

***Máster Universitario en Integridad y Durabilidad de Materiales,
Componentes y Estructuras***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS
CARACTERÍSTICOS DE UN MATERIAL EN FUNCIÓN
DE LAS VARIABLES DE ENSAYO**

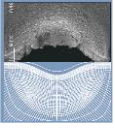
Realizado por: MIGUEL LOZANO GARCÍA

Tutores académicos: CRISTINA RODRÍGUEZ

Departamento: CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA DE FABRICACIÓN

Universidad de Oviedo

JULIO 2014



***Máster Universitario en Integridad y Durabilidad de Materiales,
Componentes y Estructuras***

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS
CARACTERÍSTICOS DE UN MATERIAL EN FUNCIÓN
DE LAS VARIABLES DE ENSAYO**

Tutor académico:

Alumno:

Firma: Cristina Rodríguez

Firma: Miguel Lozano García

Universidad de Oviedo

JULIO 2014

ÍNDICE

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	V
1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	6
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE MEDIDA MEDIANTE CORRELACIÓN DE IMÁGENES	7
3.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	7
3.2. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO	7
3.2.1. CALIBRACIÓN.....	7
3.2.1.1. DISTORSIÓN DE LAS LENTES.....	8
3.2.1.2. ORIENTACIÓN.....	9
3.2.2. CORRELACIÓN DE IMÁGENES.....	9
3.2.2.1. BÚSQUEDA MEDIANTE LÍNEA EPIPOLAR.....	11
3.2.2.2. PROFUNDIDAD.....	12
3.2.2.3. BÚSQUEDA POR TESELA.....	13
4. EQUIPOS UTILIZADOS Y PREPARACIÓN DE ENSAYOS	15
4.1. MÁQUINAS DE ENSAYO	15
4.1.1. MTS SYNERGIE.....	15
4.1.2. MTS 810.....	16
4.2. EQUIPO ÓPTICO DE MEDIDA	17
4.2.1.1. LENTES.....	18
4.2.1.2. PATRÓN DE CALIBRADO.....	19
4.3. PREPARACIÓN DE ENSAYOS	20
4.3.1. PINTADO DE LAS PROBETAS.....	20
4.3.2. CALIBRACIÓN EN EL EQUIPO ARAMIS 5M.....	21
4.3.3. CAPTURA DE IMÁGENES.....	24
4.4. TIPOS DE PROBETAS Y MATERIALES UTILIZADOS	25
4.4.1. ALEACIÓN DE NiTi.....	27
4.4.2. ACERO ESTRUCTURAL.....	27
4.4.3. ACERO PULVIMETALÚRGICO.....	28
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1. σ - ϵ <i>L</i> Y MÓDULO DE YOUNG EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN.....	29
5.1.1. PROBETAS DE NiTi.....	29
5.1.1.1. PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL.....	31
5.1.1.2. PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO.....	33

5.1.2.	σ - ε <i>L</i> Y MÓDULO DE YOUNG EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE REFERENCIA	35
5.1.2.1.	PROBETAS DE NiTi	35
5.1.2.2.	PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL	37
5.1.2.3.	PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO	39
5.1.3.	σ - ε <i>T</i> Y COEFICIENTE DE POISSON EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN.....	41
5.1.3.1.	PROBETAS DE NiTi	41
5.1.3.2.	PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL	43
5.1.3.3.	PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO	45
5.1.4.	σ - ε <i>T</i> Y COEFICIENTE DE POISSON EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE REFERENCIA	47
5.1.4.1.	PROBETAS DE NiTi	47
5.1.4.2.	PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL	48
5.1.4.3.	PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO	51
6.	CONCLUSIONES.....	53
7.	PRESUPUESTO	54
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	56
9.	ANEXOS	57
9.1.	ANEXO 1: Certificados de calibración.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Esquema de correlación de imágenes.....	10
Figura 3.2: Ayuda en búsqueda por línea epipolar	12
Figura 3.3: Esquema paralaje	13
Figura 3.4: Tesela identificada en ambos fotogramas	14
Figura 4.1: Máquina de ensayos MTS Synergie	15
Figura 4.2: Máquina de ensayos MTS 810	16
Figura 4.3: Equipo Aramis 5M	17
Figura 4.4: Características del equipo utilizado	18
Figura 4.5: Diferentes juegos de lentes del equipo Aramis 5M	19
Figura 4.6: Patrón de calibración y detalle de sus características.....	20
Figura 4.7: Esquema de escala de la fotografía	21
Figura 4.8: Resultado de la calibración.....	22
Figura 4.9: Tipos de probetas utilizadas en los ensayos. De izquierda a derecha: Probeta de NiTi, probeta de acero estructural y probeta de acero pulvimetalúrgico.....	25
Figura 4.10: Esquema de cuadrícula utilizada y dimensiones aproximadas de las probetas.....	26
Figura 4.11: Diagrama tensión-deformación en probeta de NiTi.....	27
Figura 4.12: Diagrama tensión-deformación en probeta de acero estructural.....	28
Figura 4.13: Diagrama tensión-deformación en probeta de acero pulvimetalúrgico.....	28
Figura 5.1: Curva tensión-deformación de una probeta de NiTi, variando la posición.....	29
Figura 5.2: Cálculo del Módulo de Young en NiTi, variando la posición.....	30
Figura 5.3: Curva tensión-deformación de una probeta de acero estructural, variando la posición.....	31
Figura 5.4: Cálculo del Módulo de Young en acero estructural, variando la posición.....	32
Figura 5.5: Curva tensión-deformación en acero pulvimetalúrgico, variando la posición ..	33
Figura 5.6: Cálculo del Módulo de Young en acero pulvimetalúrgico, variando la posición	34
Figura 5.7: Curva tensión-deformación de una probeta de NiTi, variando la longitud	35
Figura 5.8: Cálculo del Módulo de Young en NiTi, variando la longitud	36
Figura 5.9: Curva tensión-deformación de una probeta de acero estructural, variando la longitud	37
Figura 5.10: Cálculo del Módulo de Young en acero estructural, variando la longitud	38
Figura 5.11: Curva tensión-deformación de una probeta de pulvimetalúrgico, variando la longitud	39
Figura 5.12: Cálculo del Módulo de Young en acero pulvimetalúrgico, variando la longitud	40
Figura 5.13: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de NiTi, variando la posición.....	41
Figura 5.14: Cálculo del Coeficiente de Poisson en NiTi, variando la posición	42
Figura 5.15: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición	43
Figura 5.16: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición	44
Figura 5.17: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero pulvimetalúrgico, variando la posición	45

Figura 5.18: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero pulvimetalúrgico, variando la posición.....	46
Figura 5.19: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de NiTi, variando la longitud	47
Figura 5.20: Cálculo del Coeficiente de Poisson en NiTi, variando la posición	48
Figura 5.21: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero estructural, variando la longitud.....	49
Figura 5.22: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición	49
Figura 5.23: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero pulvimetalúrgico, variando la longitud.....	51
Figura 5.24: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero pulvimetalúrgico, variando la posición.....	52
Figura 9.1: Certificado de calibración de la banda extensométrica.	57
Figura 9.2: Certificado de calibración del patrón de calibración de las cámaras. Anverso.	58
Figura 9.3: Certificado de calibración del patrón de calibración de las cámaras. Reverso.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la posición para probetas de NiTi.....	31
Tabla 5-2 Tabla resumen del Módulo de Young en función de la posición para probetas de acero estructural.....	32
Tabla 5-3: Tabla resumen del Módulo de Young, en función de la posición, para probetas de acero pulvimetalúrgico.....	34
Tabla 5-4: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de NiTi.....	36
Tabla 5-5: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de acero estructural.....	38
Tabla 5-6: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de acero pulvimetalúrgico.....	40
Tabla 5-7: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de NiTi.....	42
Tabla 5-8: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de acero estructural.....	44
Tabla 5-9: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de acero pulvimetalúrgico.....	46
Tabla 5-10: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de NiTi.....	48
Tabla 5-11: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de acero estructural.....	50
Tabla 5-12: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de acero estructural.....	52

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de nuevas técnicas de análisis y toma de datos resulta imprescindible en un laboratorio de ensayos mecánicos. No obstante, los nuevos equipos y técnicas son tan sofisticados que la comprensión total de su funcionamiento puede quedar fuera del alcance del técnico que los maneja. Este es el caso de los equipos de video correlación de imágenes digitales, que permiten al usuario la obtención de un gran número de datos y parámetros que serían imposibles de obtener mediante otras técnicas de análisis de deformación. Dada la novedad de estos equipos es importante verificar la fiabilidad de los datos que se manejan comparando algunos de los resultados con los proporcionados por otras técnicas y evaluando como afectan ciertas variables en los resultados obtenidos.

Planteada esta problemática, este trabajo se centrará en el análisis de los resultados obtenidos al aplicar la técnica de video-correlación de imágenes en la realización de ensayos de tracción de diferentes tipos de materiales.

Para ello se analiza el efecto de dos variables de partida en la medida de deformaciones: 1) la posición de la zona de medida respecto a la zona central de la probeta, y 2) la longitud inicial de referencia.

La medida del modo en el que estas dos variables afectan a ciertas propiedades elásticas se realizará en distintos tipos de probetas y de materiales.

2. OBJETIVOS

El objetivo primordial de este trabajo es la puesta a punto de un procedimiento de análisis de resultados de deformación cuando se utiliza el equipo de video correlación en ensayos de tracción.

Otros objetivos serán:

- Analizar el efecto de la posición de medida tanto en la deformación transversal como longitudinal de una probeta de tracción
- Analizar el efecto de la longitud inicial de referencia en ambas deformaciones
- Analizar el efecto de ambas variables tanto sobre el módulo de elasticidad lineal (E) como sobre el coeficiente de Poisson (ν).

Los resultados de cada probeta se compararán entre sí y, con estas comparativas, se pretende determinar la importancia, si es que la tiene, de las dos variables mencionadas para el cálculo de los parámetros de caracterización.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO DE MEDIDA MEDIANTE CORRELACIÓN DE IMÁGENES

3.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Aunque el método fotogramétrico para la representación tridimensional del terreno existe desde hace casi 300 años (utilizando dibujos con diferentes perspectivas), ha sido desde la invención de la cámara fotográfica en 1859 cuando ha tenido más sentido y precisión. Un hito importante en la historia de esta técnica fue la aparición de la fotogrametría aérea, que disparó su uso para la creación de cartografía, sobre todo a raíz de las necesidades creadas en las dos guerras mundiales, donde su uso por parte de los cartógrafos, era imprescindible para obtener mapas precisos del terreno.

Los siguientes avances importantes en la historia de la fotogrametría fueron la invención del ordenador, que simplificó los cálculos y, posteriormente, la invención de las cámaras digitales. Estos dos avances tecnológicos combinados, son el origen de la técnica moderna, que deja a un lado las cámaras analógicas, los cálculos analíticos y los grandes restituidores, también analógicos.

Actualmente existe gran interés en el campo de la fotogrametría digital por correlación automática como técnica de medida de micro deformaciones, que se plasma en múltiples artículos que profundizan en aspectos tan importantes como el error y la incertidumbre en las medidas, tratando de minimizar sus efectos. (Error evaluation technique for three-dimensional digital image correlation., 2011).

3.2. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO

El conjunto de software y hardware permite capturar imágenes fotográficas desde dos cámaras en el mismo instante. La sincronización de las cámaras es vital ya que, de lo contrario, en ensayos a gran velocidad, cada una de las cámaras captaría momentos diferentes, con deformaciones diferentes.

El equipo precisa una calibración, que ha de repetirse cada vez que se modifique la posición relativa entre las cámaras, por tanto no será necesario volver a calibrar cuando se traslade el equipo o éste varíe en altura u orientación.

3.2.1. CALIBRACIÓN

Por calibración, desde el punto de vista fotogramétrico, se entiende el proceso en el que tratan de determinarse los parámetros geométricos y físicos de la toma fotográfica, para luego poder reconstruirla con seguridad en el proceso de restitución.

En la formación de la imagen interviene el sensor de la cámara y las lentes, por tanto ha de establecerse un modelo matemático de la geometría de la cámara y del efecto de distorsión de las lentes para intentar minimizar o eliminar sus efectos.

Aunque el fabricante no hace mención al respecto en el manual y tampoco quiere responder de forma clara a preguntas directas sobre este tema, parece claro que durante el proceso de calibración se realiza, de forma automática las orientaciones que permitirán obtener, finalmente, las coordenadas tridimensionales de la probeta.

La parte que no queda tan clara es el método que utiliza para obtener las correcciones que debe aplicar debido a las distorsiones, para el cálculo de las orientaciones y para conseguir una correcta correlación de imágenes aunque todo apunta a la utilización de los métodos, al menos en líneas generales, que se explican a continuación.

3.2.1.1. **DISTORSIÓN DE LAS LENTES**

Si los componentes ópticos fueran perfectos, la transformación entre la imagen bidimensional y el objeto tridimensional en el espacio sería perfectamente lineal y fácil de resolver, pero las lentes del sensor producen distorsiones que no son lineales y que afectan a la precisión de la transformación.

La distorsión radial desplaza los puntos de la imagen radialmente hacia el exterior, mientras que la tangencial los desplaza perpendicularmente al radio en cada punto. La causa de la primera es el incorrecto pulido de la lente, mientras que de la segunda es la incorrecta alineación de los componentes ópticos.

En modelos donde es necesaria gran precisión, lo habitual es utilizar correcciones conjuntas de forma que las coordenadas corregidas de un punto serán las siguientes (García Cortés, 2003):

$$X_c = (X - X_0) + dr_x + dp_x$$

$$Y_c = (Y - Y_0) + dr_y + dp_y$$

Siendo dr_x y dr_y las componentes "x" e "y" de la distorsión radial:

$$dr_x = (X - X_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4)$$

$$dr_y = (Y - Y_0) \cdot (K_1 \cdot r^2 + K_2 \cdot r^4)$$

Y siendo " p_x " y " p_y " las componentes "x" e "y" de la distorsión tangencial:

$$dp_x = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot (X - X_0)^2) + 2P_2 \cdot (X - X_0) \cdot (Y - Y_0)$$

$$dp_y = P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot (Y - Y_0)^2) + 2P_1 \cdot (X - X_0) \cdot (Y - Y_0)$$

Es habitual que se produzca un desplazamiento del punto principal. En caso de no producirse se sustituiría $(X - X_0)$ por X e $(Y - Y_0)$ por Y .

3.2.1.2. **ORIENTACIÓN**

Habitualmente, en fotogrametría, es necesario recurrir a varias orientaciones, que no son otra cosa que transformaciones entre diferentes sistemas de coordenadas. Normalmente es necesario realizar una orientación interna y una orientación externa, que se divide en relativa y absoluta.

En el caso concreto de este proyecto no es necesario realizar una orientación del modelo respecto a un sistema de referencia externo ya que, para el análisis de deformaciones, no influye el geoposicionamiento de la probeta.

La orientación interna permite el paso de coordenadas instrumentales a coordenadas imagen, es decir, serviría para pasar de coordenadas pixel (fila x columna) a coordenadas en un sistema de referencia con origen el centro de proyección, y coordenadas imagen (x,y).

Mediante la orientación externa, se conseguiría pasar de coordenadas imagen (x',y') y (x'',y'') de los dos fotogramas, a coordenadas objeto (X,Y, Z).

En el equipo Aramis, el proceso de calibrado, además de eliminar o minimizar los efectos de las distorsiones, es capaz de determinar cuáles son las transformaciones necesarias para calcular coordenadas objeto (X, Y, Z) a partir de cada par de imágenes.

Este proceso de calibrado es conocido como "test-field calibration" o calibración con banco de pruebas (García Cortés, 2003) y en él, la calibración de la cámara se realiza simultáneamente a la de los parámetros de la orientación externa. La auto calibración se realiza por el método de los haces de rayos, tomando múltiples imágenes fotográficas del patrón de calibración antes de comenzar con el levantamiento fotogramétrico del objeto.

Los bancos de pruebas o patrones de calibración, son esenciales para conseguir una correcta calibración-orientación. Algunas características básicas de estos patrones son:

- Estructura estable, poco deformable y controlada.
- Dimensiones adecuadas al formato de la imagen y la distancia de trabajo.
- Distribución de marcas de referencia de coordenadas relativas conocidas y de alta precisión, que permiten realizar el modelo tridimensional a una escala correcta.

Para que la calibración sea correcta las marcas han de ser fácilmente identificables (manual o automáticamente) y las condiciones ambientales y de iluminación han de ser las adecuadas. No es necesario comentar que polvo, niebla, temperaturas extremas, etc., pueden hacer que no sea posible realizar la calibración, o lo que es aún peor, realizarla con errores significativos que puedan afectar a la fiabilidad de las medidas.

3.2.2. **CORRELACIÓN DE IMÁGENES**

Durante este proceso, el software identifica grupos de píxeles en la imagen izquierda y trata de localizarlos en la imagen derecha. Éste es un proceso complicado que es fundamental en fotogrametría.

Cada par de píxeles se corresponde con un punto de la probeta. Si el proceso de calibración ha sido suficientemente riguroso, los píxeles de cada imagen no se verán afectados por las distorsiones de las lentes. Es necesario recordar que durante la calibración se lleva a cabo la orientación externa automática, y por tanto el software conoce la posición de las cámaras entre sí y el ángulo de convergencia.

Si el software es capaz de reconocer un píxel en una imagen y su homólogo o conjugado¹ en la otra imagen, se obtienen las coordenadas imagen del punto objeto, al que corresponden esos dos píxeles, en ambas fotografías. Como también es conocida la distancia focal, el software está en disposición de resolver mediante una intersección directa (MESSTECHNIK, 2007) para obtener las coordenadas objeto de los píxeles identificados en las imágenes. Para poder calcular las coordenadas objeto tendremos, por tanto, los siguientes datos:

- (x', y') = coordenadas imagen del punto identificado en el fotograma derecho.
- (x'', y'') = coordenadas imagen del punto identificado en el fotograma izquierdo.
- f = distancia focal
- $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01}); \omega_1, \phi_1, \kappa_1$ = coordenadas relativas del centro de proyección de la cámara derecha y sus correspondientes giros, todo ello obtenido en el proceso de calibración.
- $(X_{02}, Y_{02}, Z_{02}); \omega_2, \phi_2, \kappa_2$ = coordenadas relativas del centro de proyección de la cámara izquierda y sus correspondientes giros, todo ello obtenido en el proceso de calibración.

Las incógnitas serán:

- (X, Y, Z) = coordenadas objeto.

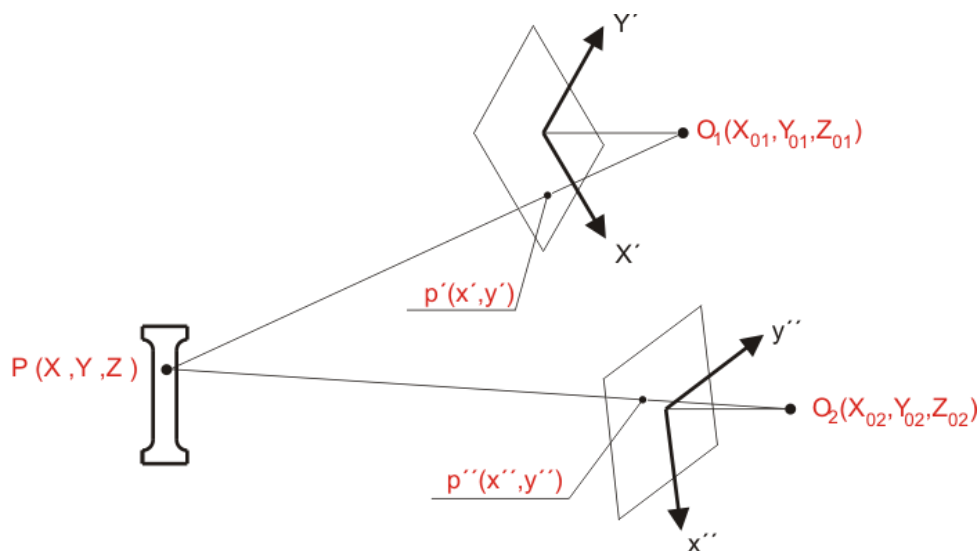


Figura 3.1: Esquema de correlación de imágenes

¹ Imagen de un mismo elemento del objeto que aparecen en varios fotogramas. (García Cortés, 2003).

Para el cálculo se parte de la expresión conocida de la condición de colinealidad, que "*parte del hecho de que, una vez realizada una toma fotográfica, un punto del objeto, el centro de proyección y la imagen del punto sobre la imagen fotográfica están alineados*" (Lerma García, 2002)(Figura 3.2):

$$F = w.x + f.u = 0$$

$$G = w.y + f.v = 0$$

Siendo R es la matriz de rotación en la que intervienen los giros de necesarios para colocar ambos centros de proyección alineados y en el mismo sistema de coordenadas ($\omega_1, \varphi_1, \kappa_1, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2$).

El principal problema se presenta a la hora de identificar automáticamente los puntos conjugados. Para ello, el software parece utilizar diferentes métodos de predicción, con los que consigue acotar el espacio de búsqueda. A continuación se enumeran estos métodos y se trata de explicar cómo se consigue acotar los criterios de búsqueda en cada uno.

3.2.2.1. BÚSQUEDA MEDIANTE LÍNEA EPIPOLAR

Es la línea sobre la que teóricamente se encuentra el punto conjugado. Se forma al cortar el plano epipolar a las dos imágenes. Este plano es el formado por cada una de las cámaras (L y R) y el punto observado (P), como puede verse en la siguiente imagen esquemática (Figura 3.2 y Figura 3.4).

"Las líneas epipolares no son normalmente paralelas al eje x del sistema de foto-coordenadas. Con bastante frecuencia se busca transformar las imágenes en otras en que las líneas epipolares sean paralelas a las filas de las imágenes digitales. Los pares estereoscópicos que verifican esta condición se denominan imágenes normalizadas" (Schenk, 2002).

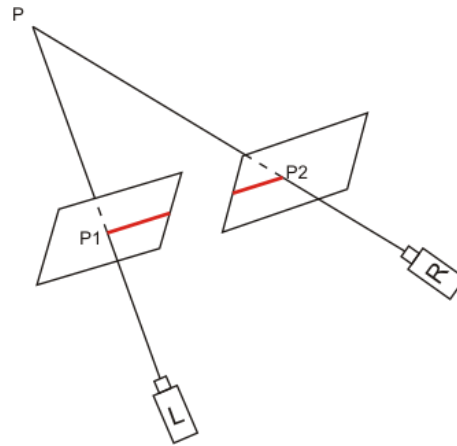


Figura 3.2: Ayuda en búsqueda por línea epipolar

Por tanto, al seleccionar un píxel de la imagen de la izquierda, el software es capaz de limitar de forma importante el espacio de búsqueda.

3.2.2.2. PROFUNDIDAD

Una vez se sabe que el punto conjugado estará sobre la línea epipolar, o muy cerca de ella si hay desviaciones, se intenta reducir aún más el espacio de búsqueda.

Para ello, el software utiliza el concepto de paralaje, que puede definirse como movimiento aparente de un objeto, sobre una referencia fija. Es sencillo comprender que un punto fijo aparecerá en distinta posición en el fotograma izquierdo y el fotograma derecho, respecto a un plano de referencia, debido a la base o distancia entre los centros de proyección de cada una de las cámaras en el momento de la toma fotográfica, que en este proyecto es fija y de valor aproximado de 98mm.

En el caso del esquema que se presenta a continuación la paralaje del punto P_1 será la diferencia en valor absoluto de las distancias a_{p1} y b_{p1} , mientras que la paralaje del punto P_2 será la diferencia en valor absoluto de las distancias a_{p2} y b_{p2} (Figura 3.3).

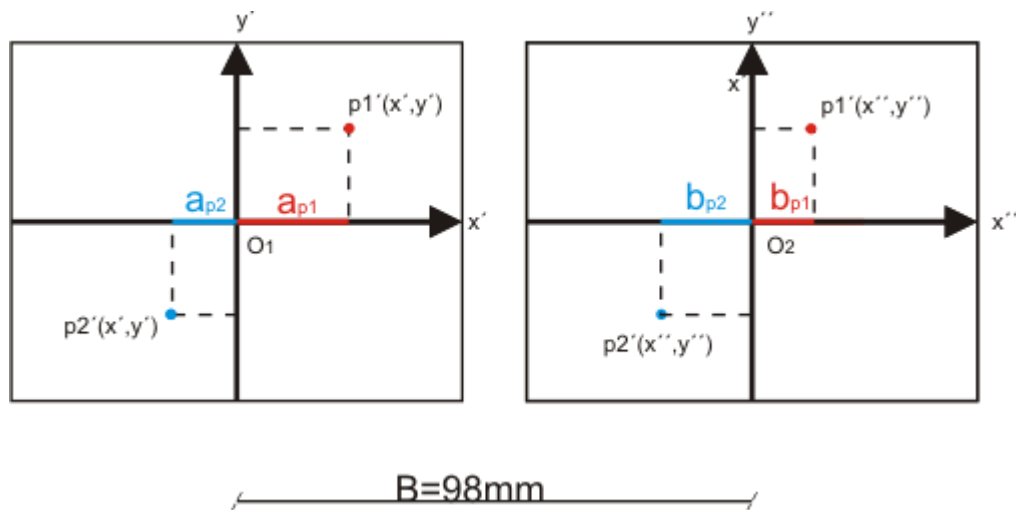


Figura 3.3: Esquema paralaje

Analíticamente, se establece que $\frac{P}{f} = \frac{B}{D}$, siendo:

$$P = |a_{p1} - b_{p1}|$$

f= distancia focal (constante).

B= separación entre cámaras (constante).

D= distancia de medida (prácticamente constante²).

De la expresión anterior se conocen todos los datos salvo la paralaje, pero como todos los datos son prácticamente constantes, la paralaje también lo será, lo que permitirá al software buscar el pixel homólogo en una zona muy reducida, agilizando el proceso y mejorando los resultados.

Para una primera aproximación de la paralaje parece probable que el software utilice las restricciones que se le imponen a la geometría del sistema en el proceso de calibración, donde se "informa" al software de la profundidad de la probeta. Un valor más exacto de la paralaje aproximada de todos los puntos de la probeta parece ser obtenida por el software a partir de la paralaje un punto inicial colocado a posteriori, durante el procesado de datos, llamado "Start Point" y que se verá más detenidamente en el Capítulo 4.3.2.

3.2.2.3. BÚSQUEDA POR TESELA

En el proceso de búsqueda del punto conjugado, el software no busca un píxel individualmente ya que, aunque se ayude de los dos métodos anteriores, éstos no serían concluyentes en caso de que hubiese dos posible píxeles homólogos cercanos con el mismo nivel digital. Para poder localizar el pixel se utiliza una tesela, que es una matriz (en este caso de 19x19 píxeles) y como tal está formada por filas y columnas de niveles digitales, con valores entre 0 y 255N (Figura 3.4).

² Durante este trabajo, como se verá en el Capítulo 14.3.2, la distancia entre la probeta y la alineación de las cámaras será de 310 mm y la variación será de 1.5 mm. Estos datos ayudan al software a reducir la zona de búsqueda de los puntos homólogos, ya que no habrá ningún punto de la probeta que esté más alejado de 311,5 mm y tampoco ninguno más cerca de 308,5 mm.

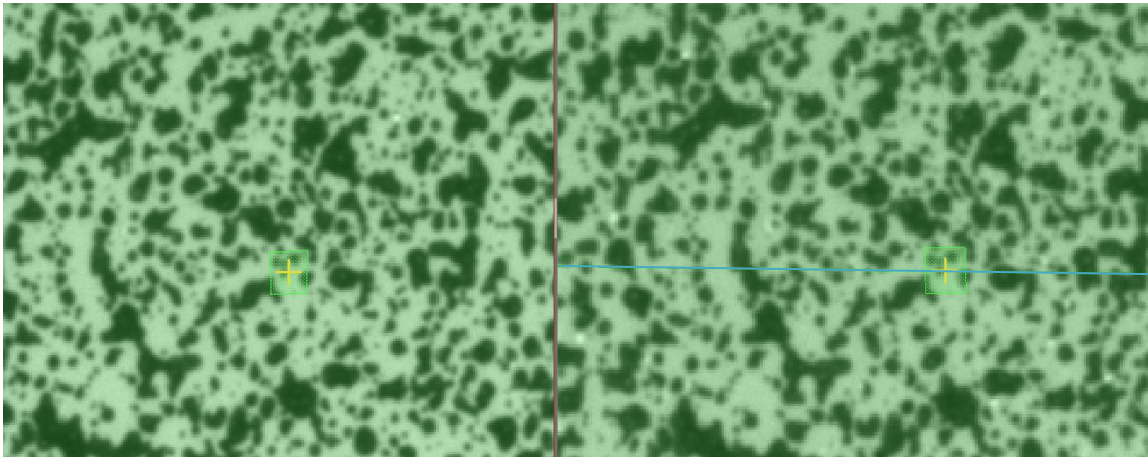


Figura 3.4: Tesela identificada en ambos fotogramas

El software analiza las coincidencias de los niveles digitales de la tesela de la imagen izquierda con la tesela de la imagen de la derecha mediante el sistema de mínimos cuadrados. En caso de que la suma del cuadrado de los residuos sea mínima, esto es, cuando la tesela homóloga se ajusta convenientemente a la tesela de la derecha, el píxel central de la tesela de la imagen derecha es identificado como homólogo del píxel central de la tesela de la imagen izquierda.

4. EQUIPOS UTILIZADOS Y PREPARACIÓN DE ENSAYOS

4.1. MÁQUINAS DE ENSAYO

Los ensayos de tracción se realizan en dos máquinas diferentes debido a que las características de las probetas (material y dimensiones), exigen células de carga con distinta capacidad.

Así pues, las máquinas utilizadas fueron los modelos MTS810 con una capacidad de carga de 100kN y MTS Synergie, con una capacidad de 5 kN. Ambas son de la firma Material Test Systems (MTS).

A continuación se describen brevemente todos los equipos utilizados.

4.1.1. MTS SYNERGIE

Esta máquina está diseñada para realizar ensayos uniaxiales de tracción y compresión a materiales cuyas tensiones de rotura no excedan los 5 kN, ya que dispone de una célula de carga de esa magnitud. Consta de un bastidor, y un computador:

Se trata de un bastidor de sobremesa compuesto por un motor con reductora que mueve un husillo sobre el que se desplaza un cabezal móvil. El desplazamiento máximo del bastidor es de 800 mm y la velocidad máxima de desplazamiento es de 500 mm/min. El cabezal inferior está fijado al bastidor, mientras que el superior móvil lleva la célula de carga que mide la fuerza que se aplica en cada momento.

El ordenador recoge las señales de fuerza y de desplazamiento del puente o cabezal móvil, mediante una tarjeta de adquisición de datos. Convierte esas señales analógicas en digitales y las procesa gracias al software Test Works proporcionado por el fabricante.



Figura 4.1: Máquina de ensayos MTS Synergie

4.1.2. MTS 810

La otra máquina utilizada ha sido de la firma MTS (Materials Testing Workstation), modelo 810, la cual permite la realización de los ensayos bajo un completo control, gracias a la facilidad de funcionamiento desde los puntos de vista de hardware y software.

La MTS 810 permite realizar diferentes tipos de ensayo, entre ellos cabe destacar los ensayos de tracción, compresión, flexión y fatiga. La máquina se compone de tres unidades básicas:

- Unidad de carga: Es la encargada de aplicar a la pieza a ensayar la carga deseada, de acuerdo a las condiciones del ensayo. El actuador o gato hidráulico aplica la carga a la probeta a través de las mordazas. Mientras que las fuerzas aplicadas son medidas por la célula de carga.
- Unidad hidráulica: Suministra la energía necesaria para la realización de los ensayos mediante un flujo de aceite a presión controlado.
- Unidad de control: Consta de una célula de control y de un PC que se encuentran conectados directamente a la máquina, permitiendo controlar el programa dinámico y los valores límites de la máquina de ensayos.



Figura 4.2: Máquina de ensayos MTS 810

4.2. EQUIPO ÓPTICO DE MEDIDA

La medida de deformaciones se realiza con un equipo óptico, modelo ARAMIS 5M de la firma GOM, que permite medir coordenadas tridimensionales a partir de las cuales se calculan las deformaciones de una probeta "sin contacto" e independientemente del material. Para muestras cargadas estáticamente o dinámicamente determina:

- Coordenadas 3D de la superficie
- Desplazamientos 3D y velocidades
- Deformaciones de la superficie de la muestra

Combinando el modelo matemático del sensor con el método de correlación de imágenes digitales y un cálculo para la obtención y transformación de coordenadas, se obtienen mallas 3D de alta precisión. La evaluación de la información de la superficie en el espacio objeto, durante toda la duración del ensayo, proporciona valores de desplazamientos y deformaciones y su relación con la carga aplicada y el tiempo.

Está formado por dos cámaras de distancia focal fija, situadas sobre un soporte que permite el movimiento de las cámaras en caso de necesidad. Este soporte está calibrado para facilitar la medida de la base (distancia entre las dos cámaras) y está unido a un sistema de sujeción mediante un cabezal que permite girar el sistema de cámaras para apuntar correctamente sobre la zona de interés (Figura 4.3)



Figura 4.3: Equipo Aramis 5M

Las cámaras tienen las siguientes características (MESSTECHNIK, 2007):

System types	ARAMIS 2M	ARAMIS 2M LT	ARAMIS 5M	ARAMIS 5M LT	ARAMIS 4M	ARAMIS 12M	ARAMIS HS
Standard measuring volume in mm	10 x 7 to 4500 x 3400		10 x 8 to 5000 x 4150		10 x 7 to 4000 x 2900	15 x 11 to 5000 x 3750	10 x 8 to 4000 x 3200
Camera resolution	1624 x 1236 pixels		2448 x 2050 pixels		2352 x 1728 pixels	4096 x 3072 pixels	1280 x 1024 pixels
Camera chip	CCD				CMOS		
Max. frame rate	With 19" PC: 15 Hz (29 Hz with binning) With laptop: 15 Hz (29 Hz with binning)		With 19" PC: 15 Hz (29 Hz with binning) With laptop: 7 Hz (29 Hz with binning)		60 Hz at 2352 x 1728 pixels 120 Hz at 2352 x 856 pixels 240 Hz at 2352 x 416 pixels 480 Hz at 2352 x 184 pixels	24 Hz at 4096 x 3076 pixels 48 Hz at 4096 x 1536 pixels 96 Hz at 4096 x 768 pixels 192 Hz at 4096 x 384 pixels 96 Hz at 2048 x 1536 pixels 190 Hz at 2048 x 768 pixels 365 Hz at 2048 x 384 pixels	500 Hz at 1280 x 1024 pixels 1000 Hz at 1280 x 512 or 880 x 704 pixels 2000 Hz at 1280 x 256 or 560 x 488 pixels 4000 Hz at 1280 x 120 or 400 x 304 pixels
Connection camera to PC	Gigabit-Ethernet via sensor controller				Camera Link		
Intermediate image storage	In the main memory (RAM) of the evaluating computer						
Exposure time	0.1 ms up to 2 s		0.1 ms up to 2 s		0.1 ms up to 2 s	0.1 ms up to 2 s	0.010 ms up to 1 s
Main hardware components	Laptop or 19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting	Laptop or 19" PC Sensor Sensor controller with restricted function	Laptop or 19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting	Laptop or 19" PC Sensor Sensor controller with restricted function	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting	19" PC Sensor Sensor controller LED specimen lighting
Laser pointer	yes						
LED lighting with polarization filters	no		yes (10° or 30°)	no	yes (30°)	yes (30°)	Yes (10° or 30°)
Strain measuring range	0.02 % up to >100 %		0.02 % up to >100 %		0.02 % up to >100 %	0.02% up to >100%	0.040% up to >100 %
Strain accuracy	up to 0.01 %		up to 0.01 %		up to 0.01 %	up to 0.01%	up to 0.02 %
Measuring results	2D or 3D displacements, strain and component contour						
For further information see http://www.gom.com							

Figura 4.4: Características del equipo utilizado

Como se observa en las especificaciones facilitadas por el fabricante (Figura 4.4), este equipo es capaz de tomar imágenes a objetos en un rango que abarca desde 10x8mm (con lente de 100mm de distancia focal) hasta 5000x4150 (con lente de 8mm de distancia focal). La resolución de la cámara es de 2448x2050 píxeles, es decir, 5 mega píxeles y el sensor es del tipo CCD (Charge Coupled Device).

4.2.1.1. LENTES

Las lentes utilizadas por el equipo son de focal fija, lo que les confiere mayor precisión en los ajustes de la lente y minimiza las causas de error producidas por desgaste y desajuste de piezas.

El equipo puede trabajar con lentes de 100mm, 50mm, 23mm, 17mm, 12mm y 8mm de distancia focal. En los ensayos realizados para este proyecto se ha utilizado únicamente el juego de lentes de 50mm, situadas a la derecha de la Figura 4.5.



Figura 4.5: Diferentes juegos de lentes del equipo Aramis 5M

4.2.1.2. PATRÓN DE CALIBRADO

Es de gran importancia utilizar un patrón de calibrado bien dimensionado, que sea muy estable, dimensionalmente hablando, en el tiempo y que esté fabricado con materiales que no se vean afectados por variaciones de temperatura.

Existen diferentes patrones, acordes a las diferentes necesidades dimensionales. Así pues, si se utiliza la lente de 100mm de distancia focal para visualizar una probeta de 10x8mm, no será conveniente utilizar un patrón de calibrado de dos metros de longitud.

Los patrones utilizados (Figura 4.6) tienen una malla de 725 puntos, distribuidos en una matriz de 29x25. En la zona central se sitúan 17 puntos principales, que están codificados. Estos puntos son reconocidos por el software durante el proceso de calibración. La identificación de esos puntos codificados permite reconocer las posiciones teóricas del resto de puntos del patrón, e incluso alertar al técnico en caso de que el patrón no se encuentre en la posición adecuada en cada paso del proceso.

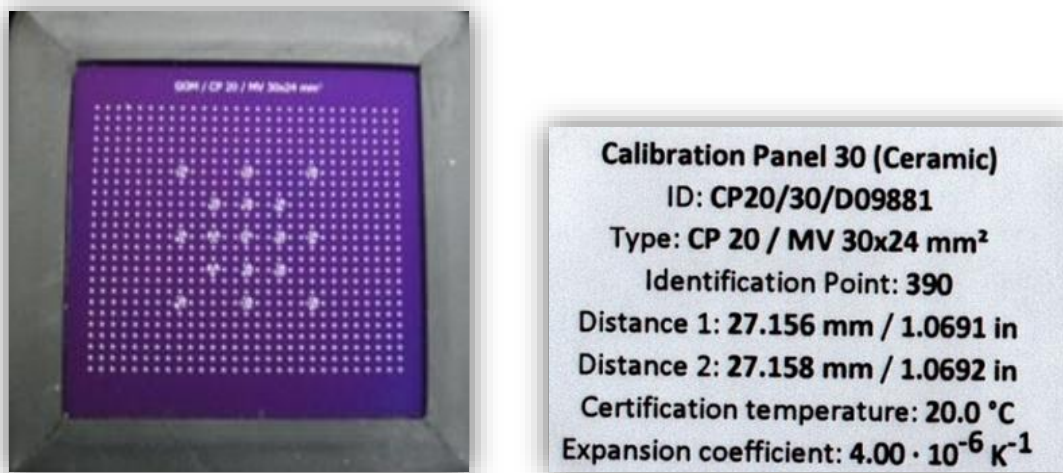


Figura 4.6: Patrón de calibración y detalle de sus características

Cada patrón debe incluir un certificado de calibración que se puede ver el ANEXO 1: Certificados de calibración.

En el certificado de calibración se informa de que el material con el que está fabricado el panel es de cerámica y que las medidas de distancias entre puntos codificados llamadas D1 y D2, tienen precisión de micras con una incertidumbre de medida (al 95%) de:

$$U(D1) = 1.50\mu\text{m} + 4 \cdot L \cdot 10^{-6}\mu\text{m} = 1.50 + 4 \cdot 27.156 \cdot 10^{-6} = 1.500000108624\mu\text{m}$$

$$U(D2) = 1.50\mu\text{m} + 4 \cdot L \cdot 10^{-6}\mu\text{m} = 1.50 + 4 \cdot 27.158 \cdot 10^{-6} = 1.500000108632\mu\text{m}$$

Donde L es la longitud (D1 o D2) en metros.

Por tanto las medidas, expresadas según el documento GUM (Metrology, 2008)

$$D1 = 27.156 \pm 1.5\mu\text{m}$$

$$D2 = 27.158 \pm 1.5\mu\text{m}$$

4.3. PREPARACIÓN DE ENSAYOS

4.3.1. PINTADO DE LAS PROBETAS

El equipo Aramis 5M utiliza la correlación de imágenes para identificar píxeles de la imagen de la izquierda en la imagen de la derecha. Estos puntos conjugados u homólogos son más fácilmente identificables si hay un contraste elevado (en sus N.D.) entre ellos.

Las imágenes que capta el equipo son en escala de grises, por tanto lo ideal sería tener una probeta con fondo blanco y puntos negros. Este efecto se consigue mediante el pintado de la probeta con pintura acrílica mate. Es muy importante que la pintura sea mate porque los brillos generan píxeles de color blanco, que en realidad no están en la superficie de la probeta. La incidencia de la luz sobre zonas mal pintadas que generan brillos, normalmente tiene graves consecuencias al ser estos brillos, registrados por una sola de las cámaras, lo que llevará a la imposibilidad de identificación de los píxeles homólogos.

4.3.2. CALIBRACIÓN EN EL EQUIPO ARAMIS 5M

Las lentes utilizadas por las cámaras del equipo son de focal fija y por tanto habrá que elegir las lentes cuya focal se adapte mejor a las dimensiones de la probeta. Es importante conocer la relación existente entre la distancia focal (f) y la distancia entre la lente y el objeto (Y), que determinará la escala (Figura 4.7) de la foto ($\frac{1}{m_f}$), o lo que es lo mismo, relacionará las dimensiones de la imagen con las dimensiones del objeto.

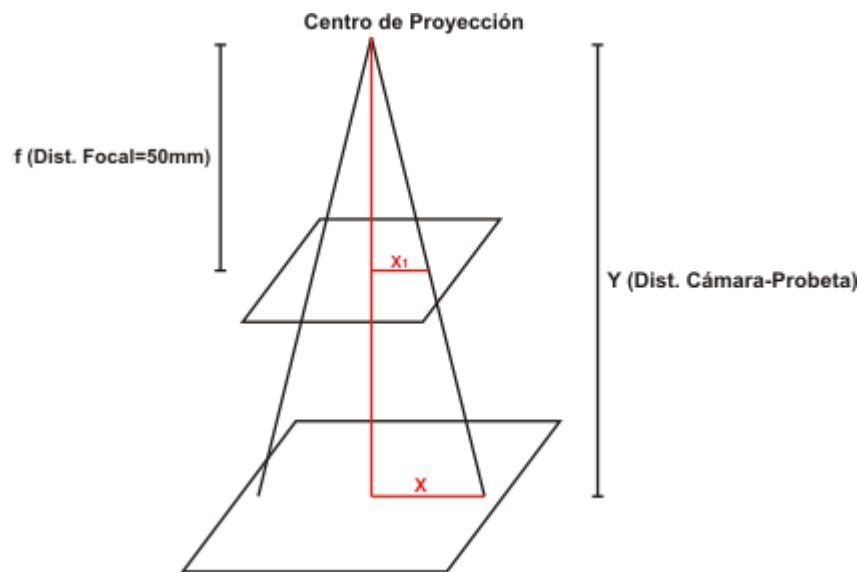


Figura 4.7: Esquema de escala de la fotografía

$$\frac{x_1}{X} = \frac{f}{Y} \rightarrow X = x_1 \frac{Y}{f}$$

$$E_f = \frac{1}{m_f} = \frac{x_1}{X} = \frac{f}{Y}$$

Una vez se ha decidido cuáles son las dimensiones de la probeta y cuál es el mejor juego de lentes (en este caso 50mm) para conseguir una visualización completa de ésta, comenzará el proceso de calibración.

El proceso de calibración es relativamente sencillo pero requiere un tiempo aproximado de veinte minutos (para un técnico habituado).

Tras realizar los pasos que el programa va solicitando se llega a una ventana (Figura 4.8), con el resultado de la calibración:

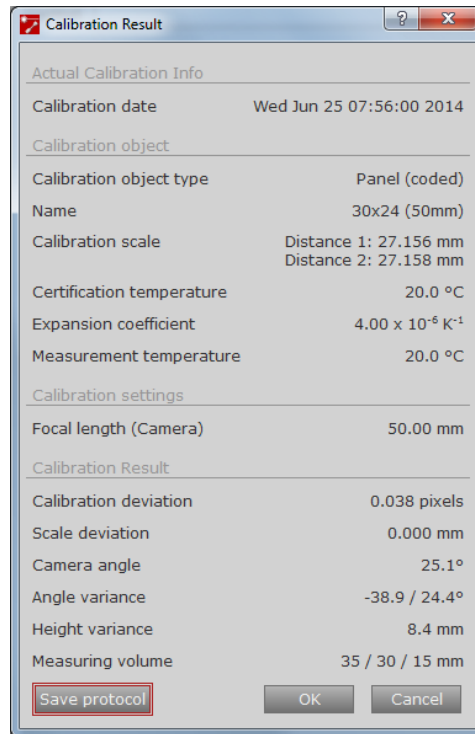


Figura 4.8: Resultado de la calibración

Esta ventana se divide en cuatro zonas:

1. "Actual Calibration Info", donde se muestra la fecha de la Calibración.
2. "Calibration object", donde pueden verse los datos propios del panel de calibración, que se pueden ver en el certificado de calibración del ANEXO 1: Certificados de calibración.
3. "Calibration settings", donde se muestra la focal de las lentes colocadas.
4. "Calibration Results", donde se presentan los resultados obtenidos en el proceso de calibración, como son:
 - "Calibration deviation", donde se presenta un valor que debe estar entre 0.01 y 0.04 (MESSTECHNIK, 2007). Un valor más elevado haría necesaria la repetición del proceso de calibración. Este valor indica la precisión de la calibración (Dynamic Impact Deformation Analysis Using High-speed, 2010).

Este valor (0.039 píxeles) es importante si se pretende calcular la precisión a priori, en coordenadas objeto, que se podrá obtener en la medida posterior, ya que se puede suponer como valor de referencia (P_C) para el cálculo de las coordenadas imagen (S_b), como puede verse en los cálculos realizados a continuación.

- "Scale deviation", que indica el valor en milímetros de "Calibration deviation". Utilizando un panel de calibración de dos escalas (como el utilizado en este proyecto), este valor ha de ser menor que 0.005% de la distancia media de calibración, que se presenta en "Calibration scale", dentro del apartado 2.
- "Camera angle", que da información sobre la geometría del sistema y más concretamente sobre el ángulo de convergencia de los haces perspectivas.
- "Angle variance", que da información sobre los valores de inclinación del patrón el proceso de calibración, serán tanto mejores cuanto más próximos estén a $-40^\circ / +40^\circ$.
- "Height variance" da información de la desviación de la distancia real a la que se ha colocado el panel de calibración sobre la distancia teórica, que es de 310mm.
- "Measuring volume", donde se muestran las dimensiones máximas del objeto fotografiado que puede ser medido con la configuración seleccionada en el proceso de calibración.

El cálculo de la precisión teórica esperada se hará utilizando la fórmula $S_p = \frac{Q}{\sqrt{K}} \cdot S_b \cdot m_f$ (Fraser, 1994) para el caso convergente. Este caso se diferencia del caso normal en que los ejes de las cámaras forman un ángulo determinado y convergen en el objeto.

Datos:

$$Y = 310mm$$

$$C = 50mm$$

$$P_s(\text{tamaño del píxel}) = 0.00345mm$$

$$w_p = 2448 \text{ pix}$$

$$h_p = 2050 \text{ pix}$$

$$Base = 98mm$$

$$K = 1$$

$$Q = \text{entre } 0.8 \text{ y } 0.5 \text{ (Parámetro obtenido empíricamente)}$$

$$P_C \text{ (Precisión de calibración)} = 0.039 \text{ pix}$$

$$\text{Ancho imagen} = 35mm$$

Cálculos:

Factor de escala (m_f):

$$m_f = \frac{Y}{C} = 6.2$$

Precisión coordenadas imagen (S_b):

$$S_b = P_c \cdot P_s = 0.000135mm = 0.135\mu m.$$

Precisión esperable en coordenadas objeto (S_p):

Calculada:

$$S_p = \frac{Q}{\sqrt{K}} \cdot S_b \cdot m_f = 0.000667mm = 0.667\mu m \text{ (Utilizando el valor de Q más desfavorable, } Q=0.8)$$

$$S_p = \frac{Q}{\sqrt{K}} \cdot S_b \cdot m_f = 0.000417mm = 0.417\mu m \text{ (Utilizando el valor de Q más favorable, } Q=0.5)$$

Según el fabricante del equipo, se ha conseguido comprobar en el laboratorio, que la precisión esperada, en caso de valores resultantes de la calibración ("Calibration Deviation") no superiores a 0.04 píxeles, es de hasta:

$$S_p = \frac{\text{Ancho imagen}}{50000} = 0.000637mm = 0.637\mu m$$

Como se puede observar, la precisión calculada y la aportada por el fabricante son prácticamente coincidentes y, en este caso concreto, inferiores a una micra.

4.3.3. CAPTURA DE IMÁGENES

Antes de comenzar con el ensayo es necesario establecer los parámetros de captura de imágenes. Los parámetros configurables son la velocidad de captura y el tiempo de apertura.

La velocidad de captura será de una imagen por segundo en todos los ensayos, mientras que el tiempo de apertura puede variar de un ensayo a otro debido a que las condiciones de luminosidad son cambiantes.

Una vez que se hace la captura de las imágenes es necesario realizar el procesado para concluir con la generación de tantos modelos digitales como pares de imágenes se hayan capturado.

4.4. TIPOS DE PROBETAS Y MATERIALES UTILIZADOS

Las probetas elegidas son de tres materiales diferentes cuya composición detallada no se puede revelar por motivos de confidencialidad pero sí se puede compartir información general.

La geometría de los tres tipos es muy diferente, como puede verse en la Figura 4.9. Las dimensiones aproximadas de cada uno de los tipos pueden verse en la Figura 4.10.

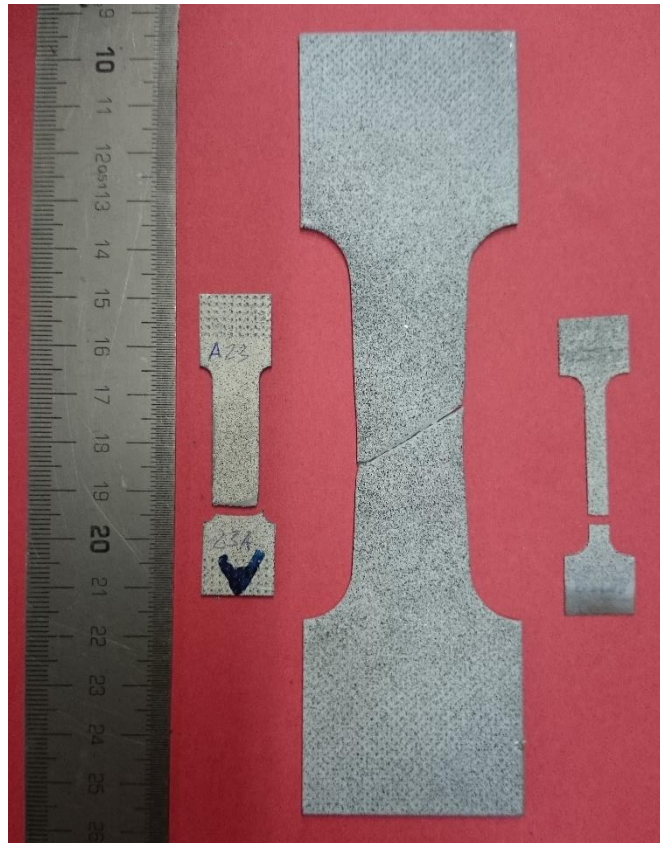


Figura 4.9: Tipos de probetas utilizadas en los ensayos. De izquierda a derecho: Probeta de NiTi, probeta de acero estructural y probeta de acero pulvimetalúrgico.

Conviene recordar que el número de ensayos experimentales realizados es de 9 y que, para facilitar su análisis se llevará acabo agrupando las probetas por materiales, por tanto existirán tres grupos que se llamarán: NiTi, acero estructural y acero pulvimetalúrgico.

Para asegurar una correcta calibración del equipo y que no se están cometiendo errores en la medida de deformaciones se han utilizado métodos extensométricos de control en varias probetas, alcanzando en todos los casos la precisión esperada calculada en el apartado

CALIBRACIÓN EN EL EQUIPO ARAMIS 5M y, en la mayoría de ellos superándola con creces.

Debido a la diferencia de geometrías en los tres tipos de probetas las medidas no se han podido realizar en las mismas zonas y con las mismas dimensiones estableciéndose, en cada uno de los casos, una cuadrícula de medida con las siguientes características:

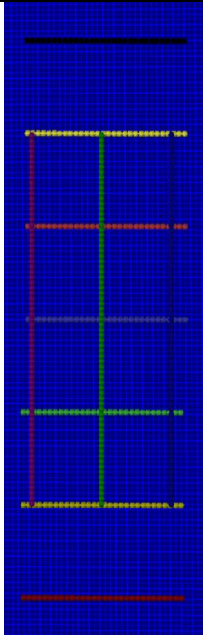
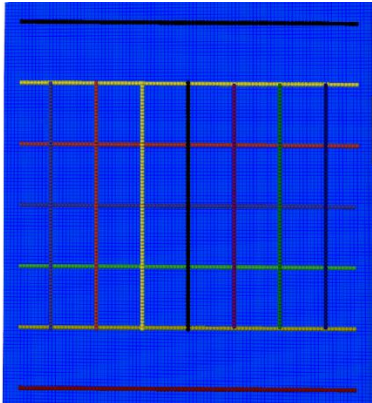
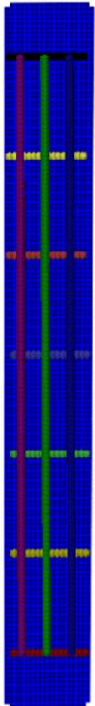
		
<p>Probetas de NiTi:</p> <p>Dimensiones aproximadas: Anchura: 10 mm Espesor: 1 mm</p> <p>Cuadrícula: Separación vertical: 4 mm Separación horizontal: 3 mm</p>	<p>Probetas de acero estructural:</p> <p>Dimensiones aproximadas: Anchura: 20 mm Espesor: 2 mm</p> <p>Cuadrícula: Separación vertical: 4 mm Separación horizontal: 3 mm</p>	<p>Probetas de acero pulvimetalúrgico:</p> <p>Dimensiones aproximadas: Anchura: 4.1 mm Espesor: 0.5 mm</p> <p>Cuadrícula: Separación vertical: 4 mm Separación horizontal: 1 mm</p>

Figura 4.10: Esquema de cuadrícula utilizada y dimensiones aproximadas de las probetas.

4.4.1. ALEACIÓN DE NiTi

Este material está siendo probado para uso medicinal, concretamente en “stents” de colon, donde su comportamiento mecánico poco habitual tiene gran importancia. Se trata de un material con memoria de forma, que presenta tres zonas bien diferenciadas en la curva tensión deformación, como puede verse el Figura 4.11.

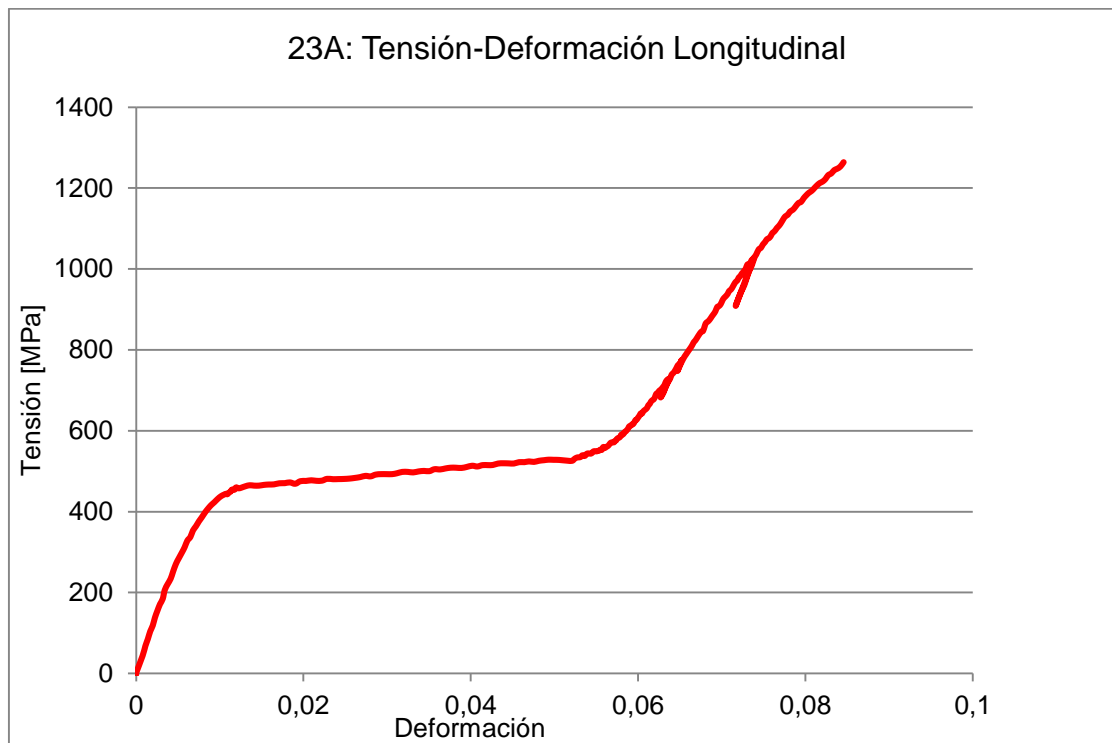


Figura 4.11: Diagrama tensión-deformación en probeta de NiTi

4.4.2. ACERO ESTRUCTURAL

Se trata de un acero utilizado en la construcción de pasarelas de embarque para uso aeroportuario.

En la Figura 4.12 se puede ver la curva característica tipo de este material en un ensayo de tracción a rotura.

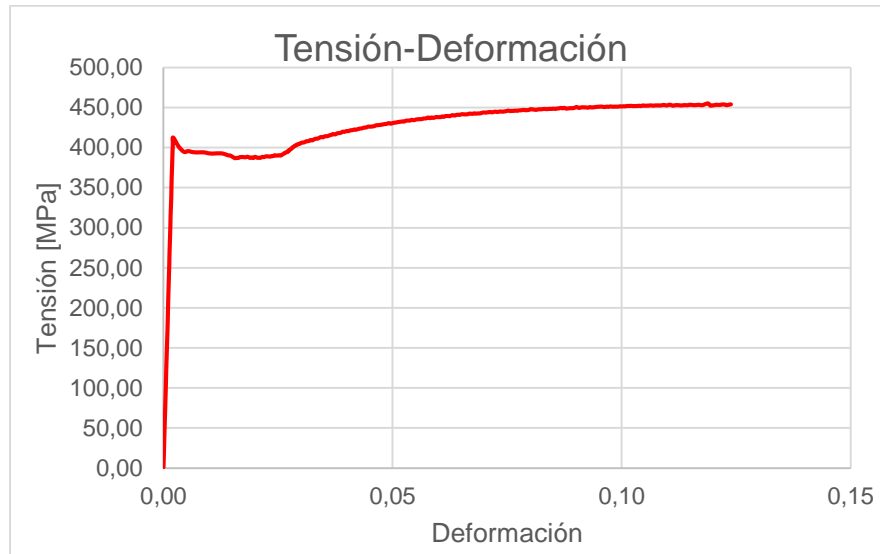


Figura 4.12: Diagrama tensión-deformación en probeta de acero estructural

4.4.3. ACERO PULVIMETALÚRGICO

En este caso, el proceso de fabricación del acero es mediante la aplicación de polvos finos en un molde, su posterior compactado y finalmente un proceso de sinterizado, para conseguir la pieza final. Durante este proceso se generan multitud de micro poros, cuya distribución aleatoria convierte a éste en un material muy interesante para el estudio en este Trabajo Fin de Máster. En la Figura 4.13 se puede ver la curva característica tipo de este material en un ensayo de tracción a rotura.

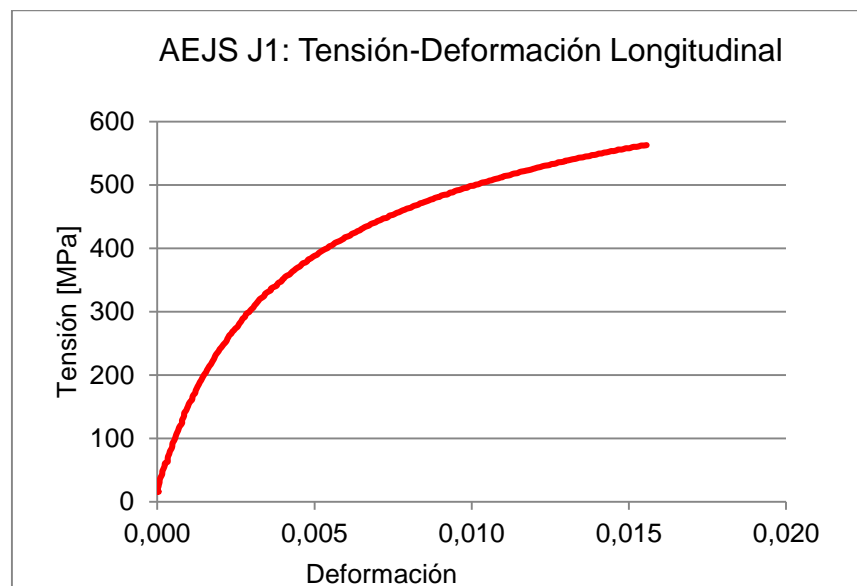


Figura 4.13: Diagrama tensión-deformación en probeta de acero pulvimetalúrgico

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar se expondrá cómo afecta la primera de las variables: la posición.

Primero se mostrarán los resultados del estudio atendiendo a la influencia que puede tener en el módulo de Young y posteriormente en el coeficiente de Poisson.

Posteriormente se expondrá cómo afecta la segunda variable: la longitud.

En esta parte, al igual que en la anterior, primero se mostrarán los resultados atendiendo a la influencia que puedan tener en el módulo de Young y posteriormente en el coeficiente de Poisson.

5.1. σ - ϵ_L Y MÓDULO DE YOUNG EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN

5.1.1. PROBETAS DE NiTi

Las medidas se realizan en tres zonas, equidistantes del eje Y de la probeta, en 3 mm (Figura 5.1). La numeración se hace desde el origen de coordenadas (Sección L=0.00) y tomando como positivos las secciones hacia la derecha (Sección L=+3.00) y negativas hacia la izquierda (Sección L=-3.00 mm).

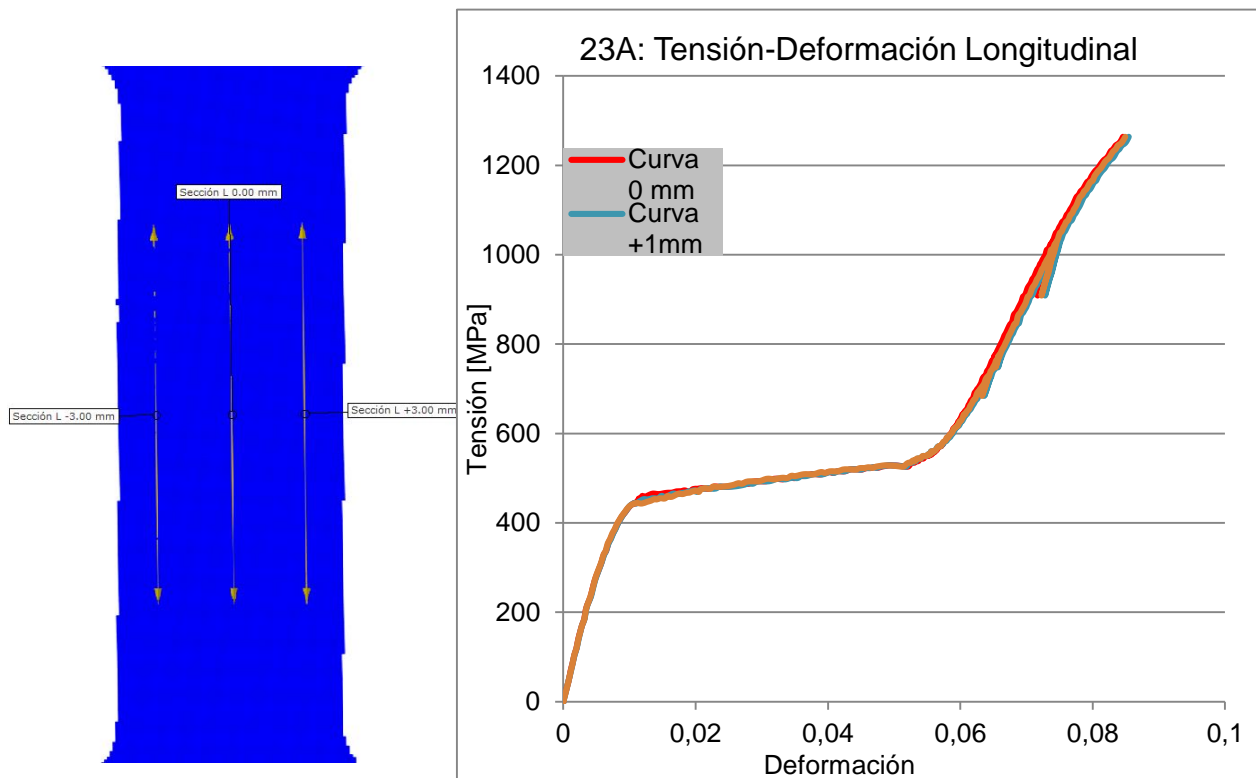


Figura 5.1: Curva tensión-deformación de una probeta de NiTi, variando la posición

En estas probetas de NiTi la medida de la deformación longitudinal en tres zonas diferentes es prácticamente coincidente, como puede verse en la Figura 5.1. Una vez superada la

zona elástica comienzan a aparecer deformaciones plásticas que afectan de forma diferente a cada una de las medidas.

En estas probetas de NiTi la medida de la deformación longitudinal en tres zonas diferentes es prácticamente coincidente, como puede verse en la Figura 5.1. Una vez superada la zona elástica comienzan a aparecer deformaciones plásticas que afectan de forma diferente a cada una de las medidas.

Se aprecia una primera zona elástica que llega hasta los 450 MPa. Es en esta zona en la que se centrará el Cálculo del módulo de Young, más concretamente entre los 45 y 180 MPa, como puede verse en la Figura 5.2.

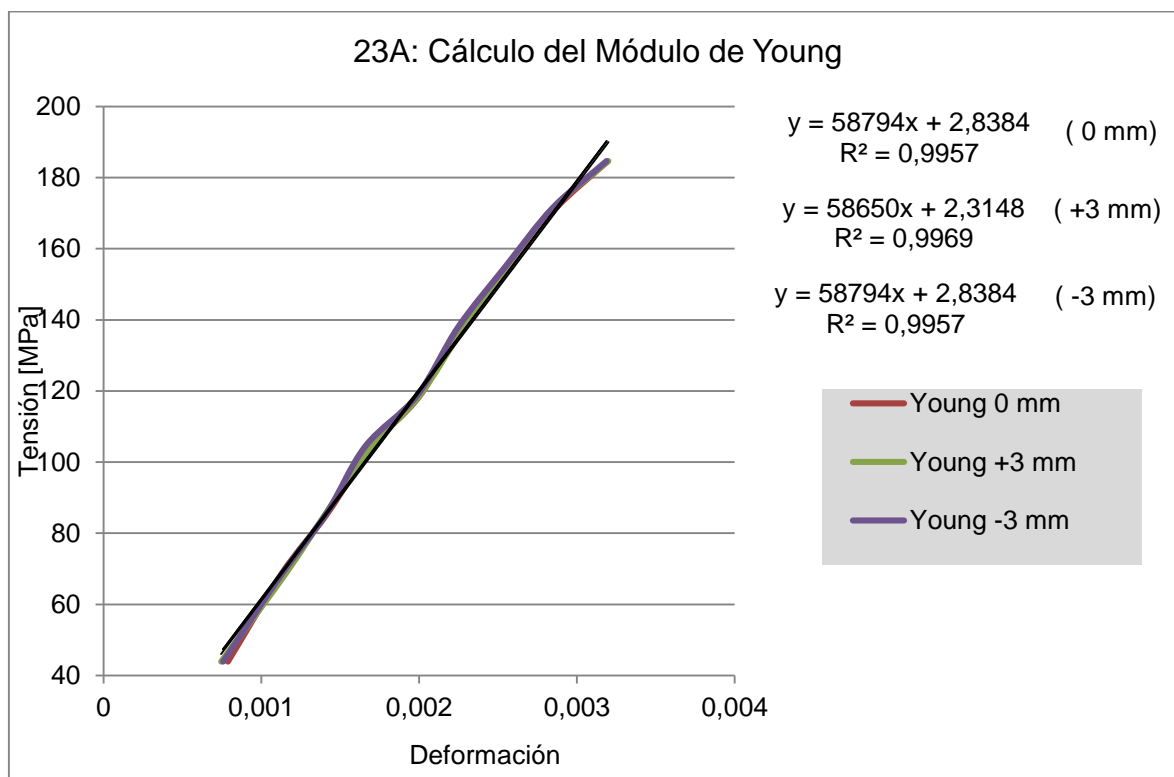


Figura 5.2: Cálculo del Módulo de Young en NiTi, variando la posición

Observando los valores del coeficiente de determinación (R^2), se puede comprobar la bondad del ajuste, que será más preciso cuanto más próximo a uno sea su valor. En este caso el ajuste realizado permite asegurar muy buena precisión en los resultados.

El coeficiente de la "x" en la ecuación de la recta será la pendiente buscada. El resultado del cálculo del Módulo de Young en las tres probetas de NiTi se puede ver en la Tabla 5.1.

Probeta	Módulo de Young según posición		
	0 mm	+ 3 mm	-3 mm
23A	58794 MPa R ² =0.9957	58650 MPa R ² =0.9969	58794 MPa R ² =0.9957
23B	59843 MPa R ² =0.9955	58262 MPa R ² =0.9960	59843 MPa R ² =0.9955
22B	61110 MPa R ² =0.9988	60042 MPa R ² =0.9985	61430 MPa R ² =0.9982

Tabla 5-1: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la posición para probetas de NiTi

En la Tabla 5.1 se ve la similitud de resultados que se obtienen con este material, lo que hace pensar que, al menos en este material, la posición de la medida no influye para el cálculo del Módulo de Young.

5.1.1.1. PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL

Las dimensiones de la probeta permiten realizar más medidas variando la posición de las “galgas extensométricas virtuales”. En la parte inicial de la zona elástica las curvas son coincidentes (Figura 5.3) pero a medida que se avanza hacia el límite elástico, que en estas probetas está perfectamente definido, las curvas se separan y es necesario realizar el cálculo del módulo para cuantificar la diferencia entre las diferentes posiciones.

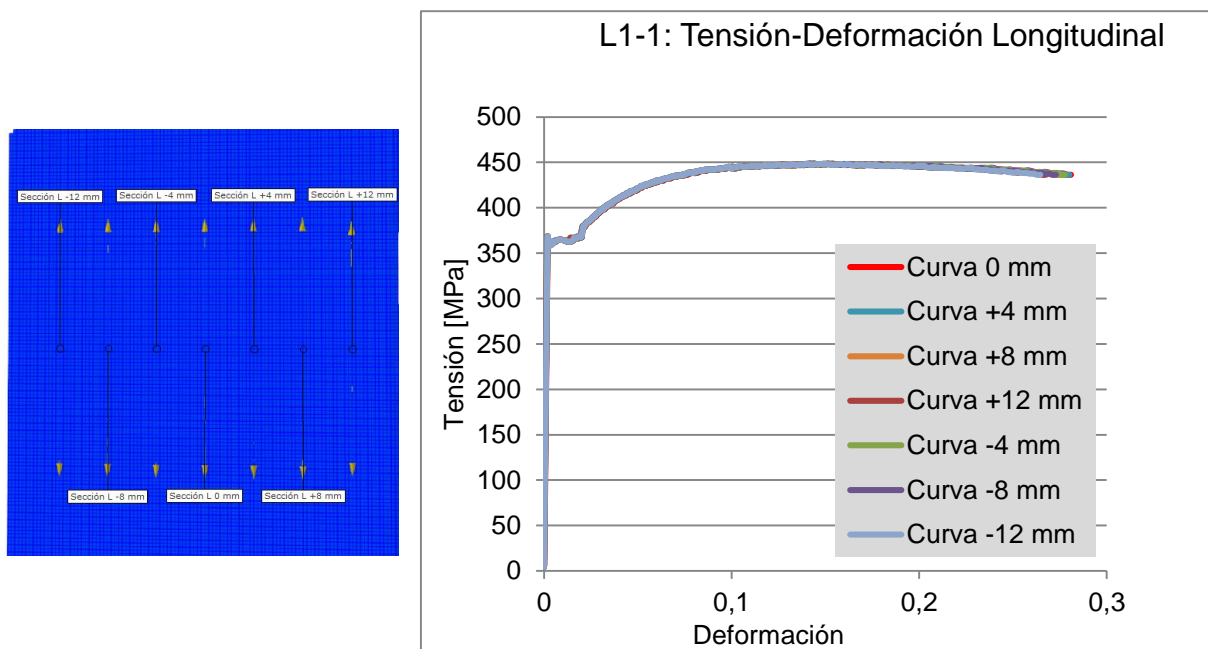


Figura 5.3: Curva tensión-deformación de una probeta de acero estructural, variando la posición

El resultado del Módulo de Young en todas las posiciones se muestra en la Tabla 5.2.

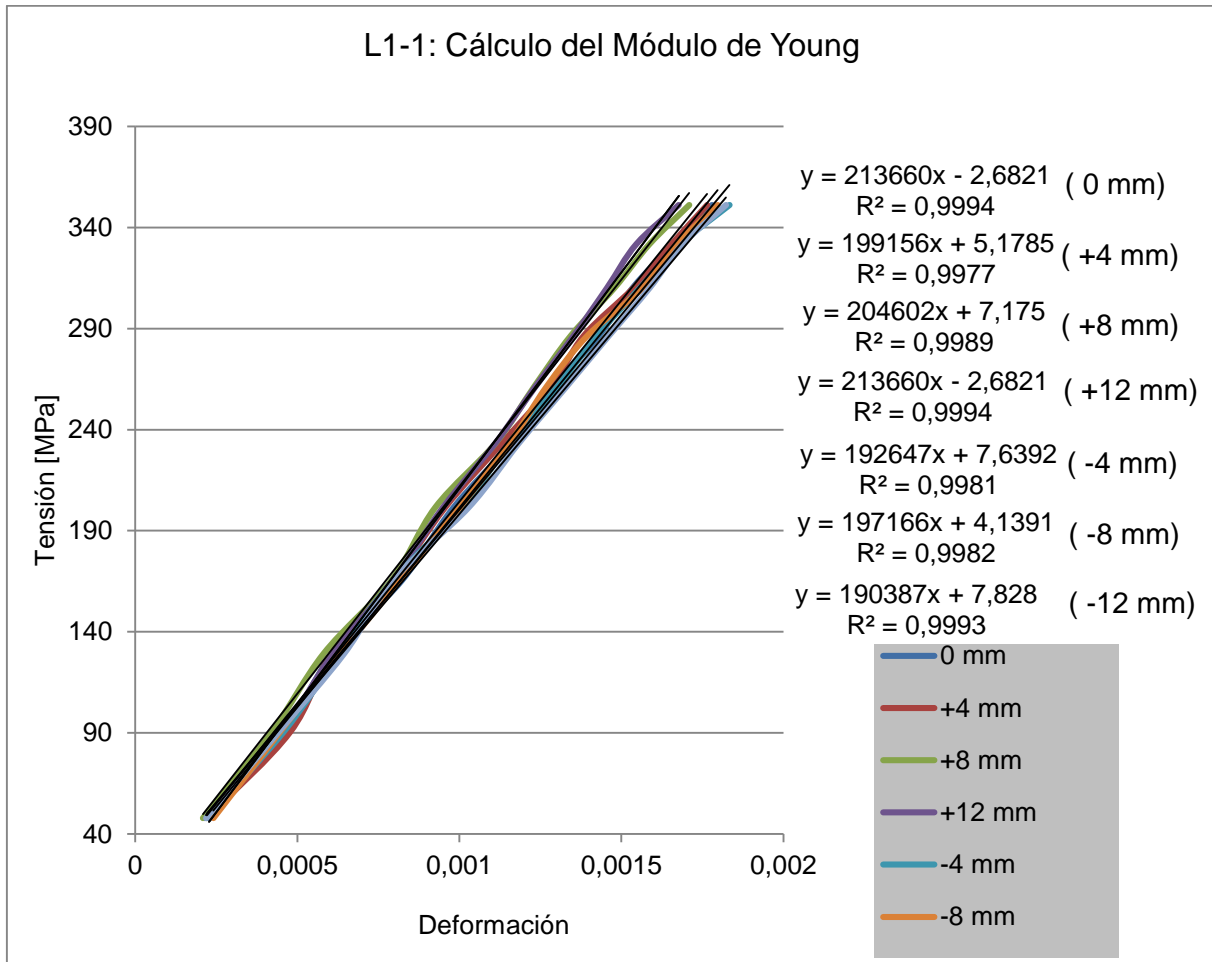


Figura 5.4: Cálculo del Módulo de Young en acero estructural, variando la posición

Probeta	Módulo de Young según posición						
	0 mm	+ 4 mm	+ 8 mm	+ 12 mm	- 4 mm	- 8 mm	- 12 mm
L1-1	213660 MPa R ² =0.999	199156 MPa R ² =0.998	204602 MPa R ² =0.999	213660 MPa R ² =0.999	192647 MPa R ² =0.998	197166 MPa R ² =0.998	190387 MPa R ² =0.999
L1-2	192197 MPa	195790 MPa	191634 MPa	204219 MPa	192197 MPa	194502 MPa	194502 MPa
T2-1	193468 MPa	196887 MPa	195791 MPa	192132 MPa	193476 MPa	194664 MPa	191586 MPa

Tabla 5-2 Tabla resumen del Módulo de Young en función de la posición para probetas de acero estructural

En este caso la probeta en la que se da mayor dispersión es la L1-1 y parece que los valores tienen tendencia de izquierda a derecha, lo que podría ser indicativo de una incorrecta alineación

5.1.1.2. PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO

Debido a las dimensiones de la probeta no se ha podido continuar con la separación establecida para los dos tipos anteriores (3 mm) y se han realizado las medidas con una separación horizontal de 1 mm, numerando del mismo modo que en los otros grupos de probetas, con origen en el centro y tomando como positivo todo lo que queda a la derecha.

En las probetas de acero pulvimetalúrgico, la medida de la deformación longitudinal en tres zonas diferentes es prácticamente coincidente en toda la curva, hasta el momento de la rotura, como puede verse en la Figura 5.5.

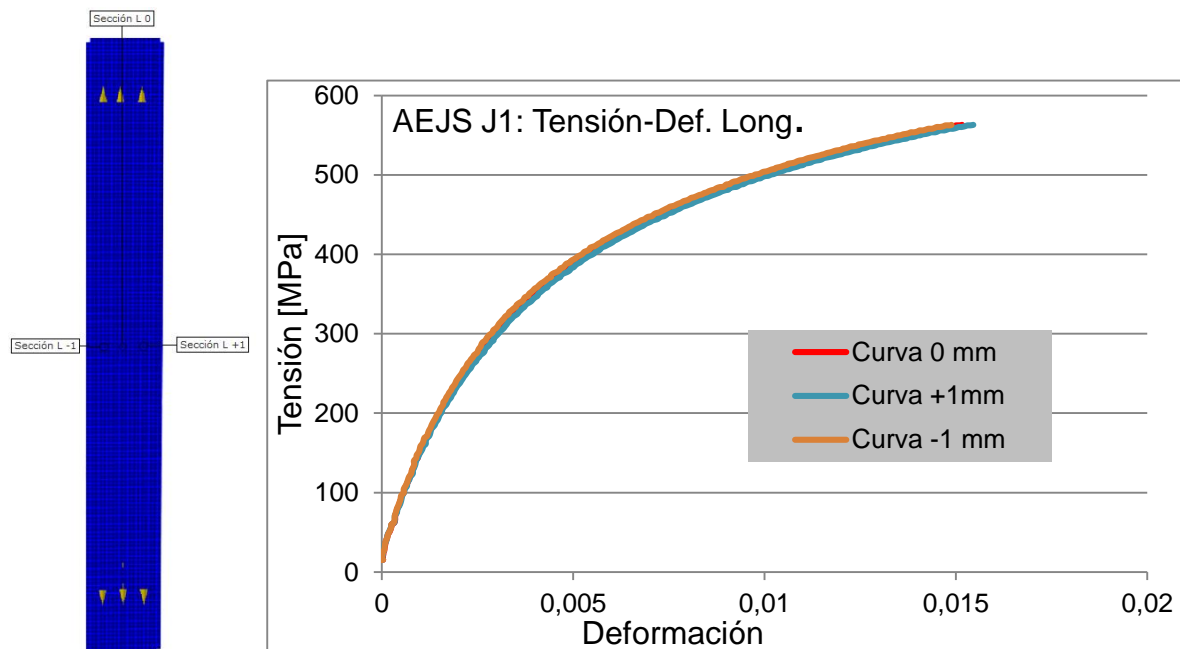


Figura 5.5: Curva tensión-deformación en acero pulvimetalúrgico, variando la posición

En la Figura 5.5 se observa que la zona que aparentemente puede interesar más para el cálculo del Módulo de Young es la que se sitúa entre 50 y 150 MPa de tensión, donde la curva se asimila a una línea recta. Una vez delimitada la zona de cálculo se procede a calcular la pendiente de la curva en esa zona, utilizando las ecuaciones de las rectas de regresión, que pueden verse en la Figura 5.6.

Observando los valores del coeficiente de determinación (R^2), se puede comprobar la bondad del ajuste, que será más preciso cuanto más próximo esté a uno. En este caso el ajuste realizado permite asegurar muy buena precisión en los resultados. El coeficiente de la "x" en la ecuación de la recta será la pendiente buscada. Con las pendientes de todas las probetas de este tipo se obtiene la información de la Tabla 5.3.

Se observa similitud entre las medidas realizadas en cada probeta, no así si se comparan las probetas entre sí. Era previsible esta variación ya que se trata de probetas con

características diferentes. La presencia de poros distribuidos de forma aleatoria, resultantes del proceso de fabricación, que estarían distribuidos de forma aleatoria de explicaría esta dispersión.

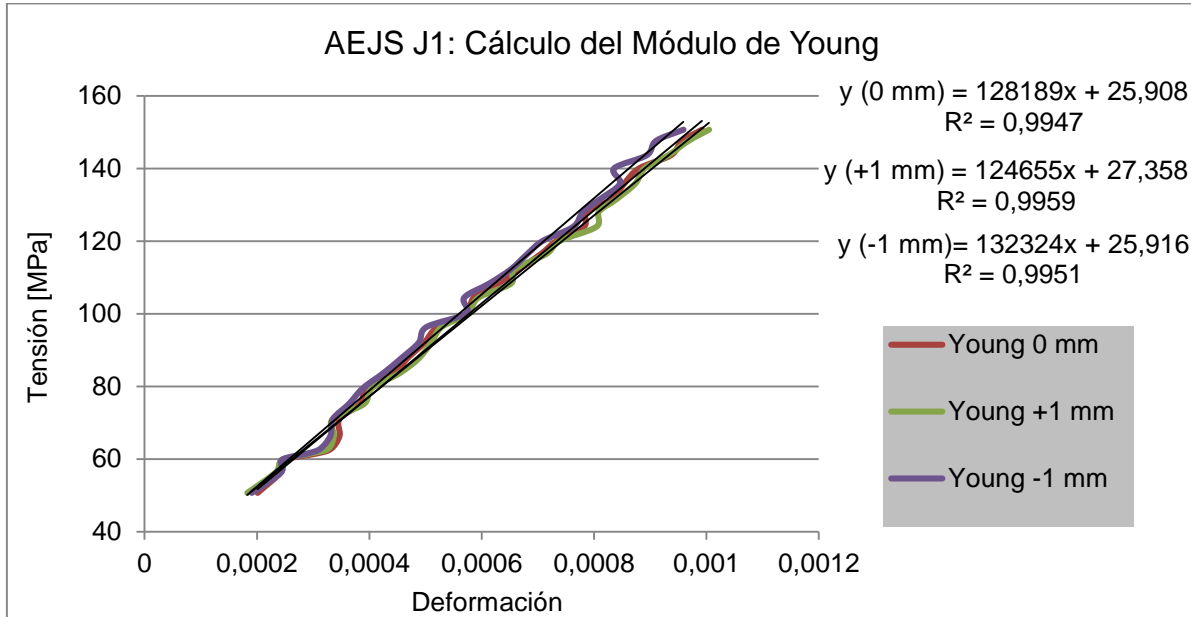


Figura 5.6: Cálculo del Módulo de Young en acero pulvimetalúrgico, variando la posición

Probetas	Módulo de Young según posición		
	0 mm	+1 mm	-1 mm
AEJS J1	128189 MPa R ² =0.9947	124655 MPa R ² =0.9959	132324 MPa R ² =0.9951
CRMJS J1	141870 MPa R ² =0.9937	150013 MPa R ² =0.9915	144337 MPa R ² =0.9930
HPJS J1	124554 MPa R ² =0.9914	119985 MPa R ² =0.9929	123337 MPa R ² =0.9947

Tabla 5-3: Tabla resumen del Módulo de Young, en función de la posición, para probetas de acero pulvimetalúrgico

5.1.2. σ - ϵ L Y MÓDULO DE YOUNG EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE REFERENCIA

5.1.2.1. PROBETAS DE NiTi

En este caso la variable estudiada es la longitud. Se realizan cuatro medidas con longitudes de 6, 12, 18 y 24 mm como puede verse en la Figura 5.7.

A continuación se muestra la curva tensión deformación con las medidas para las cuatro longitudes. Puede observarse gran coincidencia en curvas tensión-deformación. La zona de cálculo del Módulo de Young, estará comprendida entre los 45 y los 170 MPa.

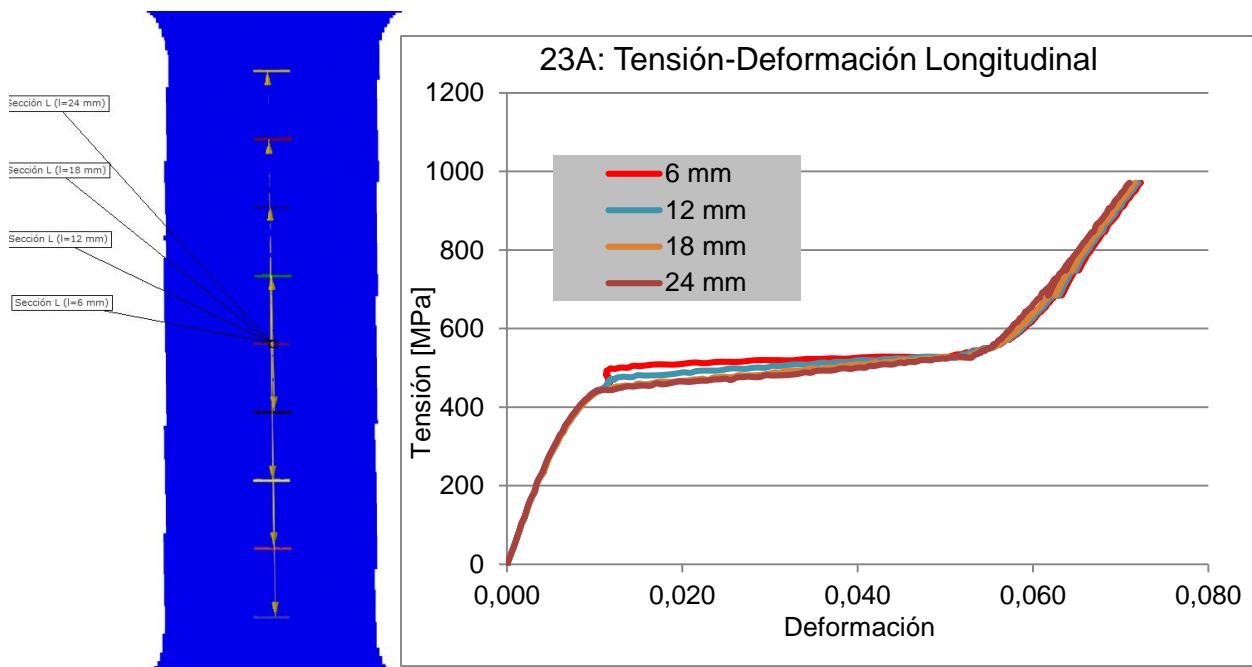


Figura 5.7: Curva tensión-deformación de una probeta de NiTi, variando la longitud

Los resultados del cálculo para la probeta 23A, se pueden ver en la Figura 5.8.

Se puede ver cierta tendencia a un aumento del módulo a asociado a un aumento de la distancia de medida, aunque sin ser en ningún caso significativa. Los valores del resto de probetas se pueden ver en la Tabla 5.4

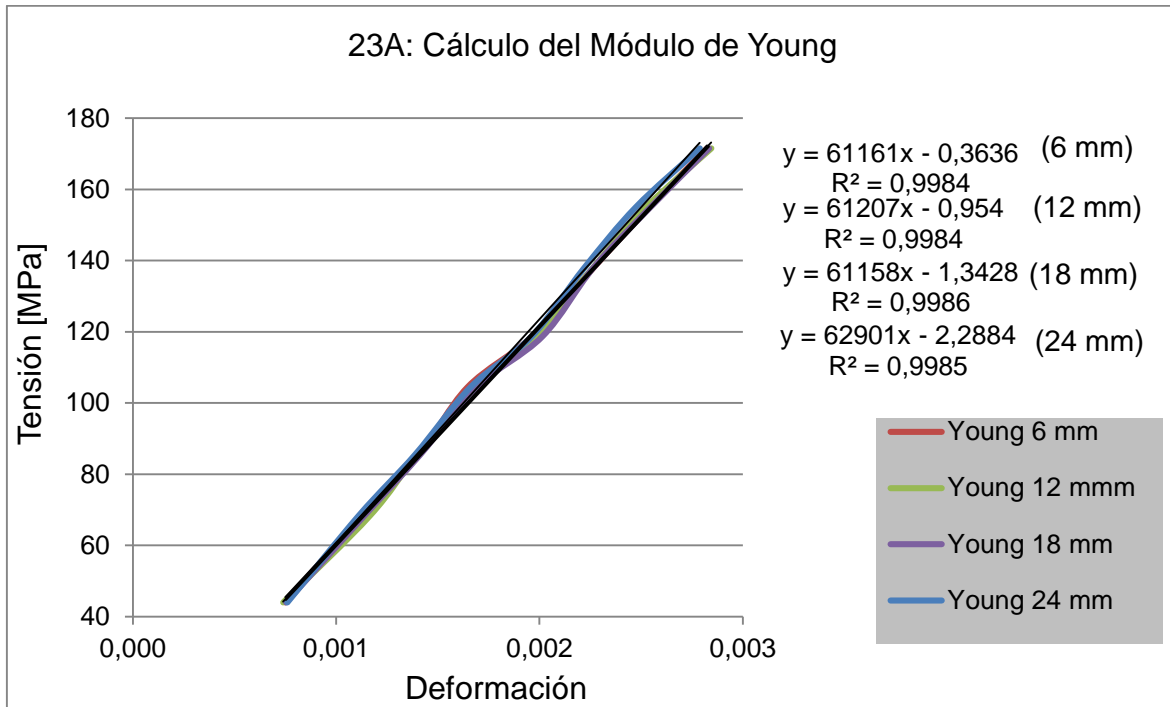


Figura 5.8: Cálculo del Módulo de Young en NiTi, variando la longitud

Probeta	Módulo de Young según longitud inicial de referencia			
	6 mm	12 mm	18 mm	24 mm
23A	59531 MPa $R^2=0.9971$	59213 MPa $R^2=0.9963$	59274 MPa $R^2=0.9968$	60961 MPa $R^2=0.9967$
23B	58894 MPa $R^2=0.9953$	58766 MPa $R^2=0.9913$	59269 MPa $R^2=0.9929$	59684 MPa $R^2=0.9952$
22B	60095 MPa $R^2=0.9978$	60151 MPa $R^2=0.9978$	61098 MPa $R^2=0.9987$	62641 MPa $R^2=0.9989$

Tabla 5-4: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de NiTi

5.1.2.2. PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL

Las medidas de deformación se realizan con longitudes de 8, 16 y 24 mm como puede verse en la Figura 5.9. En esta misma figura se recogen las curvas tensión deformación obtenidas.

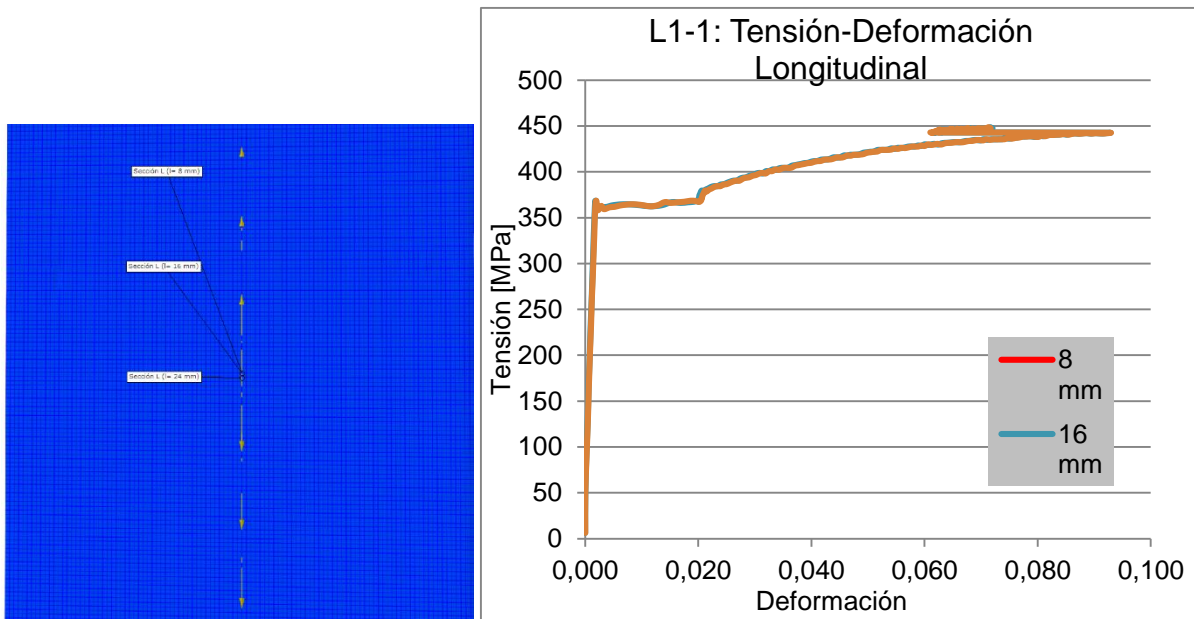


Figura 5.9: Curva tensión-deformación de una probeta de acero estructural, variando la longitud

Por su parte la Figura 5.10 recoge la zona elástica de dichas curvas así como los ajustes realizados en el cálculo del módulo elástico. Los resultados de este parámetro en función de la longitud inicial de referencia se resumen en la Tabla 5-5.

En tabla de resultados se puede ver la homogeneidad de resultados, que además no guarda ninguna relación con la longitud inicial de referencia utilizada. Los ajustes de las rectas son muy buenos en todos los casos.

En tabla de resultados se puede ver la homogeneidad de resultados, que además no guarda ninguna relación con la longitud inicial de referencia utilizada. Los ajustes de las rectas son muy buenos en todos los casos.

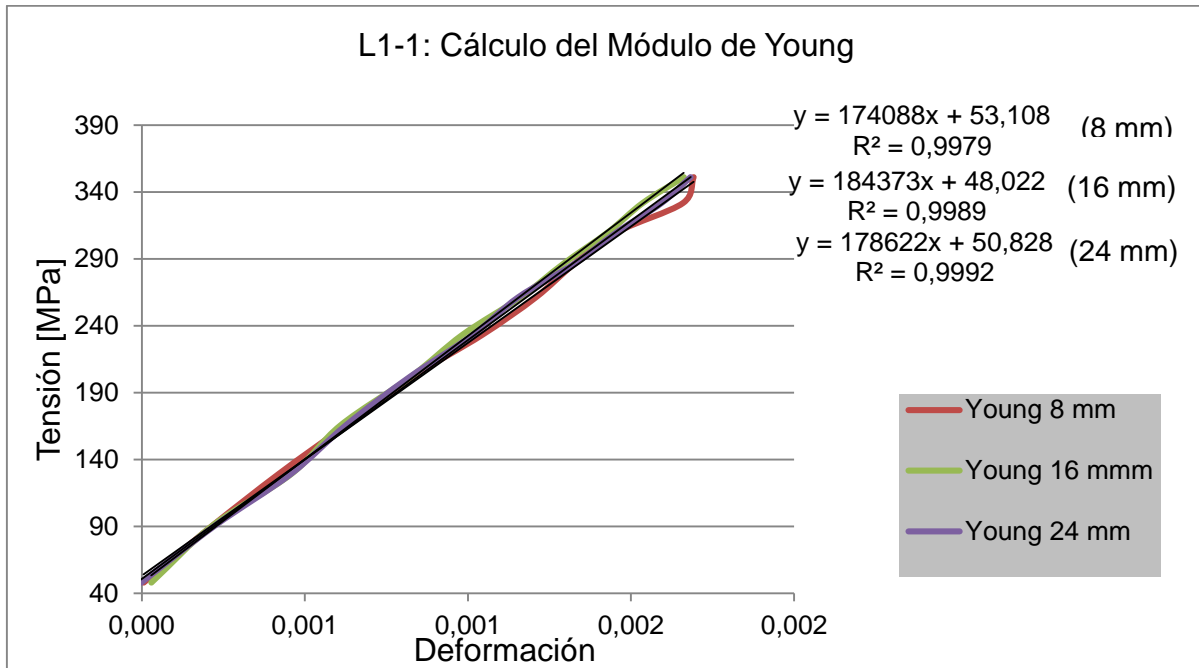


Figura 5.10: Cálculo del Módulo de Young en acero estructural, variando la longitud

Probeta	Módulo de Young según longitud inicial de referencia		
	8 mm	16 mm	24 mm
L1-1	174088 MPa $R^2=0.9979$	184373 MPa $R^2=0.9989$	178622 MPa $R^2=0.9992$
L1-2	179963 MPa $R^2=0.9948$	182198 MPa $R^2=0.9913$	180026 MPa $R^2=0.9984$
T2-1	175368 MPa $R^2=0.9974$	181995 MPa $R^2=0.9941$	183460 MPa $R^2=0.9960$

Tabla 5-5: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de acero estructural

5.1.2.3. PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO

Las medidas se realizan con longitudes de 8, 16 y 24 mm como puede verse en la Figura 5.7. En la Figura 5.11 se ve la coincidencia entre las distintas medidas realizadas en la probeta AEJS J1.

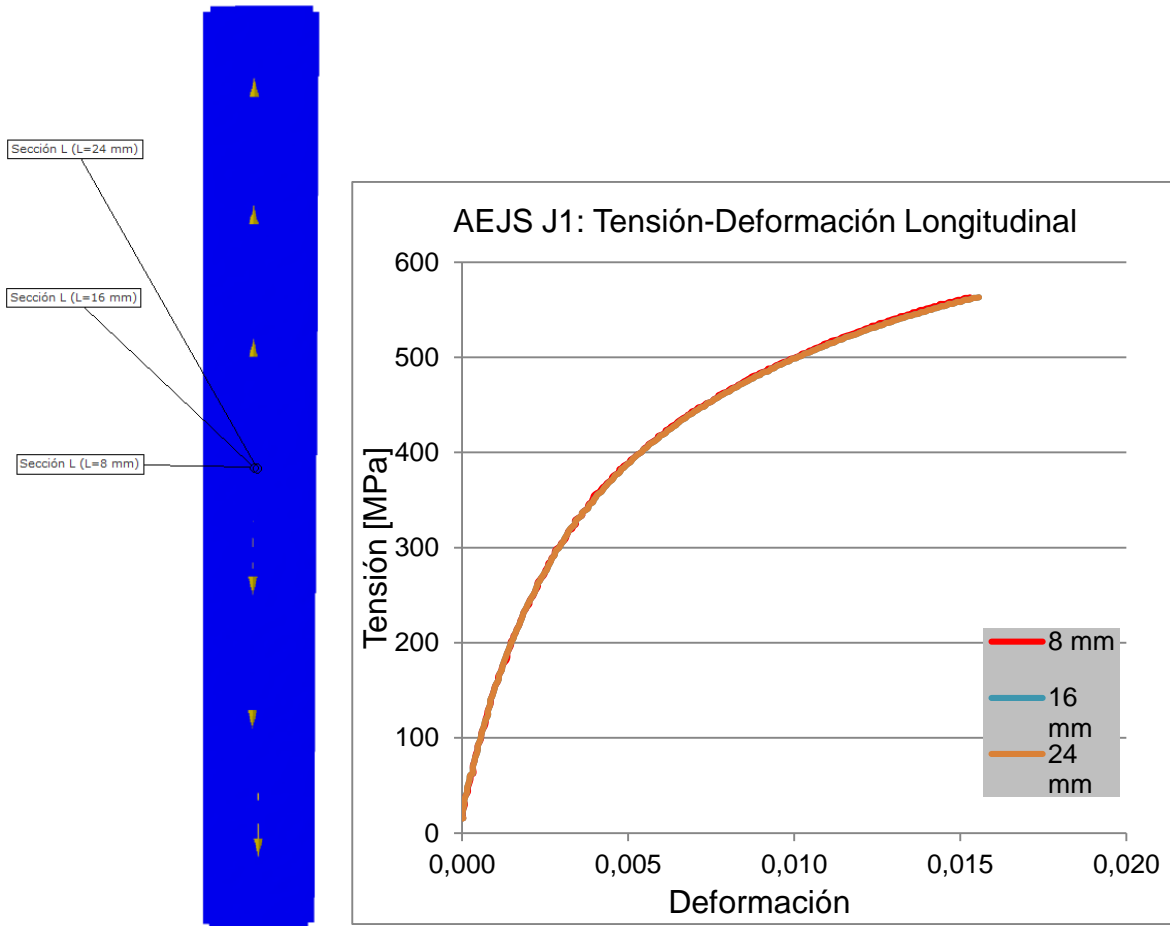


Figura 5.11: Curva tensión-deformación de una probeta de pulvimetalúrgico, variando la longitud

Para el cálculo del Módulo de Young se ha utilizado un rango de tensiones entre 50 y 150 MPa, y el ajuste de la pendiente se realizará con regresión lineal, obteniéndose los valores que pueden verse en la Figura 5.12.

De la misma forma, se realiza el cálculo en el resto de probetas del mismo tipo, obteniéndose los siguientes mostrados en la Tabla 5.6.

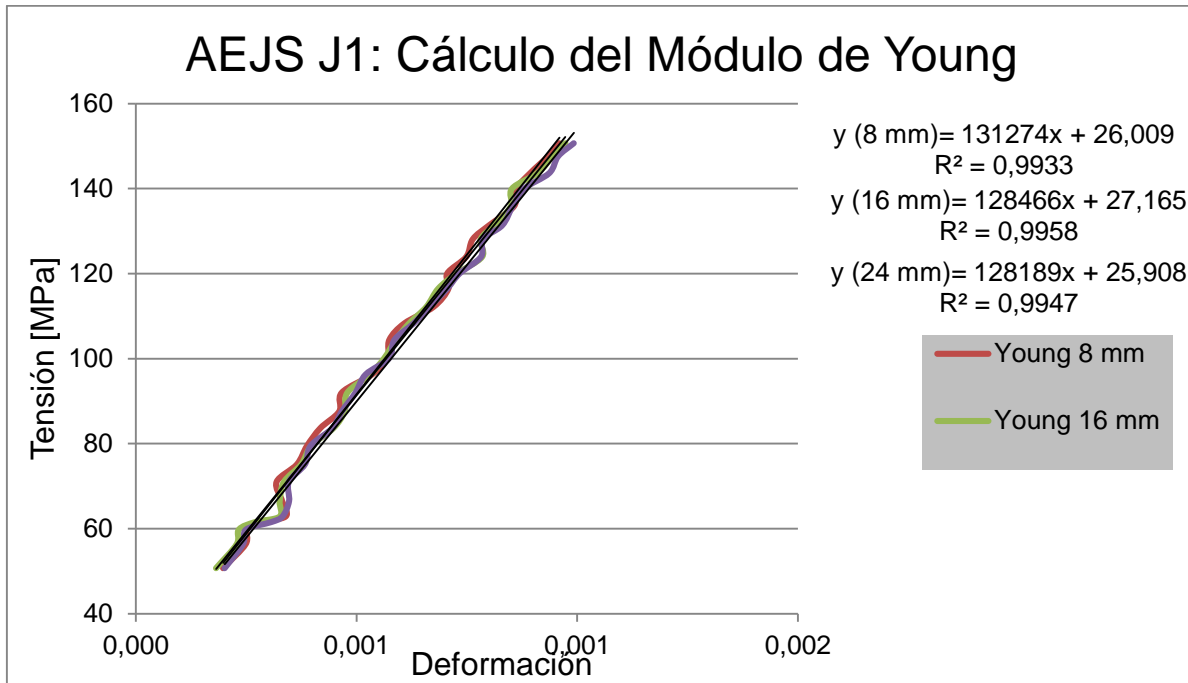


Figura 5.12: Cálculo del Módulo de Young en acero pulvimetalúrgico, variando la longitud

Probeta	Módulo de Young según longitud inicial de referencia		
	8 mm	16 mm	24 mm
AEJS J1	131274 MPa R ² =0.9933	128466 MPa R ² =0.9958	128189 MPa R ² =0.9947
CRMJS J1	119272 MPa R ² =0.9745	138402 MPa R ² =0.9924	141870 MPa R ² =0.9937
HPJS J1	121964MPa R ² =0.9789	126833 MPa R ² =0.9913	119870 MPa R ² =0.9962

Tabla 5-6: Tabla resumen del Módulo de Young en función de la longitud, para probetas de acero pulvimetalúrgico

5.1.3. σ - ϵ_T Y COEFICIENTE DE POISSON EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN

La deformación transversal utilizada para la realización de las curvas se obtiene en diferentes zonas de la probeta. La separación entre las distintas secciones horizontales es de 4 mm en vertical. La numeración se realiza desde el centro de la probeta y tomando como positivas las secciones hacia arriba y negativas hacia abajo.

5.1.3.1. PROBETAS DE NiTi

Se realizan siete medidas a 4, 8 y 12 mm del centro y de forma simétrica, es decir en los dos sentidos del eje Y (vertical), como puede verse en la siguiente figura.

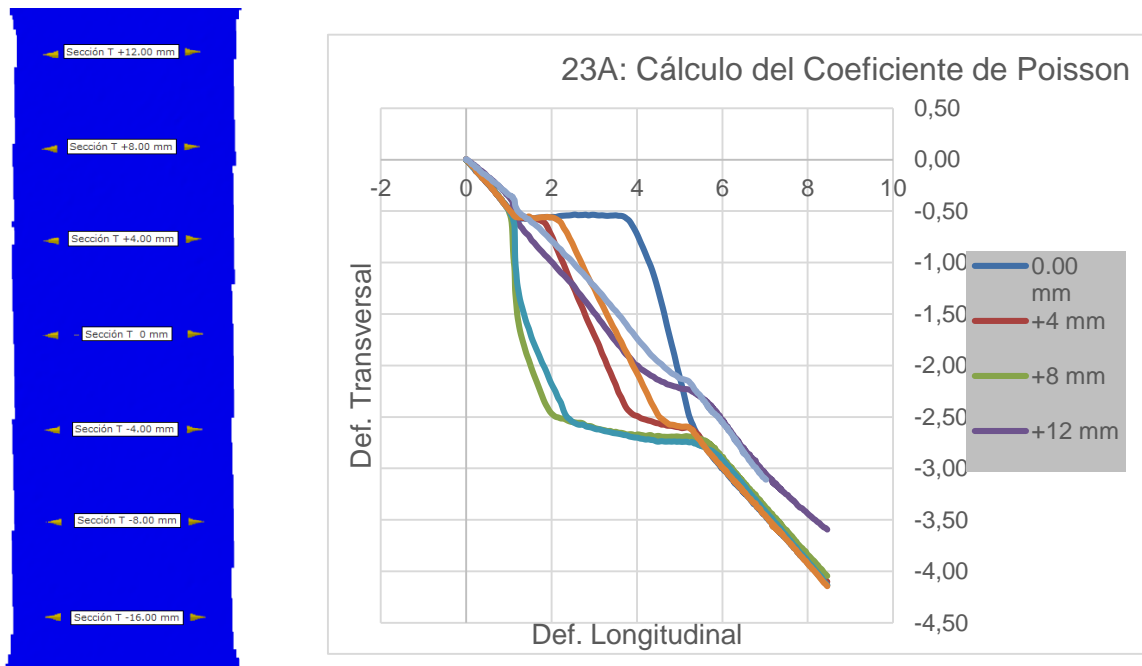


Figura 5.13: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de NiTi, variando la posición

A continuación se presenta la correspondiente a la probeta 23A. En la Figura 5.13 se aprecia que las dos curvas correspondientes con las medidas realizadas a +/- 12 mm, es decir, la zona más alejada del centro; rápidamente se diferencian del resto. Esto parece estar claramente relacionado con la existencia de concentradores de tensiones en las zonas de acuerdo circular de la probeta. Se da la circunstancia de que todas las probetas han terminado fallando por rotura frágil en esa zona de acuerdo circular. Esta diferencia tendrá gran importancia en el cálculo del Coeficiente de Poisson en cada caso, como puede verse en la Figura 5.14.

En el cálculo se ha tomado como deformación longitudinal la medida en la zona central.

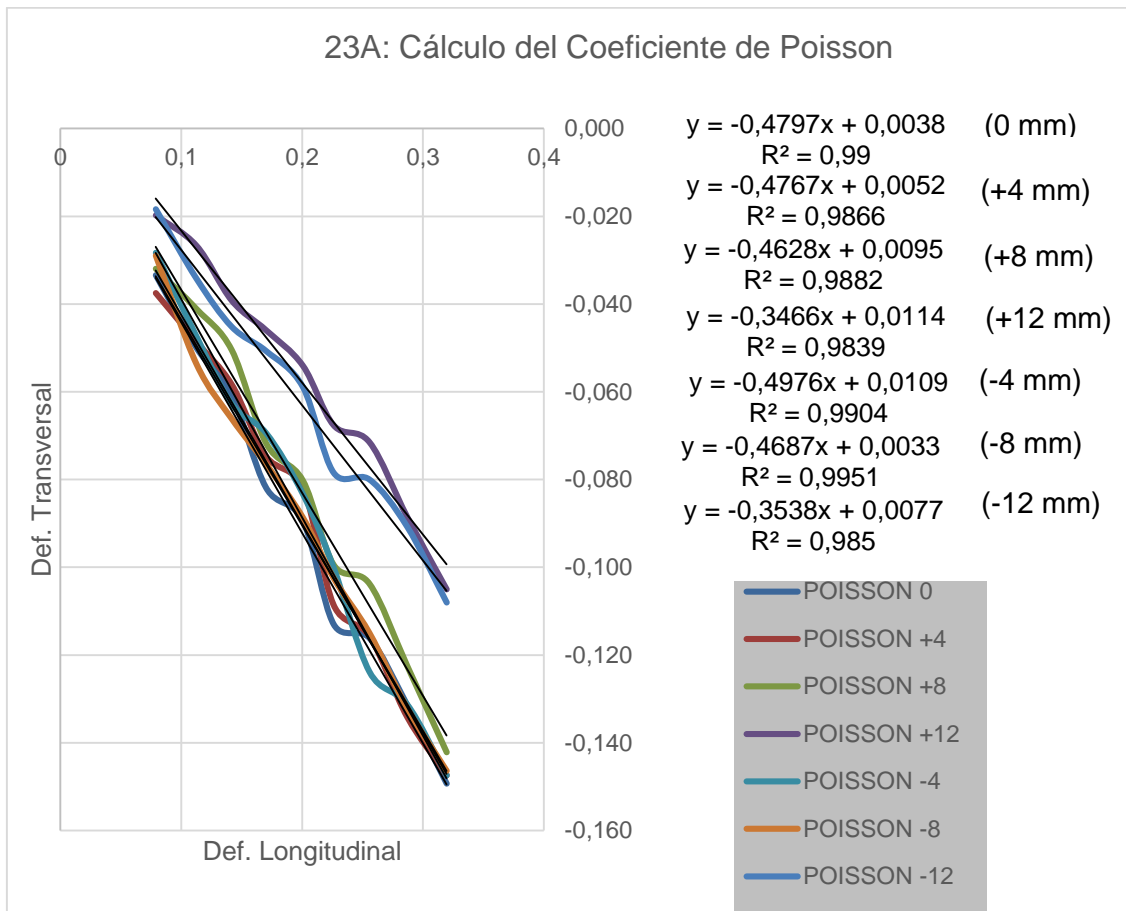


Figura 5.14: Cálculo del Coeficiente de Poisson en NiTi, variando la posición

Probeta	Coeficiente de Poisson según la posición						
	0 mm	+ 4 mm	+ 8 mm	+ 12 mm	- 4 mm	- 8 mm	- 12 mm
23A	0.48 R ² =0.9900	0.48 R ² =0.9866	0.46 R ² =0.9882	0.35 R ² =0.9839	0.48 R ² =0.9904	0.47 R ² =0.9951	0.35 R ² =0.9850
23B	0.43 R ² =0.9610	0.47 R ² =0.9896	0.45 R ² =0.9820	0.32 R ² =0.9748	0.48 R ² =0.9958	0.47 R ² =0.9993	0.35 R ² =0.9901
22B	0.48 R ² =0.9954	0.46 R ² =0.9943	0.46 R ² =0.9844	0.36 R ² =0.9682	0.47 R ² =0.9978	0.43 R ² =0.9877	0.36 R ² =0.9685

Tabla 5-7: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de NiTi

Aunque en este caso se está estudiando el Coeficiente de Poisson, parece que estos resultados tienen relación con los obtenidos en la

Tabla 5-4, y podrían explicar el aumento del valor del Módulo de Young para “galgas extensométricas virtuales” que llegan a la misma zona. Los resultados obtenidos se acercan a valores 0.5, propios de materiales incompresibles.

5.1.3.2. PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL

Se realizan medidas cada 4 mm, como puede observarse en la Figura 5.15. La numeración se realiza de la misma manera que en ocasiones anteriores, valores positivos por encima de $y=0$ y valores negativos por debajo de $y=0$.

La curva tensión-deformación transversal es similar en todas las probetas. A continuación se presenta la correspondiente a la probeta L1-1.

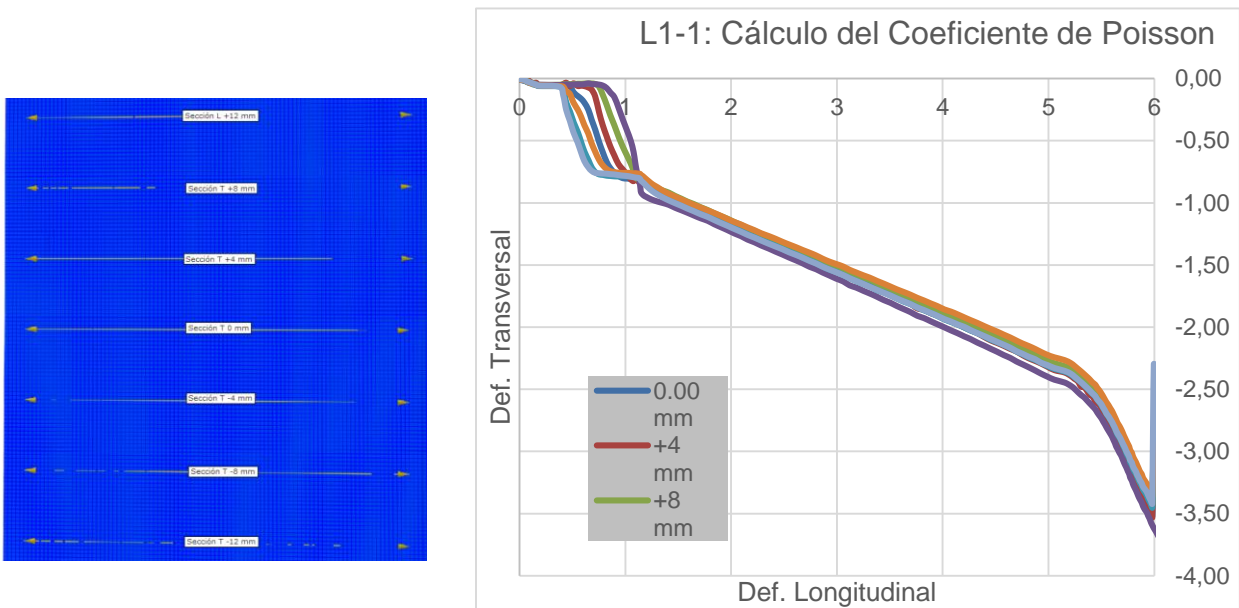


Figura 5.15: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición

El resultado del coeficiente de Poisson para este grupo de probetas es el que puede verse en la Tabla 5.8.

Se observa cierta desviación en las medidas realizadas a -12 mm, donde el resultado del cálculo nos proporciona valores del coeficiente de Poisson más bajos que en resto de casos, acentuándose más en las probetas L1-1 y T2-1

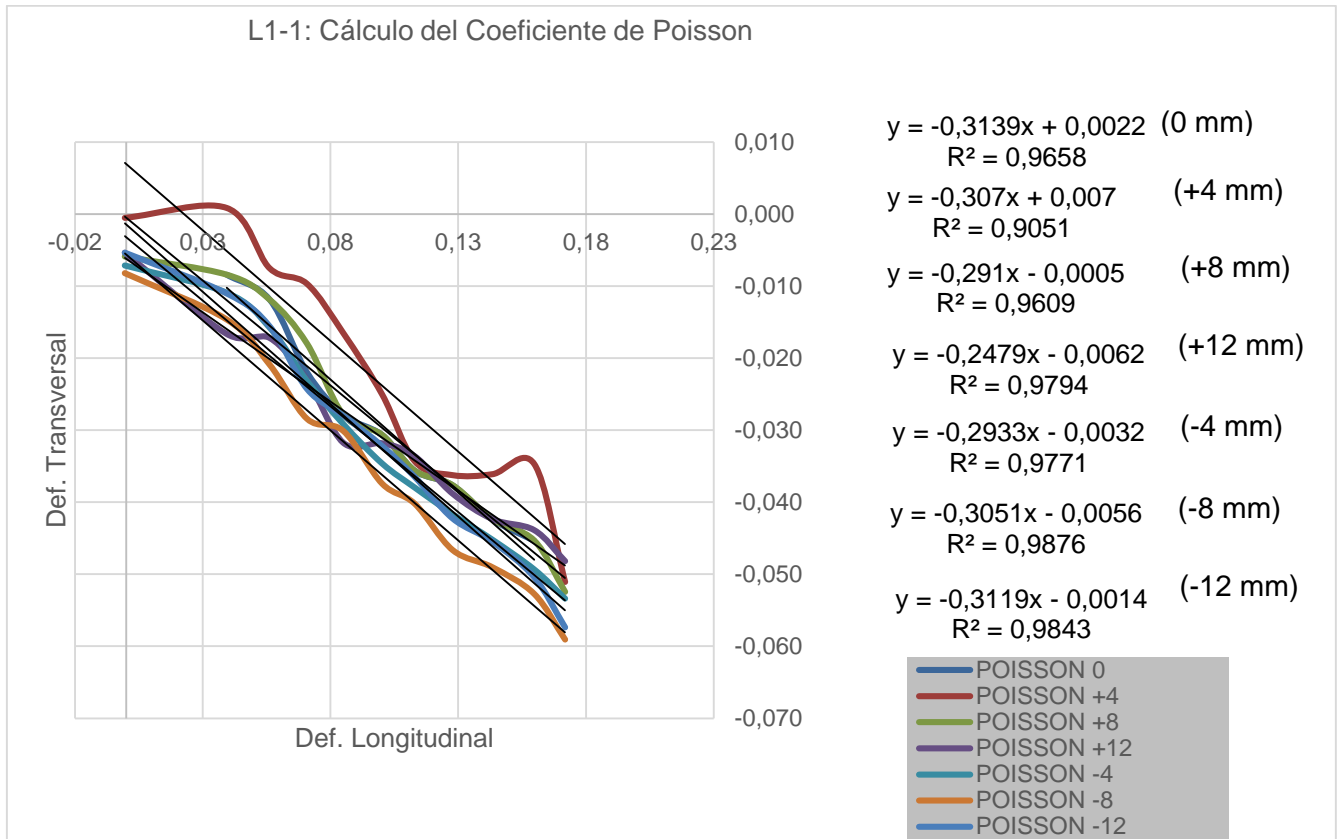


Figura 5.16: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición

Probeta	Coeficiente de Poisson según la posición						
	0 mm	+ 4 mm	+ 8 mm	+ 12 mm	- 4 mm	- 8 mm	- 12 mm
L1-1	0.31	0.31	0.29	0.25	0.29	0.31	0.31
	R ² =0.9685	R ² =0.9051	R ² =0.9882	R ² =0.9609	R ² =0.9771	R ² =0.9876	R ² =0.9843
L1-2	0.30	0.29	0.30	0.27	0.31	0.329	0.30
	R ² =0.9549	R ² =0.9447	R ² =0.9801	R ² =0.9475	R ² =0.9587	R ² =0.9635	R ² =0.9751
T2-1	0.31	0.31	0.29	0.25	0.29	0.31	0.33
	R ² =0.9630	R ² =0.9721	R ² =0.9132	R ² =0.9498	R ² =0.9714	R ² =0.9546	R ² =0.9754

Tabla 5-8: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de acero estructural

5.1.3.3. PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO

Se realizan siete medidas, separadas 4 mm en vertical, tal como puede verse en la Figura 5.17, en ella también se muestran las curvas para cada una de las posiciones de medida. La oscilación es grande ya que intervienen dos factores en contra: una línea de referencia de pequeña magnitud y una curva de comportamiento sin un tramo recto bien definido.

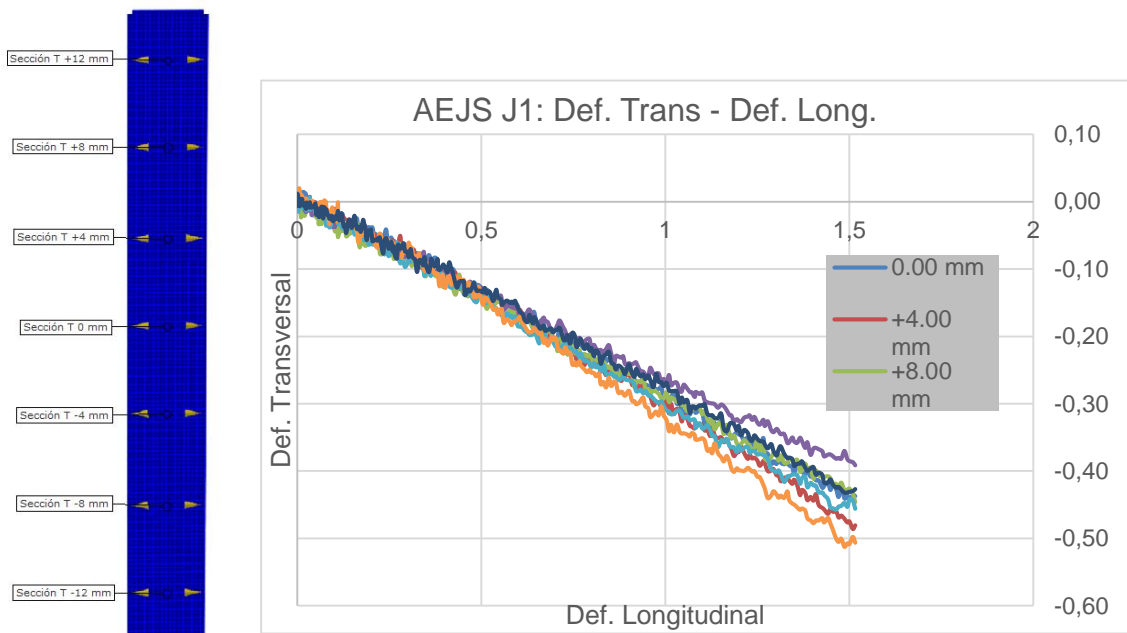


Figura 5.17: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero pulvimetalúrgico, variando la posición

Al igual que para el caso del Módulo de Young, el intervalo en el que se realizarán los cálculos es el comprendido entre 50 y 150 MPa, como puede verse en el Figura 5.17

Los valores calculados del Coeficiente de Poisson, a través de la pendiente de las líneas de regresión, presentan gran dispersión, como puede verse en la Tabla 5.9.

Se observa gran dispersión de resultados, a priori sin ninguna relación.

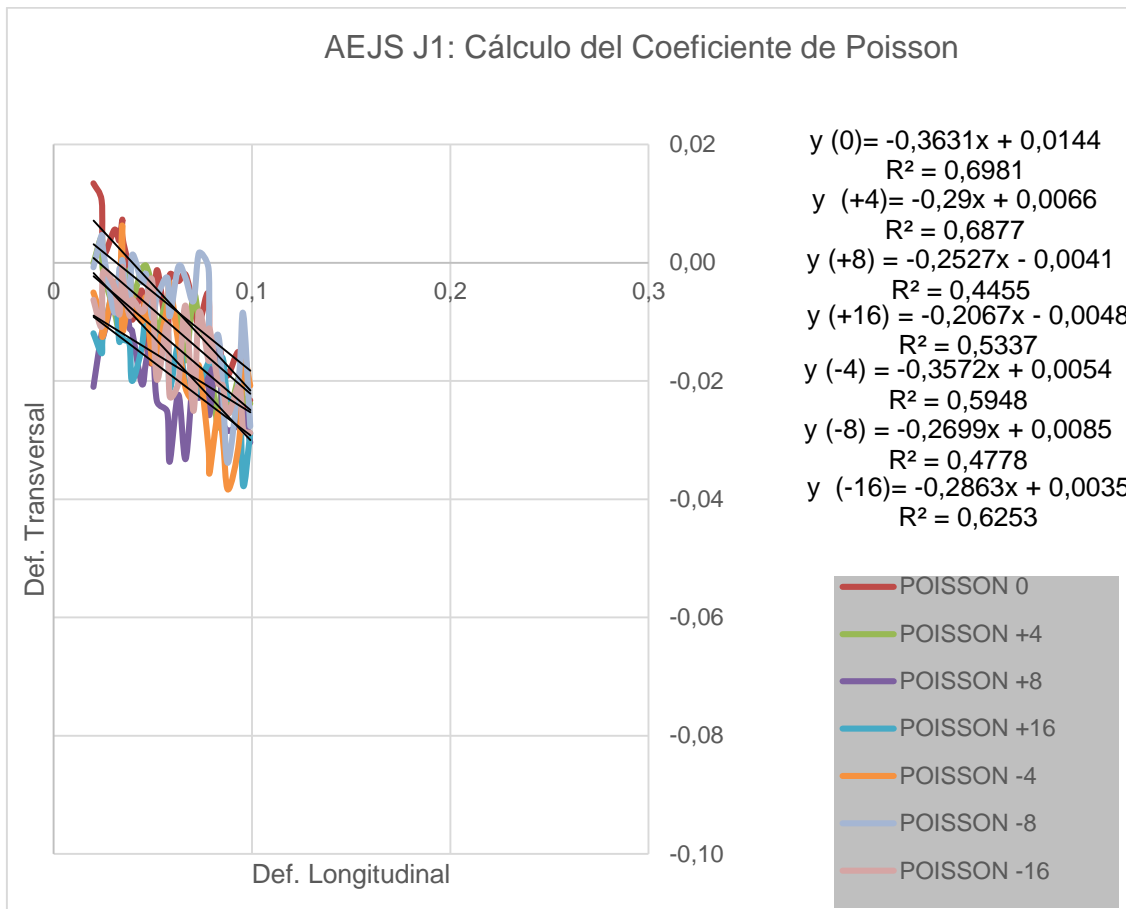


Figura 5.18: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero pulvimetalúrgico, variando la posición

Probeta	Coeficiente de Poisson según la posición						
	0 mm	+ 4 mm	+ 8 mm	+ 16 mm	- 4 mm	- 8 mm	- 16 mm
AEJS J1	0.36 $R^2=0.6981$	0.29 $R^2=0.6877$	0.25 $R^2=0.4455$	0.21 $R^2=0.5337$	0.36 $R^2=0.5948$	0.27 $R^2=0.4778$	0.29 $R^2=0.6253$
CRMJS J1	0.28 $R^2=0.1836$	0.32 $R^2=0.7149$	0.26 $R^2=0.2864$	0.24 $R^2=0.2015$	0.34 $R^2=0.02$	0.30 $R^2=0.5181$	0.29 $R^2=0.0011$
HPJS J1	0.39 $R^2=0.3467$	0.27 $R^2=0.7673$	0.38 $R^2=0.3691$	0.22 $R^2=0.3918$	0.20 $R^2=0.4793$	0.35 $R^2=0.6388$	0.33 $R^2=0.7255$

Tabla 5-9: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la posición, para probetas de acero pulvimetalúrgico.

5.1.4. σ - ϵ_T Y COEFICIENTE DE POISSON EN FUNCIÓN DE LA LONGITUD INICIAL DE REFERENCIA

En este caso se trata de ver cómo afecta la longitud de la zona de medida en el cálculo del Coeficiente de Poisson, para ello se realizarán medidas en la zona central de la probeta.

5.1.4.1. PROBETAS DE NiTi

Se realizan medidas de deformación transversal con longitudes de 4 y 8 mm, como puede verse en la Figura 5.19.

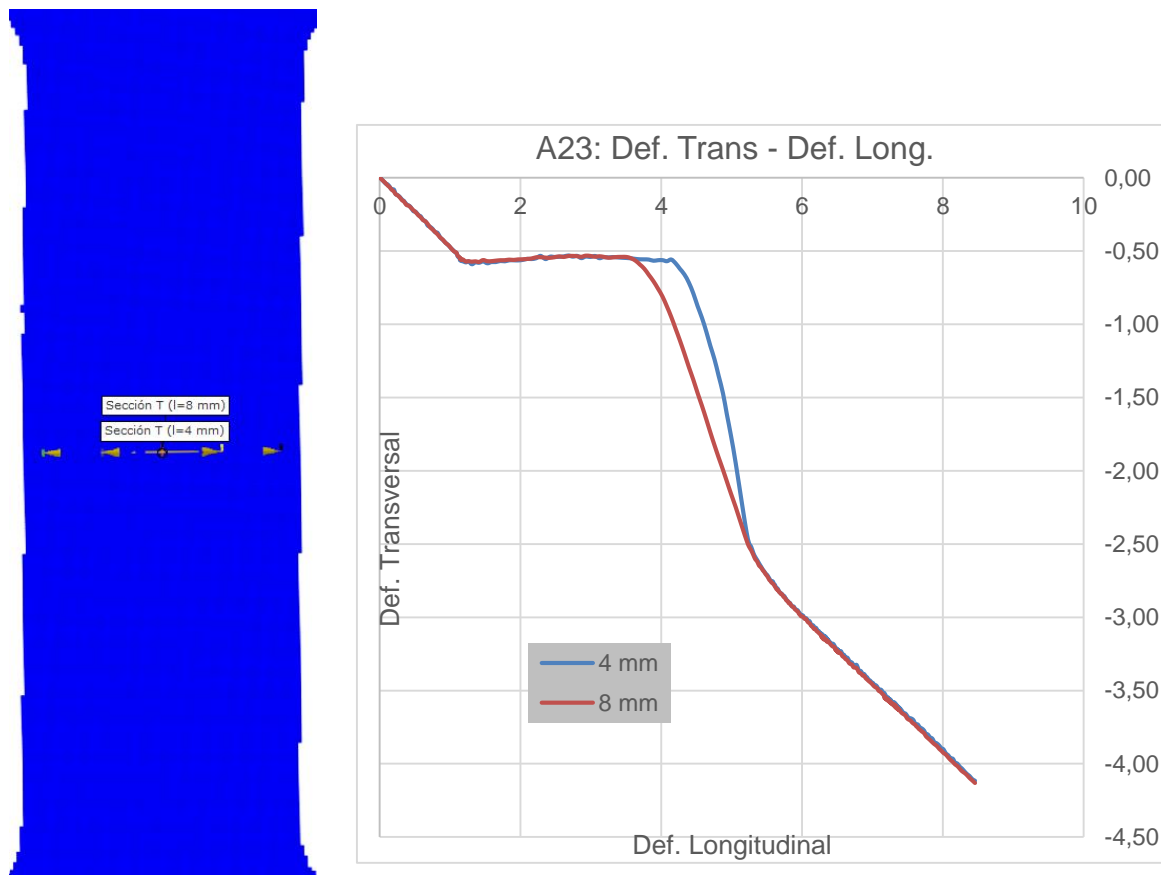


Figura 5.19: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de NiTi, variando la longitud

La curva tensión deformación es similar en los tres casos, y en ella se ve que la deformación en sentido transversal dependiente de la longitud, no se ve afectado por esta variable, como puede verse en la Figura 5.20.

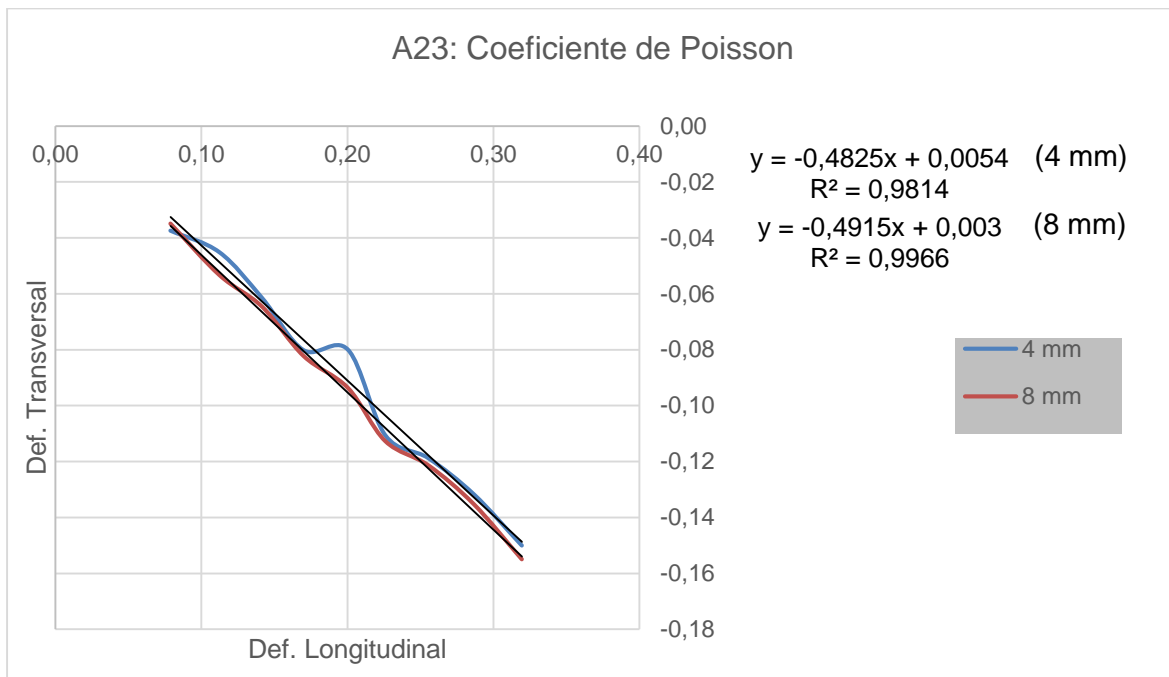


Figura 5.20: Cálculo del Coeficiente de Poisson en NiTi, variando la posición

Los valores del Coeficiente de Poisson calculados para las tres probetas pueden verse en la Tabla 5-10.

Probeta	Coeficiente de Poisson según longitud	
	4 mm	8 mm
23A	0.48 $R^2=0.9814$	0.49 $R^2=0.9966$
23B	0.49 $R^2=0.9523$	0.46 $R^2=0.9944$
22B	0.46 $R^2=0.9918$	0.45 $R^2=0.9981$

Tabla 5-10: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de NiTi

Los valores obtenidos son prácticamente iguales que los se obtuvieron para el coeficiente de Poisson para diferentes posiciones.

5.1.4.2. PROBETAS DE ACERO ESTRUCTURAL

Se realizan medidas de deformación transversal con longitudes de 6, 12 y 18 mm, como puede verse en la Figura 5.21.

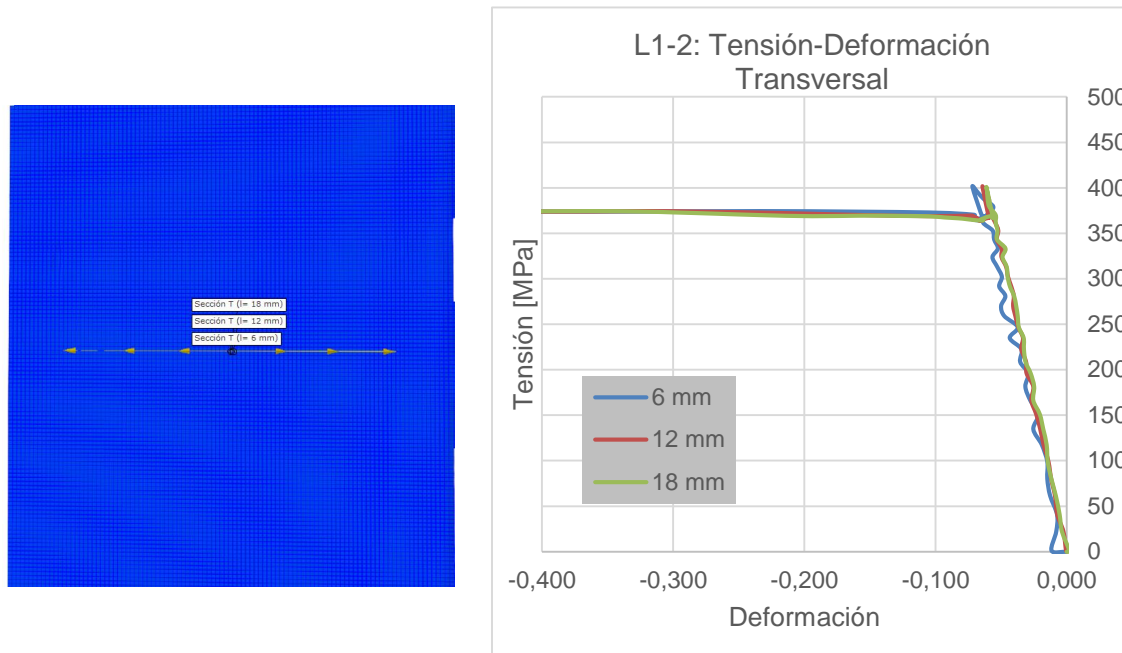


Figura 5.21: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero estructural, variando la longitud

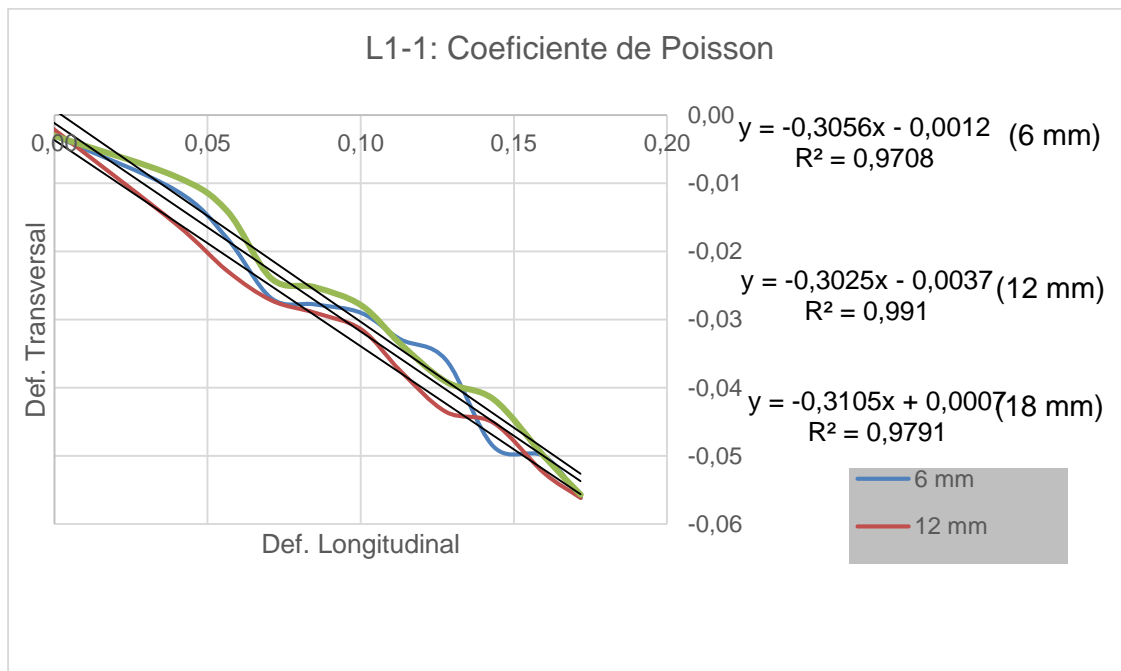


Figura 5.22: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero estructural, variando la posición

En los dos diagramas anteriores se observa que la línea correspondiente a la longitud de seis milímetros oscila más que las otras dos, sin embargo el ajuste de regresión es bueno y los resultados del coeficiente de Poisson no difieren mucho del resto como puede verse en la Tabla 5.11.

Probeta	Coeficiente de Poisson según longitud		
	6 mm	+ 12 mm	+ 18 mm
L1-1	0.31 R ² =0.9708	0.30 R ² =0.9910	0.31 R ² =0.9791
L1-2	0.30 R ² =0.9960	0.29 R ² =0.9914	0.30 R ² =0.9857
T2-1	0.31 R ² =0.9844	0.30 R ² =0.9687	0.30 R ² =0.9849

Tabla 5-11: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de acero estructural

5.1.4.3. PROBETAS DE ACERO PULVIMETALÚRGICO

Se realizan medidas de deformación transversal con longitudes de 6, 12 y 18 mm, como puede verse en la Figura 5.23.

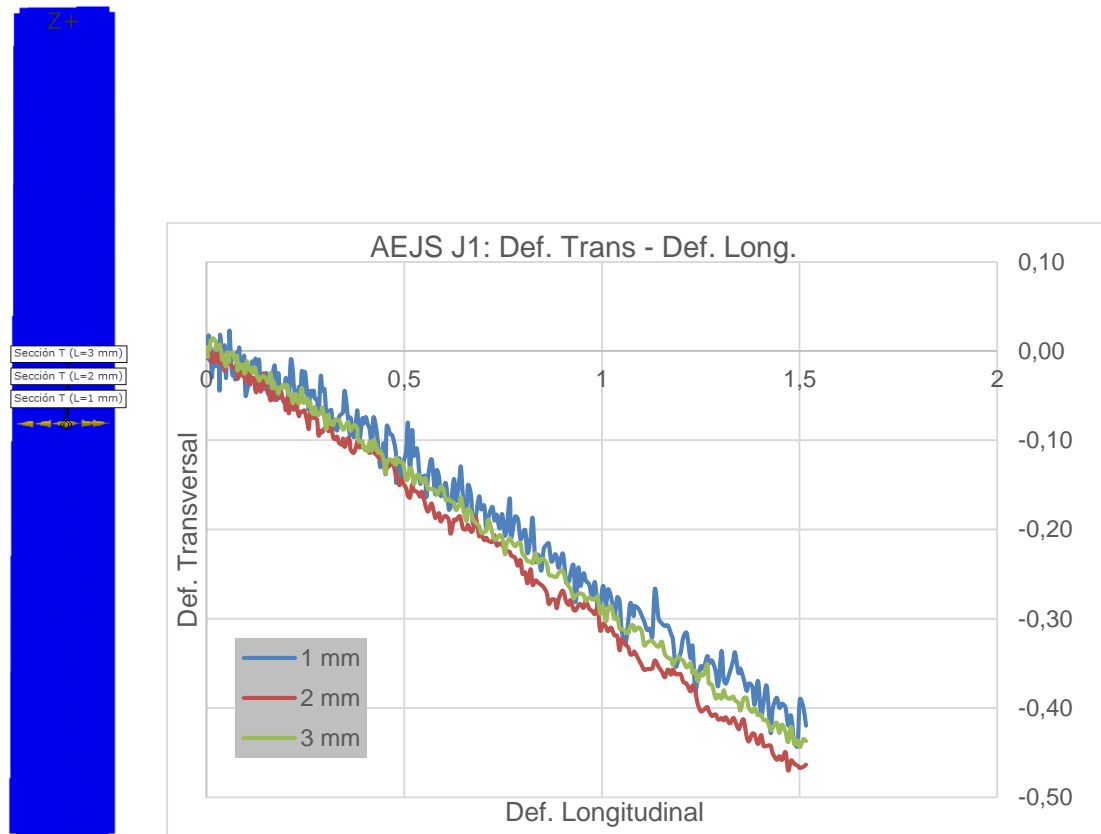


Figura 5.23: Curva Def. Transversal-Def. Longitudinal en una probeta de acero pulvimetalúrgico, variando la longitud

A continuación se muestra el diagrama Def. Transversal - Def. Longitudinal. Para el cálculo se utilizará, de nuevo la zona entre 50 y 150 MPa.

La medida realizada para una longitud de un milímetro presenta un valor del coeficiente de determinación (R^2) muy bajo, lo que indica baja precisión en el ajuste de la recta, como puede verse en la Tabla 5.12

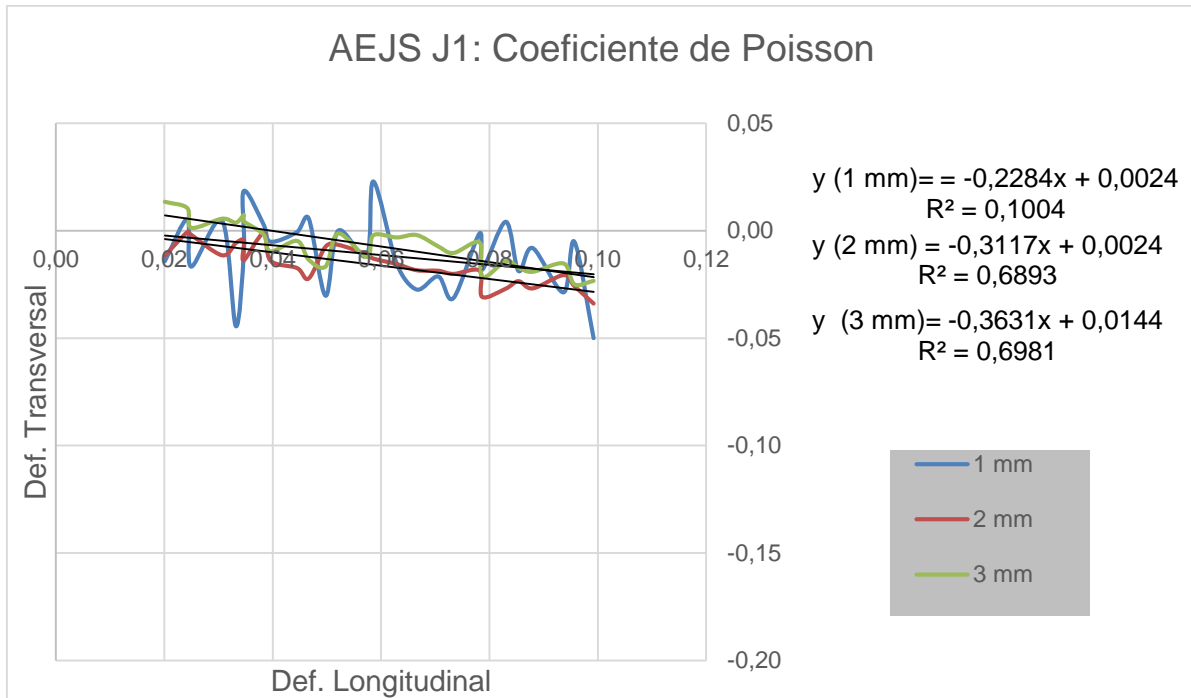


Figura 5.24: Cálculo del Coeficiente de Poisson en acero pulvimetalúrgico, variando la posición

Probeta	Coeficiente de Poisson según longitud		
	1 mm	2 mm	3 mm
AEJS J1	0.23 R ² =0.1004	0.31 R ² =0.6893	0.36 R ² =0.6981
CRMJS J1	0.23 R ² =0.0023	0.21 R ² =0.4167	0.2794 R ² =0.7999
HPJS J1	0.22 R ² =0.1631	0.34 R ² =0.3877	0.33 R ² =0.8015

Tabla 5-12: Tabla resumen del Coeficiente de Poisson en función de la longitud, para probetas de acero estructural

6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que las medidas del Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson, siempre que la probeta se encuentre en zona elástica, en general no dependen de la posición donde se realiza la medida ni de la longitud de esta.

Las probetas seleccionadas tienen comportamientos bien diferenciados, donde se podría destacar al NiTi por su elevado Coeficiente de Poisson y comportamiento con memoria de forma y al acero pulvimetalúrgico cuya porosidad ha evitado una correcta caracterización al no conseguirse homogeneidad de resultados para el cálculo del Coeficiente de Poisson.

En ocasiones puntuales han aparecido medidas discrepantes en zonas alejadas del centro geométrico de la probeta. De la misma forma, existe mayor dispersión cuando las longitudes son significativamente pequeñas, ya que la propia incertidumbre de medida hace que los errores aumenten si la longitud inicial de referencia es baja.

A la vista de los resultados podría ser conveniente delimitar una “zona segura” y una longitud mínima de las bandas extensométricas para tener la seguridad de que las medidas realizadas no se ven afectadas por los efectos anteriormente descritos. Esta zona segura podría establecerse como un porcentaje de la anchura total para el caso de medidas transversales y de la longitud de la probeta para el caso de medidas longitudinales.

A priori parece conveniente ponerse del lado de la seguridad y establecer zonas seguras de pequeño tamaño, como podría ser dos cuartas partes de la anchura en caso de medidas transversales y dos cuartas partes de la longitud en caso de medidas longitudinales. De esta forma se evitaría la acción de concentradores de tensiones por defectos en los bordes, por acuerdos mal ejecutados, etc.

Como líneas futuras de investigación podría ser interesante llevar a cabo una batería más grande de ensayos que permitiese tratar los datos estadísticamente. Esto contribuiría a acotar la zona segura y la longitud mínima de las medidas.

7. PRESUPUESTO

Con el fin de aproximar de forma real el coste del desarrollo de la presente investigación, se detalla en el presente documento el presupuesto de ejecución de la investigación llevada a cabo en el presente proyecto. En él se incluyen, tanto los costes de realización de los ensayos y procesado correspondiente, como los costes de ejecución de la presente memoria. La justificación del presupuesto se presenta a continuación:

- **Conceptos 1, 2 y 3:** Los ensayos llevados a se han facturado según tarifas habituales del laboratorio. Los ensayos a tracción realizados con la MTS 810 se facturan a 60 euros/hora, los ensayos realizados con la MTS Synergie se facturan a 40 euros/hora, y, por último, el tiempo de uso del equipo de fotogrametría, tanto en la realización de las medidas como su posterior procesado y calibración se facturan a 80 euros/hora.
- **Concepto 4:** Se ha hecho una estimación del coste para las horas empleadas tanto en el desarrollo como en el cálculo de la información obtenida de los ensayos experimentales.
- **Concepto 5:** Recoge una estimación del número de horas empleadas para la recopilación de resultados y realización de la presente memoria.
- **Concepto 6:** Hace una estimación de las distintas licencias usadas para el desarrollo de la investigación, principalmente de Aramis.
- **Concepto 7:** Engloba todo el material de oficina empleado, papel, cartuchos de tinta, encuadernación etc.

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN					
Presupuesto					
Nº	Número de unidades	Designación de las obras	Precio de las unidades	Importes	
				Parciales	Totales
				Euros	Euros
1	8	Ensayos MTS 810	60	480	4.800
2	4	Ensayos MTS Synergie	40	160	640
3	20	Equipo de videocorrelación	80	1.600	2.240
7	1	Material fungible	200	200	2.440
4	200 horas	Cálculo y análisis resultados	25	5.000	7.440
5	40 horas	Realización memoria	20	800	8.240
6	1	Licencias software	150	150	8.390
Total antes de beneficios e impuestos					8.390,00
Beneficio industrial (6%)					803,40
Total antes de impuestos					8.893,40
Impuestos (21% I.V.A.)					1.867,61
TOTAL					10.761,01
El presupuesto de ejecución del presente proyecto asciende a la cantidad de DIEZ MIL SETECIENTOS SESENTA Y UNO EUROS CON UN CÉNTIMO DE EURO					
Gijón, a 22 de Julio de 2014					

8. BIBLIOGRAFÍA

Dynamic Impact Deformation Analysis Using High-speed. **Dehmer, Jian H. Yu and Peter G. 2010.** 2010.

Error evaluation technique for three-dimensional digital image correlation. **Zhenxing Hu, Huimin Xie, Jian Lu, Huaixi Wang, and Jianguo Zhu. 2011.** 33, s.l. : Applied Optics, 2011, Vol. 50.

Fraser, Clive S. 1994. *Network design considerations for non-topographic photogrammetry.* 1994.

García Cortés, Silverio. 2003. Apuntes de Fotogrametría. *Escuela Politécnica de Ingeniería de Mieres.* s.l. : Universidad de Oviedo, 2003.

Lerma García, José Luis. 2002. *Fotogrametría moderna: Analítica y Digital.* s.l. : Universitat Politècnica de Valencia, 2002.

MESSTECHNIK, GESELLSCHAFT FÜR OPTISCHE. 2007. ARAMIS User Manual-Software. *ARAMIS v6.3 and Higher.* s.l. : GOM mbH, 2007.

Metrology, Work Group 1 of the Joint Committee for Guides on. 2008. *GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.* Primera. s.l. : JCGM, 2008.

Schenk, Toni. 2002. *Fotogrametría Digital.* Primera. s.l. : Marcombo, 2002.

9. ANEXOS

9.1. ANEXO 1: Certificados de calibración

A continuación se muestran los certificados de calibración de la banda extensométrica y del patrón de calibrado en fotogrametría.

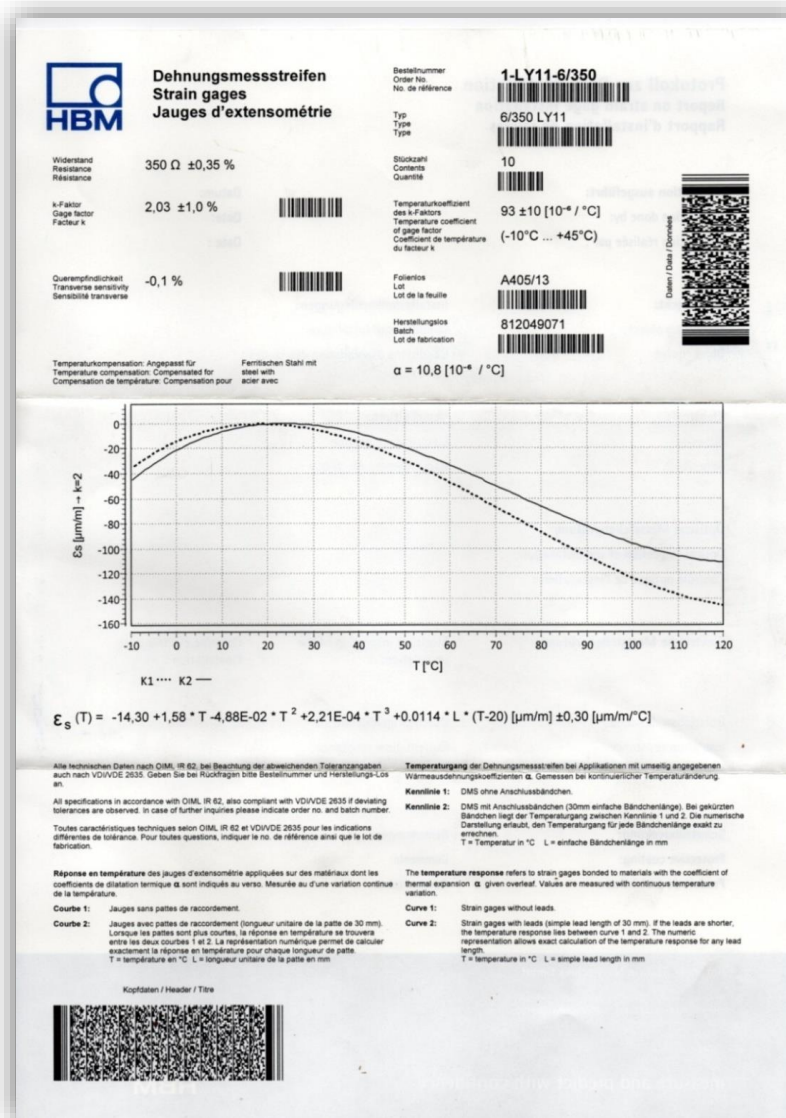


Figura 9.1: Certificado de calibración de la banda extensométrica.



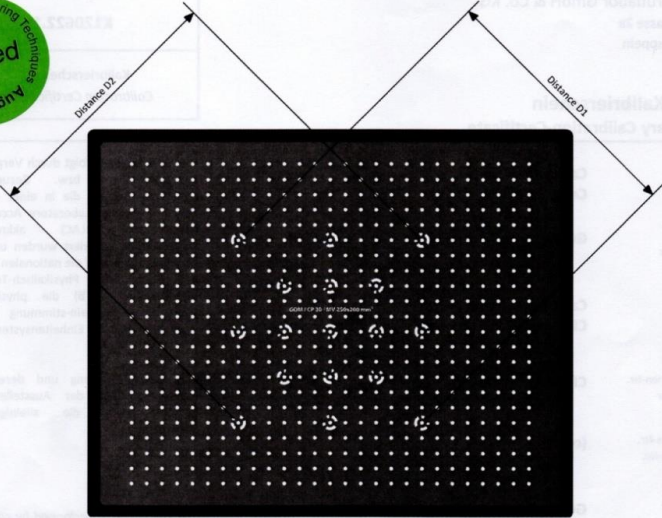
		Kalibrierstelle des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) DAR-Registriernummer: DKD-K-07601 für dimensionale Messgrößen. Akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025.
Decom Prüflabor GmbH & Co. KG Barbarastrasse 2a D-24376 Kappeln		Prüflabor zur Prüfmittelüberwachung gemäß DIN ISO 9000ff. und VDI/VDE-Richtlinien 2618ff.
Werks-Kalibrierschein Proprietary Calibration-Certificate		K120622.1 Kalibrierschein-Nr. <i>Calibration Certificate-No.</i>
Gegenstand <i>Object</i>	Calibration Panel Ceramic	Die Kalibrierung erfolgt durch Vergleich mit Bezugsnormalen bzw. Bezugsnormaleinrichtungen, die in einer innerhalb der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) akkreditierten Kalibrierstelle kalibriert wurden und damit rückgeführt sind auf die nationalen Normale, mit denen die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) die physikalischen Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI) darstellt. Für die Kalibrierung und deren Dokumentation trägt der Aussteller dieses Kalibrierscheines die alleinige Verantwortung. <i>The calibration is performed by comparison with reference standards or standard measuring equipment which are calibrated by a Calibration laboratory accredited within the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) and thus traceable to the national measurement standards maintained by the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) for the realisation of the physical units according to the International system of Units (SI).</i> <i>The issuing company is solely responsible for the performance and the documentation of the calibration.</i>
Hersteller <i>Manufacturer</i>	GOM	
Typ <i>Type</i>	Calibration Panel 30 CP 20 / MV 30x24 mm²	
Fabrikate/Serien-Nr. <i>Serial Number</i>	CP20/30/D09881	
Identifikations-Nr. <i>Identification-No.</i>	(ohne)	
Auftraggeber <i>Customer</i>	GOM Gesellschaft für opt. Messtechnik mbH Mittelweg 7-8 38106 Braunschweig	
Auftragsnummer <i>Work order No.</i>	628257	
Anzahl der Seiten <i>Number of pages</i>	2	
Datum der Kalibrierung <i>Date of calibration</i>	23.04.2012	
Prüfer <i>Inspector</i>	P. Ludwig	
Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung der ausstellenden Firma. Dieser Kalibrierschein wurde per EDV erstellt und hat ohne Unterschrift Gültigkeit .		This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing company. This calibration certificate was made by electronic data processing and is legal without signature
Decom Prüflabor GmbH & Co. KG Telefon: +49 (4642) 9855-0 Telefax: +49 (4642) 9855-20 Internet: http://www.decom.de		Persönlich haftende Gesellschafterin: Decom Prüflabor Verwaltungs GmbH Amtsgericht Kappeln HRB 272

Figura 9.2: Certificado de calibración del patrón de calibración de las cámaras. Anverso.

Protokoll-Nr Protocol N°	K120622.1	Decom Prüflabor GmbH & Co. KG	Seite Page	2 / 2
Gegenstand Object	Calibration Panel (Ceramic)	Serien-Nr. Serial-N°	CP20/30/D09881	
Typ Type	CP 20 / MV 30x24 mm²	Material Material	Ceramic: $4.00 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$	
Prüfanweisung Test instructions	Decom / GOM Test Instructions according to VDI/VDE/DGQ 2618, Blatt 27 "Prüfanweisung für Sonderlehren und Prüfvorrichtungen"			

Measuring Results		
Testing Feature	Measured Value [mm]	Measured Value [inch]
D1	27.156mm	1.0691 in
D2	27.158mm	1.0692 in

Ambient conditions		Remarks
Temperature	Relative air humidity	
(20 ± 1) °C	(50 ± 10) % rF	

Measurement standards		
Nr	Measuring system	Traceability to national standards
1)	OGP Smartscope Vantage 600 (2D x- and y-axis)	Gauge blocks 1054 DKD 01301
		exp. measurement uncertainty (P = 95%) $U = 1.50 \mu\text{m} + 4.00 \cdot L \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$, L = Length

Figura 9.3: Certificado de calibración del patrón de calibración de las cámaras. Reverso.

