	49,58	-57,28	-13,62	59,30
0,056	-175,89	-159,10	69,67	-141,00	-82,92	16,72	-89,50	-20,86	5,98
0,080	-228,12	-181,54	61,71	-209,26	-134,01	-3,85	-143,44	-34,02	-49,15
0,112	-281,85	-215,91	-8,16	-256,45	-180,30	-72,32	-177,62	-65,43	-86,70
0,144	-340,39	-260,17	-82,91	-302,03	-219,31	-151,03	-217,93	-108,56	-118,26
0,176	-345,03	-250,70	-118,46	-279,28	-196,09	-201,26	-228,10	-149,45	-135,42
0,224	-296,58	-203,85	-102,82	-178,94	-113,68	-173,29	-190,47	-159,52	-113,45
0,256	-221,26	-154,55	-71,94	-102,90	-66,26	-128,41	-134,11	-121,58	-80,68
0,320	-145,94	-105,26	-41,07	-26,86	-18,85	-83,52	-77,76	-83,65	-47,91
0,384	-39,51	-31,91	-2,57	-1,22	-4,83	-55,00	1,23	-9,90	7,21
0,448	13,71	4,76	16,68	11,60	2,18	-40,74	40,72	26,97	34,77
0,512	66,92	41,44	35,93	24,42	9,19	-26,48	80,21	63,84	62,32

Obtenidos los datos de ambos métodos, para facilitar la comparación de los perfiles de las tensiones residuales obtenidos para cada uno de los puntos, se muestran gráficamente los perfiles de cada uno de los puntos para los dos métodos de medición de tensiones residuales.

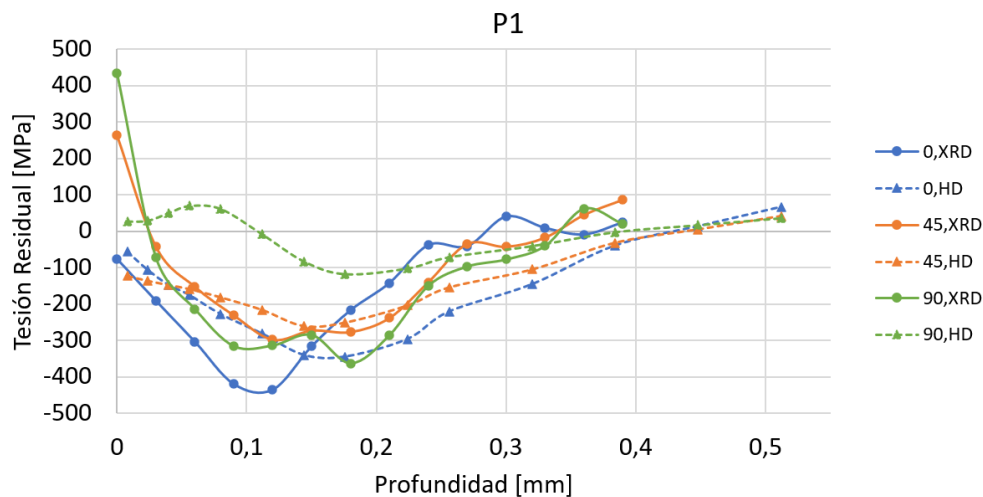


Ilustración 53. Perfil de tensión residual del P1 (XRD) y P1 (HD).

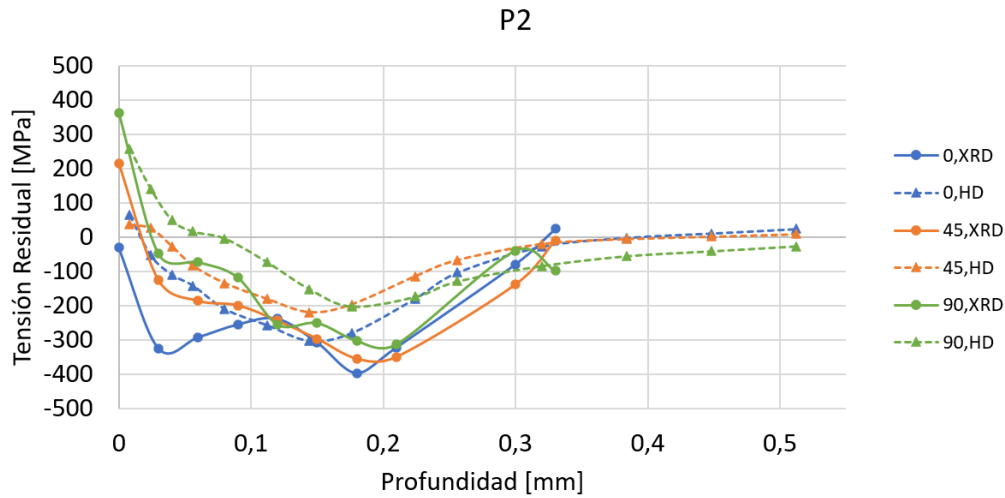


Ilustración 54. Perfil de tensión residual del P2 (XRD) y P2 (HD).

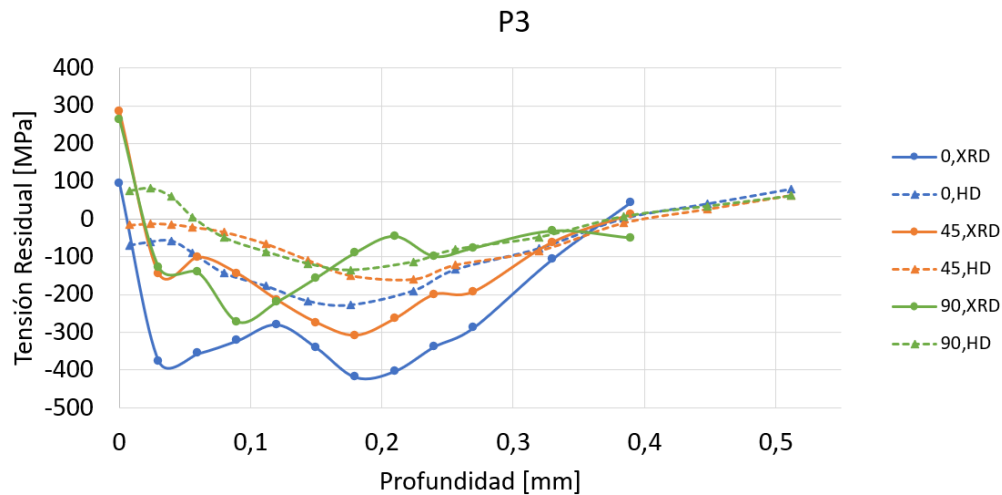


Ilustración 55. Perfil de tensión residual del P3 (XRD) y P3 (HD).

Analizando estas curvas, puede observarse que son similares en cuanto a su evolución o tendencia, es decir, ambos métodos obtienen una curva compresiva bastante amplia en profundidad y poco pronunciada la cual se estabiliza aproximadamente en una profundidad similar. Sin embargo, las tensiones residuales obtenidas en superficie o en las capas próximas a la superficie mecanizada difieren para ambos métodos: mientras que para el método de XRD aparecen picos de tensiones tractivas, para el método HD no aparece dicho pico pronunciado de tensiones tractivas. Además, por lo general el método de medición XRD obtiene datos más compresivos que el método de HD, pudiendo llegar a una diferencia de casi 200 MPa, como es el caso del P3 en el ángulo de 0°. Por otro lado, se puede observar claramente que en los puntos P1 y P2 las curvas están más superpuestas que en el punto P3. Este hecho puede estar relacionado con la diferencia de la fuerza de amarre que se generó para atornillar la placa a una superficie plana a la hora de hacer las medidas mediante el método XRD y HD.

De los perfiles graficados se obtiene que las distribuciones de las tensiones son bastante complejas y que se ven afectadas en cierta manera por la posición de los puntos de medición, la herramienta utilizada y la dirección de corte. Por esta razón, se han graficado el promedio de las tensiones residuales de todos los puntos obtenidas por los dos métodos.

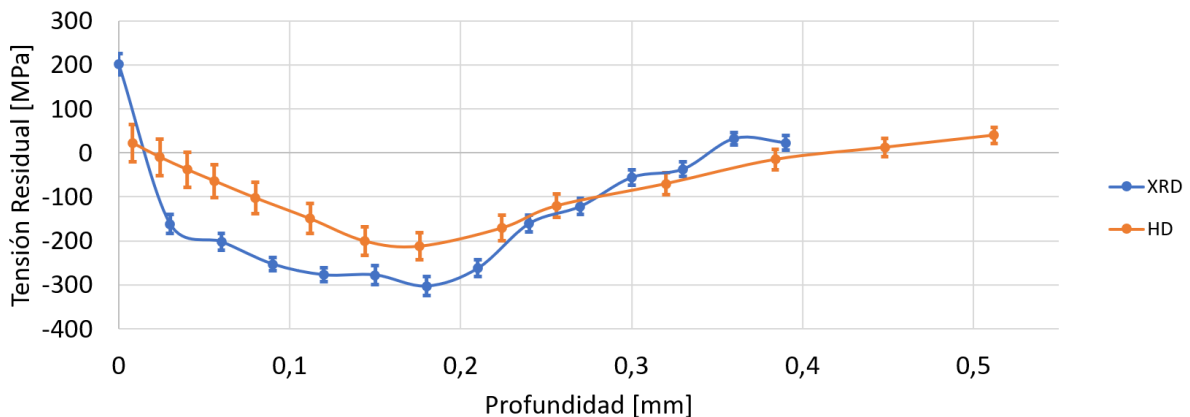


Ilustración 56. Curvas obtenidas para comparación de los métodos de XRD y HD.

Una comparación de este tipo reduce los efectos del ruido e incertidumbres, permitiendo reconocer las características de las distribuciones de tensiones, las diferencias esenciales entre los conjuntos de datos y las diferencias generales a distintas profundidades.

La curva promedio del método de HD muestra una reducción relativamente lineal de la tensión desde 22 MPa a una profundidad 0,008 mm hasta un mínimo a 0,176 mm. A partir de ahí, la tensión residual medida mediante el método de HD aumenta con la profundidad hasta una transición de estado tensional compresivo a tractivo alrededor de los 0,4 mm de profundidad.

La distribución promediada del método XRD es más compleja que la de HD. Mientras que las tensiones en el rango de profundidad de 0,03 mm a 0,18 mm son generalmente lineales, el máximo de la tensión de compresión es de aproximadamente -300 MPa, es decir, casi 100 MPa de diferencia con el método HD. En el rango de profundidad de 0,05 mm a 0,18 mm, la diferencia entre los valores de HD y XRD se mantiene bastante constante. La transición compresión/tracción es algo más superficial que los datos de HD, en torno a 0,35 mm.

Centrando la atención en los diferentes factores que influyen en la diferencia de estas medidas queda remarcar los siguientes efectos:

- La variación entre las medidas es remarcable, lo cual podría estar relacionado con la falta de uniformidad de las probetas. A pesar de que las tensiones residuales generadas durante el fresado no tienen por qué ser absolutamente homogéneas, también se observa que la superficie tiene marcas del corte de la herramienta bastante notables en la superficie. Además, como se ha mostrado anteriormente, esta placa ha sufrido ciertas deformaciones no uniformes, por lo que, a pesar de haber realizado las medidas de los dos métodos en puntos cercanos, esa distancia también es fuente de variación en las medidas.
- Las propiedades del material, módulo de Young (E) y coeficiente de Poisson (ν), utilizadas para realizar las medidas mediante los dos métodos de medición difieren, como se puede ver en la Tabla 12 y Tabla 14. En concreto, los valores utilizados en HD varían en un 4,3% en cuanto a E y un 11,1% en cuanto a ν , respecto a los valores de XRD. Por lo que este efecto también genera variabilidad en las medidas [24]. Si se recalculan los valores del P1 (rotación=0°) de XRD con las propiedades utilizadas en HD se obtiene que los perfiles obtenidos mediante diferentes parámetros difieren relativamente poco, es decir que varían menos que la incertidumbre de la propia medida. Véase el *Anexo III*.

- Los diferentes métodos son sensibles a las diferentes características de las muestras, por lo que, unas de las fuentes de error podrían ser la textura o el tamaño de grano, los cuales afectan de diferente manera a las mediciones de XRD y HD. Por ejemplo, un tamaño muy grande de grano puede ser muy limitante para las mediciones de XRD, mientras que tiene poco efecto en el método de HD.
- El material Ti6Al4V es un material bifásico y en las mediciones que se realizan mediante XRD solo se mide una fase a la vez con un determinado conjunto de constantes elásticas. Por otro lado, en el método de HD se utilizan los módulos de volumen. Sin embargo, en el caso de que una de las fracciones de volumen de las fases sea dominante o si las constantes elásticas tienen el mismo valor, este efecto no sería notable.
- En el caso del método de XRD, si las medidas se están realizando con un colimador de gran tamaño se requeriría una mayor superficie plana en el electropulido. La rugosidad provocada por el electropulido hace que el contacto del colimador sea desigual y puede causar un error geométrico en los resultados. No obstante, en la mayoría de los casos esto no se aprecia en los resultados a menos que sea muy grande. En resumen, el efecto del electropulido en cuanto a la superficie que deja y a la relajación de tensión que genera puede ser una gran fuente de error, siendo más crítico a mayores profundidades.
- Por último, existen otras dos razones, que provocan ciertas diferencias entre los métodos. La primera, en el caso del método de HD a la hora de realizar el agujero se induce un nuevo estado de tensión, lo que puede dar lugar a un resultado inexacto de la tensión residual. En segundo lugar, el haz de rayos-X tienen una penetración de 100 μm cerca de la superficie del material, mientras que la profundidad media de datos de tensión de HD es de 0,5 mm [46].

En general, el método de HD es un método menos fiable en las medidas cerca de la superficie y en las medidas a grandes profundidades en comparación con el tamaño de la perforación. Sin embargo, estos resultados sí debieran poder ser comparables a mitad de la sección, donde los resultados deberían coincidir en cierta proporción.

En consecuencia, por todo lo mencionado en los párrafos anteriores, a pesar de que en teoría todos los métodos de medición de tensiones residuales deberían dar los mismos resultados, en la práctica no es así. Por lo tanto, los métodos de XRD y HD no deben compararse directamente desde el punto de vista cuantitativo debido a los factores intrínsecos que intervienen en la medición de la tensión residual, pero, por otro lado, sí que presentan respuestas cualitativamente comparables.

Finalmente, de cara a obtener los datos de las tensiones residuales para el desarrollo del modelo matemático, se ha seleccionado el método de la difracción de rayos-X principalmente por dos razones. En primer lugar, dado que la herramienta seleccionada para la construcción del modelo no sufre un desgaste notable en las condiciones mencionadas en el *apartado 7.2.2.1*, se puede suponer que la profundidad de la superficie dañada también será inferior que la observada en este estudio. Por esto, dado que las tensiones residuales generadas van a ser más superficiales, será más beneficioso el uso de este método debido a su fiabilidad en la obtención de las tensiones superficiales. En segundo lugar, el centro donde se desarrolla el trabajo, como se ha mencionado anteriormente no cuenta con un equipo de HD, por lo que sería un gasto excesivo, ya que para la elaboración del modelo se necesitan medir un gran número de puntos.

7.3.4. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad del difractómetro de rayos-X

En las siguientes líneas se muestra el estudio de repetibilidad y reproducibilidad que se ha realizado a partir del método de Promedios y Rangos. Este método permite determinar la variabilidad del sistema de medición en dos componentes de forma independiente, es decir, la repetibilidad y reproducibilidad.

Antes de comenzar con el análisis de los datos obtenidos se definirán los conceptos necesarios para la comprensión de dicho análisis. Por ello, en los siguientes puntos se expondrán las definiciones de repetibilidad y reproducibilidad [47]:

- **Repetibilidad de las medidas:** la repetibilidad es la variación de las medidas de una misma magnitud o característica, obtenidas con un mismo sistema de medición por un único usuario, en una misma pieza y efectuadas en las mismas condiciones de medición. Además, estas medidas sucesivas deberán realizarse en el mismo lugar y en un corto plazo. Puede expresarse de forma cuantitativa, en función de las características de dispersión de los resultados.
- **Reproducibilidad de las medidas:** la reproducibilidad es la variación en el promedio de las medidas de una misma magnitud o característica, en una misma pieza y usando el mismo sistema de medición, pero efectuada bajo condiciones de medición diferentes. Las condiciones que pueden modificarse son el método de medición, el evaluador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, el lugar, las condiciones de uso o, incluso, el tiempo.

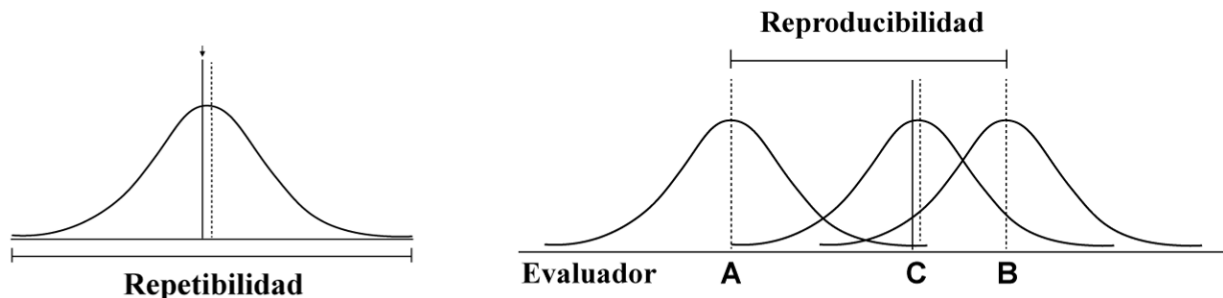


Ilustración 57. Representación gráfica del concepto de repetibilidad (izq.) y de reproducibilidad (drcha.) [48].

7.3.4.1. Obtención de los datos

Para realizar este estudio se han medido las tensiones residuales de una placa de Ti6Al4V en superficie. Estas tensiones han sido inducidas por un proceso de fresado, el cual ha sido descrito en el apartado 7.2.2.1 (Ilustración 34).

En cuanto a los parámetros de corte, se han seleccionado los parámetros nominales o recomendados para dicha herramienta, es decir, una velocidad de corte, V_c , de 70 m/min y un avance por diente, f_z , de 0,03 mm. En cuanto a la pasada radial, a_e , y axial, a_p , estos tienen valor de 11,67 mm y 0,5 mm respectivamente.

El ensayo se ha diseñado con el objetivo de medir tres puntos en la superficie con el método de medición seleccionado, para la obtención de los datos que se han utilizado en la construcción del modelo, es decir, con el difractómetro de rayos-X. Además, con el objetivo de obtener la variabilidad

que tiene el cambio de evaluador, estos tres puntos han sido medidos por dos operadores. Ambos operadores han intentado realizar la medida de los tres puntos en la misma línea, la cual hace referencia aproximadamente con el punto de máximo espesor de viruta.

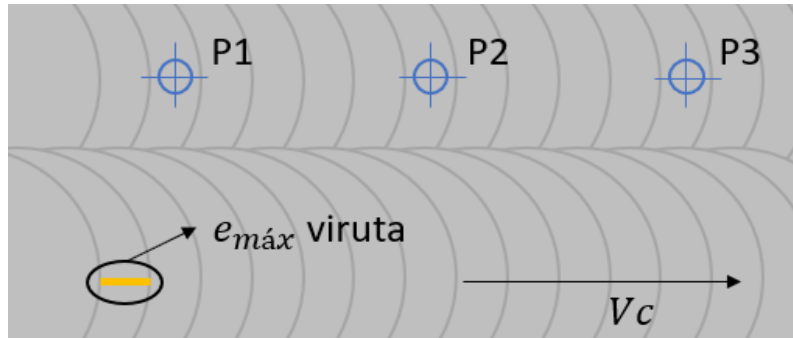


Ilustración 58. Imagen esquemática de los puntos medidos para el estudio de R&R.

Los parámetros empleados durante las mediciones de difracción de rayos-X pueden observarse en la Tabla 17.

Tabla 17. Parámetros para obtener las medidas de XRD para el estudio de R&R.

Parámetros de medición de XRD	
Material / Tipo de tubo	Ti (110) 137,5° / Ti
Propiedades del material	Módulo de Young = 120,2 GPa
	Coefficiente de Poisson = 0,36
Tiempo de exposición [s]	20
Diametro del colimador [mm]	4
Ángulos de rotación	0°
Número de ángulos de inclinación	5/5
Ángulos de inclinación [°]	-39/39
Oscilación de la inclinación [°]	± 6
Ángulo de inclinación [°]	0 / ±18,3 / ± 26,4 / ±33,0 / ±39 (Auto)
Modo de medida	χ modificado
Tensión de los rayos-X [kV]	30
Intensidad de los rayos-X [mA]	8

7.3.4.2. Análisis de los resultados

En la siguiente tabla se muestran las mediciones obtenidas para las tensiones residuales en superficie, en la dirección de la velocidad corte de la herramienta:

Tabla 18. Tensiones residuales superficiales medidas en 3 puntos diferentes por dos operadores.

Operadores	Puntos		
	P1 [MPa]	P2 [MPa]	P3 [MPa]
A	-325,7	-427,4	-417,4
	-311,4	-430,0	-419,1
	-304,4	-423,4	-420,4
	-300,5	-423,5	-417,4
B	-367,0	-497,1	-465,4
	-358,8	-498,3	-469,0
	-363,1	-492,0	-472,8
	-361,9	-498,7	-468,7

Para empezar la cuantificación de este estudio, se calculará el rango de cada uno de los operadores:

Tabla 19. Rango de cada operador.

Puntos	Operadores	
	R _A [MPa]	R _B [MPa]
P1	25,2	8,2
P2	6,6	6,7
P3	3,0	7,4

Siguiendo con los cálculos, se procederá a calcular el rango promedio de cada operador de la siguiente manera, donde n es el número de mediciones realizadas por cada operador:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (47)$$

De esta manera, se obtiene que $\bar{R}_A = 11,60 \text{ MPa}$ y $\bar{R}_B = 7,43 \text{ MPa}$. Siguiendo con el análisis, se calcula el rango promedio de todos los rangos con la siguiente ecuación, donde m es el número de operadores.

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad (48)$$

Por lo que, $\bar{\bar{R}} = 9,52 \text{ MPa}$. Obtenido el rango promedio de todos los rangos se podrá calcular el porcentaje de la repetibilidad de las medidas. En la siguiente ecuación K_1 es una constante relacionada con el número de mediciones realizadas por cada operador (Véase la Tabla 20) y ofrece un intervalo de confianza del 99% y T es la tolerancia de la magnitud medida.

$$\%Repetibilidad = \frac{K_1 \cdot \bar{R}}{T} \cdot 100 \quad (49)$$

Tabla 20. Valor de las constantes K_1 y K_2 .

Número de ensayos	2	3	4	5
K_1	4,56	3,05	2,50	2,21
Número de operadores	2	3	4	5
K_2	3,65	2,70	2,30	2,08

Así, siendo $K_1 = 2,5$ y $T \approx 22,01 \text{ MPa}$, se tiene que el **porcentaje de repetibilidad es del 108,13%**.

En cuanto a la evaluación de la reproducibilidad del sistema, el primer paso será calcular la medición promedio de cada operador desde la siguiente ecuación, donde n es número de ensayos por operador ($n=3$), r el número de repeticiones por medida ($r=4$) y, x son las medidas realizadas.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n x_i \quad (50)$$

Por lo que se obtiene que $\bar{x}_A = -385,05 \text{ MPa}$ y $\bar{x}_B = -442,73 \text{ MPa}$. Calculando la diferencia del promedio mayor y menor de los operadores Ecuación (51) se tiene que $\bar{x}_D = 57,68 \text{ MPa}$.

$$\bar{x}_D = x_{i,max} - x_{i,min} \quad (51)$$

Asimismo, siendo $K_2 = 3,65$ y calculando el porcentaje de reproducibilidad de las medidas desde la siguiente ecuación, se obtiene que el **porcentaje de reproducibilidad alcanza el 955,96%**.

$$\%Reproducibilidad = \frac{\sqrt{(K_2 \cdot \bar{x}_D)^2 - \frac{(K_1 \cdot \bar{R})^2}{nr}}}{T} \cdot 100 \quad (52)$$

Finalmente, calculados los porcentajes de repetibilidad y reproducibilidad del sistema, se calcula el porcentaje que relaciona estos dos términos.

$$\%R\&R = \sqrt{(\%Repetibilidad)^2 + (\%Reproducibilidad)^2} \quad (53)$$

De esta manera, se obtiene que **$\%R\&R = 962,06 \%$**

Si se analizan los resultados obtenidos se observa que en general los porcentajes adquiridos son elevados, donde la reproducibilidad del sistema es superior a la repetibilidad, por lo que se puede decir que la repetibilidad del sistema es aceptable y que la mayor fuente de error reside en la reproducibilidad del sistema. De la misma manera, a plena vista queda que el porcentaje que relaciona la repetibilidad y la reproducibilidad del sistema es demasiado alto. Esto se debe a que para realizar el cálculo de la repetibilidad y la reproducibilidad estos coeficientes se relacionan con la tolerancia de la medida, la cual el rango entre medidas lo supera notablemente. Además, el fenómeno que se trata de medir no es igual que si se tratara de medir, por ejemplo, el diámetro de un cilindro o incluso la

resistencia de un cable eléctrico, ya que estas medidas son constantes y mediante este estudio únicamente se vea reflejado la variabilidad del sistema. Por ello, antes de sacar conclusiones equivocadas del sistema de medición para evaluar el resultado de acorde al tipo de medición que se ha realizado, se debe analizar tanto la pieza que se somete a medida como el procedimiento utilizado para realizar las medidas.

Siendo la reproducibilidad del sistema el factor que amplifica el porcentaje de repetibilidad y reproducibilidad del sistema, se deben mencionar fuentes de error que generan este alto porcentaje de reproducibilidad. En primer lugar, si se analiza la superficie medida, al tratarse de una superficie mecanizada cuenta con marcas del proceso de fresado, por lo que un mínimo movimiento en la posición del punto que se quiere medir implicaría cierta variabilidad en el valor de la tensión residual. Otra fuente de variabilidad viene dada por las tensiones residuales volumétricas, ya que, al no realizarse medición alguna de las tensiones residuales anteriores al mecanizado, no se puede saber la magnitud de las tensiones residuales provocadas por el propio proceso de fabricación.

Mencionadas algunas de las fuentes de error o fuentes que provocan variabilidad en el sistema se reparará nuevamente en valores de las mediciones realizadas con su rango de variabilidad expresado gráficamente en la siguiente imagen.

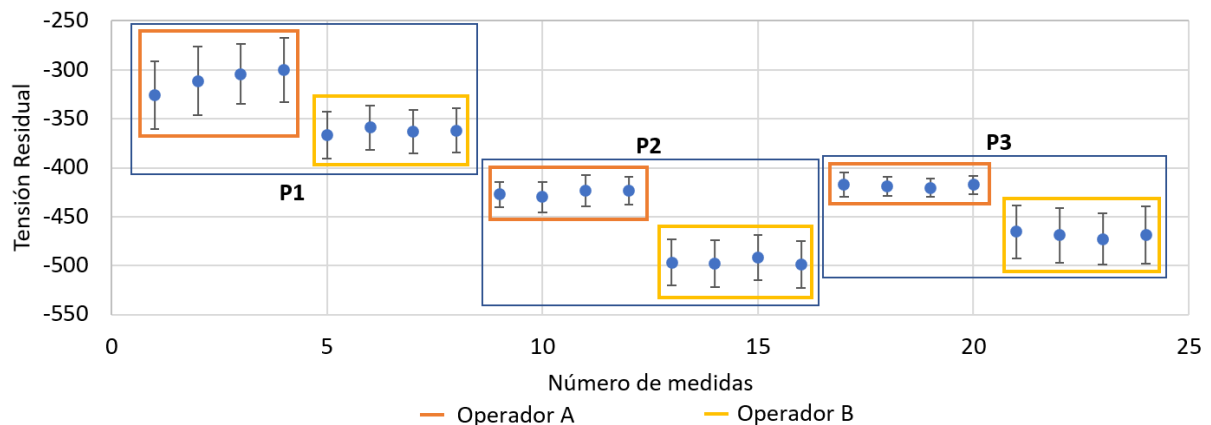


Ilustración 59. Variabilidad de las medidas realizadas en diferentes puntos y por diferentes operadores.

Observando la gráfica se puede observar que la repetibilidad del propio sistema de medición, en las medidas realizadas en un mismo punto y por mismo operador, es aceptable, ya que se parte de que el difractómetro de rayos-X cuenta con una variabilidad aproximada de ± 20 MPa. Además, a pesar de que la reproducibilidad es escasa en los tres puntos, esta variabilidad no asciende del valor de 100 MPa, el cual se podría decir que no es un valor muy alto de cara a todas las fuentes de variabilidad de medida que se han mencionado en las líneas anteriores.

Por último, debe quedar subrayada la variabilidad que genera en las mediciones la misma probeta de la cual se miden las tensiones residuales en comparación con la variabilidad del propio sistema de medición, que en este caso se trata del difractómetro de rayos-X, el cual es más fiable que otros métodos de medida en la superficie. De esta manera, por la falta de uniformidad de la superficie del material queda justificado el alto porcentaje de la relación entre repetibilidad y reproducibilidad de las medidas, el cual obtiene un valor de $\%R\&R = 962,06 \%$.

7.3.5. Obtención de datos para la construcción del modelo empírico

En el siguiente apartado se describe el proceso de obtención de datos para el desarrollo del modelo empírico de tensiones residuales.

Para poder realizar las medidas de las placas de Ti6Al4V mecanizadas de la manera que se ha explicado en el apartado 7.2.2.1, se deben realizar los pasos descritos para la preparación del sistema de medición. Por otro lado, también se debe preparar la probeta para optimizar el proceso de obtención de las tensiones residuales. Para ello, se seleccionaron los puntos donde se iban a incidir con los rayos-X y se colocó cinta de carroceros de forma cuadriculada para referenciar de cierta manera donde se debían hacer los electropulidos y así, de esta manera, no perder la referencia entre un electropulido y otro al penetrar en profundidad.



Ilustración 60. Preparación de la probeta mecanizada para obtener las tensiones residuales del modelo.

Una vez preparada la probeta, para obtener los perfiles de las tensiones residuales de cada uno de los puntos, se obtuvieron las tensiones residuales superficiales de todos los puntos y una vez realizadas dichas medidas, se realizó un electropulido en todos los puntos para una posterior medición en profundidad de las tensiones residuales. Este proceso se llevó a repetidas veces para obtener datos de tensiones residuales hasta una profundidad de 0,18 mm. Esta profundidad fue seleccionada después de obtener el perfil en un único punto de medida y ver su evolución, en el cual se podía observar que en esa profundidad o en profundidades inferiores las tensiones residuales se estabilizaban aproximadamente en 0 MPa.

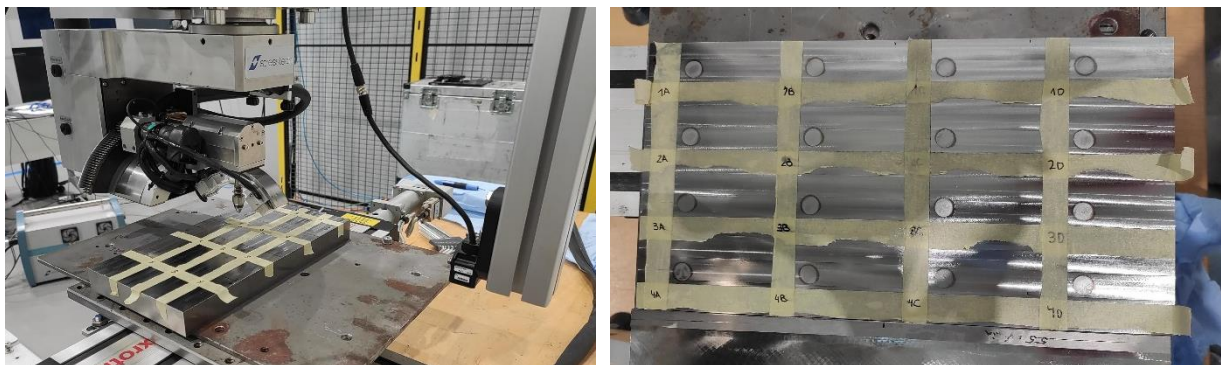


Ilustración 61. Proceso de medición de XRD (izq.) y huellas de electropulido (drcha.).

En cuanto a las mediciones de tensiones residuales que se van a realizar con el método de XRD, en cada uno de los puntos y en cada una de las profundidades, se definen los siguientes parámetros:

Tabla 21. Parámetros para obtener las medidas de XRD para el desarrollo del modelo empírico.

Parámetros de medición del método de XRD	
Material / Tipo de tubo	Ti (110) 137,5° / Ti
Propiedades del material	Módulo de Young = 120,2 GPa
	Coefficiente de Poisson = 0,36
Tiempo de exposición [s]	20
Diámetro del colimador [mm]	4
Ángulos de rotación	0° y 90°
Número de ángulos de inclinación	5/5
Ángulos de inclinación [°]	-39/39
Oscilación de la inclinación [°]	± 6
Ángulo de inclinación [°]	0 / ±18,3 / ± 26,4 / ±33,0 / ±39 (Auto)
Modo de medida	χ modificado
Tensión de los rayos-X [kV]	30
Intensidad de los rayos-X [mA]	8
Profundidad de penetración [mm]	0,18

En cuanto al proceso de electropulido para obtener las tensiones residuales en profundidad, los parámetros que se han fijado son el voltaje, el tiempo de ataque del electropulido y la ratio del flujo.

En primer lugar, de cara al electropulido de titanio la tensión alcanza los 45 V y el flujo que fija en un valor de 15. Por otro lado, el tiempo de ataque no se fijó en un valor exacto, ya que los puntos medidos en profundidad no son equidistantes. Esto se debe porque la profundidad afectada es muy poco profunda y por lo tanto solo interesa la evolución de las tensiones en las capas próximas a la superficie mecanizada y en menor medida las tensiones más alejadas de esta superficie, ya que se supone que estos perfiles de tensión tienden a estabilizarse a un valor aproximado de 0 MPa. En concreto, estas han sido las profundidades a las que se han realizado las medidas: 0 mm – 0,005 mm – 0,015 mm – 0,030 mm – 0,060 mm – 0,12 mm – 0,18 mm.

A la hora de realizar el tratamiento de las mediciones, se ha observado mediante el Anexo IV que el método de ajuste de pico *Cross correlation (lineal)* es el método que más acerca los valores de XRD a los de HD. Sin embargo, dado que el método de *Cross correlation (constante)* es el recomendado por los fabricantes del propio sistema de medición, será el que se utilice para la construcción del modelo.

En segundo lugar, se procedió a una evaluación individual de cada uno de los picos de intensidad obtenidos por cada una de las mediciones realizadas. Analizados estos picos se eliminó alguno de los ángulos de inclinación utilizados para obtener el cálculo de las tensiones, ya que el pico de intensidad no estaba bien definido, como es el caso del pico que se muestra en la siguiente imagen.

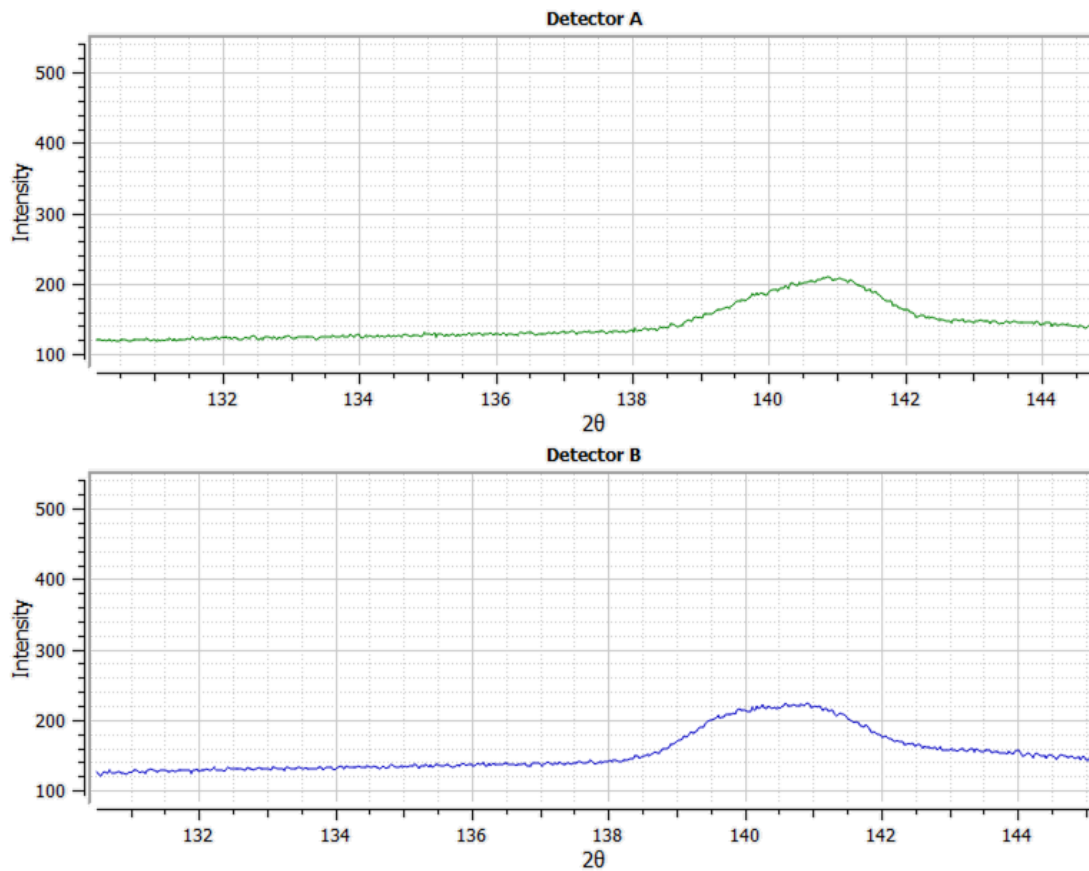


Ilustración 62. Picos de intensidad no definidos (Punto 3B – profundidad 0,18 mm – rotación 90° – inclinación -39°).

Finalmente, se debe mencionar que se optó por construir el modelo mediante los datos corregidos por el software XTronic, ya que las diferencias de valor entre los perfiles corregidos y sin corregir eran elevadas.

7.4. Desarrollo del modelo empírico

El presente apartado muestra cómo se ha desarrollado y construido el modelo empírico para la predicción de tensiones residuales inducidas por un fresado frontal en la aleación de titanio Ti6Al4V.

Los modelos empíricos, al igual que los numéricos y los analíticos, cuentan con una serie de fases para el desarrollo del propio modelo. De manera general, estas son las fases que principalmente estructuran el modelo:

1. **Identificación:** en esta etapa se determinan los diferentes parámetros que se van a tener cuenta para la elaboración del modelo, así como de las ecuaciones matemáticas que van a representar el modelo. En esta fase se idea la base teórica principal para realizar el desarrollo del modelo empírico.
2. **Simulación:** realizada la identificación, donde se define la base o la idea principal del modelo, se elabora el modelo. De esta manera, se obtendrá una única ecuación en función de las variables, las cuales en este caso serán los parámetros de corte del mecanizado.
3. **Validación:** comparación entre los resultados obtenidos del modelo para unos parámetros de corte definidos y los valores reales obtenidos mediante una serie de ensayos experimentales.
4. **Optimización:** en esta última etapa se lleva a cabo el proceso donde, una vez construido y validado el modelo, se ajustan ciertos valores del mismo de cara a mejorar su efectividad.

En cuanto al desarrollo del modelo empírico, éste se ha dividido en dos grandes apartados de acuerdo con las diferentes funciones de ajuste que se pueden utilizar para modelizar los perfiles de las tensiones residuales. Por ello, en primer lugar, se han modelizado las tensiones residuales mediante un ajuste polinómico. De esta manera, tras realizar el modelo basado en polinomios se han ajustado los puntos del perfil de tensiones residuales mediante una función cosenoidal de decaimiento exponencial (FCDE), ya que es una de las curvas que representan la evolución del perfil de las tensiones residuales más fielmente, la cual se ha mencionado en el *apartado 6.6.1.1*.

Dicho esto, en los siguientes apartados se describirá el desarrollo realizado para la obtención del modelo empírico.

7.4.1. Identificación

El desarrollo del presente modelo empírico tiene como fin obtener una única ecuación de tensión residual en función de las variables que tengan efecto en la generación de estas tensiones. De los diferentes parámetros con efecto sobre las tensiones residuales como los expuestos en líneas anteriores (*apartado 4*), se han seleccionado tres variables para la construcción del modelo, la profundidad en la que se analizan las tensiones y dos parámetros de corte, que en este caso serán, el avance por diente y la velocidad de corte. En concreto, esta selección se ha llevado a cabo para evitar realizar un modelo complejo y debido a que las variables seleccionadas son factores de bastante repercusión en la generación de tensiones residuales.

Con el objetivo de modelizar las tensiones residuales, en función de las variables mencionadas, se realizarán tres regresiones de manera consecutiva. Para ello, en cuanto a la primera regresión, se tratará de encontrar una función de ajuste que se adapte bien a la evolución del perfil de tensiones residuales, donde se obtendrá una ecuación principal en función de la profundidad. Asimismo, en

cuanto a la segunda y tercera regresión (independientemente de la función seleccionada para realizar el primer ajuste), éstas se realizarán mediante una función polinómica. Estas últimas regresiones se centran en incluir los parámetros de corte, Vc y fz , en la ecuación de las tensiones residuales.

$$\sigma = f(x, fz, Vc) \quad (54)$$

7.4.1.1. Modelización polinómica

A la hora de llevar a cabo la modelización del perfil de las tensiones residuales mediante polinomios, observando la nube de puntos de la *Ilustración 63* se puede visualizar que la evolución del perfil de tensiones se ajusta de mejor manera con polinomios de alto grado que si se modeliza con un polinomio de primer grado. Sin embargo, a pesar de que se logre un mejor ajuste de los puntos experimentalmente medidos con polinomios de mayor grado, realizar una regresión con alto grado polinómico supondrá una pérdida de significado, ya que cuanto mayor sea el grado mejor se ajustará a los puntos y no se analizará la tendencia real del perfil de tensiones. Además, la ecuación de la tensión residual se volverá excesivamente compleja. Por esta razón, la modelización mediante polinomios se limitará como máximo a polinomios de segundo grado.

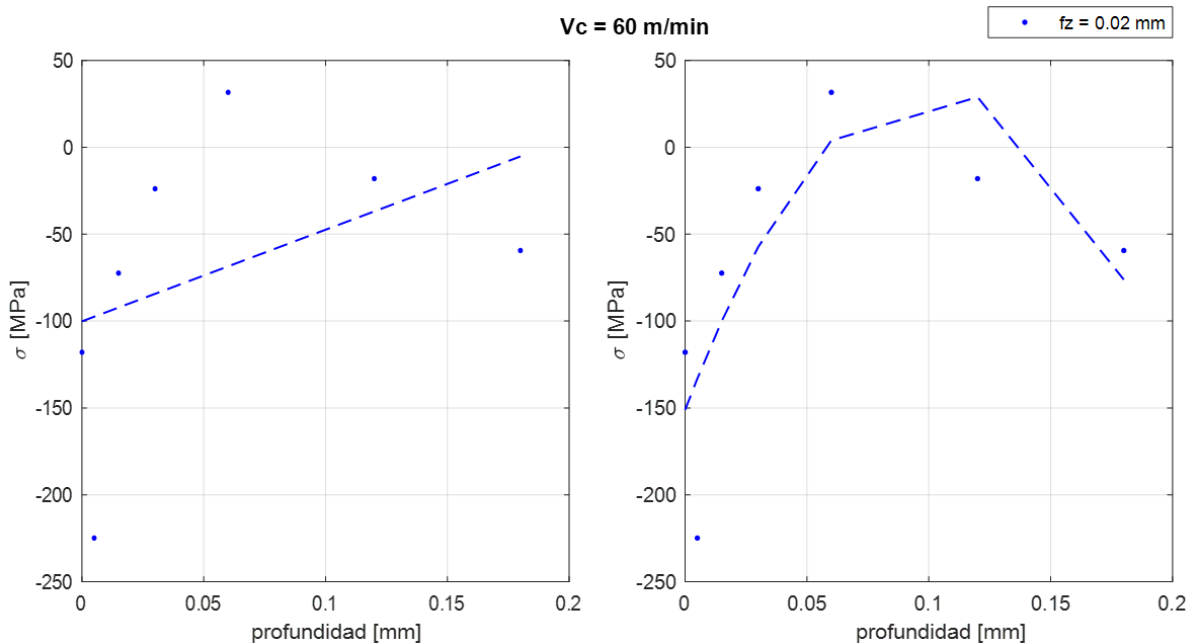


Ilustración 63. Diferencia de una regresión de primer y segundo grado de las medidas obtenidas para los parámetros de corte $Vc = 60$ m/min y $fz = 0,02$ mm.

De esta manera, el modelo desarrollado mediante regresiones polinómicas, para el cual se ha hecho uso de la función *polyfit* del software Matlab, se ha realizado siguiendo el orden que se menciona a continuación haciendo uso de polinomios de primer y segundo grado.

- **1.ª Regresión (R1):** en esta primera regresión se obtiene una ecuación donde la tensión está en función de la profundidad medida desde la superficie mecanizada, x , en la que se ha medido la tensión residual. Por lo que dependiendo del grado polinómico a utilizar para el modelado se hará uso de una de las siguientes ecuaciones.

$$\sigma(x) = a_1 \cdot x + a_0 \quad (55)$$

o

$$\sigma(x) = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (56)$$

En la *Ilustración 64* se muestra las curvas obtenidas de la primera regresión realizada mediante un polinomio de segundo grado de los puntos medidos experimentalmente. Observando los diferentes parámetros de corte que se han utilizado para desarrollar el modelo y la evolución de los puntos por cada condición de corte en función de la profundidad, a plena vista no se percibe ningún tipo de tendencia clara. Es decir, no se puede deducir que el aumento de la velocidad de corte suponga tensiones más compresivas en la superficie, o que para una velocidad de corte dada una disminución de avance por diente disminuya el pico compresivo de la superficie.

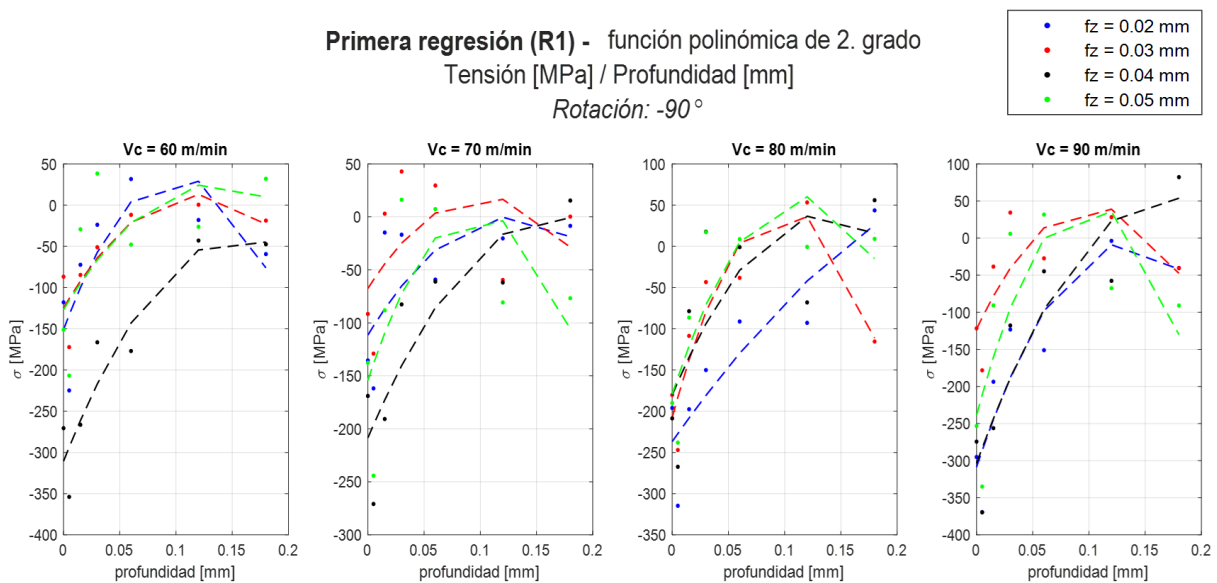


Ilustración 64. Primera regresión (R1) - Tensión [MPa] en función de la profundidad [mm].

Realizada la primera regresión y, por lo tanto, obtenida la ecuación de la tensión en función de la profundidad en la que se han medido las tensiones desde la superficie mecanizada, se determinará la tensión en función de los parámetros de corte por medio de las siguientes regresiones.

- **2.ª Regresión (R2):** para realizar la siguiente regresión, se parte de los coeficientes obtenidos de la regresión polinómica anterior (R1) y se examina en función del avance por diente, fz . De esta manera, en las siguientes ecuaciones se muestra el desarrollo realizado de los parámetros obtenidos de la primera regresión en función del fz . Obteniendo así una expresión para la tensión residual en función de dos variables, en concreto, $\sigma(x, fz)$. Donde el término a_i (donde $i = 2,1,0$) hace referencia a los coeficientes obtenidos de la primera regresión.

(57)

$$a_i = a_{i1} \cdot fz + a_{i0}$$

o

$$a_i = a_{i2} \cdot fz^2 + a_{i1} \cdot fz + a_{i0} \quad (58)$$

Mediante la *Ilustración 65* se puede observar visualmente la tendencia de los coeficientes de la primera regresión para cada velocidad de corte en función del avance por diente. Observando dichas gráficas, obtenidas mediante únicamente polinomios de segundo grado, se llega a una conclusión similar a la anterior, es decir, que los datos no muestran una tendencia clara, ya que la evolución de los coeficientes en función del avance por diente y velocidad de corte parece bastante aleatoria, lo cual no muestra significado alguno.

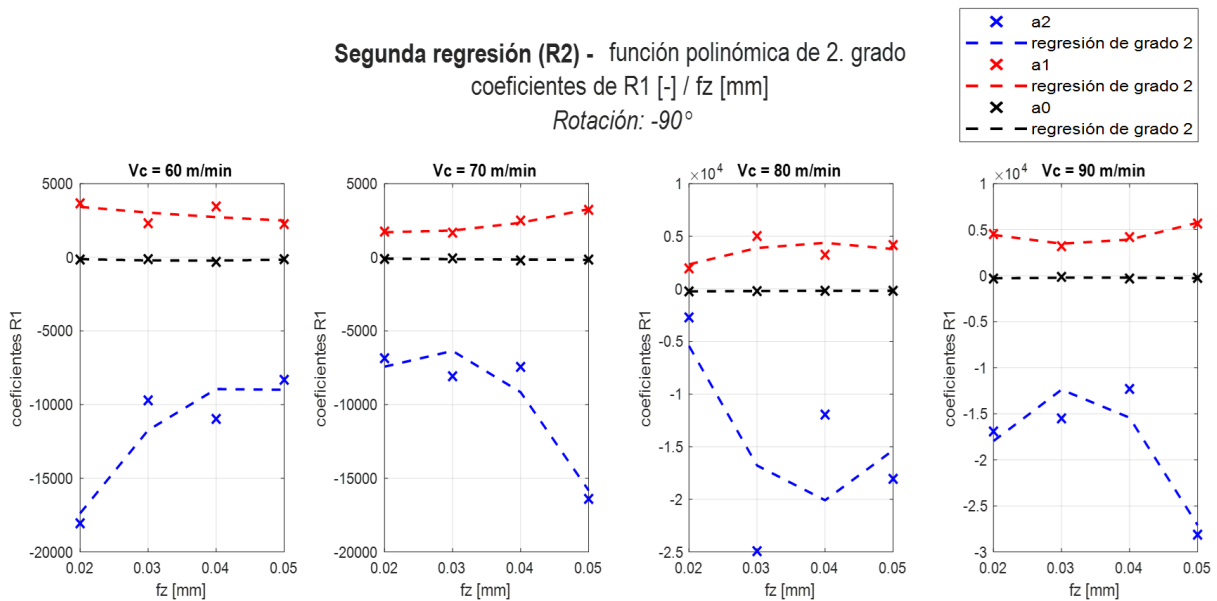


Ilustración 65. Segunda regresión (R2) - Coeficientes de R1 [-] en función de fz [mm].

- **3.ª Regresión (R3):** finalmente, para obtener la ecuación completa en función de las tres variables seleccionadas se realiza una última regresión, es decir, $\sigma(x, fz, Vc)$. Esta regresión se realiza mediante la evolución de los coeficientes obtenidos de la regresión polinómica anterior (R2) en función de la velocidad de corte, Vc . De esta manera, se obtiene el objetivo final, es decir, una única ecuación en función de los parámetros de mecanizado a estudiar. El término a_{ij} (donde $j = 2,1,0$) hace referencia a los coeficientes obtenidos de la primera regresión.

$$a_{ij} = a_{ij1} \cdot Vc + a_{ij0} \quad (59)$$

$$a_{ij} = a_{ij2} \cdot Vc^2 + a_{ij1} \cdot Vc + a_{ij0} \quad (60)$$

De esta manera, el término a_{ijk} representaría todos los coeficientes de la ecuación que modeliza el estado tensional de la superficie mecanizada (donde $k = 2,1,0$).

Al igual que se ha realizado en las regresiones anteriores, en la *Ilustración 66* se pueden visualizar las regresiones que se han establecido para relacionar la ecuación obtenida en la segunda regresión en función de la velocidad de corte mediante polinomios de segundo grado.

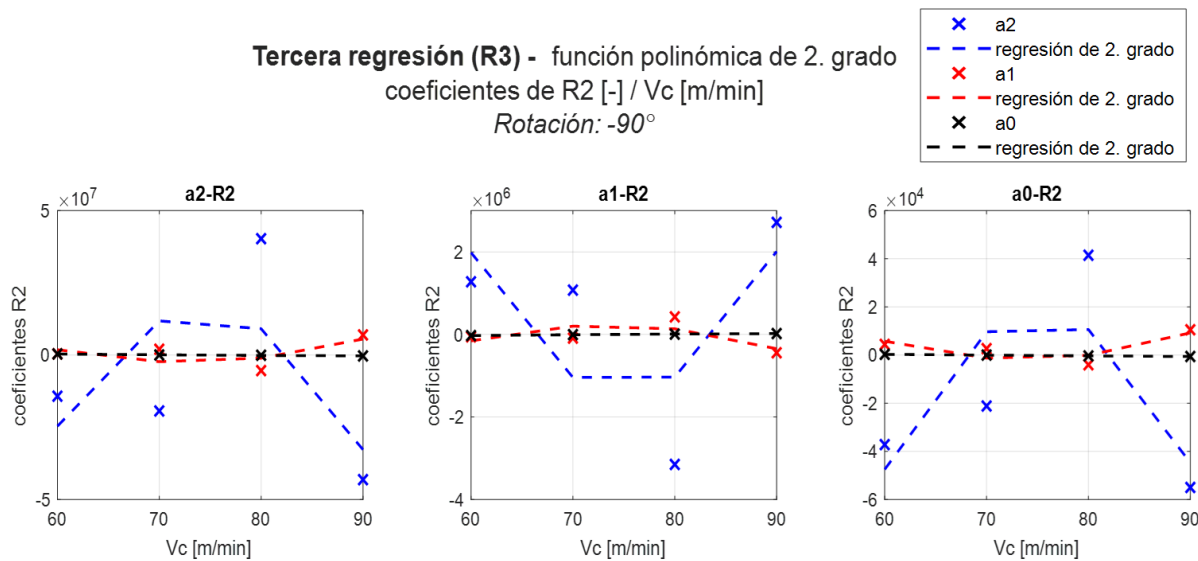


Ilustración 66. Tercera regresión (R3) - Coeficientes de R2 [-] en función de Vc [m/min].

7.4.1.2. Modelización mediante la FCDE

De la misma manera que con la modelización polinómica, en esta segunda modelización se realizan tres regresiones para obtener una ecuación de las tensiones residuales. Sin embargo, en esta modelización se hace uso de otro tipo de función para ajustar los puntos del perfil de tensiones residuales en profundidad, una función que representa la evolución o tendencia habitual de las tensiones inducidas tras realizar un proceso de fresado. Esta ecuación es la denominada función cosenoidal de decaimiento exponencial (41).

Siguiendo el ejemplo de la modelización anterior, en este apartado también se representan en modo de ejemplo las imágenes obtenidas mediante polinomios de segundo grado. Por lo que en este caso se realizan las siguientes regresiones:

- **1.ª Regresión (R1):** regresión de la tensión en función de la distancia de profundidad, x , en la que se ha medido la tensión residual desde la superficie mecanizada.

Esta regresión por mínimos cuadrados a la ecuación (41) se lleva a cabo mediante un algoritmo de optimización multiobjetivo no lineal (función *lsqcurvefit*). Este proceso de optimización puede alcanzar mínimos locales que no correspondan con los valores de optimización global. Por ellos, el resultado depende de los valores iniciales por los que se comienza el proceso de optimización. Estos valores iniciales son únicos para cada una de las curvas obtenidas, ya que estos valores han sido definidos por relación a diferentes características de cada nube de puntos del perfil de tensiones residuales. Además, estos valores iniciales también han sido limitados mediante un límite superior e inferior para cada uno de los parámetros de la función, puesto que un ajuste obtenido mediante dichos límites obtiene mejor resultado que si el programa tuviera la libertad de adquirir cualquier valor, es decir, se trata de una solución local ajustada por el usuario.

En concreto, se ha trabajado con 32 perfiles, ya que hay cuatro velocidades de corte, cuatro avances por diente y dos rotaciones y se han hecho todas las combinaciones posibles entre estos parámetros. Para cada uno de estos perfiles, los valores iniciales se obtendrán basándose en cada una de las curvas de manera independiente.

Centrando la atención en el proceso de obtención de un ajuste satisfactorio entre los valores experimentales y la curva modelizada, se desarrolló un programa iterativo para minimizar el error del ajuste realizado. Por ello, se definieron unos valores iniciales de los parámetros de la función de decaimiento para realizar la primera iteración. Estos valores se modelizaron de la siguiente manera: la amplitud (C_0) se relacionó con el valor absoluto del valor de la tensión residual obtenida en la capa superficial, el coeficiente de amortiguación (ζ) se asimiló al último valor de penetración en la que se midieron las tensiones, para la frecuencia de amortiguación (ω_d) se hizo uso del mismo valor utilizado para la amplitud pero sin el valor absoluto y, finalmente, el ángulo de fase (φ) se fijó en un valor de $\pi/4$, dado que era el valor que mejores ajustes proporcionaba .

Fijados estos primeros valores, se realizó una primera iteración de donde se obtuvo como resultado nuevos valores para los parámetros definidos, los cuales se utilizaron en la siguiente iteración como valores iniciales. Además, también se calculó la diferencia de valores obtenidos entre los valores experimentales y los obtenidos mediante la regresión por mínimos cuadrados. De esta manera, este proceso iterativo se realizó hasta la obtención de una de las siguientes condiciones:

- El valor absoluto de la suma de la diferencia, entre los valores experimentales y los obtenidos de la regresión, obtenida entre dos iteraciones (i) consecutivas fuera menor a 0,0001.

$$\left| \sum \text{diferencia}(i + 1) - \sum \text{diferencia}(i) \right| < 0,0001 \quad (61)$$

- Se alcanzara un valor máximo de 10.000 iteraciones.

$$i < 10.000 \quad (62)$$

En la siguiente imagen se muestra como se ha ido alcanzando el ajuste mediante el programa por iteraciones, donde se muestran en color azul los ajustes realizados en las primeras iteraciones y en rojo el ajuste final:

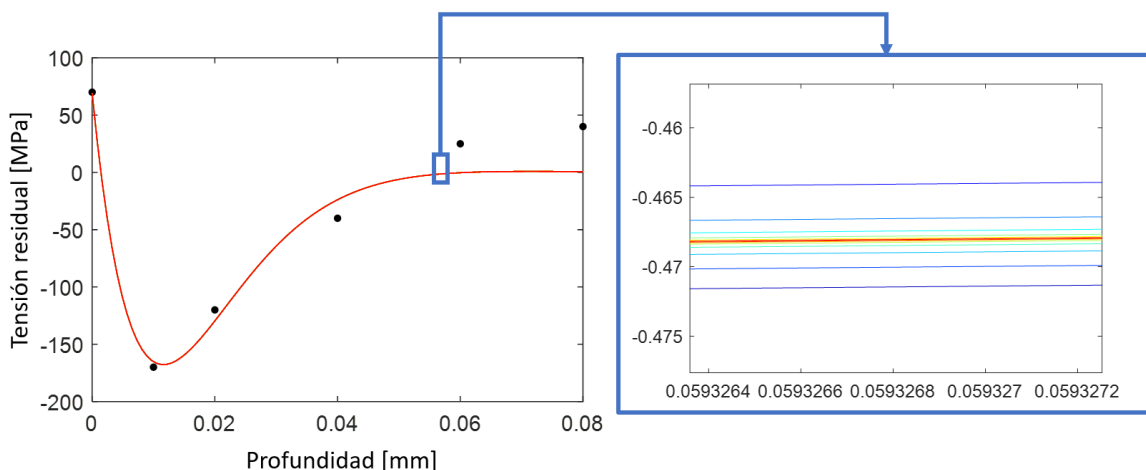


Ilustración 67. Proceso iterativo para la obtención de una curva que se ajuste a los valores experimentales del perfil de tensiones residuales.

Para simplificar y mejorar el entendimiento del propio informe, los coeficientes de la FCDE se han modificado de la siguiente manera:

$$\sigma(x) = a_1 e^{\frac{-a_2 a_3 x}{\sqrt{1-a_2^2}}} \cos(a_3 x + a_4) \quad (63)$$

Observando la *Ilustración 68* y, en concreto, los puntos medidos experimentalmente y el ajuste que realiza la función seleccionada respecto a esos puntos, se observa que a profundidades mayores de 0,1 mm aparecen puntos dispersos donde la función de ajuste no parece la más adecuada para realizar dicho ajuste. Sin embargo, dado que las tensiones residuales de mayor valor aparecen en las capas más próximas a la superficie y que a mayores profundidades las curvas de tensión deberían estabilizarse en una tensión nula, en el caso de que se tengan en cuenta las tensiones residuales generadas tras el mecanizado, se ha dado importancia al ajuste de los primeros puntos obtenidos desde la superficie, ya que por su alto valor serán los más influyentes en la generación de distorsiones en un componente. De esta manera, las tensiones medidas a altas profundidades se han considerado ruido. Ejemplo de esto pueden ser las tensiones residuales del material de partida, las cuales no se desean modelizar, ya que no es el objetivo de este modelizado.

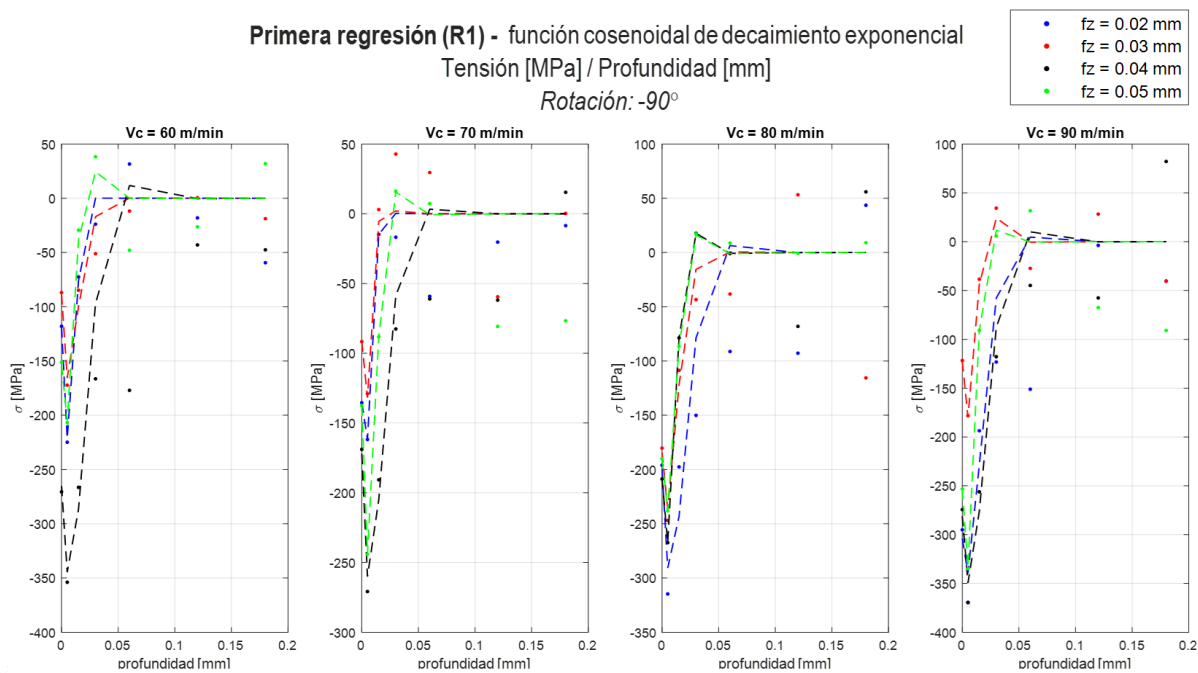


Ilustración 68. Primera regresión (R1) - Tensión [MPa] en función de la profundidad [mm].

- **2.ª Regresión (R2):** para realizar esta regresión se analiza la evolución de cada uno de los parámetros de la función cosenoidal con decaimiento exponencial (a_i donde $i = 1,2,3,4$) en función del avance por diente para cada una de las velocidades de corte. De esta manera, se ha empleado el mismo procedimiento expuesto para la modelización polinómica (*ecuaciones (57) y (58)*).

Estas regresiones se pueden observar en la *Ilustración 69*, donde los valores que se representan son los obtenidos apartir de los valores iniciales definidos. Por esta razón, los resultados rondarán los valores fijados como valores iniciales para realizar la regresión.

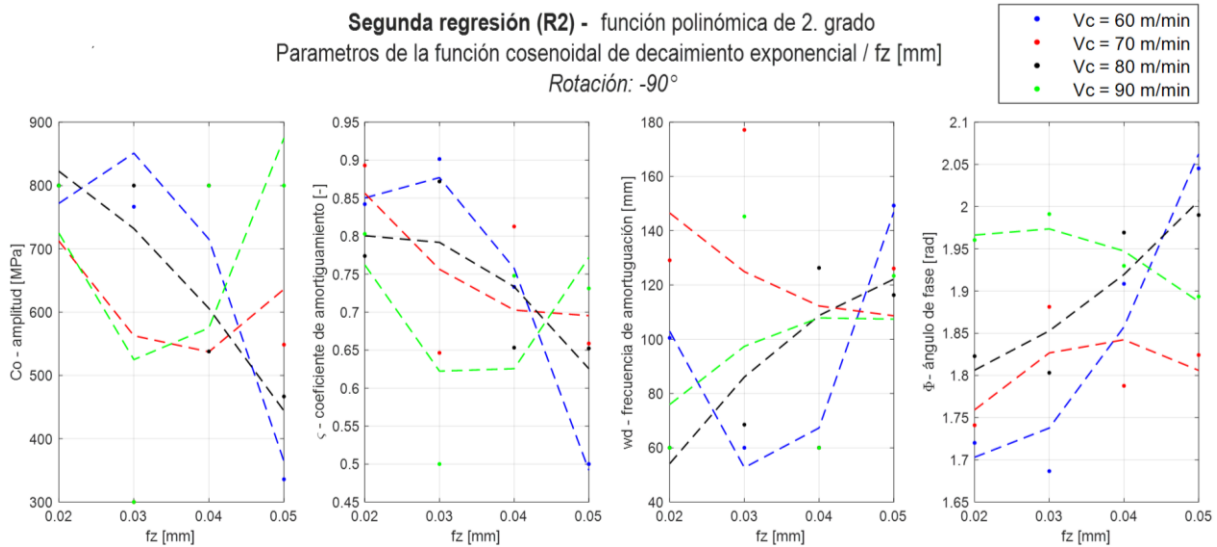


Ilustración 69. Segunda regresión (R2) - Parámetros de la función de ajuste en función de fz [mm].

- **3.ª Regresión (R3):** por último, en este paso final para obtener la expresión completa de la tensión residual, se ha realizado una regresión de los coeficientes de los polinomios de la segunda regresión en función de la velocidad de corte. Una vez más, se ha empleado el mismo procedimiento que para realizar la tercera regresión de la modelización polinómica (ecuaciones (59) y (60)).

Esta tercera regresión se muestra en la Ilustración 70, donde se observan los coeficientes de la segunda regresión polinómica en función de la velocidad de corte. Observando la evolución de cada una de las regresiones realizadas, puede observarse que el efecto de aumentar la velocidad de corte es similar para la amplitud (Co) y coeficiente de amortiguación (ζ), así como para la frecuencia de amortiguación (ω_d) y el ángulo de fase (φ).

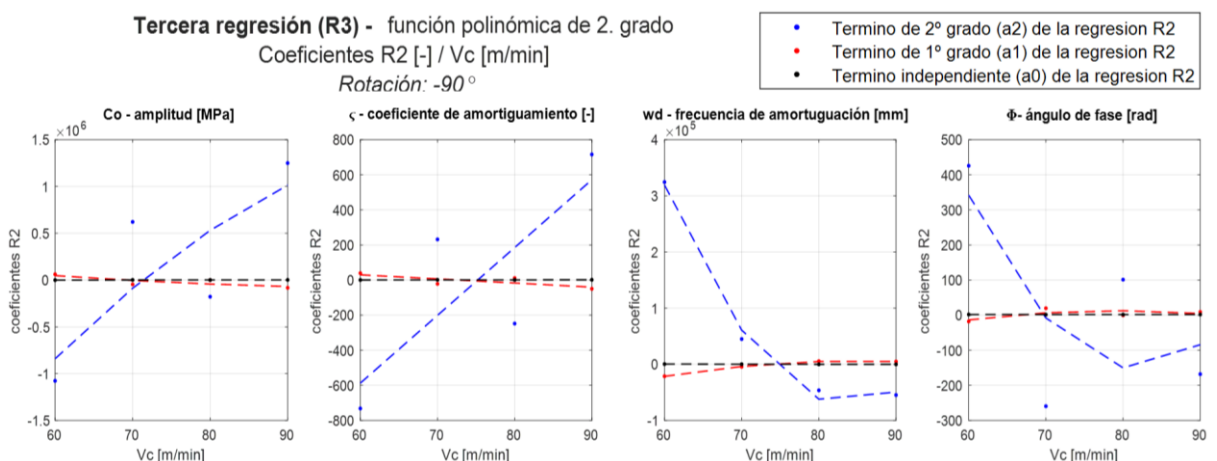


Ilustración 70. Tercera regresión (R3) - Coeficientes de R2 [-] en función de Vc [m/min].

De esta manera, obtenida la ecuación de la tensión residual en función de la profundidad en la que se analizan las tensiones residuales, la velocidad de corte y el avance por diente, queda definida la base de modelo empírico.

7.4.2. Simulación

Una vez identificada la estructura del modelo empírico, en este apartado se mostrarán los valores obtenidos de las simulaciones realizadas de cara a evaluar el modelo generado.

A continuación, se muestra la evaluación de los modelos. Para ello, se ha hecho del coeficiente de correlación de Pearson, así como el error medio. Dicho error medio se ha calculado de la siguiente manera:

$$\text{Error medio [MPa]} = \frac{\sum |\hat{\sigma} - \sigma|}{n} \quad (64)$$

Donde σ es la tensión residual medida, $\hat{\sigma}$ es la tensión residual predicha con el modelo y n es el número de medidas.

7.4.2.1. Modelización polinómica

Realizadas las simulaciones en base a la idea principal mencionada en el apartado anterior, se generan las ecuaciones de los modelos, es decir, que se obtiene una única ecuación para la obtención de la tensión residual en función de las 3 variables mencionadas (x, fz, Vc).

De esta manera en el *Anexo V - Modelización polinómica* se muestran las ecuaciones elaboradas para ambas direcciones de la placa, es decir, en dirección de la velocidad de corte (rotación=0°) y su perpendicular (rotación=-90°) y para las diferentes combinaciones en cuanto al grado polinómico de cada una de las regresiones.

Obtenidas las ecuaciones, se llevó a cabo la evaluación de cada uno de los modelos construidos respecto a la nube de puntos de los cuales se ha elaborado el propio modelo. De esta manera, se obtienen los coeficientes de ajuste y el error medio para todas las combinaciones del grado polinómico y para las dos direcciones en las que se han realizado las medidas:

Tabla 22. Evaluación del modelo construido mediante funciones polinómicas.

Evaluación del modelo – función polinómica						
Grado polinómico de las regresiones			Rotación = -90°		Rotación = 0°	
R1	R2	R3	R ²	Error medio [MPa]	R ²	Error medio [MPa]
1	1	1	0,354	68,207	0,398	81,252
1	2	1	0,388	66,448	0,404	80,985
1	1	2	0,370	68,257	0,418	81,021
1	2	2	0,408	65,490	0,426	80,863
2	1	1	0,503	59,920	0,625	62,612
2	2	1	0,538	58,421	0,634	61,962
2	1	2	0,522	58,001	0,649	61,430
2	2	2	0,564	55,006	0,660	59,633

7.4.2.2. Modelización mediante la FCDE

Al igual que se ha realizado para los modelos realizados mediante polinomios, en el *Anexo V - Modelización mediante la FCDE* se muestran las ecuaciones que forman los diferentes modelos, donde la función de ajuste al perfil de tensiones en función de la profundidad es la FCDE. De esta manera, para obtener la ecuación final de tensión residual en función de las variables que se han indicado, se realizarán dos regresiones polinómicas a los parámetros de la FCDE. Por ello, se analizarán las variaciones que presentan los parámetros ($C_0, \zeta, \omega_d, \varphi$) según el grado polinómico con el que se realicen las regresiones.

De esta manera, en la siguiente tabla se muestran evaluados con el coeficiente de correlación de Pearson y el error medio los diferentes modelos obtenidos mediante la FCDE y los diferentes grados polinómicos seleccionados para obtener los parámetros de la función.

Tabla 23. Evaluación del modelo construido mediante la FCDE y funciones polinómicas.

Evaluación del modelo – FCDE					
Grado polinómico de las regresiones		Rotación = -90°		Rotación = 0°	
R2	R3	R ²	Error medio [MPa]	R ²	Error medio [MPa]
1	1	0,671	50,987	0,874	37,015
2	1	0,702	47,787	0,866	37,730
1	2	0,684	48,740	0,876	35,147
2	2	0,725	45,760	0,879	32,290

De los resultados obtenidos mediante los dos tipos de modelizado, se debe mencionar que para poder visualizar el modelo respecto a los puntos medidos se han creado superficies tridimensionales, como las que se muestran a continuación. En ellas se observa que para una V_c dada, es decir, 60 m/min se genera una superficie en función de la tensión residual, la profundidad y fz .

Para simplificar únicamente se mostrarán las superficies de acuerdo con las combinaciones que mejores modelos construyen respecto a los puntos experimentales. Por ello, para ambos tipos se pueden observar las superficies coloreadas que forman el modelo obtenido únicamente mediante polinomios de segundo grado.

Además, con el objetivo de mostrar una visualización lo más veraz posible se muestra la superficie en isométrico donde se observan las 3 variables, además de los perfiles en profundidad y de las tensiones en función de los diferentes valores que adquiere el avance por diente en el rango [0,02-0,05] mm.

Evaluación del modelo ($Vc = 60 \text{ m/min}$ y $\text{rotación} = 0^\circ$)
 Funciones polinómicas FCDE + Funciones polinómicas

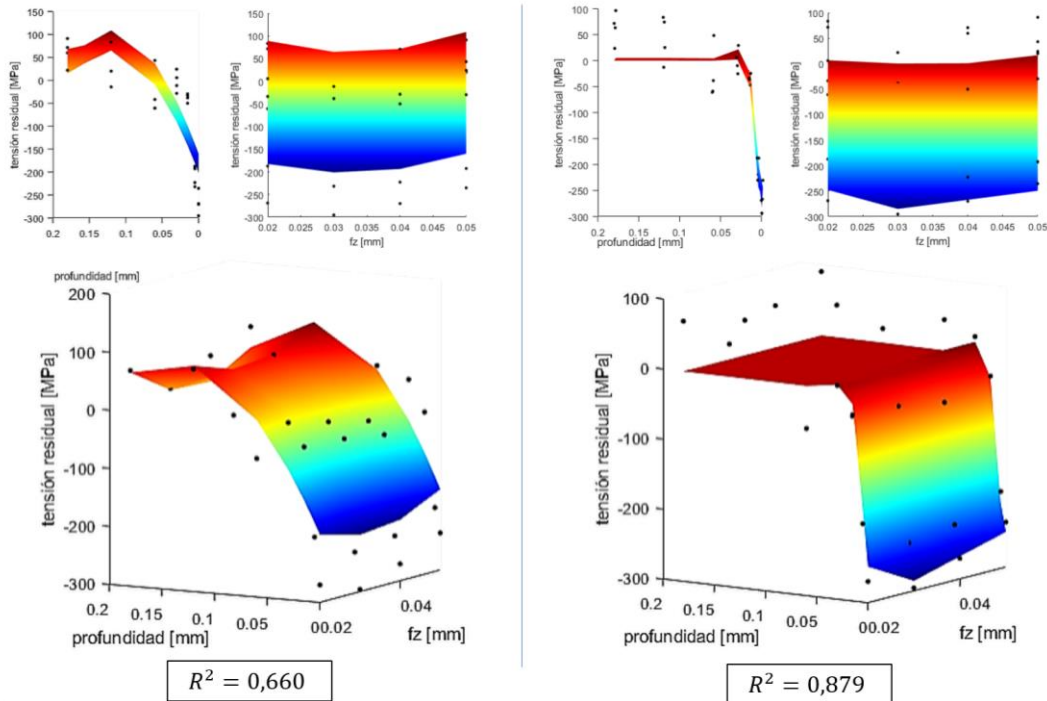


Ilustración 71. Evaluación visual de cada uno de los tipos de modelo utilizados a lo largo de este estudio.

7.4.3. Validación

La validación de un modelo tiene como objetivo cuantificar la incertidumbre del modelo mediante la comparación de sus predicciones, a la par con los datos reales obtenidos de manera experimental. Para llevar a cabo dicha comparación, los datos utilizados para la validación del modelo no son los que se han utilizado para construirlo.

De esta manera, realizados y evaluados los diferentes modelos, en el siguiente apartado se lleva a cabo la validación. Para ello, se realizará una comparación entre las tensiones obtenidas mediante el ensayo realizado para la validación, los cuales fueron realizados en un rango de Vc de [65-85] m/min y de fz de [0,015-0,045] mm, y los valores obtenidos mediante el modelo para estas condiciones de corte.

En primer lugar, se realiza una evaluación de toda la nube de puntos generada por los modelos en función de los valores experimentales, es decir, que se evalúa el modelo para todas las condiciones. Obtenida una visión general del modelo, se realiza una evaluación teniendo en cuenta de manera independiente cada uno de los perfiles generados para realizar la validación.

Para llevar a cabo dicha evaluación, al igual que en el apartado anterior, se ha hecho uso del coeficiente de correlación de Pearson. Sin embargo, dado que este coeficiente creaba cierta confusión, ya que como se puede ver en la Ilustración 72 *Error! No se encuentra el origen de la referencia.* los perfiles del modelo que se muestran parece que realizan un ajuste a los valores experimentales igual de satisfactorio si únicamente se examina el coeficiente de Pearson, alcanzando un valor de 0,97. Por otro lado, si se analiza visualmente estos dos ajustes se puede observar que el ajuste con menor valor en cuanto al coeficiente de Pearson realiza el mejor ajuste, puesto que el perfil obtenido mediante la predicción se asemeja prácticamente en su totalidad al perfil obtenido de forma experimental.

Por esta razón, para realizar la validación de cada uno de los modelos realizados se hará uso de dos coeficientes, en concreto, el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación, los cuales se han descrito en el apartado 6.7. De esta manera, volviendo a la ilustración 72 se pueden examinar los valores obtenidos mediante el coeficiente de determinación - R^2 (deter.). En este caso, este coeficiente sí que parece representar numéricamente la bondad del ajuste realizado por el modelo, ya que en este caso la gráfica de la izquierda obtiene un valor de 0,936 y el de la derecha un valor de 0,359, es decir, que el modelo de la izquierda realiza un mejor ajuste en cuanto a los valores experimentales.

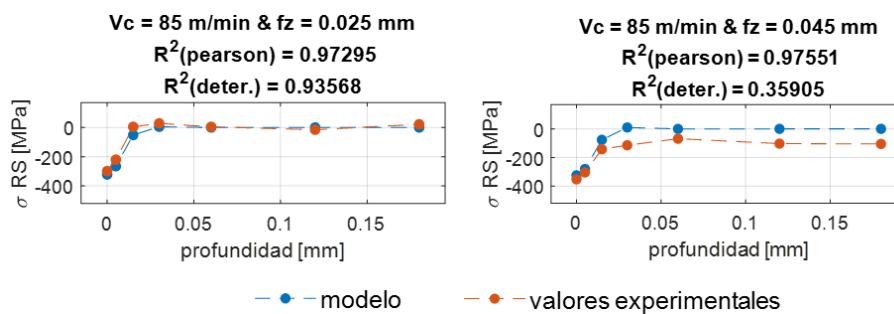


Ilustración 72. Validación de los modelos realizados mediante el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación.

7.4.3.1. Modelización polinómica

Para realizar la validación de los modelos construidos mediante regresiones polinómicas se evalúan de forma general e individual cada uno de los modelos que se han obtenido mediante diferentes combinaciones de los grados polinómicos con las que se han realizado las regresiones.

De esta manera, en la siguiente tabla se muestra la validación del propio modelo de manera general, comparando la nube de puntos experimental con la nube de puntos generada mediante el modelo de predicción para los mismos parámetros de corte.


Tabla 24. Validación del modelo construido mediante funciones polinómicas.

Validación – función polinómica									
Grado polinómico de las regresiones			Rotación = -90°			Rotación = 0°			
			R^2		Error medio [MPa]	R^2		Error medio [MPa]	
R1	R2	R3	Pearson	Deter.		Pearson	Deter.		
1	1	1	0,371	0,368	71,025	0,387	0,347	97,626	
1	2	1	0,317	0,311	73,624	0,372	0,335	100,389	
1	1	2	0,365	0,362	71,500	0,373	0,340	98,679	
1	2	2	0,303	0,299	74,887	0,370	0,340	100,531	
2	1	1	0,589	0,578	58,307	0,620	0,573	79,793	
2	2	1	0,521	0,519	62,688	0,602	0,561	79,855	
2	1	2	0,573	0,559	59,111	0,601	0,569	80,322	
2	2	2	0,496	0,496	64,022	0,594	0,567	79,946	

Por otro lado, ya que el objetivo es la efectividad que tiene el modelo para predecir los perfiles de las tensiones residuales, en las siguientes tablas, se muestra la evaluación de cada uno de los perfiles de forma individual, según la dirección de medición de las tensiones superficiales de la placa de titanio que se está analizando. Dado que, como se ha mencionado anteriormente, se evalúan los perfiles para dos coeficientes se muestran en una cuadrícula verde, los valores obtenidos mediante el coeficiente de Pearson y en naranja, los obtenidos mediante el coeficiente de determinación.

Tabla 25. Validación de la modelización polinómica (Rotación=-90°).

Validación - función polinómica - (rotación = -90°)														
Grado polinómico de las regresiones			Vc [m/min]											
			65				75				85			
			fz [mm]											
R1	R2	R3	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045
1	1	1	0,447	0,372	0,140	0,630	0,358	0,281	0,506	0,452	0,365	0,473	0,567	0,425
			0,116	0,214	0,023	0,170	0,231	0,243	0,325	0,336	0,346	0,197	0,499	0,418
1	2	1	0,447	0,372	0,140	0,630	0,358	0,281	0,506	0,452	0,365	0,473	0,567	0,425
			-1,407	0,189	-0,253	0,244	0,227	0,240	0,339	0,336	0,302	0,235	0,500	0,415
1	1	2	0,447	0,372	0,140	0,630	0,358	0,281	0,506	0,452	0,365	0,473	0,567	0,425
			0,088	0,224	0,048	0,104	0,279	0,212	0,351	0,157	0,343	0,217	0,496	0,412
1	2	2	0,447	0,372	0,140	0,630	0,358	0,281	0,506	0,452	0,365	0,473	0,567	0,425
			-1,306	0,203	-0,176	0,179	0,167	0,205	0,362	0,139	0,292	0,256	0,483	0,406
2	1	1	0,564	0,842	0,336	0,712	0,493	0,532	0,833	0,702	0,532	0,764	0,806	0,717
			0,243	0,574	0,254	0,255	0,365	0,514	0,586	0,586	0,513	0,475	0,716	0,708
2	2	1	0,341	0,830	0,305	0,716	0,491	0,528	0,817	0,702	0,564	0,761	0,806	0,717
			-1,308	0,546	-0,028	0,331	0,365	0,508	0,586	0,586	0,506	0,508	0,706	0,704
2	1	2	0,574	0,834	0,336	0,708	0,451	0,496	0,834	0,697	0,517	0,757	0,806	0,716
			0,225	0,568	0,276	0,190	0,366	0,434	0,588	0,407	0,495	0,484	0,711	0,703
2	2	2	0,418	0,825	0,314	0,712	0,371	0,503	0,842	0,695	0,534	0,756	0,807	0,716
			-1,172	0,546	0,051	0,265	0,180	0,433	0,624	0,389	0,470	0,520	0,692	0,696

 Coeficiente de Pearson


 Coeficiente de determinación

Tabla 26. Validación de la modelización polinómica (Rotación=0°).

Validación - función polinómica - (rotación = 0°)														
Grado polinómico de las regresiones			Vc [m/min]											
			65				75				85			
			fz [mm]											
R1	R2	R3	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045
1	1	1	0,439	0,445	0,714	0,567	0,369	0,207	0,645	0,532	0,226	0,305	0,262	0,363
			0,412	0,353	0,559	0,495	0,159	0,168	0,578	0,509	0,200	0,284	0,240	-0,110
1	2	1	0,439	0,445	0,714	0,567	0,369	0,207	0,645	0,532	0,226	0,305	0,262	0,363
			0,356	0,355	0,561	0,499	0,032	0,174	0,551	0,508	0,217	0,279	0,240	-0,083
1	1	2	0,439	0,445	0,714	0,567	0,369	0,207	0,645	0,532	0,226	0,305	0,262	0,363
			0,403	0,350	0,564	0,511	0,068	0,179	0,549	0,498	0,196	0,281	0,242	-0,044
1	2	2	0,439	0,445	0,714	0,567	0,369	0,207	0,645	0,532	0,226	0,305	0,262	0,363
			0,364	0,350	0,555	0,513	0,099	0,179	0,510	0,495	0,216	0,277	0,239	-0,023
2	1	1	0,630	0,471	0,778	0,806	0,605	0,578	0,793	0,795	0,602	0,527	0,653	0,696
			0,607	0,412	0,666	0,723	0,399	0,531	0,750	0,759	0,530	0,505	0,566	0,239
2	2	1	0,634	0,469	0,767	0,806	0,605	0,578	0,797	0,795	0,602	0,528	0,635	0,693
			0,551	0,414	0,669	0,727	0,273	0,533	0,721	0,756	0,587	0,502	0,524	0,263
2	1	2	0,622	0,461	0,771	0,806	0,541	0,609	0,763	0,795	0,602	0,524	0,658	0,696
			0,598	0,406	0,670	0,740	0,306	0,569	0,719	0,751	0,533	0,500	0,573	0,305
2	2	2	0,632	0,459	0,758	0,806	0,565	0,609	0,759	0,795	0,601	0,525	0,643	0,693
			0,558	0,406	0,664	0,741	0,317	0,567	0,682	0,745	0,589	0,498	0,528	0,323

Coeficiente de Pearson

Coeficiente de determinación

Mostrados los valores numéricamente en la siguiente página se muestran visualmente la comparación de los perfiles de tensión predichos y los obtenidos experimentalmente. A modo de evitar la redundancia, sólo se muestra la comparación del modelo realizado mediante regresiones polinómicas de segundo grado, al igual que se realizó en los anteriores apartados. Por otro lado, puesto que la forma del perfil en cada una de las direcciones en las que se ha medido las tensiones residuales es diferente, sí se muestran las ilustraciones para ambas rotaciones del goniómetro.

Comparativa entre el modelo y valores experimentales

Tensión [MPa] / Profundidad [mm]

Rotación: -90°

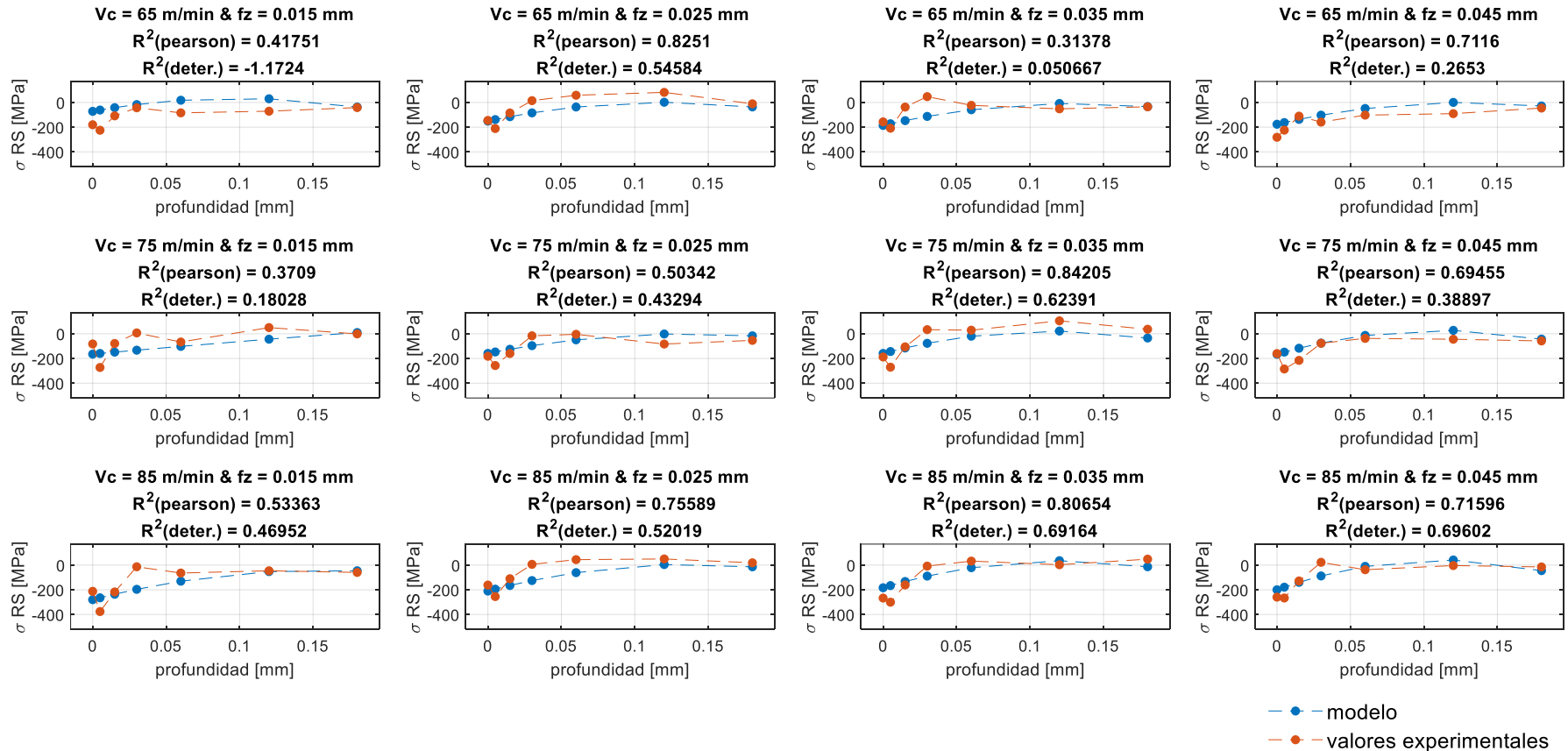


Ilustración 73. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización polinómica - Rotación=-90°).

Comparativa entre el modelo y valores experimentales

Tensión [MPa] / Profundidad [mm]

Rotación: 0°

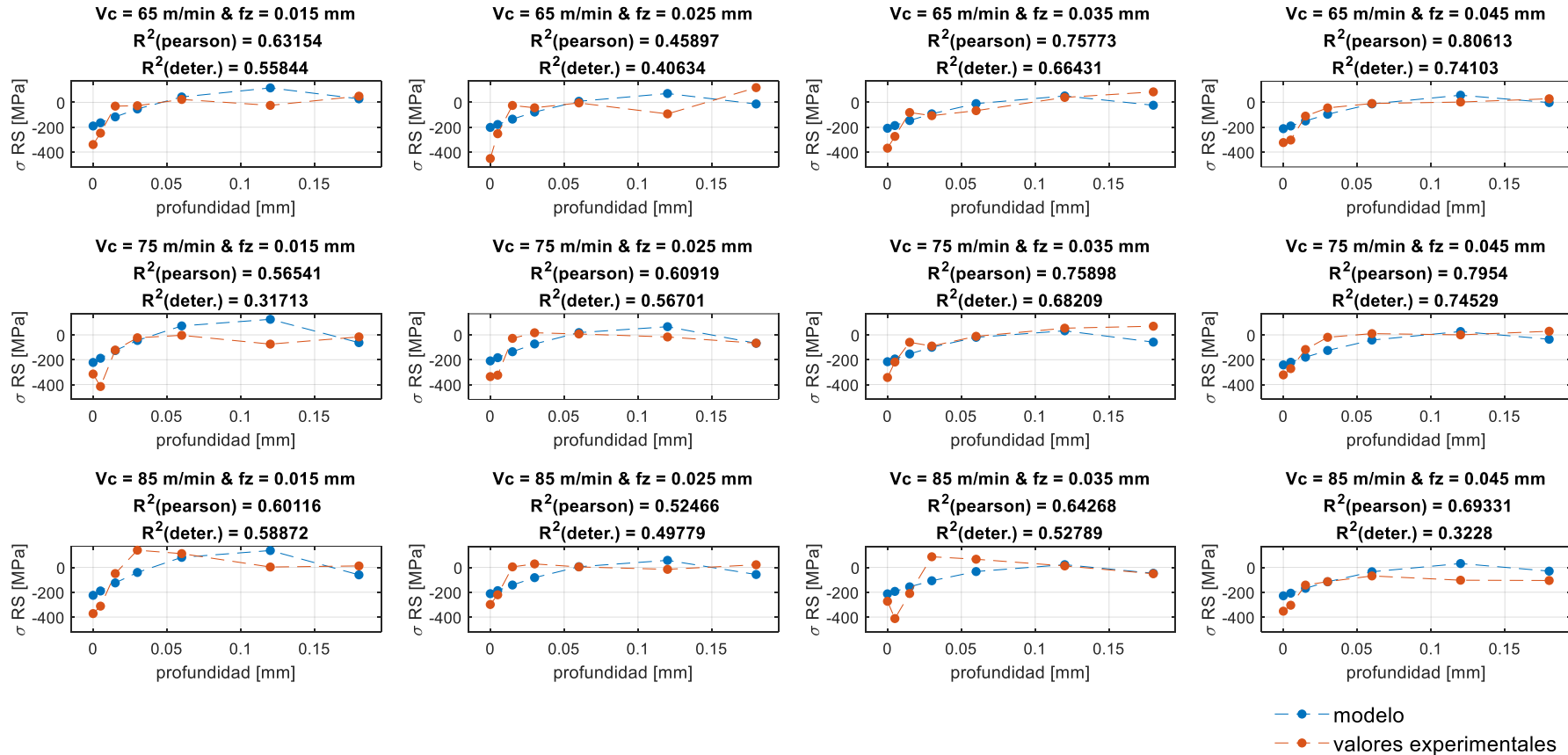


Ilustración 74. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización polinómica - Rotación=0°).

7.4.3.2. Modelización mediante la FCDE

Por último, se valida cada uno de los modelos realizados a partir de la FCDE para ajustar el perfil de tensiones según la profundidad de penetración de las tensiones desde la capa superficial afectada por el mecanizado. Para ello, al igual que para la modelización polinómica, en la *Tabla 27* se muestra la validación general del modelo de predicción realizado.

Tabla 27. Validación del modelo construido mediante la FCDE y funciones polinómicas.

Validación – FCDE							
Grado polinómico de las regresiones		Rotación = -90°			Rotación = 0°		
R2	R3	R ²		Error medio [MPa]	R ²		Error medio [MPa]
		Pearson	Deter.		Pearson	Deter.	
1	1	0,777	0,758	31,427	0,849	0,836	34,108
2	1	0,773	0,756	32,003	0,827	0,804	37,452
1	2	0,774	0,745	32,552	0,848	0,832	34,521
2	2	0,775	0,749	32,896	0,834	0,809	37,190

De la misma manera, en la *tabla 28* y *tabla 29* se muestra el nivel ajuste de cada uno de los perfiles predichos respecto al obtenido de manera experimental mediante los dos coeficientes de evaluación para cada una de las direcciones a la que se han realizado mediciones de las tensiones mediante el difractor de rayos-X.

Tabla 28. Validación de la modelización mediante la FCDE (Rotación=-90°).

Validación - FCDE - (rotación = -90°)													
Grado polinómico de las regresiones		Vc [m/min]											
		65				75				85			
		fz [mm]											
R2	R3	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045
1	1	0,937	0,910	0,800	0,572	0,771	0,917	0,963	0,845	0,921	0,983	0,969	0,962
		-0,364	0,849	0,694	-0,509	0,761	0,781	0,876	0,537	0,808	0,860	0,950	0,952
2	1	0,914	0,914	0,688	0,566	0,755	0,918	0,964	0,853	0,878	0,983	0,959	0,961
		-0,005	0,849	0,518	-0,483	0,742	0,786	0,865	0,553	0,805	0,872	0,912	0,949
1	2	0,933	0,904	0,808	0,573	0,767	0,891	0,954	0,837	0,926	0,982	0,966	0,961
		-0,452	0,847	0,725	-0,521	0,765	0,680	0,871	0,455	0,798	0,877	0,943	0,948
2	2	0,906	0,908	0,723	0,568	0,815	0,889	0,949	0,833	0,882	0,981	0,955	0,960
		-0,041	0,847	0,602	-0,494	0,814	0,674	0,863	0,443	0,807	0,888	0,897	0,944



Coeficiente de Pearson



Coeficiente de determinación

Tabla 29. Validación de la modelización mediante la FCDE (Rotación=0°).

Validación - FCDE - (rotación = 0°)													
Grado polinómico de las regresiones		Vc [m/min]											
		65				75				85			
		fz [mm]											
R2	R3	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045	0,015	0,025	0,035	0,045
1	1	0,964	0,856	0,836	0,967	0,849	0,952	0,853	0,972	0,930	0,971	0,770	0,975
		0,954	0,799	0,813	0,954	0,715	0,930	0,850	0,972	0,839	0,930	0,749	0,374
2	1	0,956	0,856	0,829	0,966	0,863	0,953	0,849	0,970	0,935	0,973	0,738	0,976
		0,583	0,799	0,775	0,950	0,756	0,929	0,849	0,969	0,830	0,936	0,703	0,359
1	2	0,963	0,857	0,836	0,966	0,844	0,959	0,857	0,969	0,930	0,973	0,766	0,975
		0,949	0,797	0,813	0,952	0,662	0,928	0,855	0,966	0,842	0,933	0,745	0,386
2	2	0,956	0,856	0,827	0,965	0,863	0,961	0,838	0,964	0,933	0,975	0,724	0,977
		0,671	0,797	0,774	0,946	0,819	0,922	0,837	0,961	0,815	0,941	0,685	0,366



Coeficiente de Pearson



Coeficiente de determinación

Finalmente, en modo de ejemplo, en las siguientes hojas se muestran gráficamente los ajustes que realizan los diferentes perfiles obtenidos a diferentes condiciones de corte para el modelo obtenido únicamente mediante polinomios de segundo grado. Mostrando en cada una de las tablas las tensiones obtenidas en diferentes direcciones en las que se han realizado las medidas.

Comparativa entre el modelo y valores experimentales

Tensión [MPa] / Profundidad [mm]

Rotación: -90°

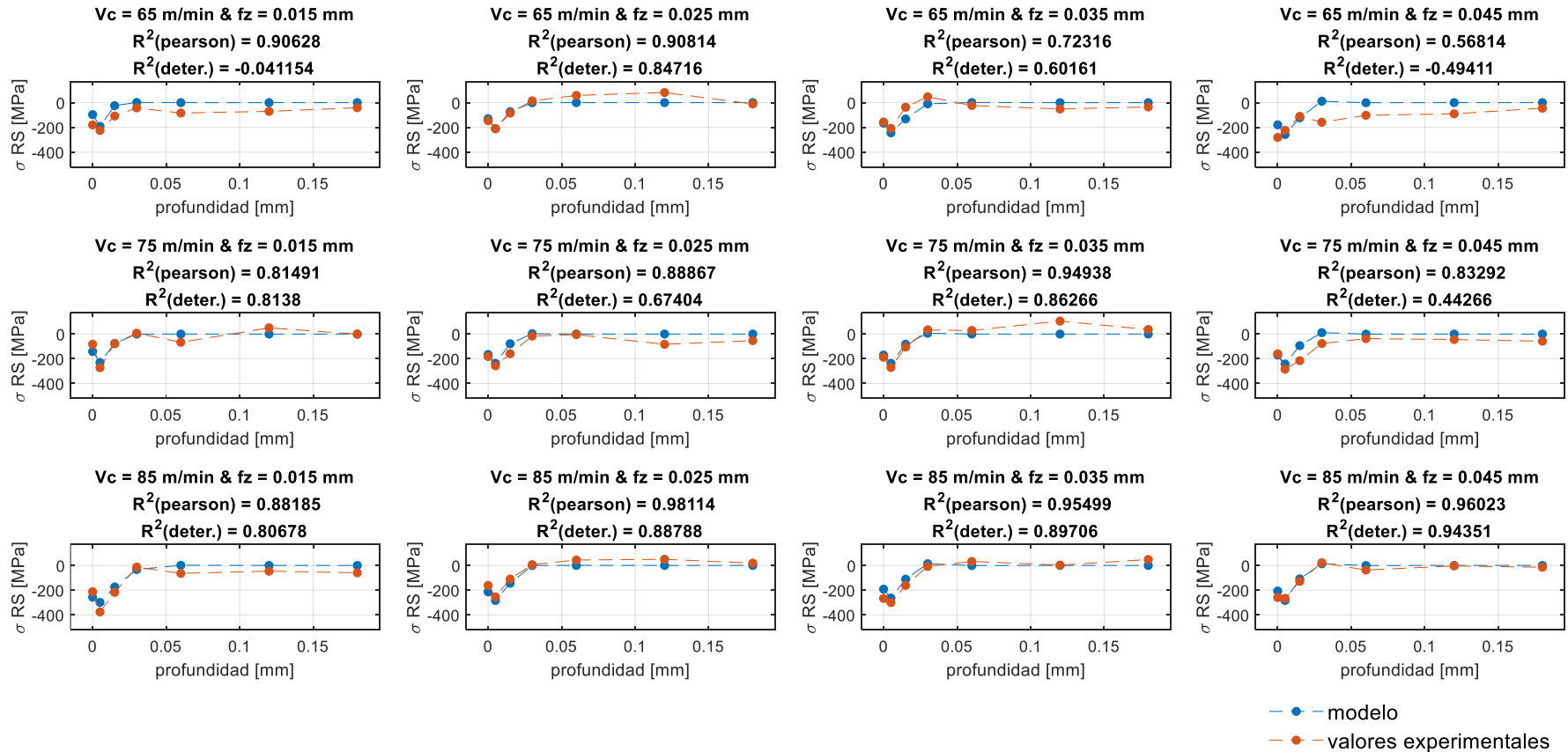


Ilustración 75. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización mediante la FCDE - Rotación= -90°)

Comparativa entre el modelo y valores experimentales

Tensión [MPa] / Profundidad [mm]

Rotación: 0°

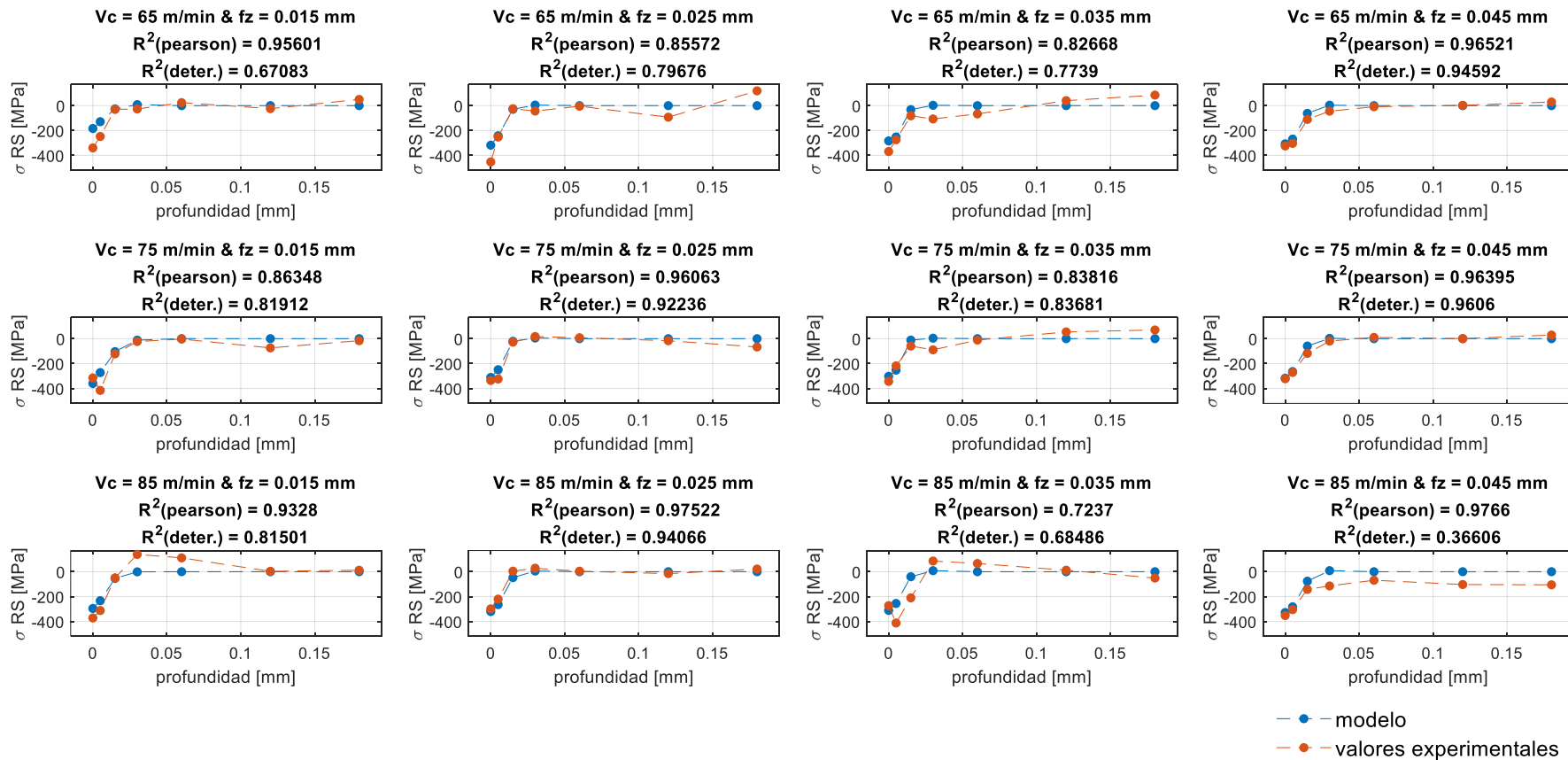


Ilustración 76. Comparación del perfil predicho mediante el modelo empírico y el obtenido experimentalmente (Modelización mediante la FCDE - Rotación=0°)

8. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez mostrados los resultados obtenidos mediante el trabajo realizado, en el siguiente apartado estos serán analizados de manera general, pudiendo así obtener una valoración del proyecto que se ha llevado a cabo.

Debe remarcarse que en este apartado únicamente se van a estudiar los resultados obtenidos de la elaboración del modelo de predicción, ya que como se ha mencionado previamente la realización del modelo es el objetivo principal. Por ello, se analizarán los resultados plasmados en el *apartado 7.4*. De esta manera, se mostrará en primer lugar el análisis de resultados de cara a los modelos realizados respecto a los puntos experimentales y realizado este paso se profundizará en la validación de cada uno de los modelos.

8.1. Evaluación del modelo

En el *apartado 7.4.2* se han mostrado cada uno de los valores que se han obtenido de la evaluación de los modelos construidos mediante diferentes ecuaciones. Si se analizan en primer lugar los resultados obtenidos en cuanto a los modelos únicamente polinómicos, es decir, la *Tabla 22*, se puede ver que en ambas direcciones realizar una primera regresión polinómica de segundo grado para modelizar la tensión residual en función de la profundidad es la decisión más adecuada, ya que obtiene de forma remarcable mejores resultados de ajuste. Por ello, en las siguientes líneas, en cuanto a la modelización polinómica se refiere, se mostrarán únicamente los resultados obtenidos mediante una primera regresión de segundo grado.

De esta manera, en las siguientes gráficas se evalúan de forma conjunta los dos tipos de modelos construidos con las diferentes combinaciones polinómicas de la segunda y tercera regresión. De la misma manera, se debe mencionar, que las barras sólidas hacen referencia a los valores obtenidos en la dirección perpendicular a la velocidad de corte de (rotación= -90°) y, por otro lado, las franjas diagonales a los valores en la dirección de la velocidad de corte (rotación= 0°).

Reparando en primer lugar en la *Ilustración 77* se observa una clara diferencia entre los dos tipos de modelos construidos, ya que la modelización realizada mediante la FCDE supera aproximadamente en un 30% el valor del coeficiente de Pearson obtenido mediante regresiones únicamente polinómicas. Esta mejora era de esperar, ya que como se ha mencionado en el estado del arte, la FCDE es una de las funciones que mejor asemeja la tendencia de las tensiones residuales generadas por el mecanizado, ya que se han dejado de lado las regresiones polinómicas mayores de segundo grado.

En cuanto a las direcciones en las que se han hecho las medidas, se puede observar que la diferencia entre ambas direcciones es diferente en cuanto a los dos tipos de modelos. En concreto, la diferencia entre las direcciones difiere en un 0,1 en cuanto al modelo polinómico y el realizado mediante la FCDE. Por otro lado, si se analizan los coeficientes obtenidos mediante las diferentes combinaciones polinómicas realizadas, se visualiza que las regresiones de segundo grado obtienen mejores resultados. Sin embargo, esta mejora no es remarcable y menos en cuanto al modelo realizado mediante la FCDE, ya que en cuanto a la rotación de -90° la mejora asciende a un valor de 0,05, pero en el caso de la rotación de 0° la mejora es únicamente de 0,004.

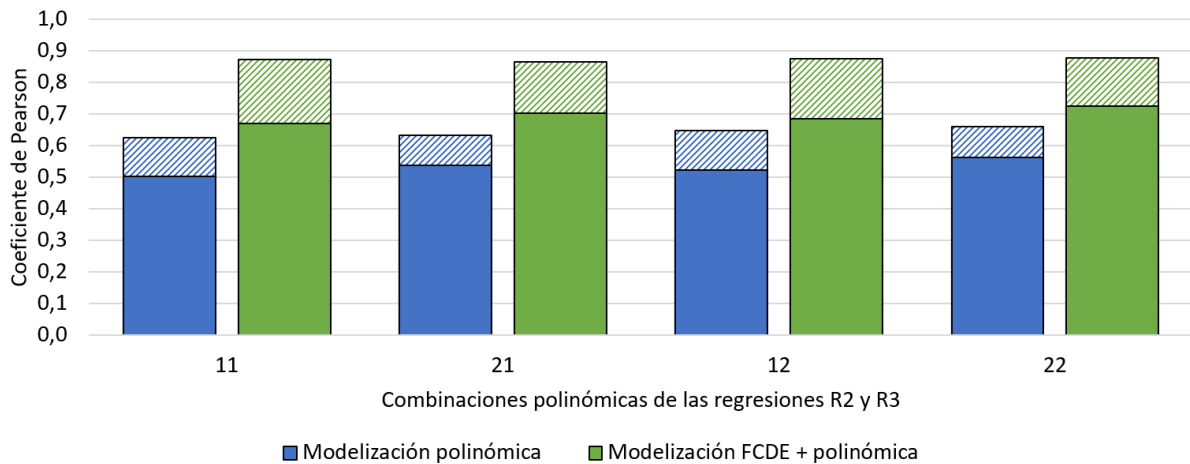


Ilustración 77. Validación de los modelos mediante el coeficiente de Pearson.

Realizado el análisis de la gráfica anterior, se debe remarcar que los valores obtenidos y, en concreto, los obtenidos para el modelo realizado a partir de la FCDE, obtienen coeficientes de ajuste bastante satisfactorios, ya que para los resultados obtenidos en la dirección de corte se aproximan al coeficiente de ajuste de 0,9.

Prosiguiendo con la evaluación del modelo, en la Ilustración 78 se muestra el error medio obtenido para cada tipo de modelo, sus diferentes combinaciones polinómicas para la segunda y tercera regresión y dirección en la que se obtienen las medidas.

En primer lugar, se observa que la FCDE genera menor error que el obtenido mediante la modelización polinómicas. Este hecho está relacionado con los valores de los coeficientes de ajuste obtenidos de la gráfica anterior, donde la FCDE obtiene mejores valores de ajuste que la modelización polinómica.

Por otro lado, a diferencia del gráfico obtenido para la evaluación mediante el coeficiente de Pearson, en este caso no se observa la misma tendencia en cuanto a los valores obtenidos para las diferentes rotaciones de goniómetro. Es decir, a pesar de que para la modelización mediante la FCDE el error medio disminuye en una medida aproximada de 13 MPa para la rotación de 0°, en el caso de la modelización polinómica la rotación de 0° muestra errores medios de mayor valor. Asimismo, se puede observar la disminución del error que supone la implementación de regresiones polinómicas de segundo grado, siendo esta disminución de alrededor de 5 MPa.

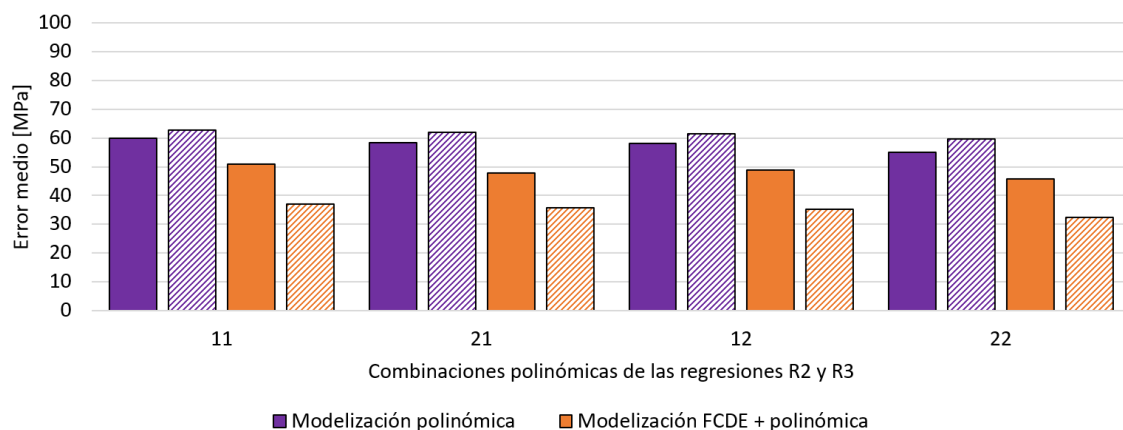


Ilustración 78. Error medio obtenido de los modelos construidos.

Por último, si se repara en los valores de error medio obtenidos de manera general, se observa que este alcanza valores entre 55 y 62 MPa en el caso del modelizado polinómico y entre 32 y 50 MPa en el caso del modelo realizado mediante la FCDE. A pesar de que estos valores no son extremadamente altos si se comparan con la máxima tensión residual compresiva, se podría decir que un error aceptable debería rondar los 20 MPa, ya que se trata de la variabilidad que genera el propio sistema de medición a las medidas, el cual se ha mencionado en el estudio de repetibilidad y reproducibilidad (*apartado 7.3.4*).

8.2. Validación del modelo

Analizados cada uno de los modelos elaborados, en las siguientes líneas se tratará de examinar los datos mencionados en el *apartado 7.4.3*, los cuales son necesarios para estudiar la eficacia del propio modelo para predecir perfiles de tensión residual. Para llevar a cabo este estudio se han hecho uso de dos coeficientes, el coeficiente de correlación de Pearson y el coeficiente de determinación, por ello, para analizar los resultados obtenidos en las siguientes gráficas se hará uso de ambos. De esta manera, se mostrarán mediante barras sólidas el valor correspondiente al coeficiente de Pearson y mediante barras con franjas horizontales estrechas el coeficiente de determinación.

En primer lugar, antes de comenzar con la validación individual de cada uno de los perfiles obtenidos, se realizará un estudio de los resultados de manera general. Por lo que se analizará la nube de puntos obtenida mediante los diferentes modelos, respecto a la nube de puntos que se debería obtener, la cual se ha obtenido de manera experimental.

De esta manera, en la *Ilustración 79* se muestran evaluados los modelos construidos mediante ambos coeficientes. Si se observan los valores obtenidos mediante un coeficiente y el otro se observa que la diferencia es mínima, por lo que de acuerdo con el *apartado 6.7*, se podría decir que se trata de un caso en el que las variables muestran cierta linealidad.

Por otro lado, a diferencia de la evaluación del modelo donde los mejores valores se obtenían para combinaciones de regresiones de segundo grado, en este caso los mejores resultados se obtienen, para ambos tipos de modelado, en el caso donde tanto la segunda como la tercera regresión polinómica se realiza mediante polinomios de primer grado.

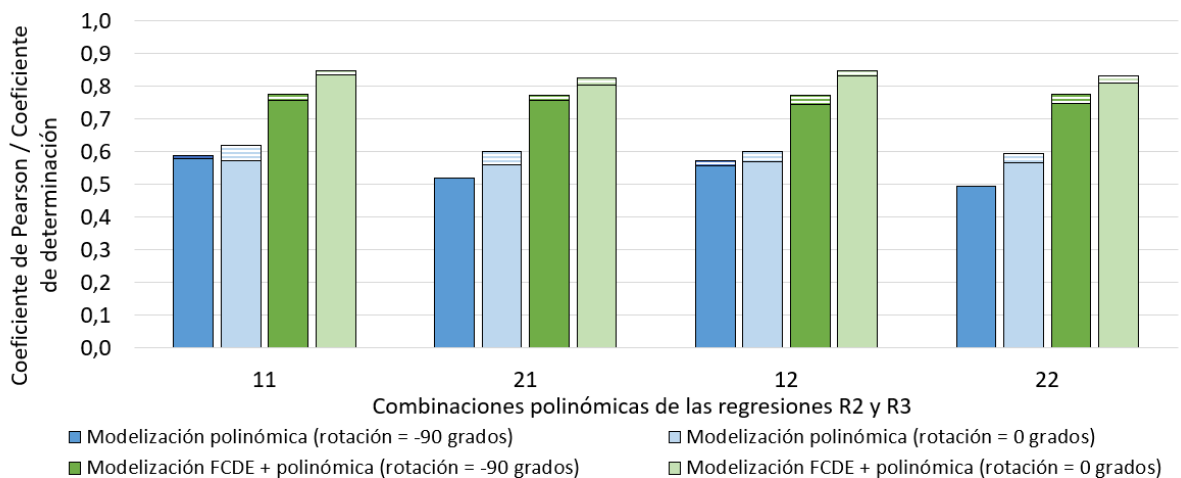


Ilustración 79. Validación de los modelos mediante el coeficiente de Pearson y coeficiente de determinación.

De la misma manera que en el apartado anterior, los modelos han sido evaluados también mediante el cálculo del error medio de las medidas (véase la *Ilustración 80*). En este caso, sí que se muestra que para ambos casos en la dirección de 0° se obtienen los valores más altos, donde se debe remarcar el error generado por la modelización polinómica, ya que este alcanza valores excesivamente altos. Sin embargo, si se centra la atención en el error generado por la modelización mediante la FCDE se observa que este error se acerca al valor mencionado anteriormente de 20 MPa. Dado que este error, ronda el valor de variabilidad del propio sistema de medición, se podría decir que los resultados obtenidos mediante este tipo de modelado son adecuados para realizar una predicción.

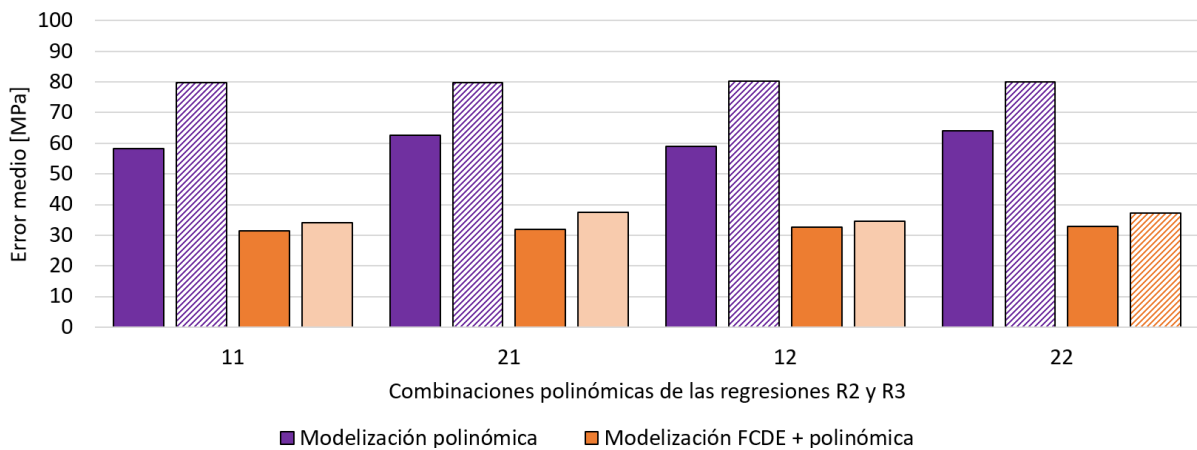


Ilustración 80. Validación de los modelos mediante el error medio.

Siguiendo con el orden establecido, se proseguirá el estudio mediante el análisis de los resultados de validación obtenidos mediante la comparativa entre el perfil de tensiones experimental y el perfil predicho mediante los modelos basados únicamente en regresiones polinómicas. Se debe mencionar que por exceso de datos y con el objetivo de realizar gráficas más visuales los datos a mostrar se han dividido según la dirección de medida. Por lo que, en la *Ilustración 81* se muestran los resultados correspondientes a la dirección perpendicular a la velocidad de corte (-90°).

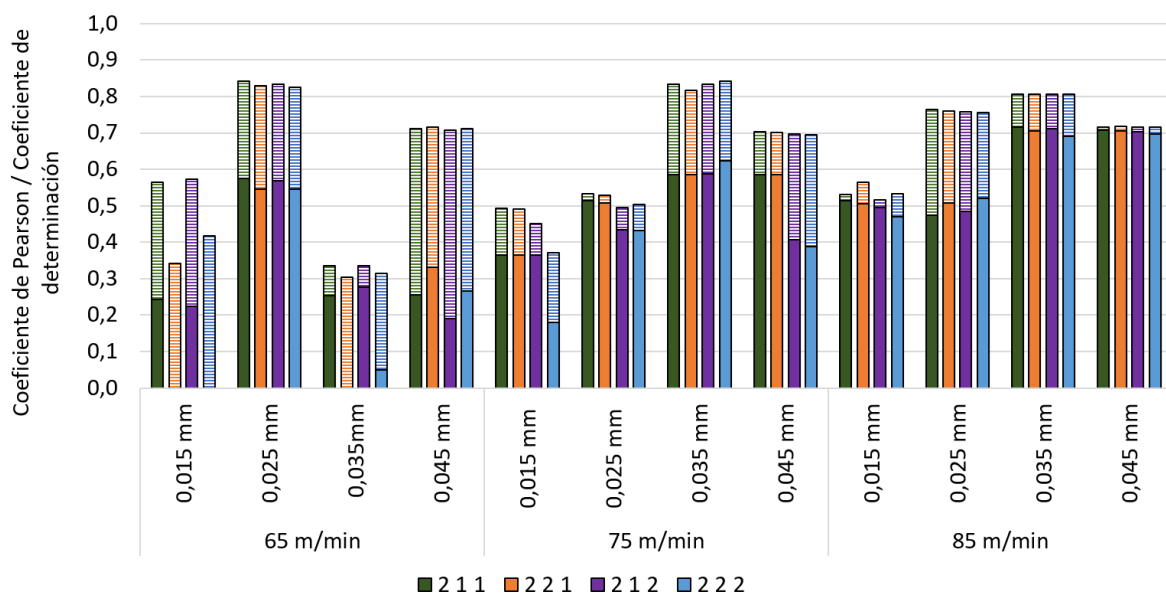


Ilustración 81. Validación de los modelos polinómicos (rotación=-90°).

A primera vista se puede observar que para algunas condiciones como, por ejemplo, 65 m/min, 0,015 mm y siendo las primeras dos regresiones segundo grado y la tercera de primer grado, no muestran valor del coeficiente de determinación. Esto se debe a que el coeficiente de determinación adquiere un valor negativo, por lo que se puede dar por nulo el valor, lo que indica que el promedio de los valores obtenidos mediante el modelo encaja mejor con el perfil experimental que la propia curva obtenida mediante el modelo. Dado que esta problemática solo se da con parámetros de corte más bajos y que a mayores velocidades de corte se obtienen por lo general coeficientes con mayor valor, con menor diferencia entre los coeficientes estudiados, se podría decir que el modelo es más eficaz siempre que supere la velocidad de corte nominal establecida por el fabricante de la herramienta.

Si se repara a la combinación de los grados polinómicos estudiados, según ambos coeficientes las predicciones óptimas se obtienen mediante la combinación de una primera regresión de segundo grado y de primer grado para las posteriores regresiones (211).

Por otro lado, si se analizan los resultados obtenidos en la dirección de la velocidad de corte (véase la *Ilustración 82*) se observa que los resultados son más favorables que en la dirección perpendicular, sobre todo en cuanto a los coeficientes de determinación. Sin embargo, al contrario que en la anterior gráfica, se observa que los mejores resultados no se obtienen a mayores velocidades de corte, pero sí que muestran mejoría con un aumento del avance por diente. Analizando las combinaciones polinómicas más adecuadas, al igual que en la gráfica anterior, los mejores resultados para ambos coeficientes se obtienen para una primera regresión de segundo grado y de primer grado para las regresiones consecutivas.

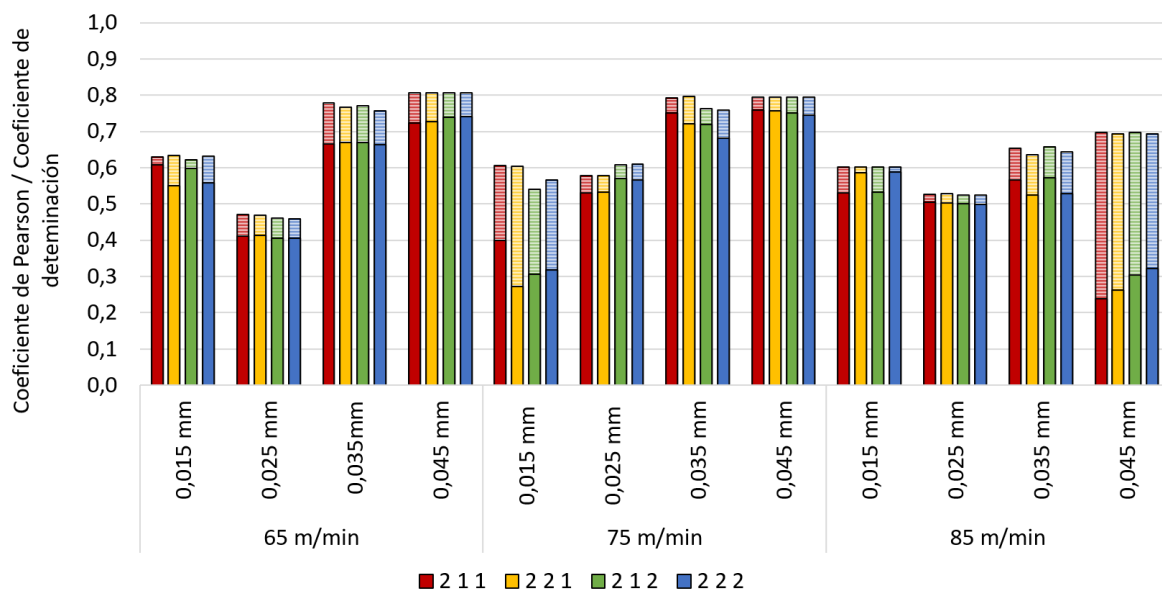


Ilustración 82. Validación de los modelos polinómicos (rotación=0°).

De la misma manera, mediante las siguientes gráficas se analizarán los resultados de la validación obtenidos de los modelos en los que se ha hecho uso de la FCDE para ajustar el perfil de tensiones.

La *Ilustración 83* muestra los resultados en la rotación de -90°, donde al igual que en las modelizaciones polinómicas, aparecen coeficientes de determinación de valor negativo, a pesar de que el coeficiente de Pearson muestre valores bastante más superiores. De la misma manera, muestra que los resultados más favorables se obtienen a mayores velocidades de corte, donde por lo general parece que aumenta la similitud entre los dos coeficientes de evaluación. Según las combinaciones posibles para realizar la

segunda y tercera regresión mediante polinomios de primer y segundo grado, realizando el promedio de los valores de los coeficientes por cada una de las combinaciones se obtiene que los mejores resultados para ambos coeficientes se adquieren cuando las regresiones posteriores a la regresión mediante la FCDE se realizan mediante polinomios de primer grado.

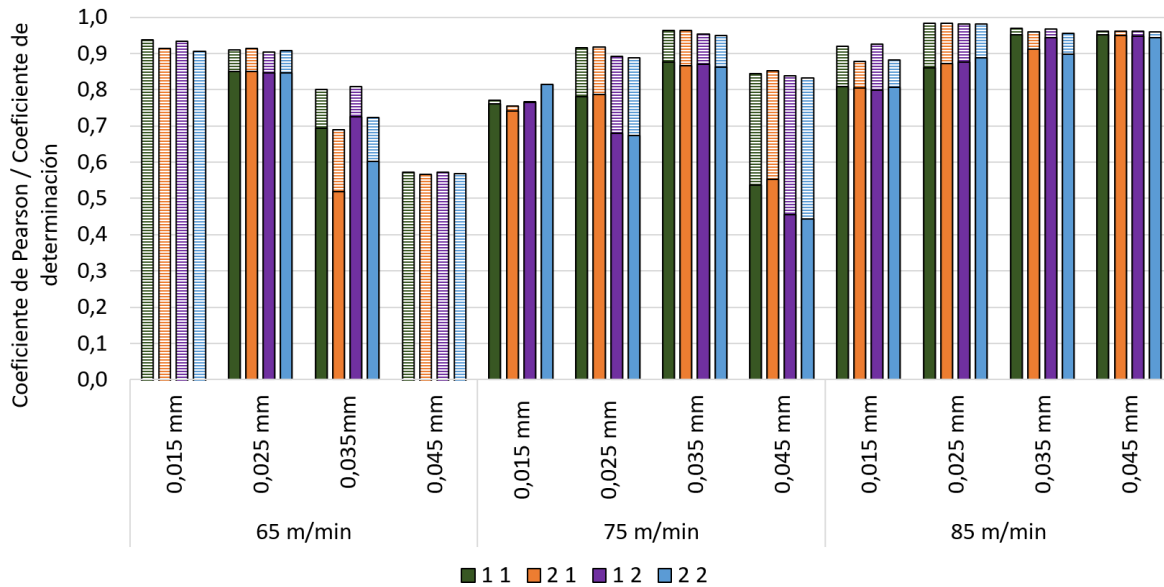


Ilustración 83. Validación de los modelos obtenidos mediante la FCDE y polinomios (rotación=-90°).

Reparando a la Ilustración 84, se observa una mejoría bastante remarcable, ya que por lo general los valores de ambos coeficientes se estabilizan en valores superiores al 0,7. En cuanto a los mejores resultados en cuanto a la velocidad de corte, se observa que se obtienen en valores cercanos a los nominales ($V_c=70$ m/min y $f_z=0,03$ mm). Por lo que se podría pensar que hacer uso de parámetros de corte indicados por el fabricante de la herramienta ayuda a obtener de perfiles de tensión característicos, siendo más uniformes a lo largo de la superficie, sin que se puedan generar fuerzas o temperaturas excesivas entre la herramienta y la superficie mecanizada.

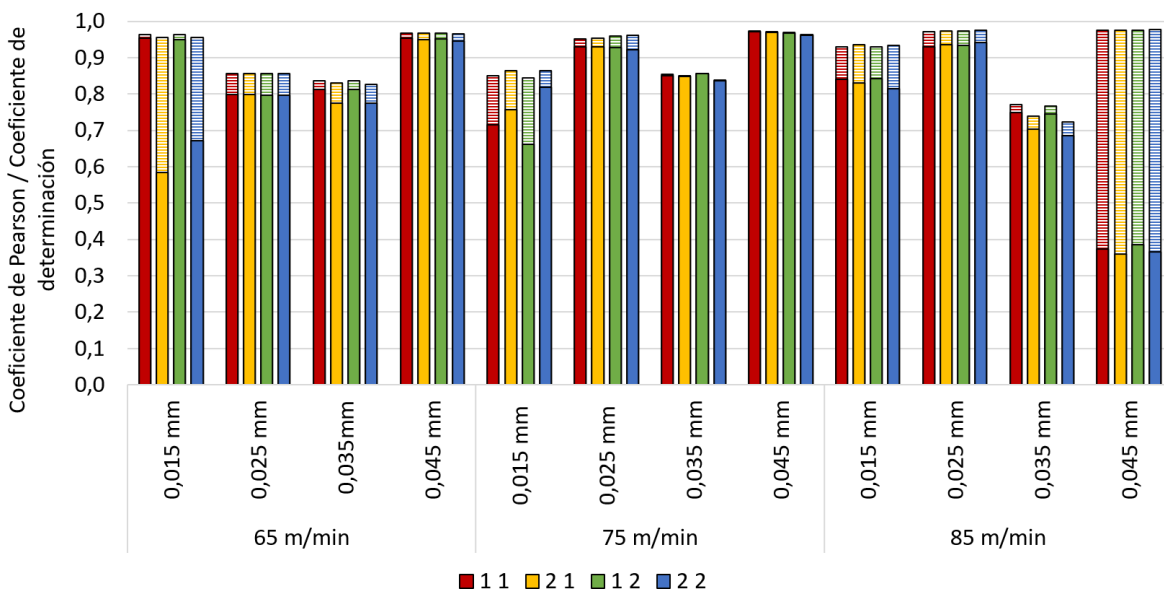


Ilustración 84. Validación de los modelos obtenidos mediante la FCDE y polinomios (rotación=0°).

Analizando, como en los casos anteriores, la combinación en cuanto a los grados polinómicos seleccionados para realizar la segunda y la tercera regresión, en este caso los coeficientes de mayor valor se obtienen para regresiones polinómicas de primer grado.

Por último, se muestra una comparativa de los dos tipos de modelos realizados, donde se muestra mediante barras con franjas diagonales el valor obtenido en dirección de la velocidad de corte y con barras con relleno sólido el valor en dirección perpendicular.

Esta comparativa ha sido realizada únicamente con la combinación más adecuada, en cuanto al grado polinomial, para cada uno de los tipos de modelo. Es decir, una primera regresión de segundo grado para el modelo polinómico y en cuanto a la segunda y tercera regresión de primer grado para ambos tipos de modelo. Observando la gráfica y la diferencia de valores, se puede decir, que la primera regresión, donde se ajusta la tensión en función de la profundidad en la que penetran estas tensiones, es la clave para generar un modelo que prediga las tensiones residuales generadas tras el mecanizado.

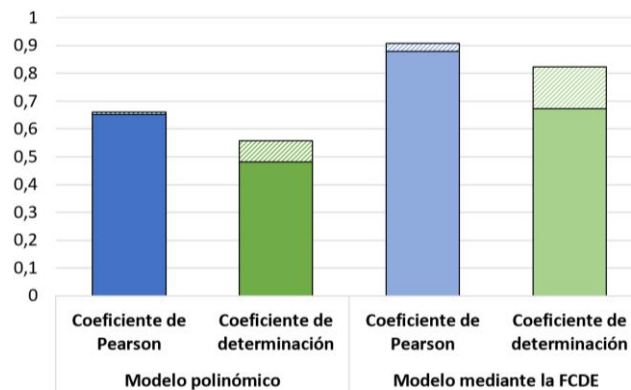


Ilustración 85. Coeficiente de Pearson y de determinación según el tipo de modelo.

Sin embargo, el objetivo del proyecto no se centra en realizar una comparativa de los dos tipos de modelo, ya que, como se ha mencionado, la FCDE es una función que modeliza el perfil de tensiones de manera más adecuada. En concreto, el objetivo principal es mostrar la capacidad que tiene una ecuación formada por una FCDE modelizando cada uno de los parámetros de la función con una función polinómica. Esta capacidad se puede ver reflejada mediante la Ilustración 86, donde se puede ver que tanto el coeficiente de correlación de Pearson, como el coeficiente de determinación muestran valores que superan el valor de 0,9. Lo que significa que el modelo diseñado para realizar la predicción de las tensiones residuales generadas tras el mecanizado de una pieza de titanio está cerca de la realidad.

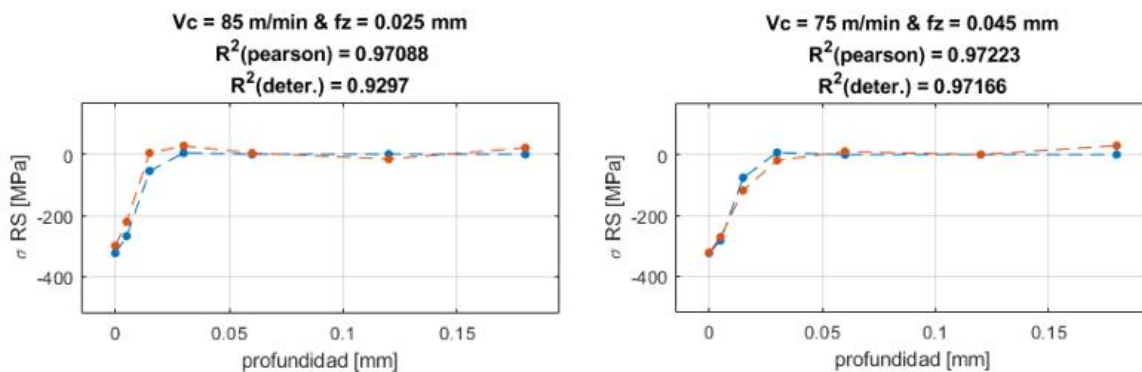


Ilustración 86. Capacidad de predicción del modelo empírico construido.

9. PLANIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En esta sección se describen las tareas que se han realizado por los diferentes miembros encargados de llevar a cabo el proyecto. Junto a la descripción se anotará el tiempo que se ha dedicado por cuando uno de los miembros del grupo que realizó el proyecto para así analizar la carga de trabajo y elaborar un diagrama de Gantt que muestre las distintas tareas, hitos y entregables.

9.1. Tareas

0. Introducción al tema

- Descripción: en esta primera fase se realizó una búsqueda de artículos que ayudaron a adquirir los conocimientos que se precisan para el trabajo que se ha realizado, ayudando a contextualizar el tema del proyecto e involucrarse en el estado actual de los avances en el campo. Posteriormente se procedió con el análisis de los mismos para poder garantizar una redacción de contenido consistente y adecuado a las necesidades actuales de la industria.
- Recursos humanos y carga de trabajo:

Tabla 30. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 0.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	96 (4h/día)
Ingeniero Senior	12

- Recursos técnicos: ordenador y documentos técnicos del tema.
- Duración: 24 días.

1. Estado del arte

- Descripción: esta fase se centró en hacer un resumen de todos los conocimientos que se deben adquirir para un buen entendimiento del informe, basándose en todos los artículos leídos y entendidos de la fase anterior. De esta manera, también se procedió a la redacción de estos apartados en el informe final y así poder centrar toda la atención a la elaboración del trabajo.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 31. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 1.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	88 (4h/día)
Ingeniero Senior	22
Director de proyecto	10

- Recursos técnicos: ordenador y documentos técnicos del tema.
- Duración: 22 días.

2. Introducción a la medición y tratamiento de RS

- Descripción: esta fase cuenta con 3 tareas, donde en ellas se introduce al usuario a la medición y al tratamiento de las tensiones residuales. Para ello, el ingeniero sénior le muestra al junior como realizar estas operaciones. Además, mediante unos puntos aleatorios se empezó a desarrollar el modelo de predicción en el software Matlab y así, de esta manera, poder coger experiencia en la programación.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 32. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 2.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	124 (4h/día)
Ingeniero Senior	62

- Recursos técnicos: ordenador, difractor de rayos-X, electropulidora, software XTronic y software Matlab.
- Duración: 31 días.

3. Comparativa de los métodos de medición de RS

- Descripción: en esta fase se llevó a cabo la comparación de medidas de tensiones residuales obtenidas mediante el método de difracción de rayos-X y *hole drilling* incremental. Para llevar a cabo esta fase se realizaron una serie de tareas, en concreto, se diseñó y se realizó el ensayo que se iba a realizar, obtenida mecanizada la superficie se midieron las tensiones residuales y finalmente se trataron los datos obtenidos por XRD. Por otro lado, en cuanto al método *hole drilling* se subcontrató el servicio de medición. Obtenidos todas las medidas por los dos métodos se trataron los datos y se realizó la comparativa.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 33. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 3.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	88 (4h/día)
Ingeniero Senior	44

- Recursos técnicos: ordenador, centro de mecanizado, difractor de rayos-X, electropulidora, software XTronic y software Matlab.
- Duración: 22 días.

4. Modelo y estudio de R&R

- Descripción: en esta fase se desarrollaron las fases más importantes para el desarrollo del trabajo, ya que se realizaron las tareas necesarias para construir el modelo empírico de predicción. Además, el diseño realizado para obtener las tensiones residuales a diferentes condiciones de mecanizado también se utilizó para obtener medidas extra para realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad del método difracción de rayos-X para obtener las tensiones residuales. Por ello, para ambos ensayos, modelo y R&R, se midieron las tensiones y se realizó el tratamiento requerido. Realizada la tarea anterior se centró la atención en la elaboración del modelo, dedicando 7 semanas, ya que es el propósito principal del trabajo.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 34. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 4.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	180 (6h/día)
Ingeniero Senior	85
Director de proyecto	5

- Recursos técnicos: ordenador, centro de mecanizado, difractor de rayos-X, electropulidora, software XTronic y software Matlab.
- Duración: 45 días.

5. Validación del modelo

- Descripción: Realizado el modelo, se llevó a cabo la validación del modelo mediante los ensayos extras realizados a otras condiciones diferentes a las utilizadas para elaborar el modelo. De esta manera, obtenidos los datos de la validación de la anterior fase se realizó el correspondiente tratamiento de los datos, siguiendo el mismo criterio utilizado para los datos del modelo. Obtenidos los datos, mediante Matlab se desarrolló un apartado para realizar la comparación de los perfiles de tensión experimentales y los predichos mediante el modelo desarrollado.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 35. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 5.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	120 (6h/día)
Ingeniero Senior	5

- Recursos técnicos: ordenador, software XTronic y software Matlab.
- Duración: 30 días.

6. Análisis de resultados

- Descripción: obtenidos todos los resultados de todos los análisis realizados en las fases y tareas anteriores, en esta fase se examinaron cada uno de ellos. Sin embargo, se dio suma importancia a los valores de la validación del modelo, ya que son los que representan con exactitud el ajuste que realiza el perfil predicho mediante el modelo con un perfil real. Realizado este análisis, se procedió a elaborar unas conclusiones de cara a evaluar el proyecto realizado.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 36. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 6.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	10 (4h/día)
Ingeniero Senior	4
Director de proyecto	5

- Recursos técnicos: ordenador.
- Duración: 20 días.

7. Redacción del trabajo

- Descripción: esta fase se ha llevado al cabo la redacción de todo el proyecto, ya que se busca redactar el informe de manera planificada sin tener que dedicar las últimas semanas antes de la entrega a la redacción completa del trabajo realizado. Además, se han podido realizar las correcciones sugeridas por ambas directoras del Trabajo de Fin de Máster.
- Recursos humanos y cargas de trabajo:

Tabla 37. Recursos humanos y carga de trabajo de la fase 7.

Recursos	Carga de trabajo [h]
Ingeniero Junior	30 (4h/día)
Ingeniero Senior	4
Director de proyecto	20

- Recursos técnicos: ordenador.
- Duración: 25 semanas.

9.2. Hitos

Definidas las tareas se deben mencionar los diferentes hitos que se han asignado en la planificación del proyecto. Estos hitos han son necesarios ya que realizan un control del trabajo, de esta manera, en el caso de que se de algún retraso en alguna de las tareas se podrá gestionar como solucionar dicho atraso para poder realizar la entrega del proyecto para la fecha indicada, en este caso, el 21-22 de septiembre del 2021.

- **H.1. Estado del arte redactado (31/03/21):** mediante este hito se puso de limite dicha fecha para la primera versión del estado del arte del proyecto. Para esta fecha se entregó el documento a la directora del proyecto, para que realizara una lectura y las correcciones necesarias.
- **H.2. Base del modelo empírico (23/04/21):** este hito fue útil para fijar la fecha para la que se debía tener una primera versión del modelo empírico que se quería realizar, en ella se habían fijado las ecuaciones que se iban a llevar a cabo para obtener la ecuación de la tensión residual en función de las variables seleccionadas para el modelizado.
- **H.3. Desarrollo del modelo empírico (02/07/21):** mediante este control se buscó tener el modelo desarrollado y evaluado. De esa manera, se dio margen para realizar modificaciones y mejoras antes de la fecha de entrega del informe.
- **H.4. Ultima versión del modelo empírico (16/07/21):** finalmente, en este hito con relación al modelo, se fijó el límite de fecha para realizar las modificaciones para mejorar la eficiencia del modelo para predecir las tensiones residuales. Además, para este hito se debía tener realizada la evaluación de los perfiles predichos por el modelo comparándolos con los perfiles experimentales.
- **H.5. Control final TFM (30/07/21):** mediante esta fecha se debía tener finalizada la redacción informe y el desarrollo del proyecto. De esta manera, se dejó el mes de septiembre para hacer los retoques y las mejoras necesarias.
- **H.6. Entrega del TFM (21/09/21):** gracias a este último hito se realizó el control para realizar la entrega del documento final.

9.3. Diagrama de Gantt

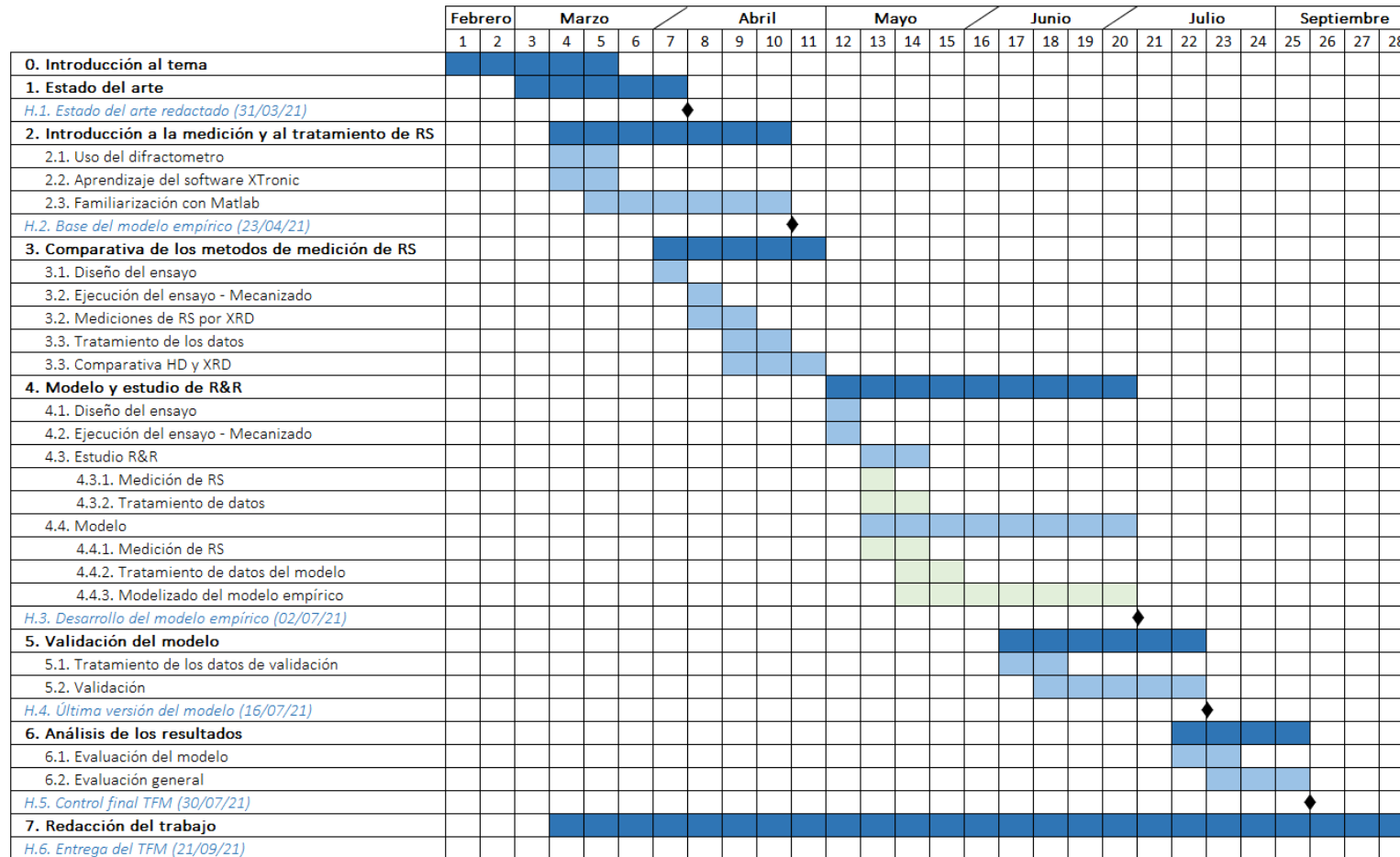


Ilustración 87. Diagrama de Gantt del proyecto.

10. DESCARGO DE GASTOS

En el siguiente apartado se muestra el descargo de gastos del proyecto de investigación que se ha llevado a cabo. De esta manera, se cuantifican los gastos totales que se generan para realizar un proyecto de este tipo, además gracias a esta cuantificación también se podrá evaluar si la inversión realizada para el proyecto es viable o no.

Para estructurar el descargo de gastos de forma ordenada se diferencian los costes por recursos humanos, gastos y amortizaciones.

Tabla 38. Horas internas para la realización del proyecto.

Horas internas			
Recursos	Horas	Coste horario [€/h]	TOTAL
Ingeniero Junior	736	6,00 €	4.416,00 €
Ingeniero Senior	238	30,00 €	7.140,00 €
Director de Proyecto	40	50,00 €	2.000,00 €
TOTAL			13.556,00 €

Tabla 39. Gastos generados para la realización del proyecto.

Gastos			
Concepto	Unidades	Coste unitario [€]	TOTAL
Material			
Ti6Al4V (370×180×30)	1	376,77 €	376,77 €
Ti6Al4V (260×140×25)	2	188,44 €	376,88 €
Tornillos varios	30	0,30 €	9,00 €
Herramientas de mecanizado			
Fresa KENNAMETAL	1	598,00 €	598,00 €
Insertos X500	5	2,97 €	14,83 €
Fresa MITSUBISHI	1	336,00 €	336,00 €
Electropulido			
Boquillas	3	0,10 €	0,30 €
Electrolito A3	1	131,00 €	131,00 €
Agua destilada	1	3,51 €	3,51 €
Subcontratación			
Medidas HD	3	304,16 €	912,48 €
TOTAL			2.758,77 €

Tabla 40. Amortizaciones del proyecto.

Amortizaciones						
Recursos	Coste unitario [€]	Vida útil [años]	Uso anual [h]	Coste horario [€/h]	Uso en proyecto [h]	TOTAL
Maquinaria						
Soraluce FMT	800.000,00 €	20	2400	16,67 €	40	666,67 €
Palpador	30.000,00 €	10	2100	1,43 €	0,5	0,71 €
Utillaje (mordaza + amarres)	10.000,00 €	30	2100	0,16 €	40	6,35 €
Instrumental XRD						
Difractómetro de rayos-X	140.000,00 €	20	1500	4,67 €	120	560,00 €
Tubo Ti	12.200,00 €	10	500	2,44 €	120	292,80 €
Patrón de referencia	1.700,00 €	5	100	3,40 €	0,5	1,70 €
Colimador	200,00 €	5	1500	0,03 €	120	3,20 €
Muestra de polvo	170,00 €	5	100	0,34 €	1	0,34 €
Instrumental electropulido						
Electropulidora	13.500,00 €	10	1000	1,35 €	16	21,60 €
Otros equipos						
Laser	100,00 €	10	1000	0,01 €	5	0,05 €
Microscopio	30,00 €	5	200	0,03 €	1	0,03 €
Mesa XY	2.000,00 €	20	1000	0,10 €	40	4,00 €
Licencias						
Microsoft Office	108,00 €	1	1000	0,11 €	500	54,00 €
Licencia XTronic	4.750,00 €	5	1500	0,63 €	200	126,67 €
Licencia Matlab	800,00 €	1	1080	0,74 €	400	296,30 €
Otros						
Ordenadores	1.000,00 €	10	2640	0,04 €	1200	45,45 €
Local	1.000.000,00 €	40	5280	4,73 €	1200	5.681,82 €
Material de oficina	30,00 €	1	2640	0,01 €	1200	13,64 €
TOTAL						7.775,32 €

Por último, en esta tabla se muestran los costes totales que se han generado a lo largo del estudio realizado. Para ello, también se han tenido en cuenta los costes indirectos, tales como la luz o el internet, los que se han supuesto como un 7% de los gastos totales. De la misma manera, para los imprevistos que se han dado a lo largo del proyecto se han estimado como el 5% de los costes directos e indirectos.

Tabla 41. Descargo de gastos total de proyecto.

Coste total	
Concepto	TOTAL
Horas internas	13.556,00 €
Gastos	2.758,77 €
Amortizaciones	7.775,32 €
Subtotal I	24.090,09 €
Indirectos (7%)	1.686,31 €
Subtotal II	25.776,39 €
Imprevistos (5%)	1.288,82 €
TOTAL	27.065,21 €

11. ANÁLISIS DE RIESGOS

De acuerdo con la planificación mencionada, existen varios riesgos que se deben tener en cuenta antes de proceder con la elaboración del proyecto, ya que los cuales pueden retrasar o imposibilitar las tareas para la realización del objetivo principal. Para poder realizar un análisis esquemático de los riesgos que se pueden dar a lo largo del proyecto, se procede a presentar la *Tabla 42* donde se enumera la lista de los riesgos que se pueden detectar en el desarrollo del trabajo y a su vez se evalúa la probabilidad que existe para que se dé, así como el impacto genera. En la columna de la derecha se explica cuáles son las medidas preventivas o correctoras que se pueden ejecutar para encaminar el proyecto a que se termine en la fecha establecida para realizar la entrega del informe.

Tabla 42. Análisis de riesgos del proyecto.

Análisis de riesgos				
N.º	Riesgo	Probabilidad	Impacto	Acción correctora
1	Averías en el centro de mecanizado	Baja	Alto	Mantenimiento preventivo y uso adecuado de la máquina
2	Averías en el difractor de rayos-X	Baja	Alto	Mantenimiento preventivo y uso adecuado del equipo
3	Descalibración del difractor	Media	Alto	Realizar calibraciones antes de cada grupo de medidas
4	Tiempo excesivo de la medición de tensiones residuales mediante XRD	Alta	Medio	Realizar un diseño de ensayos adecuado, con el cálculo de tiempos correspondiente
5	Averías en la electropulidora	Baja	Medio	Mantenimiento y uso adecuado del equipo
6	Suministro inadecuado o retraso del material	Baja	Medio	Realizar un proceso de control para evitar retrasos
7	Fallos en la ejecución de ensayos	Media	Medio	Verificar varias veces el proceso que se va a ejecutar
8	Desgaste excesivo o rotura de las herramientas de mecanizado	Media	Medio	No realizar pedidos de una única herramienta y utilizar los parámetros de corte recomendados
9	Problemas de licencia	Baja	Alto	Actualizar las licencias cuando se requiera
10	Bajas por enfermedad (COVID-19)	Alta	Medio	Utilizar siempre la mascarilla y actuar con responsabilidad
11	Fallos de programación en el desarrollo del modelo empírico	Media	Alto	Desarrollo mediante puntos de control que verifiquen el proceso
12	Fallos en el criterio para valoración y postprocesado de los resultados	Media	Medio	Documentación exhaustiva para que los miembros adquieran los conocimientos necesarios

Finalmente, de cara a hacer más representativo la tabla anterior en la *Tabla 43* se ubican los riesgos analizados en la matriz de probabilidad-impacto para reflejar la trascendencia de los riesgos planteados y prestar atención a los que deben priorizar.

Tabla 43. Matriz de probabilidad-impacto de los riesgos del proyecto.

Impacto	Alto	1, 2, 9	3, 11	
	Medio	5, 6	7, 8, 12	4, 10
	Bajo			
		Baja	Media	Alta
		Probabilidad		

De esta manera, se observa que se debe prestar atención al equipo de difracción de rayos-X, al desarrollo del modelo empírico y a la situación de pandemia que se está viviendo. Sin embargo, mientras que los primeros dos riesgos son controlables en cierta manera, las bajas por contagio del virus COVID-19 son casi inevitables, por lo que será uno de los riesgos que se deben asumir en estos momentos antes de realizar cualquier proyecto.

12. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este último apartado se exponen las conclusiones a las que se han llegado a lo largo de este trabajo. A su vez se plantean nuevas cuestiones e inquietudes surgidas durante este proyecto que pudieran ser el punto de partida de futuras investigaciones.

En vista de los resultados y vinculando con lo anterior, se concluye que:

- Para realizar mediciones de tensiones residuales, se puede hacer uso de numerosas técnicas. Sin embargo, habiendo realizado una comparativa entre el método XRD y Hole Drilling, se puede deducir que las diferentes técnicas no pueden ser comparadas cuantitativamente, si no de manera cualitativa, ya que cada técnica cuenta con sus propias características. Por esta razón, en el caso de querer medir tensiones residuales a pocas micras de la superficie, es necesario hacer uso de la difracción de rayos-X, ya que como se ha estudiado, el método de Hole Drilling Incremental no tiene tal fiabilidad cuando se trata de tensiones superficiales.
- A la hora de elaborar un modelo empírico son de vital importancia los datos de entrada, ya que estos son la base que cimienta dicho modelo. Por esta razón, a pesar del tedioso trabajo que supone la obtención de medidas mediante el método de XRD, es necesario realizar más de dos medidas por punto. De la misma manera, estos datos deben tratarse de manera correcta y objetiva, ya que de esto dependerá la eficacia que tenga el modelo para realizar la predicción.
- Antes de realizar medidas haciendo uso de un instrumento se debe evaluar la repetibilidad y reproducibilidad de dicho equipo, ya que será un factor importante que permitirá ofrecer medidas de calidad. En el caso mostrado, donde se ha realizado un estudio R&R del difractor de rayos-X, el porcentaje obtenido supera el %100. Este valor está unido al hecho de que las medidas de repetibilidad y reproducibilidad se relacionan con la tolerancia de la medida, la cual el rango entre medidas la supera notablemente. Además, el fenómeno a medir no es de valor constante, ya que este está influenciado por varios factores, por lo que hace imposible medir únicamente la variabilidad del sistema. Por lo que, para obtener únicamente la eficacia del sistema, se concluye que lo más correcto podría ser realizar dicho estudio realizando mediciones en un patrón libre de tensiones.
- De cara al modelo construido, haciendo uso de la FCDE y de regresiones polinómicas, se ha logrado modelizar el perfil de las tensiones residuales en función de la profundidad de penetración de estas tensiones, la velocidad de corte y del avance por diente. Gracias a esta combinación de funciones, en concreto, de la FCDE y de regresiones de primer grado, se ha logrado que, para algunos de los casos modelizados, los coeficientes de ajuste puedan alcanzar valores superiores a 0,9, pudiendo mostrar una predicción que se acerca a la tendencia real de los perfiles de tensión superficial.

En cuanto a líneas futuras se refiere:

- A pesar de que a lo largo del proyecto se han medido mediante un láser las profundidades de cada una de las huellas generadas por el proceso de electropulido, estas medidas no han podido tenerse en cuenta a la hora de generar el modelo, ya que estas no fueron tomadas de la forma más idónea, pudiendo suponer una mayor fuente de incertidumbre. Dicho esto, una manera de mejorar dicho modelo sería la implementación de un sistema de medición de profundidad fiable, ya que es un factor que influye en gran medida en la evolución del perfil de tensiones residuales.

-
- Como se ha mencionado en el estudio, para realizar el ajuste mediante la FCDE se deben seleccionar unos valores iniciales para que el programa empiece a ejecutarse y ajuste los puntos experimentales a una curva. Estos valores iniciales, que hacen referencia a los parámetros de la FCDE, han sido fijados tomando referencias de cada de los perfiles generados. Sin embargo, esta práctica no es la más adecuada ni la más eficiente, por lo que se debería buscar un método de optimizar este proceso.
 - Realizada la base de un modelo de predicción, sería un gran avance la implementación de más variables, las cuales tienen efecto a la hora de generar campos de tensión en la superficie como, por ejemplo, la geometría y las dimensiones de la herramienta, la profundidad de la pasada que se realiza, la temperatura que se genera por la fricción de la herramienta con la pieza y el desgaste de la herramienta.
 - Por otro lado, de cara a mejorar el propio modelo, podría ser influyente el tomar medidas de las tensiones residuales ya existentes en el material de partida antes de realizar el mecanizado de la pieza, es decir, las tensiones volumétricas ya que, de esta manera, se podrán obtener con mayor exactitud las distorsiones que se podrían generar en una pieza después del proceso de mecanizado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “La inversión de las empresas vascas en I+D lleva a Euskadi a un nuevo récord en 2019,” *El Español*, Dec. 30, 2020. https://www.elespanol.com/invertia/disruptores-innovadores/autonomias/pais-vasco/20201230/id-supone-pib-euskadi-debajo-media-ue/545945773_0.html (accessed Apr. 26, 2021).
- [2] AFM, “2020, un durísimo año que hemos afrontado con decisión | AFM.” <https://www.afm.es/es/noticias/2020-un-durisimo-ano-que-hemos-afrontado-con-decision> (accessed Apr. 26, 2021).
- [3] “Boeing: Commercial Market Outlook.” <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/> (accessed Apr. 26, 2021).
- [4] I. Lazoglu, D. Ulutan, B. E. Alaca, S. Engin, and B. Kaftanoglu, “An enhanced analytical model for residual stress prediction in machining,” *CIRP Ann.*, vol. 57, no. 1, pp. 81–84, 2008, doi: 10.1016/j.cirp.2008.03.060.
- [5] D. Chantzis, S. Van-der-Veen, J. Zettler, and W. M. Sim, “An Industrial Workflow to Minimise Part Distortion for Machining of Large Monolithic Components in Aerospace Industry,” *Procedia CIRP*, vol. 8, pp. 281–286, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.103.
- [6] P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, and I. S. Jawahir, “Recent advances in modelling of metal machining processes,” *CIRP Ann.*, vol. 62, no. 2, pp. 695–718, 2013, doi: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
- [7] L. D’Alvise, D. Chantzis, B. Schoinochoritis, and K. Salonitis, “Modelling of Part Distortion Due to Residual Stresses Relaxation: An aeronautical Case Study,” *Procedia CIRP*, vol. 31, pp. 447–452, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.03.069.
- [8] D. Ulutan and T. Özel, “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, no. 3, pp. 250–280, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.ijmactools.2010.11.003.
- [9] I. Llanos, J. L. Lanzagorta, and A. Beristain, “Part Distortion Modeling on Aluminum Slender Structural Components for Aeronautical Industry,” *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 158–162, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.213.
- [10] Y. Yang, M. Li, and K. R. Li, “Comparison and analysis of main effect elements of machining distortion for aluminum alloy and titanium alloy aircraft monolithic component,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 70, no. 9–12, pp. 1803–1811, Feb. 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5431-x.
- [11] D. Novovic, R. C. Dewes, D. K. Aspinwall, W. Voice, and P. Bowen, “The effect of machined topography and integrity on fatigue life,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 2–3, pp. 125–134, Feb. 2004, doi: 10.1016/j.ijmactools.2003.10.018.
- [12] I. Inagaki, Y. Shirai, T. Takechi, and N. Ariyasu, “Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry,” no. 106, p. 6, 2014.
- [13] Virginia García Navas, “OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS DE MECANIZADO MEDIANTE CONTROL DE TENSIONES RESIDUALES Y OTROS PARÁMETROS DE INTEGRIDAD SUPERFICIAL.”
- [14] Albert Flor de Lis Vidal, “Medición de tensiones residuales.”
- [15] B. Liščić, H. M. Tensi, and W. Luty, Eds., *Theory and Technology of Quenching*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992. doi: 10.1007/978-3-662-01596-4.
- [16] “What is Residual Stress?” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/residual-stress.aspx> (accessed Mar. 20, 2021).
- [17] G. E. Totten, M. A. H. Howes, and T. Inoue, Eds., *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.

- [18] “Medida de Tensiones Residuales – LMTR.” <https://blogs.upm.es/labstress/tensiones-residuales/> (accessed Mar. 20, 2021).
- [19] E. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovar, J. Peters, and H. K. Tönshoff, “Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes,” *CIRP Ann.*, vol. 31, no. 2, pp. 491–510, 1982, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60172-3.
- [20] D. Yang, Z. Liu, X. Ren, and P. Zhuang, “Hybrid modeling with finite element and statistical methods for residual stress prediction in peripheral milling of titanium alloy Ti-6Al-4V,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 108–109, pp. 29–38, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.01.027.
- [21] D. Yang, X. Xiao, Y. Liu, and J. Sun, “Peripheral milling-induced residual stress and its effect on tensile–tensile fatigue life of aeronautic titanium alloy Ti–6Al–4V,” *Aeronaut. J.*, vol. 123, no. 1260, pp. 212–229, Feb. 2019, doi: 10.1017/aer.2018.151.
- [22] “Tecnologías de Fabricación y Tecnología de Maquinas - Torneado (I) - Proceso.” Dpto. de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco.
- [23] M. Aurrekoetxea, L. N. López de Lacalle, and I. Llanos, “Machining Stresses and Initial Geometry on Bulk Residual Stresses Characterization by On-Machine Layer Removal,” *Materials*, vol. 13, no. 6, p. 1445, Mar. 2020, doi: 10.3390/ma13061445.
- [24] “Determination of residual stresses by X-ray diffraction – issue 2 GPG52,” *NPLWebsite*. <https://www.npl.co.uk/gpgs/residual-stresses-xray-diffraction> (accessed Mar. 22, 2021).
- [25] B. B. He, *Two-dimensional x-ray diffraction*, Second edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [26] “Measurement of residual stresses by the incremental hole drilling technique GPG53,” *NPLWebsite*. <https://www.npl.co.uk/gpgs/incremental-hole-drilling-technique> (accessed Mar. 22, 2021).
- [27] D. Peral Jiménez, “Desarrollo de métodos para la acotación de la incertidumbre en las medidas de tensiones residuales en materiales metálicos tratados por LSP,” Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2017.
- [28] G. S. Schajer, “Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I—Stress Calculation Procedures,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 110, no. 4, pp. 338–343, Oct. 1988, doi: 10.1115/1.3226059.
- [29] G. S. Schajer, “Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part II—Practical Application of the Integral Method,” *J. Eng. Mater. Technol.*, vol. 110, no. 4, pp. 344–349, Oct. 1988, doi: 10.1115/1.3226060.
- [30] M. Wan, X.-Y. Ye, D.-Y. Wen, and W. H. Zhang, “Modeling of machining-induced residual stresses,” *J. Mater. Sci.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–35, Jan. 2019, doi: 10.1007/s10853-018-2808-0.
- [31] F. A. V. da Silva, L. A. Denguir, and J. C. Outeiro, “Residual stresses prediction in machining of Inconel 718 superalloy using a constitutive model considering the state of stress,” *Procedia CIRP*, vol. 87, pp. 527–532, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.029.
- [32] K. Lin, W. Wang, R. Jiang, and Y. Xiong, “A Numerical Study on the Redistribution of Residual Stress After Machining,” in *Advanced Manufacturing*, Tampa, Florida, USA, Nov. 2017, vol. 2. doi: 10.1115/IMECE2017-71199.
- [33] A. L. Rocha D’ Oliveira, R. R. Rego, and A. R. de Faria, “Residual stresses prediction in machining: Hybrid FEM enhanced by assessment of plastic flow,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 275, p. 116332, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116332.
- [34] M. Wan, X.-Y. Ye, Y. Yang, and W.-H. Zhang, “Theoretical prediction of machining-induced residual stresses in three-dimensional oblique milling processes,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 133, pp. 426–437, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2017.09.005.
- [35] O. Fergani, X. Jiang, Y. Shao, T. Welo, J. Yang, and S. Liang, “Prediction of residual stress regeneration in multi-pass milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 5–8, pp. 1153–1160, Mar. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7464-9.

- [36] D. Ulutan, Y. M. Arisoy, T. Özel, and L. Mears, "Empirical Modeling of Residual Stress Profile in Machining Nickel-based Superalloys Using the Sinusoidal Decay Function," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 365–370, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.04.062.
- [37] J. Wang, D. Zhang, B. Wu, and M. Luo, "Prediction of distortion induced by machining residual stresses in thin-walled components," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 9–12, pp. 4153–4162, Apr. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-1358-y.
- [38] Fuh and Wu, "A proposed statistical model for surface quality prediction in end-milling of Al alloy," *Int J Mach Tools Manuf.*, p. 14, 1995.
- [39] L. Tan, D. Zhang, C. Yao, D. Wu, and J. Zhang, "Evolution and empirical modeling of compressive residual stress profile after milling, polishing and shot peening for TC17 alloy," *J. Manuf. Process.*, vol. 26, pp. 155–165, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.02.002.
- [40] K. Rao, "r² or R² — When to Use What," *Medium*, Aug. 04, 2020. <https://towardsdatascience.com/r%C2%B2-or-r%C2%B2-when-to-use-what-4968eee68ed3> (accessed Jul. 28, 2021).
- [41] G. James, D. Witten, T. Hastie, and R. Tibshirani, *An Introduction to Statistical Learning*, vol. 103. New York, NY: Springer New York, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
- [42] "Tackling Titanium." <https://www.ctemag.com/news/articles/tackling-titanium-0> (accessed Jul. 23, 2021).
- [43] J. Caldeirani Filho and A. E. Diniz, "Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process," *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, vol. 24, pp. 10–14, Mar. 2002, doi: 10.1590/S0100-73862002000100002.
- [44] "XTronic - Software User's Guide, V1.14." stresstech, Sep. 2020.
- [45] "Stresstech Support." [Online]. Available: <https://www.stresstech.com/contact-us/support/>
- [46] J. Guo, H. Fu, B. Pan, and R. Kang, "Recent progress of residual stress measurement methods: A review," *Chin. J. Aeronaut.*, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2019.10.010.
- [47] Infasdev, "Repetibilidad y Reproducibilidad," *Infas | Máquinas, equipos especiales y sistemas de medición*. <https://www.infas.com.ar/repetibilidad-y-reproducibilidad/> (accessed Jun. 24, 2021).
- [48] M. Botero, "Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad utilizando el Método de Promedios y Rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la Norma Técnica NTC-ISO/IEC 17025," no. 35, p. 7.

ANEXOS

En este apartado se adjuntan los anexos que se han referenciado a lo largo de informe:

- **Anexo I:** determinación del tiempo de electropulido en relación con la profundidad en la que elimina el material.
- **Anexo II:** informe de las medidas de las tensiones residuales realizadas por la empresa subcontratada Stresscraft, las cuales han sido obtenidas mediante el método de *Hole Drilling*.
- **Anexo III:** análisis del efecto que supone en las medidas de tensión residual, obtenidas mediante el método de XRD, la modificación del valor de las propiedades del material adjudicados mediante el software XTronic.
- **Anexo IV:** comparativa de los diferentes métodos para realizar del ajuste de pico de intensidad del proceso de difracción de rayos-X, respecto a la curva obtenida mediante el método de *Hole Drilling*.
- **Anexo V:** parámetros de las diferentes ecuaciones que conforman los diferentes modelos elaborados.
- **Anexo VI:** Normativa aplicada a lo largo del proyecto.

Anexo I. Tiempos del proceso de electropulido

Para determinar la cantidad de material eliminado al electropulir una superficie de la aleación de titanio Ti6Al4V se solicitaron unas medidas de profundidad a la empresa Zeiss. Esta empresa, líder y referente mundial en óptica y metrología de precisión, fue seleccionada para realizar las medidas por que cuenta con un laboratorio de metrología de ultraprecisión en las instalaciones de IDEKO. Se debe mencionar que estas medidas son anteriores al desarrollo de este proyecto, por lo que queda fuera del alcance de este.

El objetivo de realizar estas medidas fue obtener una relación de profundidad de eliminación de material con el tiempo de electropulido. Por ello, se realizaron electropulidos de 30 segundos en el dos puntos y se midieron cada una de las huellas obtenidas al transcurrir dicho tiempo. Las condiciones de electropulido se realizaron con una ratio de flujo de 15 y un voltaje de 45 V. De esta manera, se obtuvieron los siguientes valores.

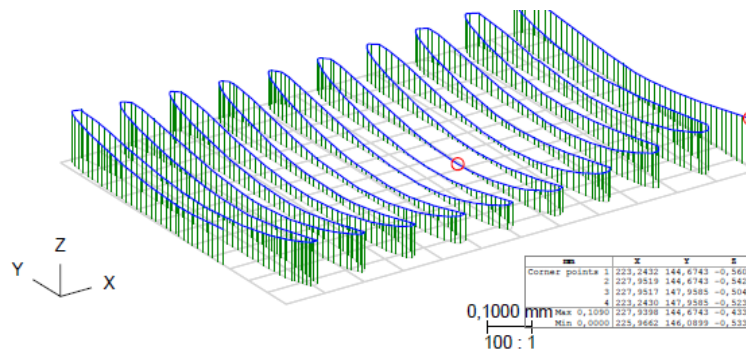


Ilustración 88. Imagen 3D de la forma de la huella obtenida mediante un escaneo mediante una máquina de medición por coordenadas.

Tabla 44. Medidas de profundidad obtenidas por la empresa Zeiss.

Huella	Tiempo [s]	Tiempo total [s]	P1		P2	
			Profundidad [mm]	Diferencia [mm]	Profundidad [mm]	Diferencia [mm]
1	30	30	0,001	-	0,042	-
2	30	60	0,034	0,033	0,075	0,032
3	30	90	0,065	0,031	0,109	0,034
4	30	120	0,098	0,033	0,137	0,028
5	30	150	0,129	0,031	0,158	0,021
6	30	180	0,152	0,023	0,189	0,031
7	30	210	0,173	0,021	0,220	0,031
8	30	240	0,192	0,019	0,246	0,026
9	30	270	0,215	0,023	0,275	0,029
10	30	300	0,239	0,024	0,297	0,021
Promedio				0,026		0,028

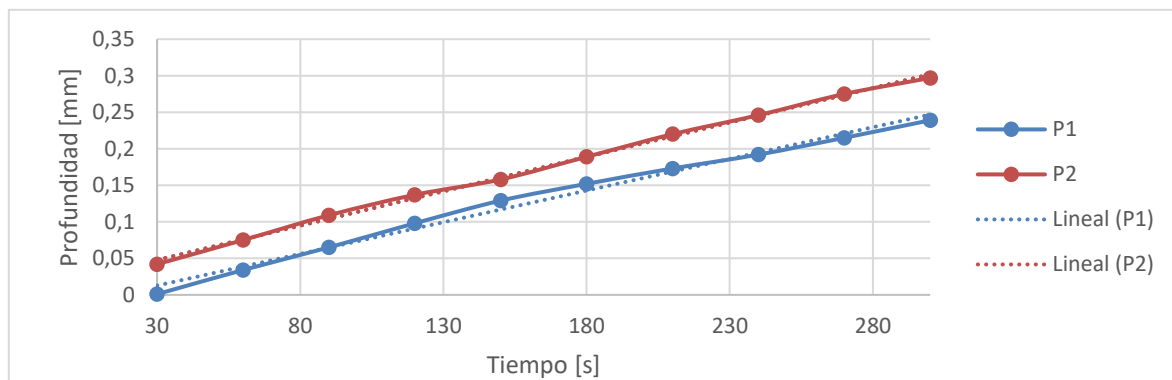


Ilustración 89. Relación lineal de la profundidad y el tiempo de electropulido.

Graficando las profundidades obtenidas en función del tiempo de electropulido se obtiene la gráfica de la *Ilustración 89*. En ella se puede ver esa tendencia prácticamente lineal entre tiempo y profundidad, donde la primera medida realizada en el punto P1 no se considera aceptable. Esto es debido a que al realizar el electropulido no ha alcanzado la intensidad adecuada, por lo que se puede dar como electropulido no realizado. De esta manera, descartando este primer punto y la diferencia entre una huella y su consecutiva obtenidos en ambos puntos puede aceptar la relación de eliminación de material de 0,03 mm al electropulir un punto durante 30 segundos.

Anexo II. Informe del proceso de Hole Drilling (Stresscraft)

Nota: en el siguiente informe se muestran las mediciones de 4 puntos. in embargo, los puntos examinados en este informe son los siguientes: H1, H2 y H4. Denominados a lo largo del Trabajo de Fin de Máster como: P1, P2 y P3.

	<p>Stresscraft Ltd <i>St. Winefride's Chapel, Pick Street, Shepshed, Loughborough, Leicestershire, LE12 9BB, UK</i> Tel: 01509 506019 Fax: 01509 601061 Email: stresscraft@btinternet.com Web: www.stresscraft.co.uk</p>
---	--

Export Control Rating: N/A

REPORT No. 04-947

TO IK4-IDEKO, GIPUZKOA, SPAIN

MILLED TEST-PIECE T1.3 IN Ti6Al4V

MATERIAL; AN ASSESSMENT OF RESIDUAL

STRESSES USING THE TARGET STRAIN

GAUGE / CENTRE HOLE DRILLING METHOD

J. S. LODGE & P. S. WHITEHEAD

APRIL 2021



CONTENTS

1. SUMMARY
2. INTRODUCTION
3. PROCEDURE
4. RESULTS
5. DISCUSSION OF RESULTS
6. REFERENCES

Figs. 1.1 to 1.8 Identification, gauge positions, gauge installation and incremental drilling
Fig. 2 Summary of residual stresses
Figs. 3 to 6 Results from individual target strain gauges



Report No. 04-947 p. 1.

1. SUMMARY

This assessment has been carried out in order to determine the magnitudes and distributions of residual stresses in a milled test-piece in Ti6Al4V material. Stresses have been determined using the target strain gauge / centre hole drilling method to a maximum depth of 512 μm . The test-piece supplied for assessment had been identified by indelible ink markings on the back surface, as shown in Fig. 1.1 :

T1.3

It was required to install and drill one 031-size target strain gauge at each of the four marked sites shown in Fig. 1.2.

The measurements have been carried out in two phases :

- Measurements at positions H3 and H4; test-piece bolted to mounting plate.
- Measurements at positions H1 and H2; test-piece cemented to mounting plate (i.e. no applied loads).

Target gauge installations and the arrangements for incremental drilling are shown in Figs. 1.3 to 1.8. Results from the individual gauges are given in Figs. 3 to 6 while a summary of stress distributions from the four gauges are presented in Fig. 2. Residual stresses at depths 24 μm , 256 μm and 512 μm and the extreme maximum principal stress at any depth to 512 μm are as follows :

Strain Gauge	Longitudinal direction σ_1 stress MPa			Transverse direction σ_3 stress MPa			Max. Princ. Stress σ_{max} ; any depth
	24 μm	256 μm	512 μm	24 μm	256 μm	512 μm	
H1	29	-72	36	-107	-221	67	109
H2	140	-128	-26	-53	-103	24	319
H3	181	-83	-10	-305	-4	24	181
H4	83	-81	62	-60	-134	80	86

2. INTRODUCTION

The project documentation (Ref. 1.1) describes the measurement positions required for this assessment. The test-piece supplied for assessment had been identified by indelible ink markings on the back face.

The type of target strain gauges used was Vishay Precision Group EA-06-031RE-120. The relevant material properties used for strain-to-stress data reduction (Ti6Al4V material) were :

- Young's modulus (E) = 115.0 GPa
- Poisson's ratio (μ) = 0.320

3. PROCEDURE

Target site surfaces were prepared for gauge installation by two passes of fine (400 grade) SiC paper followed by degreasing (acetone). Gauges were bonded using Loctite 407 adhesive with element 1 aligned in the longitudinal direction and element 3 in the transverse direction. These directions also refer to stresses σ_1 and σ_3 in subsequent results sheets. Target gauge installations are shown in Fig. 1.3; this Fig. confirms the orientation of gauge elements 1 and 3.



All hole drilling measurements were carried with the milled test-piece fitted to a flat mounting plate placed on a drilling frame for alignment with a miniature, PC-controlled, 3-axis drilling machine.

Prior to hole drilling, the opportunity was taken to measure the sensitivity of strains at the four gauges to the bolt clamping loads. Each gauge in turn was connected to a strain indicator and the gauge outputs recorded. The M8 bolts and nuts were first hand tightened; bolts were then finally tightened to a torque of 27 Nm using a torque wrench. It was then checked that a 0.05 mm slip gauge did not fit between the edges of the test-piece and the mounting plate. The final gauge outputs were recorded and changes in strain (final strain – initial strain) calculated. Changes in strains and stresses at the four gauges are :

Gauge	strain $\mu\epsilon$		stress MPa	
	change		change	
	ϵ_1	ϵ_3	σ_1	σ_3
H1	37	-537	-17	-67
H2	-23	-235	-13	-31
H3	-483	-341	-76	-63
H4	56	-469	-12	-58

For hole drilling measurements at positions H3 and H4, the test-piece was bolted to the mounting plate using four M8 bolts, washers and nuts as described above. For measurements at positions H1 and H2, the bolts were removed and the test-piece was cemented to the mounting plate. The test-piece positioning and cementing procedures were carried out with one of the target gauges connected to a strain indicator. In this way, it was ensured that no forces (including self-weight loading) were applied to the test-piece that could result in significant strains at the gauges.

Orbital drilling was carried out at each gauge using an inverted cone tungsten carbide cutter with a pre-set orbital eccentricity (one cutter per hole). Datum depth detection at each hole was carried out using an iterative command in the drill control software to advance the rotating drill bit in 2 μm increments. Between successive advances, orbit and withdrawal movements were carried out so that the target site could be inspected for penetration through the gauge backing material and adhesive layer. Orbital drilling was carried out using depth increments set at 4 x 16 μm + 4 x 32 μm + 8 x 64 μm to give a final hole depth of 0,7 mm.

Final hole diameters were measured using an optical head. All gauge mounting and drilling procedures were conducted in accordance with Refs. 2 and 4. Relaxed strain data was reduced to residual stresses using the Integral Method (Ref. 3). This method of calculation has been developed especially for the determination of residual stresses which vary with depth.

4. RESULTS

Results from the target gauges are shown in Figs. 3 to 6 and include the relaxed strains recorded at each drilling depth. Within the data reduction program, the strain data was subjected to a smoothing process and then reduced to direct (σ_1 and σ_3) and shear stress (τ_{13}) components at selected depth increments. Residual stresses were then resolved into maximum and minimum principal stresses (σ_{max} and σ_{min}) at each depth. The distributions of direct stresses (σ_1 and σ_3) versus depth are shown in the centre of the Fig. The lower part of each Fig. shows the layout of the three gauge elements with respect to the longitudinal and transverse directions and the directions of the principal stresses at depths 256 μm and 512 μm .



Results from the four gauges are summarised in Fig. 2. This Fig. lists the longitudinal and transverse stresses at depth 24 μm and the maximum, minimum and average stresses at this depth. Distributions of residual stresses over the depth range to 512 μm have been plotted in the lower part of Fig. 2.

Residual stresses (σ_1 and σ_3) at depths of 24 μm , 256 μm and 512 μm and the extreme maximum principal stress at any depth to 512 μm are listed in the Summary section at the beginning of the report.

5. DISCUSSION OF RESULTS

Results obtained from the data reduction include the following features :

- Summary Fig. 2 shows the degree of variability in near-surface residual stress magnitudes and distributions at the four gauges applied to the test-piece. The variability is greater in the group of transverse direction distributions. Near-surface longitudinal stresses are tensile and clearly greater than the corresponding transverse stresses. First increment (8 μm mid-depth) longitudinal tensile stresses lie within the range 27 MPa to 258 MPa while corresponding transverse stresses cover a wider range (-300 MPa to 65 MPa).
- Distributions of stresses in summary Fig. 2 show how near-surface longitudinal tension generally decays with depth. Longitudinal stress minima are developed in the depth range 112 μm to 176 μm . Thereafter, longitudinal compression decays with depth. It is most likely that stress distributions of this nature are associated with the milling process. For gauges at positions H1, H2 and H4, transverse stresses decay over the depth range 176 μm to 512 μm with average gradients of the order 1000 MPa / mm. Over this depth range the change of transverse stress at position H3 is significantly smaller.
- At depth 256 μm , residual stresses are compressive and lie within the ranges of -128 MPa to -72 MPa (σ_1) and -221 MPa to -4 MPa (σ_2).
- The table in the Summary section confirms that, at the final calculation increment (depth 512 μm), residual stresses detected at gauge H4 are tensile with values of 62 MPa (longitudinal) and 80 MPa (transverse). At gauges H1, H2 and H3, corresponding stresses are smaller and lie within the ranges -26 MPa to 36 MPa (σ_1) and 24 MPa to 67 MPa (σ_3).

The NPL Good Practice Guide (Ref. 4) lists a number of contributors to stress uncertainty, including factors arising from the component, the drilling process, the strain gauge and strain indicator. The strain gauge and indicator together are the greatest sources of uncertainty in the form of noise in the strain output. A random strain uncertainty in the range $\pm 3 \mu\epsilon$ applied to the strain data of gauges in this assessment produces uncertainties of $\sim \pm 36$ MPa in near-surface σ_1 and σ_3 stresses. This decreases to a minimum of ± 6 MPa at the mid-depth and then increases again to ± 14 MPa at the final increment because of reducing sensitivity. Other factors listed in Ref. 4 are linear in their effect and can be expressed as percentages. Many of the other factors have been evaluated; for the gauges covered here, the additional combined overhead is estimated at $\pm 7\%$. For a near-surface σ_1 or σ_3 stress of, say, 100 MPa decreasing to -300 MPa at depth 256 μm and then changing to 50 MPa at depth 512 μm , total uncertainty ranges over the depth range covered here may be calculated as :

- ± 43 MPa ($= \pm 36$ MPa $\pm 7\%$ of 100 MPa) at depth 8 μm ,
- ± 27 MPa ($= \pm 6$ MPa $\pm 7\%$ of -300 MPa) at depth 256 μm ,
- ± 18 MPa ($= \pm 14$ MPa $\pm 7\%$ of 50 MPa) at depth 512 μm .

It is to be noted however, that where the strain uncertainties combine to give extreme stress values, there is a clear increment-to-increment oscillation. This effect is not apparent in the stress distributions presented here.



Report No. 04-947 p. 4.

6. REFERENCES

- 1) Project Documentation :
 - 1.1 Email messages; RE : Quotation Request; Maria Aurrekoetxea; 15th March to 19th March 2021.
 - 1.2 Purchase Order No. P21PK0470; 22nd March 2021.
- 2) Stresscraft Ltd; Methods and techniques; The determination of residual stresses using the target gauge/centre hole drilling technique; Issue 12; P. S. Whitehead; August 2018.
- 3) Stresscraft Ltd; Program for determination of residual stresses using the centre hole drilling method; RS INT v5.6; May 2005.
- 4) National Physical Laboratory Good Practice Guide No. 53 Issue 2; The Measurement of Residual Stresses by the Incremental Hole Drilling Technique; P. V. Grant, J. D. Lord and P. S. Whitehead; February 2006.



Report No. 04-947



Fig. 1.1 Test-Piece identification



Fig. 1.2 Marked gauge positions



Fig. 1.3 Installation of strain gauges

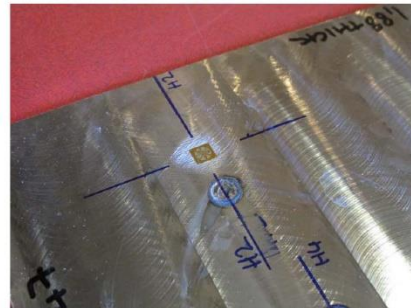


Fig. 1.4 Installation of strain gauge at position H2



Report No. 04-947

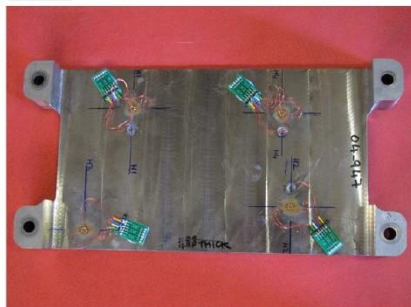


Fig. 1.5 Strain gauges wired to fixed terminals for monitoring

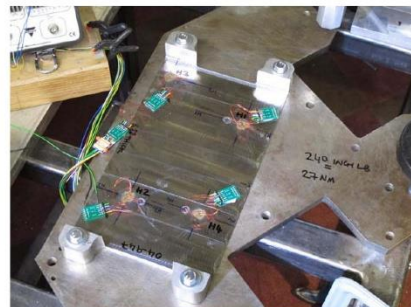


Fig. 1.6 Plate bolted to mounting plate



Fig. 1.7 Incremental drilling at strain gauge H4; plate bolted to mounting plate



Fig. 1.8 Incremental drilling at strain gauge H1; plate cemented to mounting plate

Stresscraft Report No. 04-947

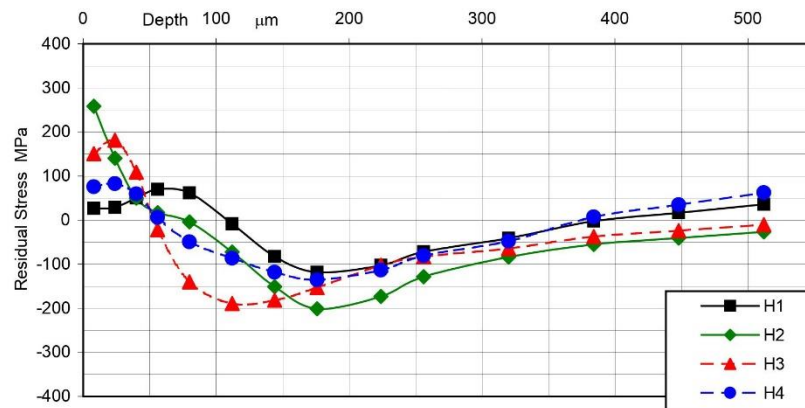
Milled Test-Piece; Ti6Al4V Material

Fig. No. 2

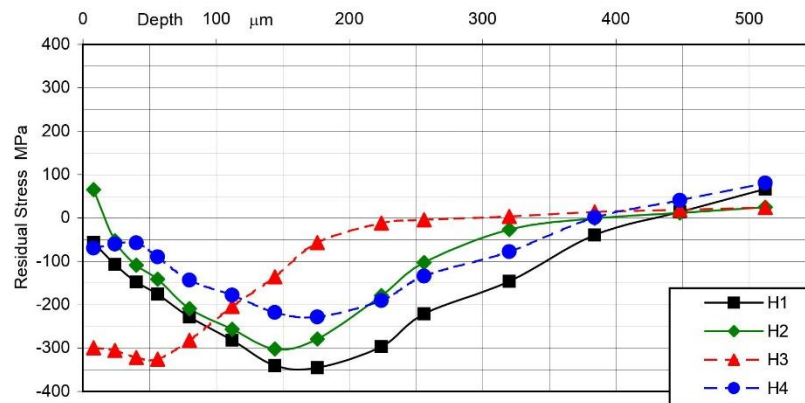
4 Gauges type 031RE

Summary of Residual Stresses at Positions H1 to H4

Gauge	Residual Stresses at depth 24 μm	
	longitudinal	transverse
H1	29	-107
H2	140	-53
H3	181	-305
H4	83	-60
maximum	181	-53
average	108	-131
minimum	29	-305



Distributions of longitudinal stresses vs depth



Distributions of transverse stresses vs depth

[Stresscraft RS INT v5.6]

Stresscraft Report No. 04-947

Milled Test-Piece, Ti6Al4V Material

Fig. No. 3

Gauge Type = 031RE

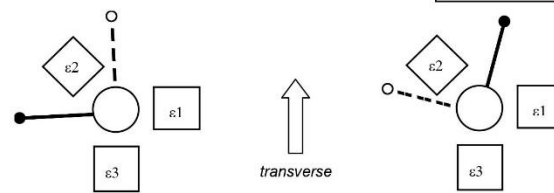
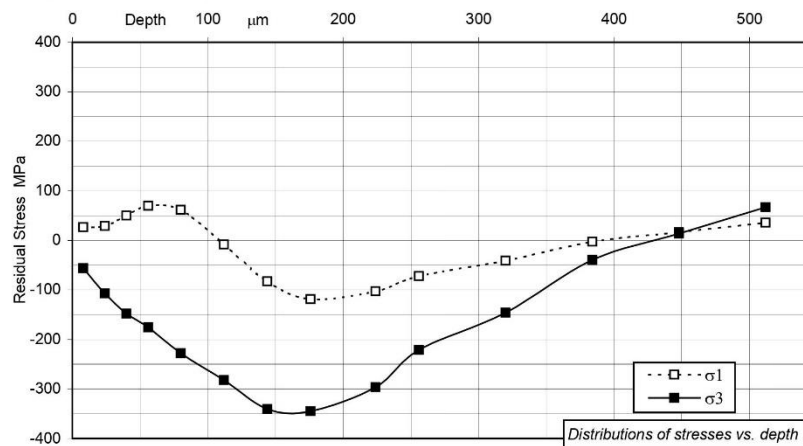
Hole diameter = 0.98 mm

Gauge No. H1

depth μm	Relaxed Strains ($\mu\epsilon$)					
	measured			smoothed		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
16	-2	7	2	-2	8	3
32	-4	16	9	-5	16	10
48	-9	26	19	-9	27	20
64	-15	38	31	-16	38	32
96	-31	65	63	-30	67	67
128	-42	100	109	-39	102	111
160	-42	141	163	-41	141	164
192	-39	180	219	-39	179	218
256	-32	248	325	-34	242	316
320	-32	293	395	-33	288	387
384	-35	319	432	-35	316	427
448	-38	334	450	-38	332	447
512	-39	342	455	-39	341	455
576	-39	346	458	-39	345	457
640	-38	347	457	-38	347	458
704	-36	348	458			

depth μm	Residual Stresses (MPa)				
	principal		direct		shear τ_{13}
	σ_{max}	σ_{min}	σ_1	σ_3	
8	101	-131	27	-56	108
24	80	-158	29	-107	97
40	91	-189	50	-148	99
56	109	-215	70	-176	106
80	92	-258	62	-228	98
112	9	-299	-8	-282	71
144	-74	-349	-83	-340	49
176	-117	-347	-118	-345	19
224	-103	-297	-103	-297	4
256	-72	-222	-72	-221	8
320	-40	-147	-41	-146	12
384	0	-42	-3	-40	11
448	26	5	17	14	10
512	70	33	36	67	10

[Stresscraft RS INT v5.6] PSW MAY05



Young's Modulus = 115.0 GPa Poisson's ratio = 0.320 Gauge No. H1

Stresscraft Report No. 04-947

Milled Test-Piece, Ti6Al4V Material

Fig. No. 4

Gauge Type = 031RE

Hole diameter = 0.98 mm

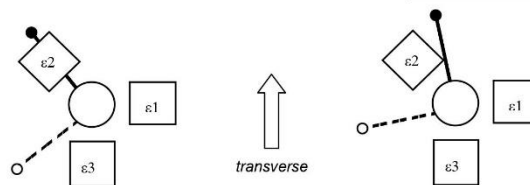
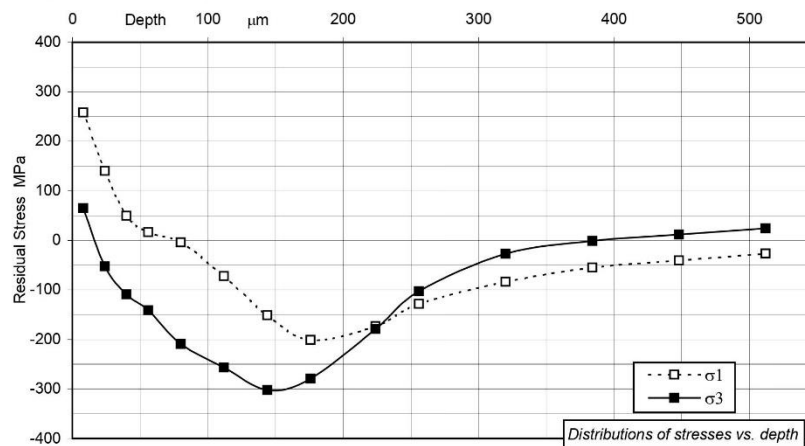
Gauge No. H2

depth μm	Relaxed Strains ($\mu\epsilon$)					
	measured			smoothed		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
16	-14	3	-3	-13	1	-1
32	-24	-2	3	-23	0	3
48	-29	0	9	-29	1	10
64	-33	4	17	-33	5	18
96	-44	18	44	-42	21	47
128	-46	42	83	-44	43	85
160	-38	70	128	-36	70	128
192	-20	96	172	-20	94	170
256	16	129	240	13	123	229
320	40	139	265	38	138	261
384	56	143	272	55	143	271
448	66	145	276	66	145	275
512	75	147	277	74	147	278
576	81	148	280	81	148	280
640	85	149	281	85	149	281
704	88	150	282			

depth μm	Residual Stresses (MPa)				
	principal		direct		shear
	σ_{max}	σ_{min}	σ_1	σ_3	τ_{13}
8	319	4	258	65	124
24	142	-54	140	-53	17
40	50	-109	50	-109	-4
56	19	-144	17	-141	21
80	0	-213	-4	-209	27
112	-71	-258	-72	-256	16
144	-151	-302	-151	-302	-7
176	-181	-299	-201	-279	-44
224	-114	-239	-173	-179	-62
256	-65	-167	-128	-103	-49
320	-9	-101	-84	-27	-36
384	7	-64	-55	-1	-23
448	17	-46	-41	12	-17
512	26	-28	-26	24	-10

[Stresscraft RS INT v5.6]

PSW MAY05



Stress directions at depth 256 μm

Stress directions at depth 512 μm

Young's Modulus = 115.0 GPa

Poisson's ratio = 0.320

Gauge No. H2

Stresscraft Report No. 04-947

Milled Test-Piece, Ti6Al4V Material

Fig. No. 5

Gauge Type = 031RE

Hole diameter = 0.97 mm

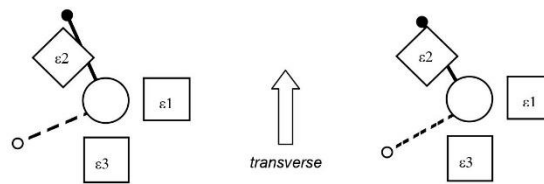
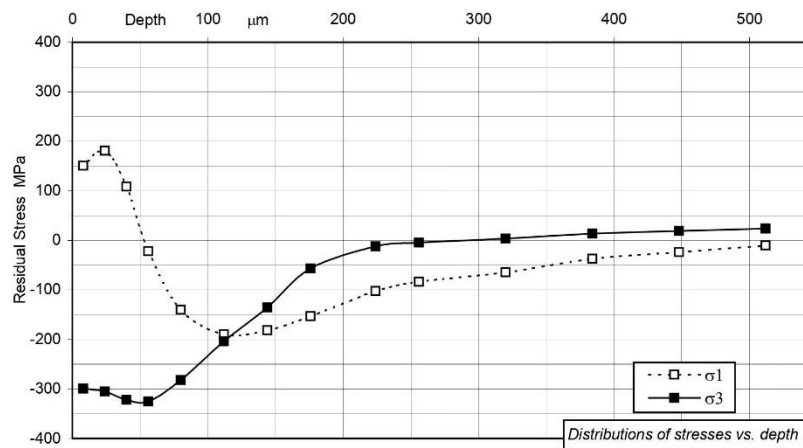
Gauge No. H3

depth μm	Relaxed Strains (μ ϵ)					
	measured			smoothed		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
16	-9	2	16	-11	2	17
32	-26	4	37	-25	5	37
48	-37	9	59	-35	9	60
64	-41	14	83	-39	14	83
96	-36	27	129	-33	27	127
128	-17	39	168	-17	38	166
160	3	48	197	3	47	195
192	24	53	216	23	53	214
256	57	59	240	55	57	237
320	80	57	253	79	57	251
384	97	53	258	95	53	258
448	107	48	262	106	48	262
512	114	43	264	113	43	264
576	118	39	264	118	39	264
640	121	36	263	120	36	263
704	122	33	262			

depth μm	Residual Stresses (MPa)				
	principal		direct		shear τ_{13}
	σ_{max}	σ_{min}	σ_1	σ_3	
8	151	-300	151	-300	-18
24	181	-305	181	-305	-6
40	109	-323	108	-322	-21
56	-11	-336	-22	-325	-59
80	-100	-323	-140	-282	-86
112	-111	-283	-190	-204	-85
144	-76	-241	-182	-135	-79
176	-26	-184	-153	-57	-63
224	7	-121	-102	-12	-45
256	14	-102	-83	-4	-42
320	21	-82	-64	3	-39
384	30	-54	-37	14	-33
448	34	-39	-24	19	-30
512	39	-25	-10	24	-27

[Stresscraft RS INT v5.6]

PSW MAY05



Stress directions at depth 256 μm

Stress directions at depth 512 μm

Young's Modulus = 115.0 GPa

Poisson's ratio = 0.320

Gauge No. H3

Stresscraft Report No. 04-947

Milled Test-Piece, Ti6Al4V Material

Fig. No. 6

Gauge Type = 031RE

Hole diameter = 0.95 mm

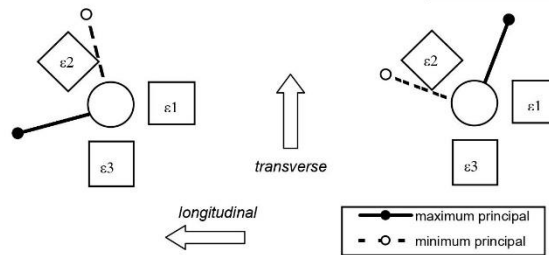
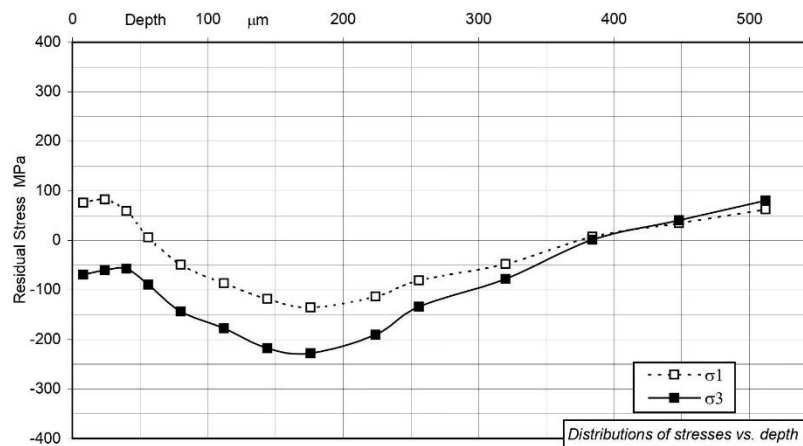
Gauge No. H4

depth μm	Relaxed Strains ($\mu\epsilon$)					
	measured			smoothed		
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
16	-4	1	4	-5	1	4
32	-10	2	9	-10	2	9
48	-15	3	12	-14	3	13
64	-17	4	18	-17	4	19
96	-17	4	35	-16	5	37
128	-12	9	61	-11	10	62
160	-3	16	90	-2	18	91
192	9	31	124	9	32	123
256	30	68	185	28	66	179
320	43	97	223	41	93	218
384	48	111	240	47	109	237
448	48	117	245	48	116	244
512	47	118	245	47	118	245
576	46	117	245	46	117	245
640	45	115	244	45	115	244
704	44	114	243			

depth μm	Residual Stresses (MPa)				
	principal		direct		shear
	σ_{max}	σ_{min}	σ_1	σ_3	τ_{13}
8	78	-72	76	-69	19
24	86	-64	83	-60	23
40	61	-59	59	-57	15
56	10	-94	6	-90	-21
80	-18	-174	-49	-143	-62
112	-51	-213	-87	-178	-67
144	-90	-246	-118	-218	-60
176	-125	-238	-135	-228	-32
224	-113	-191	-113	-190	8
256	-77	-138	-81	-134	14
320	-37	-88	-48	-78	21
384	19	-10	7	1	14
448	49	27	35	41	11
512	83	60	62	80	7

[Stresscraft RS INT v5.6] PSW MAY05

longitudinal
transverse



Young's Modulus = 115.0 GPa Poisson's ratio = 0.320 Gauge No. H4

Anexo III. Estudio del efecto del valor de las propiedades del material en la obtención de las tensiones residuales

En el siguiente anexo se va a analizar el efecto que supone en las medidas de la tensión residual, obtenidas mediante el método de XRD, la modificación del valor de las propiedades del material adjudicados mediante el software XTronic. Para realizar dicho estudio se hace uso de las medidas que se muestran en la *Tabla 13* del punto P1 para la rotación de 0°. De esta manera, en la siguiente tabla los valores del ensayo 1 hacen referencia a los parámetros fijados para obtener los valores mediante el método de XRD y los del ensayo 2 a los valores de las propiedades que se han fijado para las medidas del método de HD.

Tabla 45. Condiciones de los diferentes ensayos para el estudio del efecto del valor de las propiedades del material.

Propiedades	Ensayo 1	Ensayo 2
Módulo de Young (E)	120,2	115
Coefficiente de Poisson (ν)	0,36	0,32

De esta manera, en la siguiente tabla se muestran los valores de las medidas a diferentes profundidades, el error entre los valores de los diferentes ensayos y el porcentaje que supone respecto a las medidas del ensayo 1. Además, para realizar una evaluación coherente se muestra la incertidumbre de medida que existe en cuanto a los valores del ensayo 1.

Tabla 46. Valores de tensiones obtenidos mediante diferentes valores de las propiedades del material (P1-rotación=0°).

Medidas XRD mediante diferentes parámetros					
Depth [mm]	Ensayo 1		Ensayo 2	Error	%
	σ [MPa]	(\pm)	σ [MPa]		
0,000	-76,51	50,8	-53,1	23,44	30,6
0,030	-191,46	21,2	-188,7	2,73	1,4
0,060	-303,30	11,5	-297,1	6,18	2,0
0,090	-419,42	16,9	-408,7	10,75	2,6
0,120	-434,72	18,8	-419,8	14,93	3,4
0,150	-315,92	18,8	-302,3	13,66	4,3
0,180	-216,89	20,1	-204,1	12,83	5,9
0,210	-142,18	12,9	-135,1	7,09	5,0
0,240	-38,14	14,2	-36,2	1,93	5,1
0,270	-41,33	8,9	-39,3	2,01	4,9
0,300	39,86	11,5	46,3	6,48	16,3
0,330	8,81	13,9	15,9	7,06	80,1
0,360	-9,09	8,8	-6,5	2,57	28,3
0,390	24,08	17,9	30,8	6,68	27,7

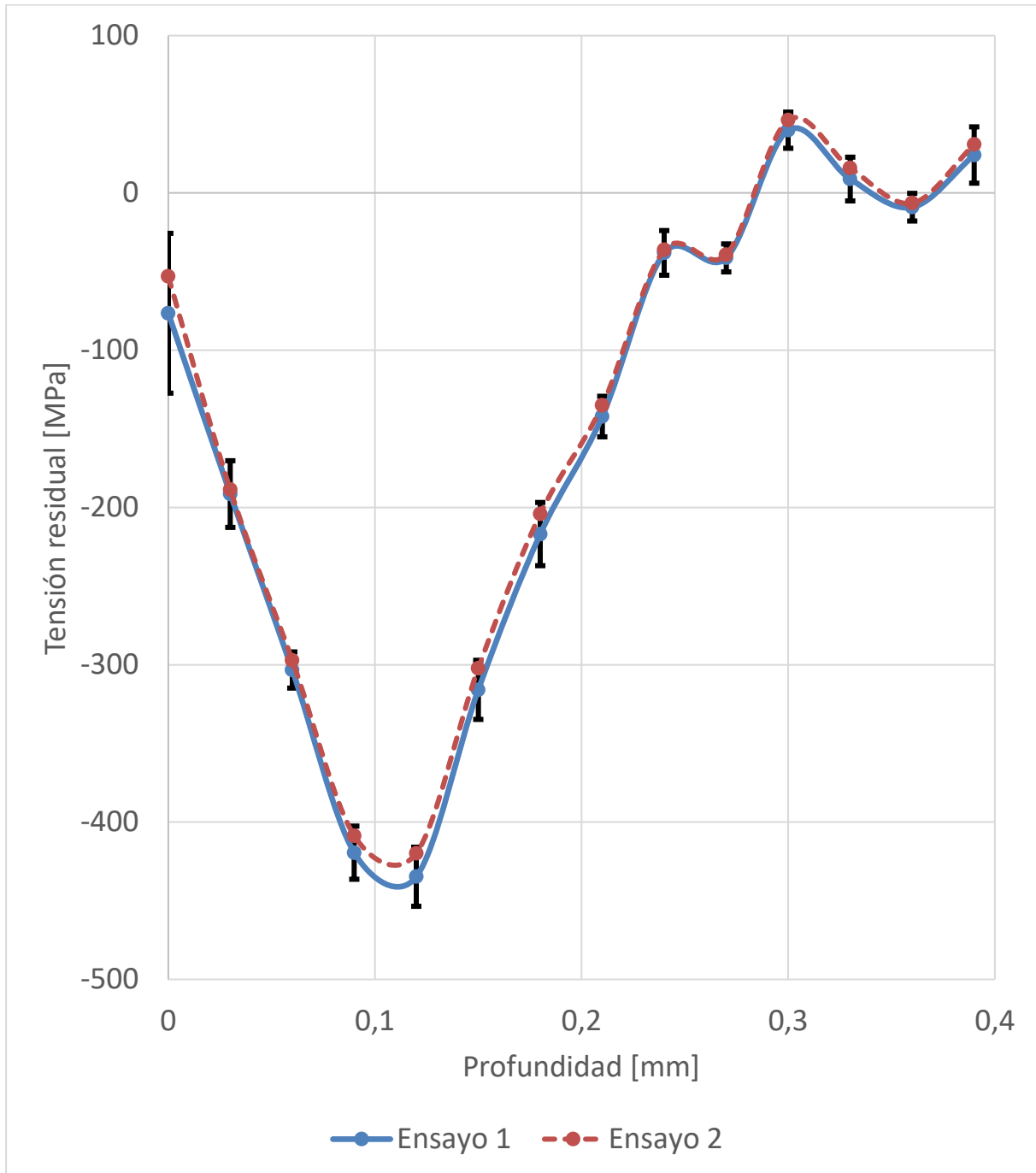


Ilustración 90. Comparativa de los perfiles de tensión residual obtenidos mediante el ensayo 1 y el ensayo 2.

Analizando la gráfica se puede observar que los datos obtenidos mediante el ensayo 2 están dentro del rango establecido por la incertidumbre del ensayo 1. Por esta razón, se puede deducir que el efecto que genera el cambio de valores los parámetros E y ν , para la obtención de los datos mediante el método de XRD, a los fijados para el método de HD no afecta en gran medida, ya que dicha variabilidad es menor que la incertidumbre de la propia medida.

Anexo IV. Análisis de los métodos de ajuste del pico de difracción

De los datos obtenidos en el *apartado 7.3.3*, en el siguiente anexo se muestra la comparativa de los diferentes métodos de ajuste del pico de difracción. Para ellos, se han obtenido las tensiones residuales mediante diferentes métodos de ajuste que ofrece el software XTronic y se ha calculado el error medio de cada una de las curvas respecto a la curva de los datos de *Hole Drilling*.

Entre los métodos de ajuste existente son los que se mencionan a continuación los que van a ser analizados. En cuanto al método *Cross correlation*, ya que es el método recomendado por los expertos, se ha evaluado también el tipo de ajuste que se realiza para el ruido de fondo del pico de intensidad, el cual puede realizarse mediante un valor constante o una regresión lineal.

- Cross correlation (Constante o lineal)
- Pearson VII
- Gauss
- Lorentz
- Pseudo-Voigt

De esta manera, en la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos por cada método a diferentes profundidades desde la superficie, donde en la última fila se muestra el error medio calculado para cada método de ajuste respecto a los valores de HD.

Tabla 47. Datos del método de medición de HD y de XRD obtenidos mediante diferentes métodos de ajuste.

Profundidad [mm]	Tensiones residuales [MPa]						
	HD	XRD					Pseudo-Voigt
		Cross correlation		Pearson VII	Gauss	Lorentz	
Constante	Linear						
0,000	40,07	201,55	65,06	63,06	66,85	95,06	14,66
0,030	-20,87	-161,50	-156,20	-166,52	-164,45	-188,19	-165,64
0,060	-70,48	-201,93	-182,62	-192,73	-192,78	-207,85	-193,66
0,090	-116,40	-252,81	-234,40	-240,85	-240,30	-255,91	-241,83
0,120	-162,69	-277,30	-258,26	-261,72	-261,68	-276,57	-264,27
0,150	-205,76	-277,58	-256,63	-260,88	-260,97	-275,87	-261,91
0,180	-210,86	-302,93	-282,15	-288,25	-288,31	-303,84	-288,37
0,210	-188,40	-262,37	-239,83	-245,97	-245,92	-261,08	-248,09
0,240	-144,42	-160,79	-137,21	-147,96	-148,02	-162,63	-150,07
0,270	-104,15	-121,64	-99,35	-109,77	-109,87	-124,30	-112,37
0,300	-82,63	-55,82	-33,66	-45,51	-45,54	-57,49	-47,19
0,330	-62,22	-36,95	-16,88	-28,90	-28,95	-42,44	-31,43
0,360	-35,03	32,75	55,49	56,71	57,59	38,01	49,65
0,390	-10,97	22,97	44,81	34,29	49,73	21,00	47,06
Error medio		79,29	65,16	65,79	67,05	74,08	66,90

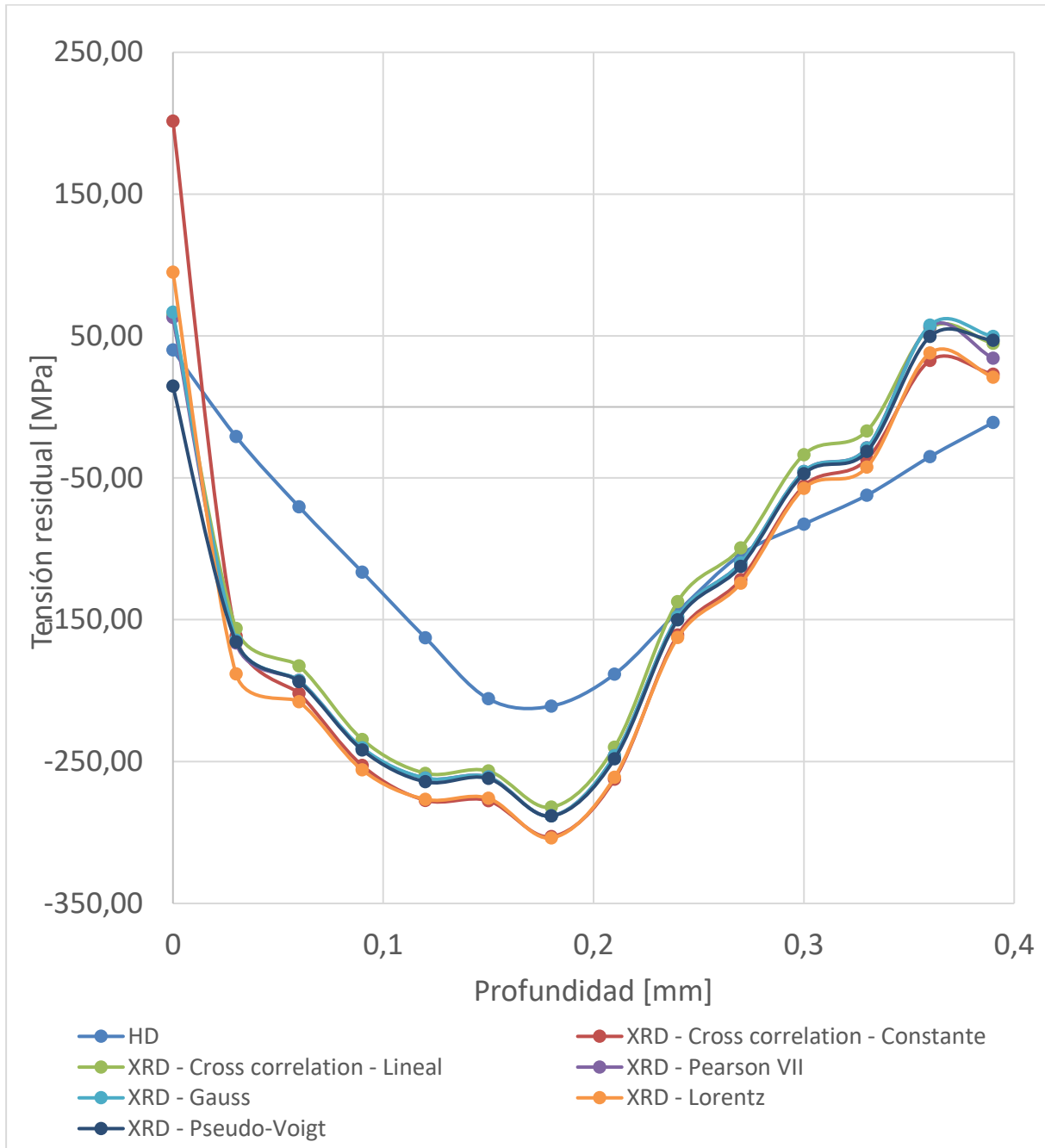


Ilustración 91. Comparativa de los métodos de ajuste de los picos de difracción.

Analizando los datos obtenidos se aprecia que la mayor diferencia entre los métodos de ajuste se da en las tensiones residuales de la superficie. Asimismo, el método que menor error genera entre los dos métodos de medición es el método de ajuste Cross correlation, ajustando el ruido de fondo a una regresión lineal.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el proyecto que se ha llevado a cabo mediante el método de ajuste Cross correlation (constante), por lo que se podría valorar como futura investigación realizar un estudio del efecto del método de ajuste del pico de intensidad en el propio modelo.

Anexo V. Parámetros de los modelos empíricos

En este apartado se muestran las ecuaciones que se han hecho uso para modelizar los perfiles de tensiones.

Modelización polinómica

Siguiendo con el orden de investigación y estudio establecido para dicho proyecto, a continuación, se muestran las ecuaciones polinómicas que se han elaborado para la construcción del modelo empírico.

Se debe mencionar que la terminología que se ha utilizado para nombrar los parámetros que constituyen la ecuación donde se modeliza la tensión residual se ha realizado utilizando el término a_{ijk} . Donde ijk representan el término del grado de polinomio que se ha hecho uso para realizar la cada una de las regresiones, siendo i la primera regresión, j la segunda y k la tercera. Ejemplo, si la primera regresión es de segundo grado el término i obtendrá los siguientes valores:

$$i = 2 \text{ (termino de 2º grado)}, 1 \text{ (termino de 1º grado)}, 0 \text{ (termino independiente)}$$

De esta manera, los parámetros que se han obtenido en cuanto al modelizado puramente polinómico se pueden observar en la *Tabla 48* y *Tabla 49*, dependiendo de la dirección en la que se han medido las tensiones residuales de la superficie mecanizada.

Modelización mediante la FCDE

De la misma manera que se han mostrado los coeficientes que forman las ecuaciones obtenidas para obtener la modelización polinómica, para el caso en el que la función utilizada para ajustar el perfil de tensiones en función de la profundidad es la FCDE, también se hace uso del término a_{ijk} . Sin embargo, en este caso el subíndice del término no representa únicamente los términos de la ecuación dependiendo el grado polinómico.

En este caso, el término i hace referencia a los parámetros de la FCDE como se ha mostrado en el *apartado 7.4.1.2*. Por otro lado, los términos j y k sí representan los términos de las regresiones polinómicas utilizadas para incluir en la ecuación de la tensión residual las variables relacionadas con los parámetros de corte del mecanizado realizado.

De este modo, los coeficientes obtenidos para este ajuste se pueden visualizar en la *Tabla 50* y *Tabla 51*.

Tabla 48. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante regresiones polinómicas (rotación=-90°).

Coeficientes de la función de ajuste polinómica – (rotación = -90°)

R1	R2	R3	a_{222}	a_{221}	a_{220}	a_{212}	a_{211}	a_{210}	a_{202}	a_{201}	a_{200}
1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	1	-	-	-	-	-1,802E+04	1,193E+06	-	3,902E+02	3,722E+04
2	2	1	-	-2,705E+05	1,119E+07	-	9,153E+02	4,098E+05	-	9,262E+01	-2,492E+04
2	1	2	-	-	-	1,464E+03	-2,377E+05	9,246E+06	-6,593E+01	1,028E+04	-3,998E+05
2	2	2	-1,958E+05	2,909E+07	-1,065E+09	1,517E+04	-2,274E+06	8,383E+07	-2,813E+02	4,228E+04	-1,572E+06
R1	R2	R3	a_{122}	a_{121}	a_{120}	a_{112}	a_{111}	a_{110}	a_{102}	a_{101}	a_{100}
1	1	1	-	-	-	-	-9,201E+02	6,997E+04	-	4,786E+01	2,673E+03
1	2	1	-	-2,110E+04	1,619E+06	-	-6,251E+03	5,104E+05	-	1,316E+02	-9,594E+03
1	1	2	-	-	-	3,492E+01	-6,158E+03	2,620E+05	-1,648E-01	7,258E+01	-3,580E+03
1	2	2	-7,220E+03	1,159E+06	-4,600E+07	5,404E+02	-8,730E+04	3,482E+06	-8,107E+00	1,348E+03	-5,418E+04
2	1	1	-	-	-	-	2,213E+03	-1,374E+05	-	-1,998E+01	3,798E+03
2	2	1	-	1,232E+05	-8,237E+06	-	-6,410E+03	4,392E+05	-	1,155E+02	-5,262E+03
2	1	2	-	-	-	-2,197E+02	3,516E+04	-1,346E+06	1,130E+01	-1,715E+03	6,593E+04
2	2	2	2,681E+04	-3,899E+06	1,392E+08	-2,096E+03	3,081E+05	-1,109E+07	4,079E+01	-6,003E+03	2,191E+05
R1	R2	R3	a_{022}	a_{021}	a_{020}	a_{012}	a_{011}	a_{010}	a_{002}	a_{001}	a_{000}
1	1	1	-	-	-	-	1,400E+02	-1,044E+04	-	-6,837E+00	3,592E+02
1	2	1	-	7,615E+04	6,292E+06	-	1,617E+03	1,238E+05	-	-3,004E+01	2,140E+03
1	1	2	-	-	-	-4,515E+00	8,172E+02	-3,527E+04	-1,365E-02	-4,789E+00	2,841E+02
1	2	2	8,909E+02	-1,547E+05	6,519E+06	-6,688E+01	1,165E+04	-4,916E+05	9,663E-01	-1,750E+02	7,455E+03
2	1	1	-	-	-	-	8,918E+01	-7,077E+03	-	-5,738E+00	2,543E+02
2	2	1	-	-2,186E+04	1,651E+06	-	1,619E+03	-1,226E+05	-	-2,978E+01	2,070E+03
2	1	2	-	-	-	-3,880E-01	1,474E+02	-9,211E+03	-1,995E-01	2,418E+01	-8,428E+02
2	2	2	3,391E+02	-7,273E+04	3,516E+06	-2,413E+01	5,238E+03	-2,553E+05	1,736E-01	-5,582E+01	3,025E+03

Tabla 49. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante regresiones polinómicas (rotación=0°).

Coeficientes de la función de ajuste polinómica – (rotación = 0°)

R1	R2	R3	a_{222}	a_{221}	a_{220}	a_{212}	a_{211}	a_{210}	a_{202}	a_{201}	a_{200}
1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	1	-	-	-	-	6,999E+03	-3,670E+05	-	-3,371E+02	1,869E+01
2	2	1	-	-1,424E+06	9,048E+07	-	1,067E+05	-6,701E+06	-	-1,904E+03	9,955E+04
2	1	2	-	-	-	-1,476E+03	2,285E+05	-8,487E+06	7,041E+01	-1,090E+04	3,873E+05
2	2	2	2,458E+03	-1,793E+06	1,040E+08	-1,649E+03	3,540E+05	-1,577E+07	7,312E+01	-1,287E+04	5,017E+05
R1	R2	R3	a_{122}	a_{121}	a_{120}	a_{112}	a_{111}	a_{110}	a_{102}	a_{101}	a_{100}
1	1	1	-	-	-	-	2,702E+02	-1,428E+04	-	-1,534E+01	2,141E+03
1	2	1	-	4,582E+02	6,904E+05	-	2,381E+02	-6,261E+04	-	-1,484E+01	2,900E+03
1	1	2	-	-	-	-7,866E+01	1,207E+04	-4,469E+05	3,330E+00	-5,148E+02	2,046E+04
1	2	2	-2,387E+03	3,585E+05	-1,244E+07	8,843E+01	-1,303E+04	4,238E+05	7,043E-01	-1,205E+02	6,774E+03
2	1	1	-	-	-	-	-9,466E+02	4,953E+04	-	4,326E+01	2,137E+03
2	2	1	-	2,481E+05	-1,504E+07	-	-1,831E+04	1,102E+06	-	3,161E+02	-1,441E+04
2	1	2	-	-	-	1,780E+02	-2,765E+04	1,029E+06	-8,911E+00	1,380E+03	-4,687E+04
2	2	2	-2,814E+03	6,721E+04	-3,052E+07	3,750E+02	-7,456E+04	3,165E+06	-1,201E+01	2,117E+03	-8,045E+04
R1	R2	R3	a_{022}	a_{021}	a_{020}	a_{012}	a_{011}	a_{010}	a_{002}	a_{001}	a_{000}
1	1	1	-	-	-	-	-3,712E+01	1,892E+03	-	7,573E-01	-1,805E+02
1	2	1	-	-6,105E+02	8,317E+04	-	5,617E+00	-3,930E+03	-	8,585E-02	-8,899E+01
1	1	2	-	-	-	1,356E+01	-2,072E+03	7,650E+04	-3,869E-01	5,880E+01	-2,309E+03
1	2	2	6,933E+02	-1,046E+05	3,896E+06	-3,497E+01	5,251E+03	-1,963E+05	3,757E-01	-5,627E+01	1,978E+03
2	1	1	-	-	-	-	-1,739E+01	8,571E+02	-	-1,926E-01	-1,804E+02
2	2	1	-	-4,625E+03	3,382E+05	-	3,063E+02	-2,282E+04	-	-5,280E+00	1,916E+02
2	1	2	-	-	-	9,403E+00	-1,428E+03	5,258E+04	-1,885E-01	2,808E+01	-1,217E+03
2	2	2	7,002E+02	-1,097E+05	4,190E+06	-3,961E+01	6,248E+03	-2,407E+05	5,818E-01	-9,255E+01	3,392E+03

Tabla 50. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante la FCDE y regresiones polinómicas (rotación=-90°).

Coeficientes de la función de ajuste FCDE – (rotación = -90°)

R2	R3	a_{122}	a_{121}	a_{120}	a_{112}	a_{111}	a_{110}	a_{102}	a_{101}	a_{100}
1	1	-	-	-	-	4,561E+05	-4,020E+04	-	-1,562E+01	2,033E+03
2	1	-	6,180E+04	-4,481E+06	-	-3,869E+03	2,735E+05	-	5,236E+01	-2,896E+03
1	2	-	-	-	1,644E+01	-2,009E+03	5,019E+04	-3,570E-01	3,793E+01	6,926E+01
2	2	-6,751E+02	1,631E+05	-8,194E+06	6,369E+01	-1,342E+04	6,238E+05	-1,100E+00	2,173E+02	-8,944E+03
R2	R3	a_{222}	a_{221}	a_{220}	a_{212}	a_{211}	a_{210}	a_{202}	a_{201}	a_{200}
1	1	-	-	-	-	3,636E-01	-3,298E+01	-	-1,434E-02	2,008E+00
2	1	-	3,863E+01	-1,905E+03	-	-2,340E+04	1,704E+02	-	2,815E-02	-1,188E+00
1	2	-	-	-	-1,042E-03	5,199E-01	-3,871E+01	-9,068E-05	-7,329E-04	1,509E+00
2	2	5,984E-04	3,854E+01	-2,902E+03	-1,084E-03	-2,178E+00	1,644E+02	-9,002E-05	4,166E-02	-1,683E+00
R2	R3	a_{322}	a_{321}	a_{320}	a_{312}	a_{311}	a_{310}	a_{302}	a_{301}	a_{300}
1	1	-	-	-	-	2,286E+01	-8,357E+02	-	-9,619E-01	1,428E+02
2	1	-	-1,229E+04	9,888E+05	-	8,831E+02	-7,005E+04	-	-1,448E+01	1,231E+03
1	2	-	-	-	3,771E+00	-5,427E+02	1,990E+04	-1,976E-01	2,868E+01	-9,442E+02
2	2	6,777E+02	-1,139E+05	4,716E+06	-4,367E+01	7,433E+03	3,102E+05	5,478E-01	-9,665E+01	4,243E+03
R2	R3	a_{422}	a_{421}	a_{420}	a_{412}	a_{411}	a_{410}	a_{402}	a_{401}	a_{400}
1	1	-	-	-	-	-3,869E-01	3,341E+01	-	1,753E-02	4,039E-01
2	1	-	-1,420E+01	1,090E+03	-	6,074E-01	-4,290E+01	-	1,902E-03	1,603E+00
1	2	-	-	-	2,782E-03	-8,042E-01	4,871E+01	1,002E-04	2,502E-03	9,547E-01
2	2	1,040E+00	-1,702E+02	6,808E+03	-7,000E-02	1,111E+01	-4,279E+02	1,244E-03	-1,847E-01	8,444E+00

Tabla 51. Coeficientes de la ecuación de modelado de tensiones residuales realizada mediante la FCDE y regresiones polinómicas (rotación=0°).

Coeficientes de la función de ajuste FCDE – (rotación = 0°)

R2	R3	a_{122}	a_{121}	a_{120}	a_{112}	a_{111}	a_{110}	a_{102}	a_{101}	a_{100}
1	1	-	-	-	-	-4,295E+02	3,244E+04	-	1,533E+01	-5,571E+02
2	1	-	8,208E+04	-6,500E+06	-	-6,175E+03	4,874E+05	-	1,056E+02	-7,707E+03
1	2	-	-	-	-5,729E+01	8,164E+03	-2,827E+05	1,639E+00	-2,305E+02	8,458E+03
2	2	-6,776E+03	1,098E+06	-4,377E+07	4,170E+02	-6,873E+04	2,781E+06	-5,814E+00	9,778E+02	-3,969E+04
R2	R3	a_{222}	a_{221}	a_{220}	a_{212}	a_{211}	a_{210}	a_{202}	a_{201}	a_{200}
1	1	-	-	-	-	-1,839E-01	1,281E+01	-	5,757E-03	3,870E-01
2	1	-	2,641E+01	-2,032E+03	-	-2,033E+00	1,551E+02	-	3,481E-02	-1,848E+00
1	2	-	-	-	-5,121E-02	7,497E+00	-2,688E+02	1,621E-03	-2,374E-01	9,303E+00
2	2	-6,228E+00	9,605E+02	-3,628E+04	3,847E-01	-5,974E+01	2,271E+03	-5,229E-03	8,192E-01	-3,061E+01
R2	R3	a_{322}	a_{321}	a_{320}	a_{312}	a_{311}	a_{310}	a_{302}	a_{301}	a_{300}
1	1	-	-	-	-	2,407E+01	-2,448E+03	-	-1,189E+00	2,220E+02
2	1	-	-4,649E+02	-5,239E+04	-	5,661E+01	1,220E+03	-	-1,701E+00	1,643E+02
1	2	-	-	-	1,156E+01	-1,710E+03	6,113E+04	-4,340E-01	6,399E+01	-2,165E+03
2	2	2,108E+03	-3,167E+05	1,154E+07	-1,360E+02	2,046E+04	-7,469E+05	1,885E+00	-2,845E+02	1,053E+04
R2	R3	a_{422}	a_{421}	a_{420}	a_{412}	a_{411}	a_{410}	a_{402}	a_{401}	a_{400}
1	1	-	-	-	-	5,047E-01	-3,802E+01	-	-1,727E-02	3,441E+00
2	1	-	-8,735E+01	7,083E+03	-	6,619E+00	-5,338E+02	-	-1,134E-01	1,123E+01
1	2	-	-	-	4,861E-02	-6,787E+00	2,293E+02	-1,334E-03	1,829E-01	3,898E+00
2	2	5,636E+00	-9,327E+02	3,808E+04	-3,459E-01	5,851E+01	2,436E+03	4,865E-03	-8,431E-01	3,799E+01

Anexo VI. Normativa aplicada

En este apartado se van a presentar el conjunto de normas que se han tenido en cuenta para la realización de los ensayos:

- **ISO 513:2004:** *Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – designation of the main groups and groups of application* / Clasificación y aplicación de materiales de corte duro para la eliminación de metales con filos de corte definidos – designación de los principales grupos y grupos de aplicación.
- **ASTM E837:** *Standard Test Method for Determining Residual Stress by the Hole-Drilling Strain-Gage Method* / Método de ensayo estándar para la determinación de la tensión residual por el método de la perforación de la galga extensométrica.
- **ISO 8688:1989:** *Tool life testing in milling* / Ensayo de vida de la herramienta en un proceso de fresado.