

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Técnica de videocorrelación aplicada al estudio del
contacto entre sólidos

Autor: Roberto Serrano Cabello

Tutor: Rosario Chamorro Moreno

Dep. Ingeniería Mecánica y de Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Técnica de videocorrelación aplicada al estudio del contacto entre sólidos

Autor:

Roberto Serrano Cabello

Tutor:

Rosario Chamorro Moreno

Profesora ayudante doctor

Dep. Ingeniería Mecánica y de Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo Fin de Grado: Técnica de videocorrelación aplicada al estudio del contacto entre sólidos

Autor: Roberto Serrano Cabello

Tutor: Rosario Chamorro Moreno

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mis padres y hermanos

A mis abuelos

A Jennifer y amigos

Agradecimientos

Quiero comenzar este espacio agradeciendo a mis padres su dedicación y esfuerzo para que sus hijos podamos seguir creciendo en el ámbito formativo que cada uno de nosotros hemos elegido. También les estoy muy agradecido por su confianza en mí e incondicional apoyo. Estaré siempre orgulloso de su labor como padres. Sin ellos este documento nunca habría visto la luz.

De igual modo a mis hermanos, Irene y Jorge, y a los verdaderos amigos, quienes me ayudan a desconectar de la rutina: muchas gracias.

Agradecido enormemente a Jennifer, por haber estado a mi lado como fuente de tranquilidad en los momentos de frustración y desánimo que he sufrido estos últimos meses.

También de forma especial agradezco a Rosario Chamorro Moreno la ayuda prestada e implicación en este proyecto. De igual forma, a las personas que cada día se encuentran en el laboratorio de Ingeniería Mecánica, por haber puesto a mi disposición las instalaciones y haberme tendido la mano cada vez que he demandado su ayuda.

Por último, quiero hacer mención a mis abuelos, a quienes brindo este trabajo porque estoy seguro que, allá donde estén, sentirán un gran orgullo viendo a su nieto concluir la carrera universitaria.

Roberto Serrano Cabello

Sevilla, 2015

Con la presente investigación se ha tratado de aportar información de interés acerca del funcionamiento de un equipo de correlación de imágenes digitales, que implementa una técnica cuya aparición en el mercado es reciente. Concretamente se ha utilizado el sistema VIC 2D de Limesh con el que se cuenta en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

Se trata de un sistema de medición óptica de desplazamientos y deformaciones, lo que resulta de gran valía en investigaciones enfocadas al estudio del comportamiento de materiales.

Se ha puesto a prueba en situaciones en las que todavía no había sido utilizado, como son la medida de pequeñas deformaciones y su aplicación al problema del contacto. El motivo por el que se ha querido indagar acerca de la respuesta del sistema ante esas circunstancias ha venido dado por el deseo de conocer si, en investigaciones futuras, podría ser implementada la técnica en el mundo ferroviario, concretamente para la adquisición de información sobre la interacción rueda – carril.

Tras recabar información acerca del algoritmo interno del sistema y su funcionamiento, se ha llevado a cabo una caracterización experimental del régimen elástico de probetas de aluminio 7075, con el fin de validar la calibración y los resultados del equipo.

Posteriormente se ha analizado su respuesta en problemas de contacto estático entre sólidos metálicos, comparando los resultados experimentales con los que se obtienen tanto en simulaciones con elementos finitos como en procedimientos teóricos basados en soluciones clásicas de la mecánica del contacto.

En Anexos se incluye una guía que ha sido elaborada para facilitar el uso del software del sistema, recogiendo la secuencia de instrucciones que ha sido ejecutada en los ensayos de este proyecto para la obtención de mapas y evoluciones en tiempo de deformación.

Abstract

This research has tried to provide relevant information about the operation of a digital images correlation system what implements a recent technique at present. Specifically, it has been used the VIC 2D Limes system which can be found in the laboratory of Mechanical Engineering of the Advanced School for Engineers of Seville.

This is a system that provides an optical method for measuring deformations and displacements which is a relevant factor in researches focused on the investigation of the behaviour of materials.

It has been tested in situations in which it had not been experimented yet such as the measurement of small deformations and its application to the contact problem. The reason of the inquiry about the response of the system in these circumstances is related to the desire of knowing if, in future investigations, it could be implemented this technique in the railway industry, specifically for the acquisition of information about the wheel-rail interaction.

After collecting information about the internal algorithm of the system and its functioning, it has been carried out an experimental characterisation of the elastic behaviour of specimens of aluminium 7075 to validate the calibration and the results of the equipment.

Subsequently, it has been analysed its response in problems of static contact between metallic solids comparing the experimental results to the obtained ones in simulations with finite elements and in theoretical procedures based on classical solutions of the contact mechanics.

In the Annex is included a guide that has been elaborated to facilitate the use of the software of the system including the sequence of instruction that has been executed in the tests of this project to the obtaining of maps and the development of deformation.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	iv
Índice	v
1 Introducción	1
1.1. <i>Motivación y objetivo</i>	1
1.2. <i>Alcance de la investigación</i>	1
1.3. <i>Metodología</i>	2
2 Correlación de imágenes digitales (DIC)	3
2.1. <i>Aplicaciones de la técnica DIC</i>	4
2.2. <i>Sistema VIC 2D</i>	4
3 Caracterización experimental del aluminio 7075 empleando DIC	8
3.1. <i>Consideraciones teóricas generales</i>	9
3.2. <i>Diseño de las probetas y procedimiento seguido</i>	10
3.3. <i>Equipo empleado</i>	10
3.4. <i>Ensayos</i>	12
3.4.1. <i>Cálculos a realizar una vez extraídos los datos experimentales</i>	13
3.4.2. <i>Direcciones principales de tensión y deformación</i>	13
3.4.3. <i>Ensayo 1</i>	14
3.4.3.1. <i>Cálculos preliminares</i>	14
3.4.3.2. <i>Datos experimentales</i>	14
3.4.3.3. <i>Resultado</i>	17
3.4.4. <i>Ensayo 2</i>	18
3.4.4.1. <i>Cálculos preliminares</i>	18
3.4.4.2. <i>Datos experimentales</i>	18
3.4.4.3. <i>Resultados</i>	21
4 Análisis del contacto estático mediante DIC	24
4.1. <i>Presentación del problema</i>	24
4.2. <i>Metodología</i>	27
4.2.1. <i>Procedimiento teórico</i>	27
4.2.1.1. <i>Contacto Hertziano</i>	27
4.2.1.2. <i>Procedimiento</i>	28
4.2.2. <i>Procedimiento experimental</i>	31
4.2.3. <i>Procedimiento para la simulación</i>	33
4.3. <i>Resultados</i>	34
4.3.1. <i>Empleando las probetas de aluminio</i>	35
4.3.1.1. <i>Resultados experimentales</i>	35
4.3.1.2. <i>Resultados en la simulación</i>	38
4.3.1.3. <i>Resultados teóricos</i>	39
4.3.1.4. <i>Deducciones</i>	41

4.3.2.	Empleando las probetas de acero	41
4.3.2.1.	<i>Resultados experimentales</i>	42
4.3.2.2.	<i>Resultados en la simulación</i>	44
4.3.2.3.	<i>Resultados teóricos</i>	45
4.3.2.4.	<i>Deducciones</i>	47
5	Conclusiones y desarrollos futuros	48
5.1.	<i>Conclusiones</i>	48
5.2.	<i>Líneas de investigación futuras</i>	50
	Referencias	52
	Anexos	53
A.	<i>Sistema VIC 2D</i>	53
A.1.	Preparación de las muestras	53
A.2.	Consideraciones generales	53
A.3.	VIC SNAP 2010	55
A.4.	VIC 2D 2009	55

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y objetivo

Con este proyecto se pretende dar a conocer información relevante acerca de la técnica de videocorrelación, al tiempo que se analiza la posibilidad de aplicarla al estudio de un problema en concreto: el contacto.

La técnica de correlación de imágenes digitales es muy novedosa y está en pleno crecimiento, de ahí que el funcionamiento de los equipos y sus posibles aplicaciones sean todavía hoy por hoy objeto de estudio.

El proyecto nace en el deseo de presentar una alternativa a las técnicas existentes en la actualidad para el estudio del contacto rueda - carril en dinámica ferroviaria. Experimentalmente, hoy día es común emplear ejes dinamométricos o sensores inerciales de bajo coste para analizar la interacción rueda - carril en los vehículos ferroviarios. Los sistemas de videocorrelación están empezando a sustituir a la extensometría en áreas donde es necesaria la medida de deformaciones y, hasta donde se sabe, no han sido todavía utilizados en el mundo ferroviario, por lo que la aplicación de esta técnica resultaría un hecho totalmente novedoso en este campo.

El contacto rueda - carril es el aspecto más importante en el movimiento de un ferrocarril, pues es el principal factor que determina el comportamiento dinámico del vehículo. Por ello, la mitad del alto coste que supone el mantenimiento de los trenes es destinado a las ruedas, focalizándolo mayoritariamente a la detección de fisuras y defectos. Tener un método óptico que permita evaluar su estado supondría un gran avance con impactos beneficiosos en el plano económico y en aspectos de seguridad. Además de optimizar las técnicas de fabricación de los elementos implicados, podría permitir que las inspecciones se realizaran constantemente, cuando el vehículo viaja con total normalidad, evitando tener que hacerlas fuera del horario usual de funcionamiento o las interrupciones en el tráfico que hoy día suponen algunos casos de mantenimiento regular.

Antes de aplicar la técnica a un caso dinámico tan complejo hay que analizar su viabilidad. Para ello, lo primero es recabar información sobre el potencial de los equipos de correlación de imágenes digitales y, luego, simular situaciones un tanto más sencillas, comparando los resultados con otros métodos para extraer conclusiones acerca de la posible aplicación al problema deseado. Es el objetivo de esta investigación.

1.2 Alcance de la investigación

En este estudio se ha utilizado el sistema VIC 2D de Limes con el que se cuenta en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Se trata de un equipo adecuado para el análisis de problemas enmarcados en la elasticidad plana.

Antes de abordar una situación dinámica de contacto con este sistema, es importante estudiar su funcionamiento en casos estáticos, ya que si éstos no pueden analizarse de buena manera, menos aún una situación con efectos dinámicos. Por ello, esta investigación centrará su estudio en simulaciones de contacto estático en un laboratorio, utilizando sólidos con geometrías similares a las de rueda y carril. Se considera también interesante tratar de limitar el estudio a un marco de pequeñas deformaciones en los materiales que serán utilizados. Aunque hoy día se admite, dentro de unos límites, cierta degradación en los materiales que participan en el contacto rueda - carril, ésta es consecuencia de concentraciones de tensión que se dan debido a los efectos dinámicos, de modo que, analizando el caso estático, debieran medirse niveles pequeños de tensión y deformación para que el funcionamiento dinámico fuese adecuado, ya que

será entonces cuando aparezcan mayores tensiones, que han de estar por debajo de los límites marcados por normativa. Es por ello que se ha querido supeditar el análisis a pequeñas deformaciones y observar la respuesta del equipo de videocorrelación a tal circunstancia.

Antes de acometer el problema de contacto, se ha utilizado el equipo en ensayos típicos de compresión a una sola probeta con el fin de comprobar la validez de los resultados, también bajo pequeñas deformaciones, lo que dará idea de la precisión que ofrece.

1.3 Metodología

Los resultados arrojados por el equipo VIC 2D se compararán con los dados por otros métodos. Se emplearán procedimientos analíticos y simulaciones virtuales mediante el programa de elementos finitos ANSYS. Por tanto, son tres las metodologías empleadas para el análisis del problema.

En los ensayos de compresión a una sola probeta, conociendo las propiedades mecánicas del material se podrá contar con la formulación de mecánica de los medios continuos para verificar los estados de deformación. En el problema de contacto, se desarrollará un procedimiento teórico deducido a partir de la ley de Hertz del contacto.

En las simulaciones se ha empleado la plataforma ANSYS Workbench, un módulo de fácil seguimiento y muy visual. Se mostrarán en detalle sus características en el capítulo 4. En cada ensayo se indicarán los aspectos oportunos en cuanto a la creación del modelo y la visualización de resultados.

2 CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES (DIC)

Tener información acerca de la deformación es realmente importante en lo que a ciencias mecánicas se refiere. Es frecuente que las investigaciones enfocadas al estudio del comportamiento de materiales y componentes estructurales requieran medidas de deformación en cualquier punto dentro de un área de interés. Es por ello que tener un mapa de deformación sobre una superficie completa de una muestra puede resultar de gran utilidad. En base a esa idea nace la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC), también conocida como videocorrelación.

Los sistemas de correlación de imágenes digitales permiten medir de forma óptica deformaciones, desplazamientos y, en algunos casos, tensiones e incluso aceleraciones, dando pie a conocer las características de un material sin interferir en sus condiciones reales, sin contacto [1]. La videocorrelación permite por tanto caracterizar el comportamiento de los materiales y la respuesta de las estructuras a las cargas externas.

Se trata de un método óptico que utiliza un análisis de correlación matemática para examinar los datos de imágenes digitales tomadas mientras que una o varias muestras se encuentran sometidas a ensayos mecánicos.

La técnica consiste en la captura de imágenes consecutivas con una cámara digital durante el periodo de deformación, para posteriormente evaluar los cambios acontecidos en la superficie de la muestra y extraer información acerca del comportamiento del material cuando está sujeto a cargas incrementales.

Esta técnica presenta varias ventajas respecto a otros métodos para la medición de desplazamientos y deformaciones [2]:

- El montaje del equipo necesario es sencillo, así como la preparación de las muestras.
- La luz necesaria para la realización de los ensayos puede ser luz natural, si bien es frecuente utilizar fuentes de luz externas para mejorar la calidad de las imágenes.
- Es versátil (pudiendo aplicarse a diferentes problemas), no invasiva y hay equipos que permiten llegar a tener 0.01 pixel de precisión para la medida de desplazamientos y 0.01% para la medida de deformaciones.
- Los algoritmos que implementa la técnica tienen bajos requerimientos computacionales, lo que permite realizar análisis en tiempo real.
- No se limita el campo de medida al punto de posicionamiento de una galga extensiométrica (método comúnmente utilizado para la medida de deformación). Esta técnica permite obtener información en toda la zona dentro del campo de visión de una o varias cámaras, lo que permite extraer mapas de deformación o tensión englobando a grandes recintos, lo que no es posible con otros métodos, como las galgas, por el alto coste que supondría entre otras cosas.

Igualmente, la técnica presenta algunas desventajas, destacando la rigurosidad en cuanto a la calidad de las imágenes tomadas y en cuanto al patrón moteado que ha de generarse en las muestras (que, aunque es sencillo aplicarlo, no puede hacerse de cualquier manera), así como la posible pérdida de información según en qué zonas quiera medirse el desplazamiento o la deformación. Se detallarán estos aspectos con posterioridad.

La investigación que se plasma en este documento ha sido llevada a cabo con un sistema de medición

estática de deformaciones 2D: VIC 2D de Limes.



Figura 2-1: Cámara digital, VIC 2D Limes

2.1 Aplicaciones de la técnica DIC

En los últimos años, gran número de investigaciones han utilizado y desarrollado la técnica de correlación de imágenes digitales donde otros métodos de medición tradicionales, por las características de los ensayos, encuentran dificultades. Con sistemas de videocorrelación se ha analizado el comportamiento de multitud de materiales ante cargas de tracción o compresión; se han investigado materiales compuestos ante sollicitaciones biaxiales; común es su aplicación en ensayos de fatiga; la técnica también se ha puesto a prueba en situaciones de mecánica de la fractura y termografía; incluso se ha explorado la deformación plástica en materiales anisótropos. La videocorrelación también ha sido empleada en el sector aeronáutico para la evaluación de propiedades mecánicas. En el sector automovilístico se ha estudiado un caso curioso, el impacto producido por la colisión con un peatón. Incluso en medicina, habiéndose investigado las propiedades mecánicas de la piel humana [2].

Apenas se ha encontrado documentación en la que se trate la medida, empleando la técnica DIC, de desplazamientos y deformaciones en un problema de contacto entre dos superficies. De ahí el interés de la presente investigación.

2.2 Sistema VIC 2D

VIC 2D utiliza algoritmos de correlación para proporcionar datos de desplazamiento y deformación en ensayos sobre probetas planas. Puede determinar el movimiento en el plano de todos los puntos dentro de la zona de medición, y obtener con ello las deformaciones que se producen. La puesta a punto del sistema no es compleja, y la preparación de muestras sólo requiere la aplicación de un patrón moteado (mediante pintura).

The VIC-2D Digital Image Correlation Measurement System

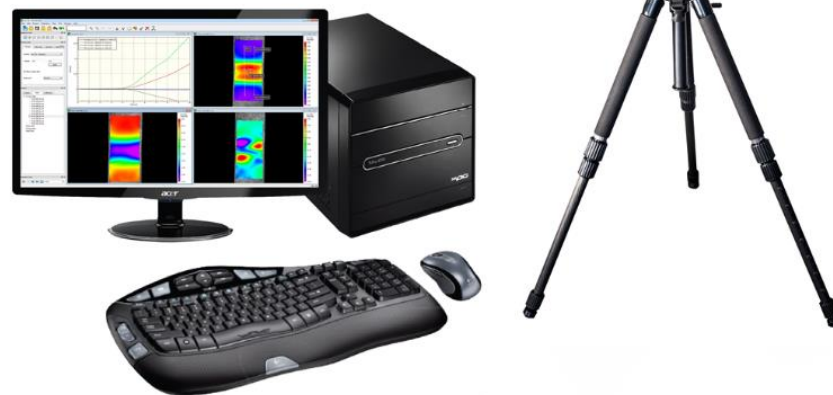


Figura 2-2: Sistema VIC 2D [3]

Su campo de aplicación es muy amplio, destacando la posibilidad de utilizarlo en casos de mecánica de la fractura, fatiga o ensayos bi-axiales de tensión/deformación [1].

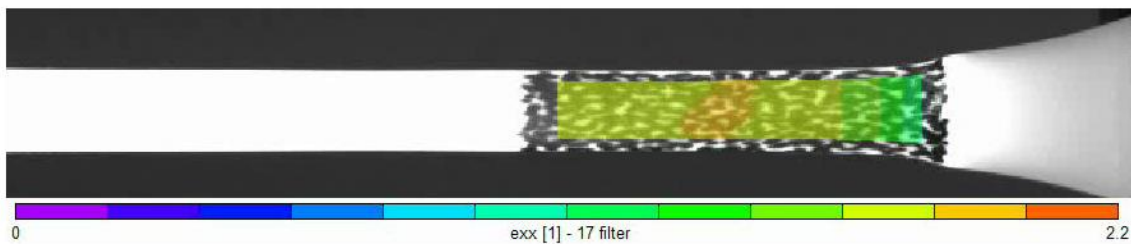


Figura 2-3: Ejemplo de un mapa de deformación obtenido mediante un sistema VIC 2D [3]

El sistema permite obtener toda la historia en tiempo de deformaciones sobre la superficie exterior de la muestra. Para ello, como ya se ha mencionado con anterioridad, es necesario obtener un patrón estocástico de motas sobre la superficie de la muestra, lo cual se consigue aplicando una base de pintura blanca mate, flexible y adherente sobre la misma, y, una vez seca, un fino patrón moteado de pintura negra mediante spray. El patrón ha de ser regular en toda la superficie de análisis y ha de poseer un alto contraste de blancos y negros, con objeto de que el sistema óptico capte su evolución correctamente [4].

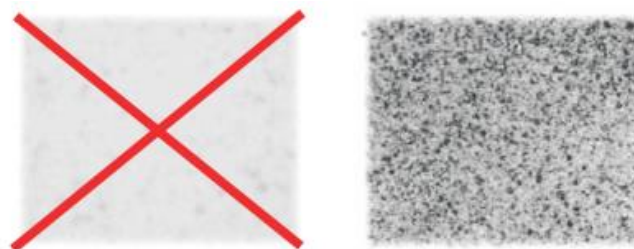


Figura 2-4: Patrón estocástico incorrecto (izqda) y patrón con buen contraste (dcha) [4]

Una vez que la muestra ha sido moteada, se capturan fotogramas de la zona de interés a una determinada frecuencia a medida que el espécimen se deforma durante el ensayo. Durante la deformación, el sistema hace un seguimiento de los cambios en el patrón estocástico de motas negras tomando pequeños subconjuntos virtuales de la muestra (denominados facetas). Mediante algoritmos de correlación, el sistema busca una región o faceta de la imagen de referencia (estado inicial, sin deformación) en la imagen deformada, determinando el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas.

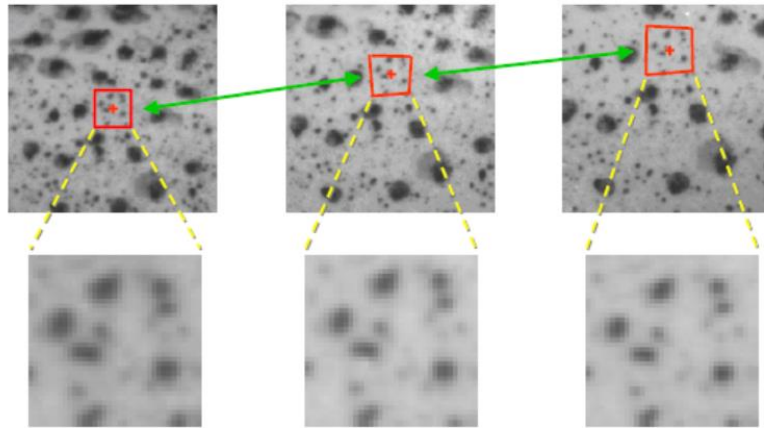


Figura 2-5: Ejemplificación de la evolución en tiempo de una faceta (elemento de correlación) [5]

En cada faceta, el sistema de correlación asigna los resultados al punto central de la misma. Los puntos centrales de las facetas conforman lo que se denomina malla. En la figura 2-6 se muestra una faceta y la malla de la que formaría parte su punto central. El principio del método consiste en reconocer cada uno de los puntos de la malla en la imagen deformada mediante identificación del nivel de grises en la faceta correspondiente a cada punto. Esto quiere decir que realmente el algoritmo lo que hace es un seguimiento del nivel de grises.

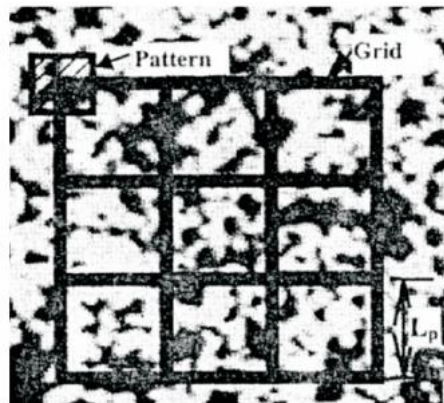


Figura 2-6: Identificación de una faceta (pattern) y la malla (grid) constituida por varias de ellas [6]

El nivel de grises de la imagen inicial se representa, por cada faceta, mediante una función discreta $f(x, y)$, la cual se transforma en otra función $f'(x', y')$ tras sufrir la deformación, esto es, $f'(x', y') = f'(x + u(x, y), y + v(x, y))$, donde $u(x, y)$ y $v(x, y)$ son los desplazamientos asociados a la faceta en el paso de un fotograma a otro. Los desplazamientos se obtienen identificando mediante correlación las posiciones de las facetas en la imagen inicial y en la imagen deformada (reconociendo el nivel de grises). Para posibilitar esto de forma precisa, el campo de desplazamientos de la faceta ha de contener tanto las traslaciones de sólido rígido como los modos de deformación. Por ello, se considera un campo bi-lineal, es decir, toma las siguientes expresiones:

$$u(a_0, a_1, a_2, a_3, x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (2-1)$$

$$v(a_4, a_5, a_6, a_7, x, y) = a_4 + a_5x + a_6y + a_7xy \quad (2-2)$$

donde a_j con $j = 0, \dots, 7$ son constantes a determinar.

El algoritmo utiliza coeficientes de correlación para calificar la similitud entre las funciones de un fotograma y otro (comparación del nivel de grises). Una correlación perfecta indica que las funciones son idénticas $f(x, y) = f'(x', y')$. Existen diversos coeficientes de correlación típicamente empleados en esta

técnica, destacando la diferencia absoluta, los mínimos cuadrados y la correlación cruzada.

El cálculo de los desplazamientos en cada faceta supone un proceso iterativo. El sistema da inicialmente una solución aproximada, típicamente un desplazamiento de sólido rígido sin considerar deformación, y la va corrigiendo en las sucesivas iteraciones. El proceso termina cuando se alcanza la convergencia, tomando el coeficiente de correlación su valor mínimo.

Una vez se tiene el campo de desplazamientos en todas las facetas y para todos los fotogramas, y conocido el estado de referencia, el sistema calcula las deformaciones en la superficie de la muestra usando la teoría clásica de deformaciones y desplazamientos a partir del cálculo del gradiente de deformación y el tensor de Hencky (asociado a deformación logarítmica o real; su formulación será expuesta en el capítulo siguiente), seleccionado éste en concreto por ser el adecuado para la presente investigación, en la que se trabajará con pequeñas y reales¹ deformaciones.

En cuanto al tamaño de las facetas, en este trabajo se ha utilizado para la mayor parte de los ensayos un tamaño de 21x21 píxeles, adecuado en la búsqueda del equilibrio entre precisión y tiempo de computación. En un principio se realizó un estudio de sensibilidad de los resultados empleando diferentes tamaños, desde 13x13 píxeles hasta 21x21 píxeles.

Para obtener mediciones precisas con esta técnica es muy importante tener en cuenta otros aspectos. Los resultados también van a depender de la resolución de las imágenes, la longitud focal y la aplicación del patrón moteado. La longitud focal viene dada por la distancia cámara – muestra y el tamaño del enfoque utilizado en el objetivo. Así pues, para situaciones en las que la cámara ha de colocarse lejos de la muestra se utilizan enfoques de tamaño reducido (disminuyendo el número de anillos acoplados al objetivo) para la obtención de imágenes nítidas, y de igual forma se emplean enfoques de tamaño aumentado cuando la cámara se coloca muy cerca de la muestra (Ver Figuras 2-7 y 2-8).



Figura 2-7: Enfoque adecuado para largo alcance



Figura 2-8: Enfoque adecuado para corto alcance

¹ Se tienen en cuenta los valores instantáneos de todas las magnitudes que varían en el proceso de deformación, considerando los efectos en todas las direcciones. Se expondrá este aspecto más en detalle en la subsección 3.4.1. “cálculos a realizar una vez extraídos los datos experimentales” del capítulo 3.

3 CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DEL ALUMINIO 7075 EMPLEANDO DIC

En este capítulo se presenta un estudio que ha tenido por objetivo la caracterización mecánica del régimen elástico de cierto material empleando para ello el sistema de correlación de imágenes digitales. La pretensión de este estudio ha sido validar los resultados dados por el equipo antes de afrontar el problema del contacto, así como la puesta a punto del mismo.

Se han empleado probetas de aluminio de la familia 7XXX (aleación de aluminio con zinc como principal elemento de aleación) en estado térmico de templado con maduración artificial y alivio de tensiones residuales, concretamente la aleación 7075-T651. Este tipo de material es ampliamente utilizado en situaciones que exigen grandes esfuerzos a compresión, haciendo posible su uso en campos que tradicionalmente eran reservados a los aceros. Es común su aplicación en la industria del automóvil, tornillería, industria aeronáutica, construcción de moldes, etc. Es un material idóneo para situaciones que requieren gran resistencia mecánica y ligereza a la vez. La tabla 3-1 muestra su composición química (en % en peso).

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti (+Zr)	Otros	Al
0,4	0,5	1,2 – 2,0	0,3	2,1 – 2,9	5,1 – 6,1	0,2	0,15	Resto

Tabla 3-1: Composición química del Al 7075

El AA7075-T651 presenta límite elástico y de rotura muy superiores a los del resto de aleaciones basadas en aluminio, ofreciendo también resistencia a fatiga y dureza superiores, aunque en estos aspectos las diferencias son menores. La tabla 3-2 refleja algunas de las propiedades mecánicas de interés de este material.

Módulo de elasticidad, N/mm ²	Límite elástico, N/mm ²	Carga rotura, N/mm ²
72000	480	540

Tabla 3-2: Características mecánicas del AA7075-T651

Naturalmente los valores recogidos en la tabla anterior son orientativos, dados en prontuarios acerca del material que se tiene entre manos. Es sabido que las propiedades reales de un material pueden presentar ligeras variaciones respecto a los datos conocidos, en función del fabricante o suministrador, la concentración de los aleantes, la temperatura, la orientación de corte de las probetas respecto a la de laminación del tocho, la posible presencia de imperfecciones, etc. Es por ello que con una caracterización experimental se han de obtener valores próximos a los conocidos, pero no supondría ningún error el hecho de que se obtuviesen resultados ligeramente diferentes.

En lo que sigue se expondrán en detalle los ensayos realizados y los resultados obtenidos.

3.1 Consideraciones teóricas generales

Se ha tenido por objetivo determinar, en base a la experimentación, el módulo de elasticidad del material. Para ello se han sometido a compresión probetas planas del tipo “dogbone” en una máquina universal de ensayos, de acuerdo a lo establecido en la correspondiente norma ASTM. El conjunto de normativas ASTM fue desarrollado por la American Society for Testing and Materials como estándares para la realización de ensayos de materiales estableciendo las condiciones y procedimientos más adecuados para la obtención de buenos resultados. En concreto, para la ejecución de ensayos de tracción/compresión, aplica la norma ASTM E8M-00.

Desde el punto de vista de la Resistencia de Materiales, los ensayos de compresión y tracción son el mismo caso de sollicitación, donde la muestra es sometida a una carga uniaxial. Es común realizar este tipo de ensayos a tracción, simplemente para evitar las dificultades que puede plantear la compresión: aplicar la carga de forma verdaderamente concéntrica o axial, carácter inestable global o local de la probeta y tendencia a la aparición de momentos flectores, posible fricción entre las mordazas y los extremos de la probeta debido a la expansión lateral, etc. En este caso se ha optado por sollicitación a compresión con el objetivo de acercar el problema al que será estudiado con posterioridad, el contacto. Será útil para analizar si es necesaria o no la aplicación de correctivos para aumentar la estabilidad de los ensayos, y subsanar dificultades de cara a los ensayos venideros.

En un ensayo de tracción o compresión es posible asumir, en un principio, las siguientes hipótesis [7]:

- En la sección (plano transversal), la distribución de tensión es uniforme, por lo que el vector tensión es el mismo para todos los puntos.
- Dicho vector tensión coincide en dirección con la normal a la superficie transversal, por lo que no existe componente tangencial del mismo: $\tau \approx 0$.

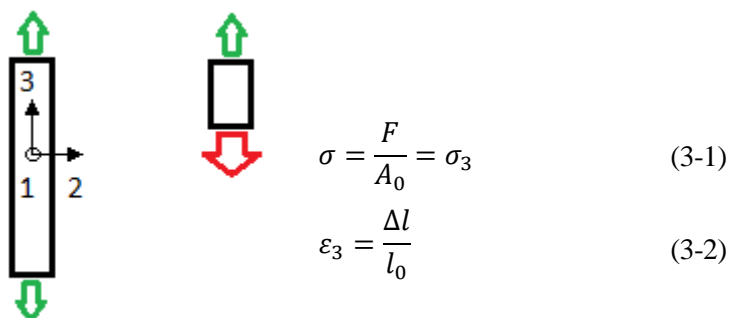


Figura 3-1: Visión lagrangiana del ensayo de tracción/compresión

Esta última hipótesis no es tal en la realidad. Refleja una visión lagrangiana del problema, la cual no considera los efectos transversales en ensayos de este tipo. Realmente las mayores tensiones se producen, de largo, en la dirección de carga, pero es sabido que, cuando una barra se somete a compresión, su longitud disminuye y las dimensiones transversales aumentan, por lo que también aparecen tensiones (de menor magnitud) en las direcciones perpendiculares a la de actuación de la fuerza. El coeficiente de Poisson es precisamente la relación entre la deformación unitaria transversal y la deformación unitaria longitudinal, resultado de un esfuerzo axial uniforme inferior al límite de proporcionalidad. Este coeficiente es una propiedad del material, y oscila entre $0 \leq \nu \leq 0,5$.

La investigación se limitará al comportamiento elástico lineal del material, en el que existe reversibilidad total del proceso de carga, lo que significa que la muestra tiene la capacidad de recuperar totalmente forma y tamaño ante el cese de la carga. Dicho comportamiento se caracteriza por el módulo de Young o de elasticidad, que viene dado por la pendiente de la curva tensión – deformación mientras no se exceda el límite de proporcionalidad (valor prácticamente coincidente con el límite elástico para la mayoría de materiales metálicos). Es un indicio de la rigidez del material. La ley Hooke (ecuación 3-3) define el módulo elástico como la constante de proporcionalidad existente entre tensión y deformación en el comportamiento elástico de un material elástico lineal, homogéneo e isótropo.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3-3)$$

El problema se ha limitado a deformaciones elásticas pensando en los muchos casos que no permiten el desgaste o deterioro en las interacciones entre superficies, el cual es habitualmente causado por acumulación de deformaciones plásticas en las zonas más críticas de las piezas. Como se ha expuesto en la introducción del proyecto, en el contacto rueda – carril la degradación y la acumulación de tensiones elevadas que se permite (dentro de unos márgenes) han de ser consecuencia del funcionamiento dinámico del vehículo ferroviario, por lo que en un estudio estático debieran observarse niveles muy bajos de deformación. Para conocer si la videocorrelación es un método adecuado en el análisis de tal caso estático, una buena forma de comenzar es limitando el nivel de deformación (en torno al 0,2 %).

3.2 Diseño de las probetas y procedimiento seguido

Se han empleado probetas planas del tipo “dogbone” con las siguientes dimensiones de interés, las cuales cumplen con lo exigido por la norma: espesor de $e = 6,05 \text{ mm}$, longitud efectiva (sin considerar las zonas reservadas a la cogida de las mordazas) de $l_0 = 153 \text{ mm}$ y ancho en la zona central de $w = 16 \text{ mm}$.

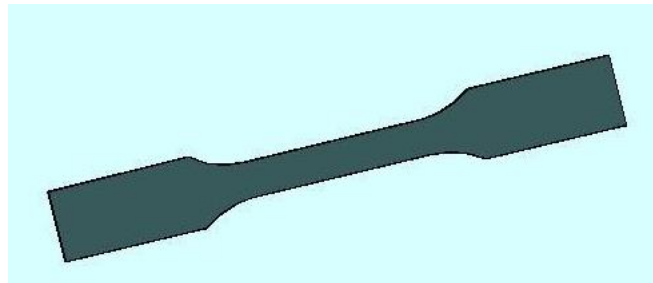


Figura 3-2: Tipología de las probetas utilizadas [8]

Los ensayos consistieron en someter la probeta a esfuerzo axial de compresión dentro del marco elástico, para lo que previamente hubo que realizar una serie de cálculos con el fin de conocer la fuerza que, de ser sobrepasada, supondría la plastificación de la probeta. Durante la realización del ensayo fueron registradas la carga aplicada (a partir del sistema de adquisición de datos de la máquina universal de ensayos) y la deformación de la probeta (a través del equipo de correlación de imágenes digitales). Dichos datos son los empleados para la determinación del parámetro buscado.

3.3 Equipo empleado

Se ha utilizado una máquina hidráulica biaxial MTS-809 (figura 3-3), realizando los ensayos a temperatura ambiente.

Se observó que, empleando una tradicional máquina uniaxial, no podría ser utilizado el sistema óptico durante el ensayo debido a que el soporte del puente (base móvil superior) de la máquina impide la colocación del sistema de videocorrelación en la perpendicular a la superficie de la probeta, por lo que no es posible la toma de imágenes (observable en la figura 3-4). Esta es la razón por la que se decidió emplear una máquina biaxial, con posibilidad de giro en sus mordazas.

Las características del equipo MTS-809 empleado son [9]:

- La capacidad de carga axial es de $\pm 100 \text{ kN}$
- Valor del par máximo aplicable: $1100 \text{ N} \cdot \text{m}$
- Desplazamiento del pistón: $\pm 125 \text{ mm}$
- Ángulo de giro: $\pm 35^\circ$
- Longitud máxima entre mordazas: 550 mm
- Distancia libre entre columnas: 530 mm
- Diámetro del actuador: 70 mm

- Presión hidráulica de hasta 220 bares
- Caudal: 41,5 l/mín

En cuanto a la sujeción, se han empleado mordazas planas apropiadas para las dimensiones de la probeta (figura 3-5).



Figura 3-3: Máquina biaxial MTS-809 empleada



Figura 3-4: Máquina uniaxial MTS-810

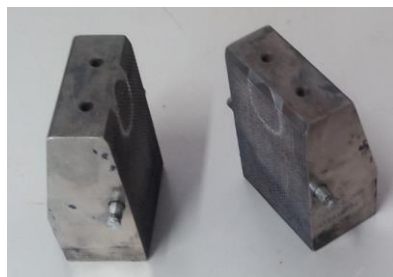


Figura 3-5: Mordazas utilizadas

Las figuras 3-6 y 3-7 presentan el montaje del sistema óptico VIC 2D en la máquina universal para la medida de las deformaciones durante los ensayos. Se empleó una fuente de luz externa para mejorar el contraste en las imágenes.

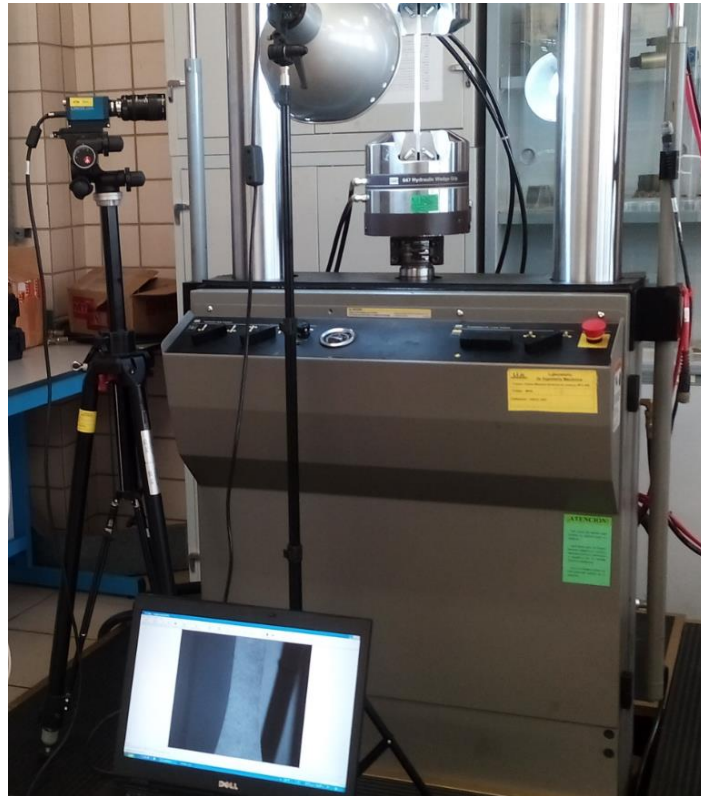


Figura 3-6: Sistema VIC 2D acoplado en la máquina universal de ensayos

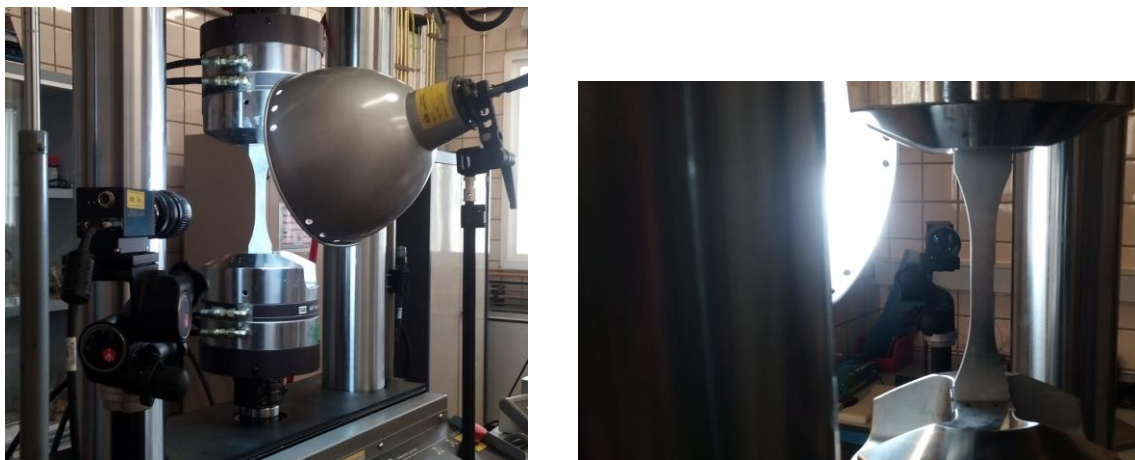


Figura 3-7: Contacto óptico cámara – probeta

Algunos experimentos fueron realizados con control en desplazamiento y otros bajo control en fuerza, observando a la postre que un control en fuerza permite ser más preciso, más aún cuando se buscan tan pequeños niveles de tensión y deformación (régimen elástico).

Durante la ejecución de las pruebas se registraron de forma continua los datos de fuerza y desplazamiento del cabezal mediante el sistema de adquisición de datos del que dispone el software de la máquina, así como los datos de deformación empleando el sistema óptico 2D, capturando imágenes del espécimen a razón de 1 fotograma por segundo.

3.4 Ensayos

Han sido varias las pruebas realizadas, todas ellas con el fin de calcular el módulo de Young a partir de los datos extraídos del ensayo. En la ejecución de las mismas, las diferencias han radicado bien en el modo de

control de la máquina (en fuerza o en desplazamiento) o bien en el nivel de carga introducido. El proceder en el posterior análisis ha sido el mismo, y el resultado es similar. Por ello, únicamente se expondrán en detalle dos de los ensayos.

3.4.1 Cálculos a realizar una vez extraídos los datos experimentales

Dado que en un ensayo de tracción/compresión el material es sometido a una carga uniaxial, las deformaciones o tensiones en las direcciones perpendiculares a la de aplicación de la fuerza son irrelevantes cuando el material se deforma elásticamente, tratándose por ello este problema de forma unidimensional. En esta situación, con el material dentro del marco elástico lineal, y aplicándose la carga de forma cuasiestática, tensión y deformación en la dirección longitudinal de la probeta (dirección de aplicación de la fuerza) vienen relacionadas por la ley de Hooke unidimensional:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (3-4)$$

siendo E el módulo de Young, esto es, el parámetro que se desea obtener y con el que validar los resultados dados por el sistema de videocorrelación. Dicho sistema permite extraer datos de deformación real, gracias a la selección del tensor de Hencky como referencia en los cálculos internos del software. De ese modo, el programa internamente obtiene valores de deformación bajo el siguiente cálculo:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (3-5)$$

donde e hace referencia a la deformación ingenieril:

$$e = \Delta l / l_0 \quad (3-6)$$

Por ello, para tener el módulo de elasticidad con la mayor precisión posible, se ha de calcular la tensión real:

$$\sigma = s(1 + e) \quad (3-7)$$

donde s es la tensión ingenieril:

$$s = F / A_0 \quad (3-8)$$

Conocidas σ y ε se obtiene el módulo de Young sin más que despejar de la ley de Hooke.

Tensión real y deformación real conforman una visión euleriana del problema. Ésta tiene en cuenta que, cuando una probeta se comprime, su longitud disminuye mientras que las dimensiones transversales aumentan. Como ya se ha expuesto en el primer párrafo de este apartado, cuando el caso se limita al régimen elástico los efectos transversales son mínimos, y por tanto la visión euleriana del problema conduce a unos resultados similares a los de la visión lagrangiana (ésta última dada por tensión ingenieril y deformación ingenieril). No obstante, ya que con el sistema VIC 2D se obtendrán valores de deformación real, se calcularán los correspondientes en tensión según la ecuación 3-7.

Si quiere tenerse más información acerca de las relaciones tensión - deformación ingenieril y tensión - deformación real, puede consultarse Rodríguez Montes *et al.* [10].

3.4.2 Direcciones principales de tensión y deformación

Se da en cualquier problema de sólido deformable sometido a cargas cuasiestáticas que, en todos los puntos del sólido, existen 2 planos (para casos 2D) perpendiculares entre sí en los que el vector deformación coincide en dirección con la normal al plano. Ello conlleva que, expresando el tensor de deformaciones en el sistema de referencia conformado por las normales a esos 2 planos (denominadas “direcciones principales”), no existen componentes tangenciales, y por tanto se trata de una matriz diagonal. Además,

los 2 valores que forman dicha diagonal son las deformaciones máxima y mínima (denominadas “deformaciones principales”) de las infinitas que pueden tenerse en el punto (relativas a las infinitas direcciones que podrían considerarse). Se denota como ε_1 al valor máximo de deformación y como ε_2 al mínimo. De forma análoga, se dan las “tensiones principales” en las mismas direcciones.

En un ensayo de tracción/compresión el material se somete a una carga uniaxial, normalmente en una de las direcciones cartesianas (dirección vertical). Como ya se indicó en la sección 3.1 “consideraciones teóricas generales”, en este tipo de ensayos se asume que la dirección de carga cumple con la definición de dirección principal. Por ello lo habitual es que, en este tipo de ensayos, las direcciones principales coincidan con las direcciones cartesianas. Si se trata de un caso de compresión, la deformación mínima (que es máxima en módulo) ocurre en la dirección de la fuerza, tratándose de la dirección vertical típicamente, por lo que $\varepsilon_2 = \varepsilon_y$. En consecuencia, la deformación máxima (mínima en módulo) ocurre en la dirección perpendicular (horizontal): $\varepsilon_1 = \varepsilon_x$. En la subsección 3.4.4 “ensayo 2” se mostrará que, en las pruebas realizadas experimentalmente, han ocurrido tales hechos.

En lo que sigue, análisis y cálculos se centrarán en las direcciones principales.

3.4.3 Ensayo 1

3.4.3.1 Cálculos preliminares

Se realizan unos cálculos aproximados preliminares con el objeto de determinar la carga a introducir en el ensayo de modo que los esfuerzos sufridos por la probeta nunca superen el límite elástico. En metales, es común tomar dicho límite como aquel valor de tensión que hace aparecer una deformación de 0,2 % ($\varepsilon = 0,002$), valor positivo cuando se trata de tracción y negativo ante compresión.

Se realizarán los cálculos en búsqueda de una deformación en el entorno del 0,1 %, teniendo así un amplio margen de seguridad.

En la sección 3.2 fueron indicadas las dimensiones de la probeta. Se obtiene el área transversal de interés conociendo ancho ($w = 16 \text{ mm}$) y espesor ($e = 6,05 \text{ mm}$):

$$A = w \cdot e \quad (3-9)$$

Puede estimarse el decremento de longitud que experimentará la probeta conociendo el valor de deformación buscado ($\varepsilon = -0,001$) y la longitud efectiva que presenta inicialmente ($l_0 = 153 \text{ mm}$):

$$\nabla l = 0,001 \cdot l_0 \quad (3-10)$$

Se obtiene $\nabla l = 0,153 \text{ mm}$. Se toma $\nabla l = 0,1 \text{ mm}$ como el decremento de longitud que se buscará en el ensayo. Esto aumenta la seguridad de cara a evitar exceder el límite elástico. La deformación que ha de resultar se estima entonces en $-0,000654$ (0,0654 %), empleando la ecuación 3-6.

Tras el cálculo anterior y sabiendo que el valor teórico del módulo de elasticidad del AA7075-T651 es 72 GPa , puede emplearse la ley de Hooke (ecuación 3-4) para obtener, de forma aproximada, la tensión que se producirá en la zona de interés de la probeta.

Por último, se estima la fuerza a introducir en este ensayo para cumplir con lo anterior. Se utiliza la ecuación 3-8, introduciendo la tensión esperada y el área transversal. -4555 N es el valor que se obtiene.

Finalmente el ensayo fue ejecutado con una carga de -4000 N , por lo que eran esperables unos valores de tensión y deformación algo inferiores a los estimados en este apartado.

3.4.3.2 Datos experimentales

Desde el software de la máquina de ensayos se ejecutó un programa de control en fuerza que llevó a la probeta a experimentar los estados que se detallan en la tabla 3-3.

<u>Duración</u>	<u>Nivel inicial</u>	<u>Nivel final</u>	<u>Descripción</u>
5 s	0 N	0 N	Iniciación
40 s	0 N	-4000 N	Proceso de carga
10 s	-4000 N	-4000 N	Carga constante
40 s	-4000 N	0 N	Proceso de descarga
5 s	0 N	0 N	Finalización

Tabla 3-3: Programa de control en fuerza ejecutado en el ensayo 1

Los procesos de carga y descarga tuvieron lugar a razón de 100 N/s, tratándose de una velocidad adecuada en vistas de la norma para las dimensiones de la probeta empleada.

Según lo indicado en la tabla 3-3, la duración del ensayo fue de 100 s, tiempo durante el cual se registraron de forma continua los datos de fuerza, desplazamiento y deformación.

Con la cámara digital del sistema de videocorrelación, el enfoque se limitó a la zona central de la muestra, zona de interés en donde se quiere conocer la historia en tiempo de deformación.

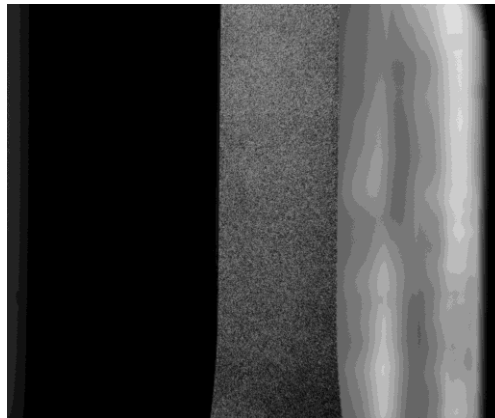
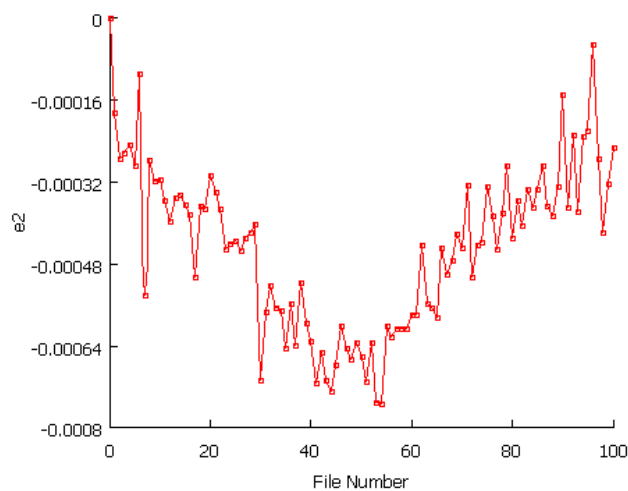


Figura 3-8: Visión de la probeta dada por el software del sistema VIC 2D (ensayo 1)

Tras el pertinente tratamiento del conjunto de fotogramas capturados, se obtuvo la siguiente evolución por parte de la deformación principal mínima (deformación longitudinal, la cual es máxima en módulo):

Figura 3-9: Evolución en tiempo de ε_2 (ensayo 1)

Se tomaron fotogramas a razón de 1 captura/s, por lo que el número de imágenes procesadas (*file number*) coincide con el tiempo de duración, en segundos. Cuando se muestra la evolución temporal de algún parámetro de deformación, en el eje de abscisas aparece “file number”, por lo que realmente la gráfica refleja el nivel de deformación que se ha dado en cada uno de los fotogramas procesados.

La figura 3-9 evidencia que se ejecutó un programa de carga – descarga. En el tiempo que permaneció constante la fuerza, la probeta experimentó los niveles máximos (en módulo) de deformación, entorno al 0,07 % en la dirección de carga. Al ser tan bajos los niveles que se producen, el ruido de la señal es importante e inevitable, a pesar de haber pasado por el filtro que utiliza por defecto el sistema de videocorrelación. El motivo de que el ruido sea tan notable viene dado porque la propia precisión del sistema conduce a fluctuaciones del mismo orden que los niveles de deformación que se producen, del orden de 10^{-4} . Además, hay que contar con la posible aportación de la máquina universal de ensayos al ruido, la cual tiene una capacidad de ± 100 kN y se le está obligando a entregar tan solo el 4 % de ésta (-4 kN). Observando la figura 3-9 puede indentificarse fácilmente el momento en el que comenzó el proceso de carga, así como en el que finalizó la descarga; en dichos instantes se incrementa la inestabilidad o ruido debido al repentino cambio en el movimiento del pistón encargado de presionar la probeta.

La figura 3-10 refleja un mapa de deformación extraído de uno de los fotogramas en los que la compresión era máxima. Los valores que el sistema utiliza para representar la evolución en tiempo de la deformación (figura 3-9) son tomados a partir de estos mapas (figura 3-10): para cada fotograma, el software calcula el valor promedio de la deformación que presentan todos los puntos dentro del rango de interés y asocia ese valor promedio al instante correspondiente.

En la tabla 3-4 se recogen los datos de fuerza, desplazamiento del pistón (mediante el cual se imprime la carga) y deformación registrados durante el tiempo en que permanecieron aplicados los -4 kN, esto es, durante los 10 s de interés para el cálculo que se pretende.

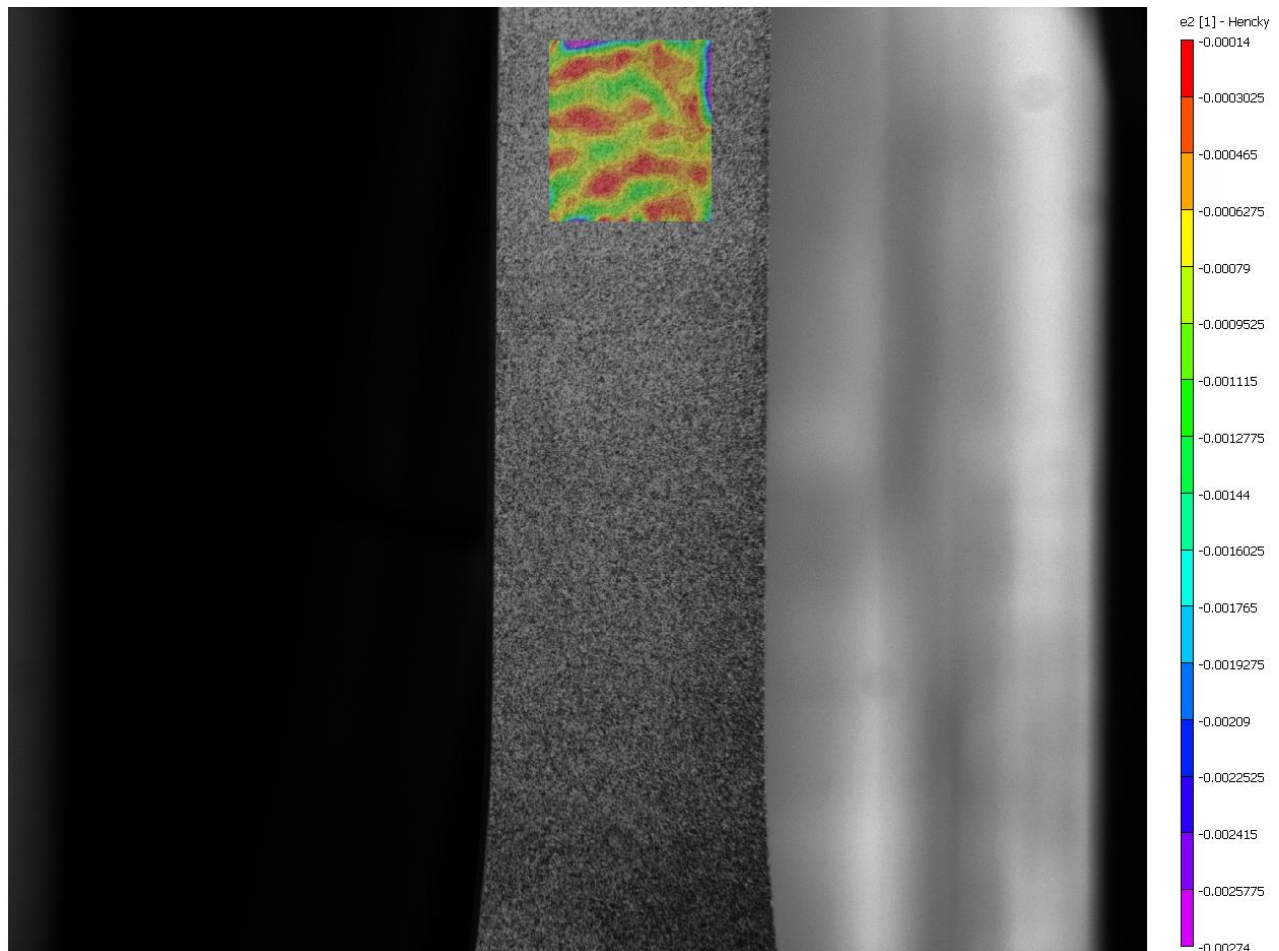


Figura 3-10: Mapa real de deformación ε_2 bajo compresión de -4 kN (ensayo 1)

<u>Time</u> (s)	Adquisición máquina ensayos MTS-809		Adquisición DIC
	<u>Axial Fuerza</u> (N)	<u>Axial LVDT</u> (mm) ²	<u>Strain</u> , ε_2
45	-3998,4	64,882	-0,0006421
46	-3998,9	64,880	-0,0005497
47	-4001,2	64,880	-0,0005968
48	-3999,5	64,881	-0,0006185
49	-3999,8	64,879	-0,0005827
50	-3999,1	64,880	-0,0006215
51	-3999,1	64,880	-0,0006526
52	-3998,9	64,880	-0,0005870
53	-3997,8	64,880	-0,0006966
54	-3999,4	64,880	-0,0007022
55	-3999,9	64,880	-0,0005477
<u>Valor medio</u> ³	-3999,3		-0,0006179

Tabla 3-4: Datos registrados durante el estado de máxima carga (ensayo 1)

3.4.3.3 Resultado

Procediendo numéricamente del modo indicado en la subsección 3.4.1 “cálculos a realizar una vez extraídos los datos experimentales” y empleando para ello el valor medio de los parámetros medidos durante el tiempo en que se aplicó la carga de forma constante (tabla 3-4):

se obtiene la tensión ingenieril:

$$s = \frac{-3999,3}{96,8} = -41,315 \text{ N/mm}^2$$

y la deformación ingenieril:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) = -0,0006179 \quad \rightarrow \quad e = -6,1771 \cdot 10^{-4}$$

Estas magnitudes permiten obtener la tensión real, que dividida posteriormente por la deformación real (dada por el sistema VIC 2D) permitirá tener el módulo de elasticidad o de Young:

$$\sigma = -41,315 \cdot (1 - 6,1771 \cdot 10^{-4}) = -41,289 \text{ N/mm}^2$$

módulo de elasticidad:

$$E = \frac{-41,289}{-0,0006179} = 66821,5 \text{ N/mm}^2$$

$$E \approx 67 \text{ GPa}$$

Teniendo en cuenta que se trata de una caracterización experimental y, además, la delicadeza de este ensayo por los niveles tan bajos de deformación a los que se ha llevado el material, la proximidad del valor obtenido con el teórico asociado al material constata que el equipo de medición óptica de deformaciones está bien calibrado y arroja resultados correctos.

Teniendo en cuenta que en un análisis mediante videocorrelación pueden ser influyentes aspectos como el patrón generado en la muestra o la resolución de las imágenes, el resultado es bueno pese a trabajar con deformaciones muy pequeñas. Pero parece razonable que, en ese sentido, a medida que el nivel de deformación crezca, aumentará la precisión empleando la técnica DIC.

Compresión frente a tracción: cabe también mencionar que, un caso de compresión, favorece en mayor

² Posición del pistón al inicio del ensayo: 65 mm

³ Adicionalmente se calcula la media aritmética de los datos de fuerza y deformación para su posterior uso.

medida a la inestabilidad, al ruido en las señales medidas, lo que puede tener influencia en los resultados.

3.4.4 Ensayo 2

En esta prueba se incrementa, respecto al caso anterior, el nivel de fuerza que se introduce a la probeta. Se persigue con ello quedar más cerca del límite elástico (sin excederlo) para elevar así los niveles de tensión y deformación que aparecen, mejorando presumiblemente la precisión del sistema VIC 2D.

3.4.4.1 Cálculos preliminares

El nivel de deformación obtenido experimentalmente en el caso anterior es el que se esperaba en un principio, el cual había sido estimado en los cálculos iniciales. Este hecho da solidez a dichos cálculos. Por ello, se procederá para este caso de la misma forma y se reducirán los márgenes de seguridad, pues ahora se conoce que los cálculos arrojan resultados en consonancia con los que realmente se producen.

El objetivo es calcular la fuerza a introducir en el ensayo, siendo primordial mantener a la probeta dentro de su régimen elástico lineal. Al igual que en el caso anterior, se tiene en cuenta la teoría según la cual, para materiales metálicos, un valor de tensión igual al límite elástico hace aparecer una deformación del 0,2 % aproximadamente.

Se buscará en esta ocasión un nivel de deformación entorno al 0,15 %.

Sabiendo la deformación que se pretende y el valor teórico del módulo elástico del material, se estima la tensión que aparecerá en la muestra mediante la ley de Hooke. La fuerza que causará tales niveles se tiene haciendo uso de la ecuación 3-8, introduciendo la tensión esperada y el área transversal de la probeta. Se obtiene un valor de -10164 N.

Finalmente, se decide que serán introducidos -9000 N por disminuir, algo más, el riesgo de que la probeta sufra deformaciones permanentes. Aun así, se trata de un valor de más del doble de la fuerza a la que fue sometida la muestra en el ensayo anterior.

3.4.4.2 Datos experimentales

En la tabla 3-5 se detalla el programa de control en fuerza que se ejecutó en esta ocasión.

<u>Duración</u>	<u>Nivel inicial</u>	<u>Nivel final</u>	<u>Descripción</u>
5 s	0 N	0 N	Iniciación
180 s	0 N	-9000 N	Proceso de carga
15 s	-9000 N	-9000 N	Carga constante
180 s	-9000 N	0 N	Proceso de descarga
5 s	0 N	0 N	Finalización

Tabla 3-5: Programa de control en fuerza ejecutado en el ensayo 2

La velocidad en los procesos de carga y descarga fue de 50 N/s, bastante reducida pero perfectamente válida según la norma (ASTM E8M-00). Se eligió una velocidad pequeña pensando que transiciones lentas podrían resultar beneficiosas para el sistema VIC 2D (en cuanto a tener señales más limpias respecto al caso anterior, con menor ruido). La duración total del ensayo fue de 385 s, tomando los datos de fuerza, desplazamiento y deformación en cada segundo.

Idealmente, en base a la teoría, los efectos causados por una compresión perfectamente centrada según la dirección del eje longitudinal de la probeta son: cambio de tamaño en las direcciones longitudinal y transversal y nulidad de los efectos tangenciales, esto es, inexistencia de cambio de forma. Para un caso como el que ocupa este espacio en el que el eje longitudinal de la probeta coincide con la dirección vertical,

debiera de producirse:

- Cambio de tamaño en las direcciones cartesianas, vertical y horizontal, siendo mucho mayor el efecto en la dirección vertical (dirección de la carga) cuando únicamente se evalúa el marco elástico, como es el caso.
- Al tratarse de una carga uniaxial, los efectos tangenciales debieran de ser nulos en todo momento, si bien en un ensayo real es difícil tener una carga perfectamente centrada y lograr estabilidad total de la probeta.

Como consecuencia de estos sucesos, las direcciones vertical y horizontal conforman el sistema de referencia principal de tensión y deformación. Al tratarse de una compresión, la mínima deformación principal (máxima en módulo, es negativa) se producirá en la dirección de carga, $\varepsilon_2 = \varepsilon_y$, mientras que la máxima (mínima en módulo) se dará en la dirección horizontal, $\varepsilon_1 = \varepsilon_x$.

En este ensayo se ha querido comprobar si el sistema de medición óptica de deformaciones muestra estos fenómenos. En caso afirmativo, se tendrá evidencia de un buen manejo del equipo, además de confirmar el buen hacer por su parte.

Por un lado, observando las figuras 3-11 y 3-12 se ratifica que puede utilizarse indistintamente la información que proporcionan dirección mínima principal y dirección vertical, siendo los resultados aproximadamente iguales en toda la historia en tiempo de deformación. De igual forma ocurre para la deformación máxima principal y dirección horizontal, figuras 3-13 y 3-14. Además, la figura 3-15 muestra que efectivamente los efectos tangenciales se aproximan a cero en todo instante.

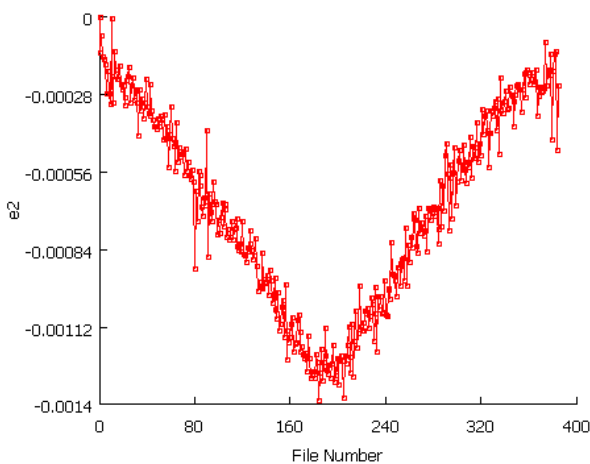


Figura 3-11: Evolución en tiempo de ε_2 (ensayo 2)

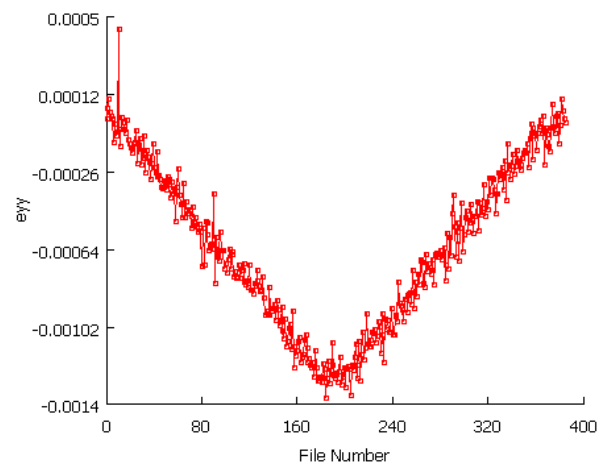


Figura 3-12: Evolución en tiempo de ε_y (ensayo 2)

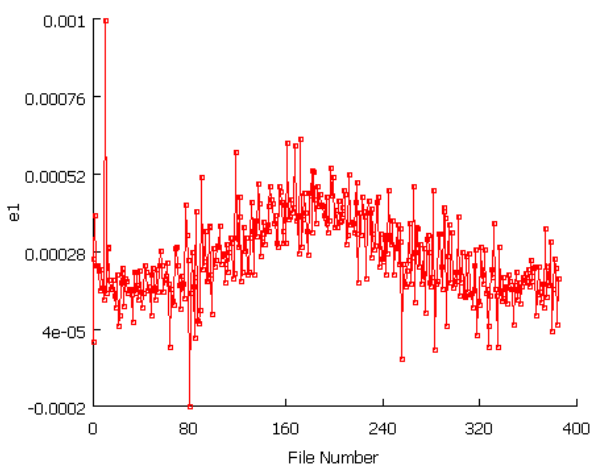


Figura 3-13: Evolución en tiempo de ε_1 (ensayo 2)

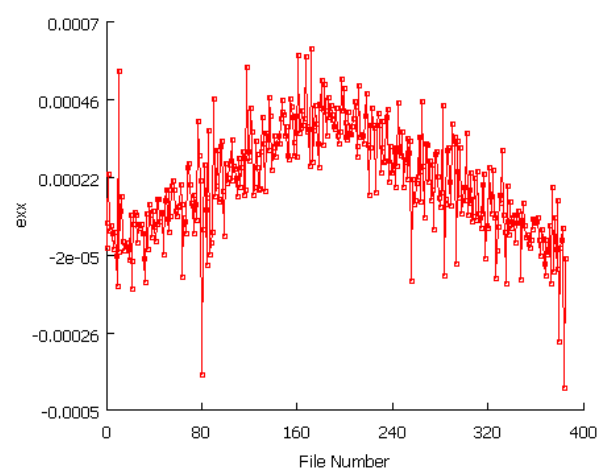


Figura 3-14: Evolución en tiempo de ε_x (ensayo 2)

Cabe indicar que se tomaron fotografías a razón de 1 captura/s al igual que en el ensayo anterior, por lo que el número de imágenes procesadas (*file number*) coincide con el tiempo de duración, en segundos, del ensayo.

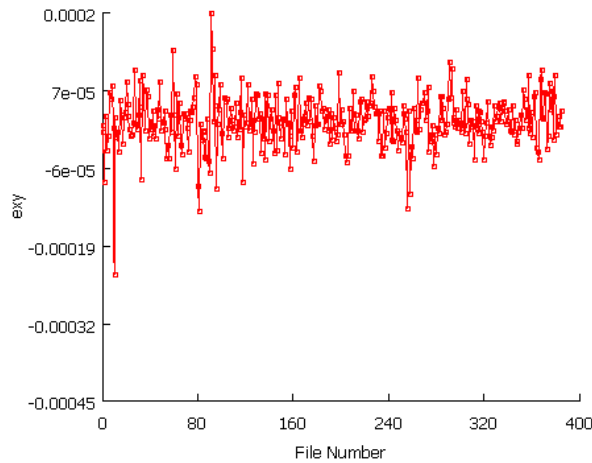


Figura 3-15: Evolución en tiempo de ε_{xy} (ensayo 2)

Las figuras 3-11 y 3-12 muestran que, en la dirección de carga, se produjeron niveles de deformación entorno al 0,13 % cuando permaneció constante la compresión a -9 kN. Durante ese tiempo, se dieron los datos de deformación, desplazamiento y fuerza (en la dirección vertical) que se recogen en la tabla 3-6.

Se ha construido la curva tensión – deformación en base a los datos de fuerza y deformación longitudinal registrados durante los 385 s que duró el ensayo (figura 3-16). Se han tomado las medidas de ε_2 dadas por el sistema VIC 2D, en porcentaje, y los datos de fuerza extraídos del sistema de adquisición de la máquina universal. Se han aproximado los niveles instantáneos de tensión dividiendo cada dato en fuerza por el área inicial de la probeta (visión lagrangiana del problema). Esta representación corrobora que tuvo lugar un proceso de carga y descarga dentro del marco elástico lineal de la muestra, volviendo ésta a su estado inicial tras el cese de la fuerza. Al tratarse de una compresión, la curva viene dada por valores negativos de tensión y deformación.

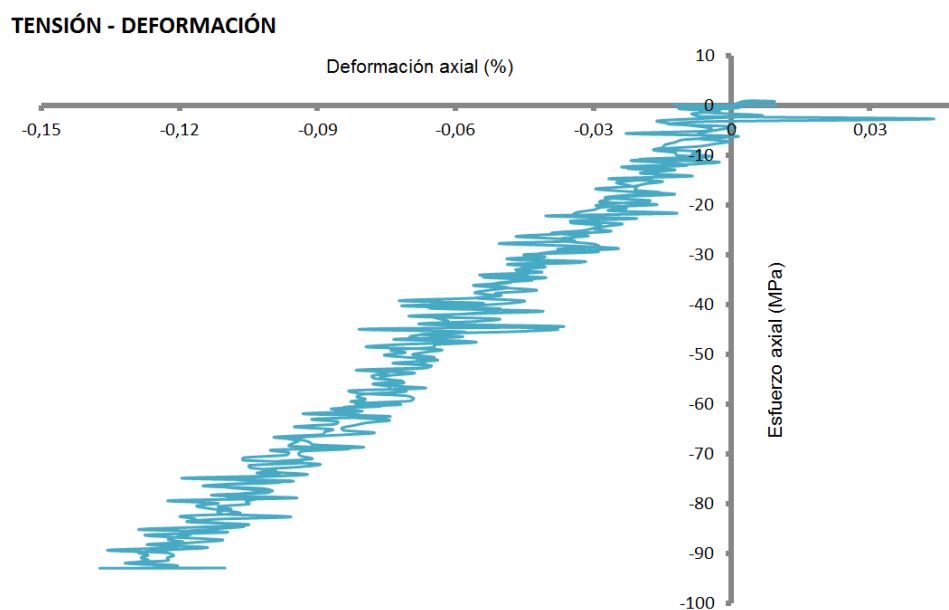


Figura 3-16: Curva experimental tensión – deformación en el ensayo 2

<u>Time</u> (s)	Adquisición máquina ensayos MTS-809		Adquisición DIC
	<u>Axial Fuerza</u> (N)	<u>Axial LVDT</u> (mm) ⁴	<u>Strain</u> , ε_2
185	-8995,3	64,744	-0,001251
186	-8998,4	64,744	-0,001386
187	-8996,3	64,737	-0,001289
188	-8996,9	64,736	-0,001204
189	-8997,7	64,735	-0,001317
190	-8998,0	64,740	-0,001251
191	-8997,5	64,736	-0,001226
192	-8995,5	64,748	-0,001125
193	-8996,2	64,745	-0,001278
194	-8997,4	64,736	-0,001292
195	-8996,3	64,743	-0,001262
196	-8996,9	64,744	-0,001309
197	-8996,0	64,744	-0,001255
198	-8997,5	64,745	-0,001187
199	-8996,5	64,743	-0,001321
200	-8997,0	64,745	-0,001299
<u>Valor medio</u> ⁵	-8996,8		-0,001266

Tabla 3-6: Datos registrados durante el estado de máxima carga (ensayo 2)

Cabe indicar que los valores de “Axial LVDT” que se indican en la tabla 3-6 hacen referencia a la distancia existente entre las mordazas fija y móvil en cada instante. Teniendo en cuenta que dicha distancia era de 65 mm cuando comenzó el ensayo, se puede aproximar el desplazamiento vertical que ha tenido lugar en cada momento mediante la diferencia.

3.4.4.3 Resultados

Ya en el apartado anterior se han puesto de manifiesto algunas coincidencias teoría – experimentación que dan pie a pensar que el equipo de medición óptica de deformaciones funciona adecuadamente ante este tipo de pruebas. Se procede ahora a llevar a cabo otro tipo de comprobaciones.

En primer lugar se calculará el módulo de Young partiendo de los datos experimentales en la dirección vertical; deberá obtenerse un valor próximo al que teóricamente se asocia al material. Se actúa del mismo modo en que se hizo para el ensayo anterior, utilizando el procedimiento indicado en la subsección 3.4.1 “cálculos a realizar una vez extraídos los datos experimentales”:

se obtiene la tensión ingenieril:

$$s = \frac{-8996,8}{96,8} = -92,942 \text{ N/mm}^2$$

y la deformación ingenieril:

$$\varepsilon = \ln(1 + e) = -0,001266 \quad \rightarrow \quad e = -1,2652 \cdot 10^{-3}$$

Estas magnitudes permiten conocer la tensión real:

$$\sigma = -92,942 \cdot (1 - 1,2652 \cdot 10^{-3}) = -92,824 \text{ N/mm}^2$$

Y por último se calcula el módulo de elasticidad dividiendo este valor por la deformación real, la cual se ha estimado realizando la media aritmética de los valores que el sistema VIC 2D ha proporcionado correspondientes al tiempo en que fue aplicada la carga de forma constante (tabla 3-6):

$$E = \frac{-92,824}{-0,001266} = 73320,7 \text{ N/mm}^2$$

⁴ Posición del pistón al inicio del ensayo: 65 mm

⁵ Adicionalmente se calcula la media aritmética de los datos de fuerza y deformación para su posterior uso.

$$E \approx 73 \text{ GPa}$$

Se obtiene un valor verdaderamente próximo al que habitualmente se asocia al AA7075-T651 (72 GPa).

Se decide introducir una última vía para la verificación de los resultados. Sobre todo se hace pensando ya en el problema que será abordado en el capítulo siguiente, el contacto, considerando interesante contar con un programa de simulación que permita comparar en paralelo los resultados que arroja la técnica DIC con los que se obtienen ejecutando virtualmente el mismo ensayo. Se emplea un programa que ofrece muy buenas prestaciones, ANSYS, el cual incluye un módulo de diseño, análisis y simulación estructural.

Se utiliza la plataforma ANSYS Workbench, la cual es muy visual e intuitiva en su uso, permitiendo un sencillo seguimiento. Cuando se lleva a cabo un análisis estático estructural mediante esta plataforma, son 4 las secciones bien diferenciadas a concretar: propiedades físicas y mecánicas del material, geometría de la muestra a ensayar, modelo (que incluye la selección de comportamiento, mallado y cargas) y por último la obtención y análisis de los resultados.

Para el caso que ocupa este espacio, la figura 3-17 muestra la geometría generada en el programa, la cual es un fiel reflejo en diseño y dimensiones de la probeta ensayada experimentalmente.

Cuando se trabaja con ANSYS es muy importante la definición del modelo, especialmente el mallado. Ante una geometría sencilla como la de este caso y una sola carga que, además, es uniaxial según el eje longitudinal de la probeta, se ha optado por utilizar el método “sweep” de mallado (“por barrido”), con el que se generan elementos hexaédricos rectangulares en toda la muestra. Se trata de elementos con 20 nodos, por lo que, habiendo nodos no sólo en los vértices sino también entre vértices, exhiben un comportamiento cuadrático en desplazamiento; estos elementos reciben el nombre de “SOLID186”. Se ha dado mayor tamaño a los elementos de las zonas extremas, afinando la malla únicamente en la zona de interés, zona central. En cuanto a las cargas, se ha aplicado 9 kN de compresión en el extremo inferior y empotrado el extremo superior, simulando los efectos de las mordazas móvil y fija en la realidad.

Tras todo ello se está en disposición de correr el modelo y obtener los resultados.

La figura 3-18 muestra el estado de la probeta en cuanto a la deformación mínima principal, es decir, en cuanto a la deformación longitudinal (coincidente con la vertical teniendo en cuenta la posición que adopta la probeta en el ensayo experimental).

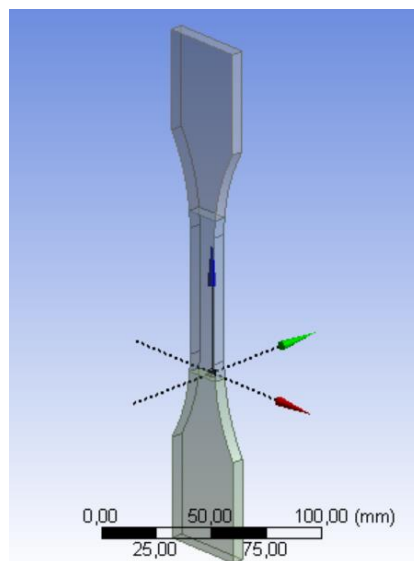


Figura 3-17: Geometría de la probeta generada en ANSYS

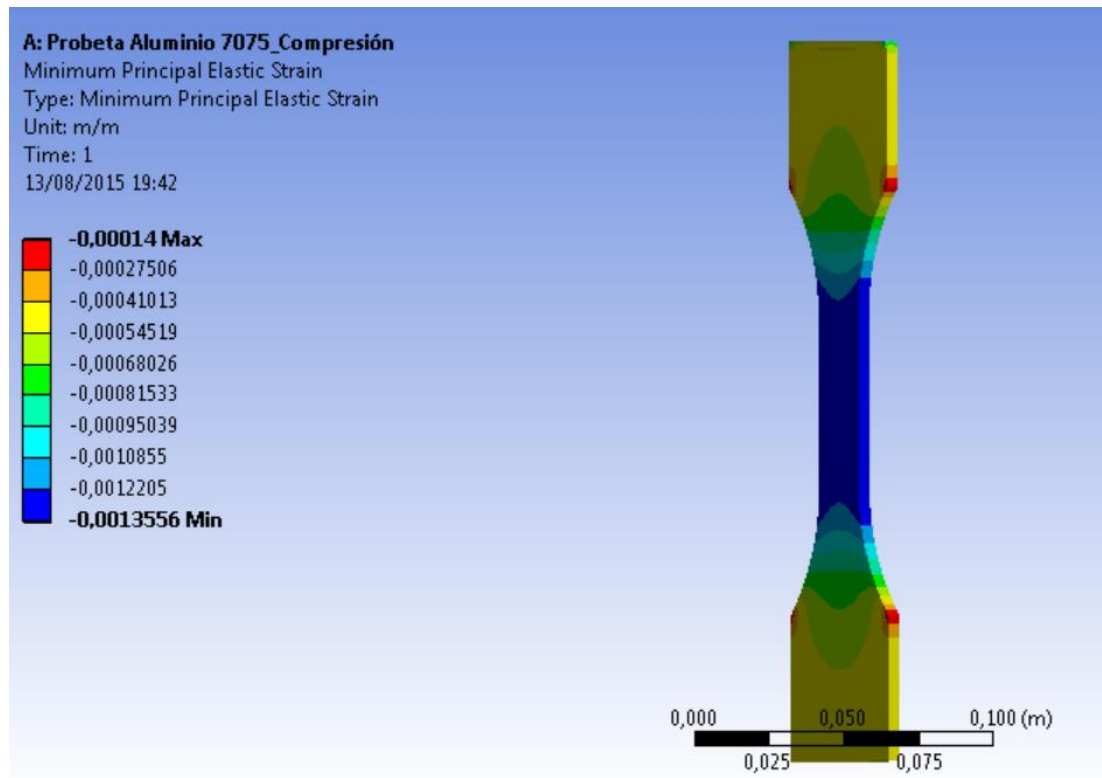


Figura 3-18: Deformación mínima principal resultante en la simulación del ensayo 2

En la figura 3-18 se puede apreciar que, según la simulación, el nivel de deformación longitudinal experimentado por la zona central de la probeta es de $-0,001356$, fruto de una carga constante de 9 kN a compresión. En el ensayo real, los datos de la misma deformación recopilados con el sistema de videocorrelación oscilaron entre $-0,001125$ y $-0,001386$ durante el tiempo en que la carga fue aplicada de forma constante, lo que se ha mostrado con anterioridad en la tabla 3-6. Por consiguiente, simulación y realidad arrojan resultados similares, suponiendo ésto una razón más para considerar que se está procediendo adecuadamente con el sistema VIC 2D de Limes y que éste funciona de buena manera, al menos cuando se estudia el comportamiento de materiales ante ensayos sencillos de tracción/compresión

4 ANÁLISIS DEL CONTACTO ESTÁTICO MEDIANTE DIC

En el presente capítulo se realiza un estudio de la respuesta que ofrece la técnica de correlación de imágenes digitales ante ensayos de contacto dentro del campo de la mecánica experimental.

Los resultados arrojados por el equipo VIC 2D se compararán con los dados por otros 2 métodos bien diferentes: por un lado un procedimiento analítico deducido a partir de la teoría de Hertz del contacto, y, por otro lado, una simulación virtual mediante el programa de elementos finitos ANSYS. Por tanto, han sido 3 las metodologías empleadas para el análisis del problema.

A continuación se muestra el problema 2D con el que se ha llevado a cabo el análisis.

4.1 Presentación del problema

En esta investigación se emplean dos sólidos de igual espesor para el estudio del contacto 2D estático, uno a modo de indentador circular (figura 4-1) y el otro con superficie plana, lo que a priori favorece que en éste se den los mayores niveles de tensión y deformación (figura 4-2). Las dimensiones están expresadas en mm. La figura 4-3 muestra la situación a analizar.

Seleccionando estas geometrías se ha tratado de acercar el caso al que tiene lugar en el contacto carril - rueda en los vehículos ferroviarios. Pensando en esto, es también de importancia tratar de limitar el estudio a un marco de pequeñas deformaciones en los materiales que serán utilizados, algo que ya se hizo en el capítulo anterior. En el mundo ferroviario suele decirse que, en cuanto a seguridad, los elementos más importantes en un tren son las ruedas. Entre sus funciones se encuentran el guiado del vehículo y la transmisión de los esfuerzos tractores y de frenado, lo que hace de la rueda uno de los elementos más críticos sin duda. Su cuidado es uno de los factores más importantes en la seguridad del transporte. El abandono de su funcionalidad inicial puede tener consecuencias catastróficas, causando muertes y grandes pérdidas económicas. El coste de mantenimiento en trenes es muy alto, y la mitad de éste es destinado a las ruedas, focalizándolo mayoritariamente a la detección de fisuras y defectos. Con todo esto se quiere hacer ver que no debe permitirse la aparición de tensiones o deformaciones elevadas en casos tan susceptibles y críticos. Realmente hoy día se admite, dentro de unos límites, cierta degradación y modificación en la geometría (sobre todo en los carriles), pero esto supone un mantenimiento regular que lleva asociado un coste importante. Lo ideal sería, en un futuro, contar con herramientas suficientes para impedir la concentración de tensiones que da lugar a estos problemas. Además, los efectos dinámicos son considerablemente mayores que los estáticos, por lo que no deben apreciarse niveles grandes en el análisis estático.

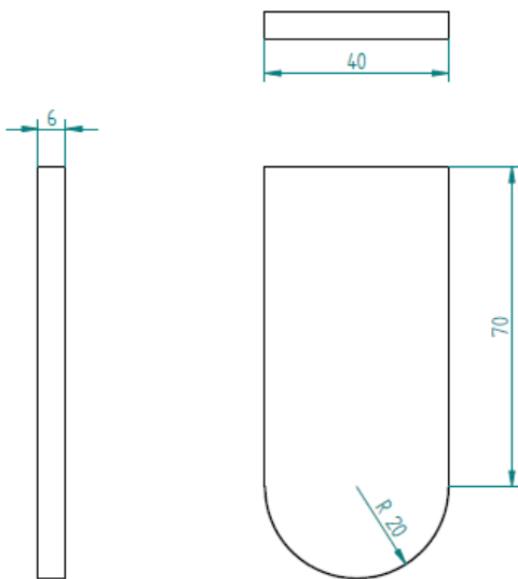


Figura 4-1: Dimensiones de la probeta semicircular (mm)

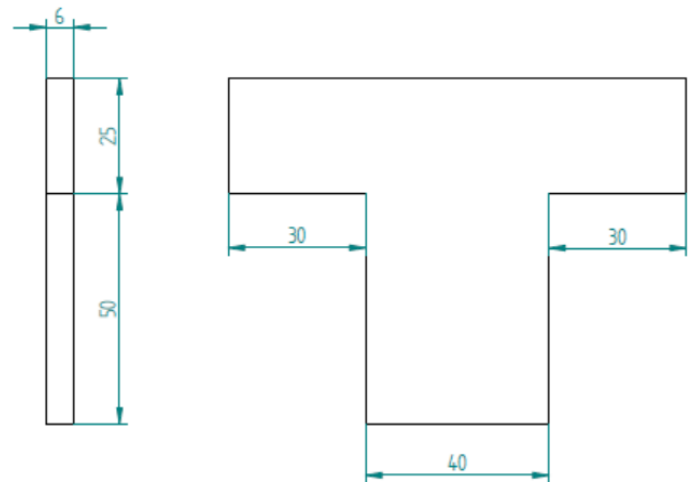


Figura 4-2: Dimensiones de la probeta en T (mm)

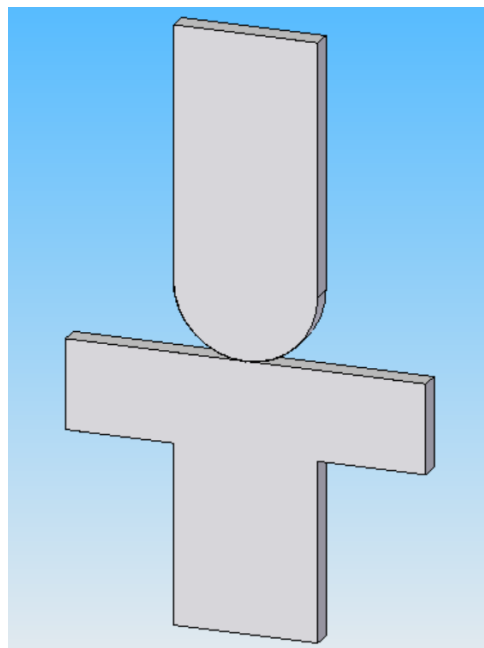


Figura 4-3: Contacto entre los dos cuerpos; situación de análisis

Las pruebas experimentales tuvieron lugar, de nuevo, en la máquina hidráulica biaxial MTS-809, al igual que para los casos del capítulo anterior. Se realizaron a temperatura ambiente.

Como puede apreciarse en las figuras 4-1 y 4-2, las probetas fueron diseñadas con suficiente dimensión vertical para permitir la cogida por parte de las mordazas. Éstas han sido las mismas que las empleadas para las probetas tipo “dogbone” del capítulo anterior, ya que el espesor de los cuerpos en uno y otro caso es el mismo.

El problema va a ser estudiado bajo 2 casos, diferenciados únicamente en la tipología de los materiales empleados en uno y otro. El conjunto (probeta semicircular y probeta en T) fue adquirido en aluminio y en acero. Con ello se pretende extraer información comparativa del comportamiento de uno y otro material. La menor rigidez del aluminio respecto del acero (módulo de elasticidad más bajo) supone que, para alcanzar un mismo nivel de deformación en ambos materiales, el aluminio requiere una carga más baja;

esto es una ventaja de cara a la realización de ensayos en laboratorio, como es el caso, ya que trabajar con niveles moderados es beneficioso en cuanto a seguridad y reducción del riesgo. Por otro lado, también es de deseo experimentar con acero, pues es el material por excelencia con el que se producen tanto las ruedas ferroviarias como los carriles, y ya se ha comentado que una de las finalidades de esta investigación es simular, de la mejor forma posible, el contacto carril – rueda para obtener soluciones parecidas y conclusiones extrapolables a dicho caso.

Por un lado, uno de los conjuntos fue fabricado en AA7075-T651, mismo material que el utilizado para las probetas del capítulo 3. Por otro lado, para el segundo conjunto se empleó un acero suave (bajo contenido en Carbono) laminado en caliente, concretamente la calidad S235JR. La tabla 4-1 reúne propiedades de ambos materiales que serán de utilidad para el presente estudio.

	Densidad, ρ [g/cm ³]	Módulo Young, E [N/mm ²]	Coef. Poisson, ν	Límite elástico, σ_e [N/mm ²]
Aluminio, AA7075-T651	2,80	$72 \cdot 10^3$	0,35	$480 \cdot 10^3$
Acero, S235JR	7,80	$207 \cdot 10^3$	0,28	$235 \cdot 10^3$

Tabla 4-1: Algunas propiedades de los materiales empleados

En la figura 4-4 pueden observarse las probetas adquiridas; a la izquierda, el conjunto de acero, y a la derecha, el de aluminio.

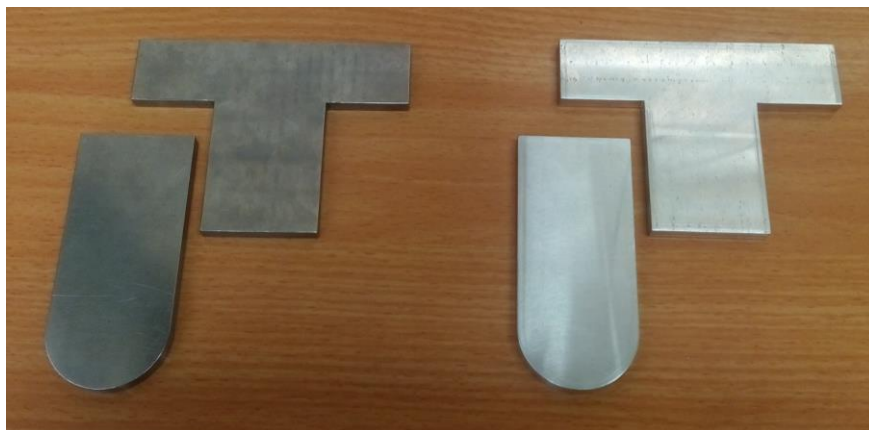


Figura 4-4: Probetas adquiridas para estudiar experimentalmente el contacto

La figura 4-5 muestra cómo quedaron tras la aplicación de la pintura para generar el patrón estocástico de motas sobre la superficie, necesario para la interpretación y correlación de las imágenes tomadas con el equipo de medición óptica.

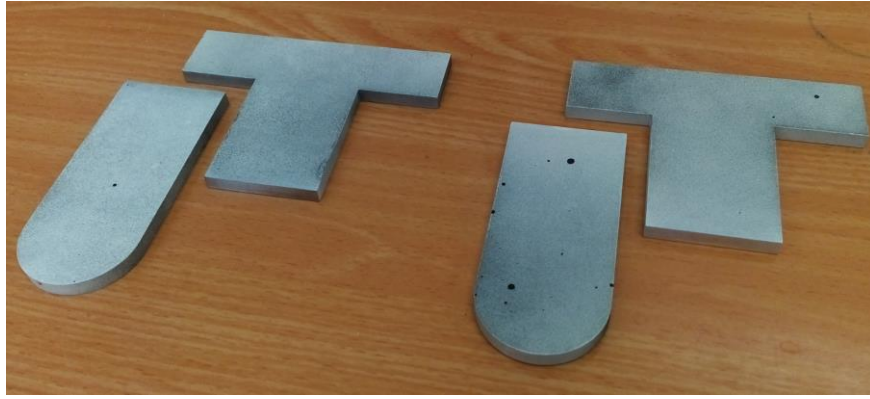


Figura 4-5: Probetas preparadas para posibilitar la correlación de las imágenes

4.2 Metodología

En esta sección se expondrá, para cada una de las 3 vías con las que se estudiará el caso, el procedimiento desarrollado para obtener información de tensión y deformación.

4.2.1 Procedimiento teórico

4.2.1.1 Contacto Hertziano

La mecánica del contacto centra su estudio en la deformación de sólidos que se tocan en uno o varios puntos. Su formulación física y matemática está basada en la ingeniería de materiales y la mecánica de los medios continuos, y hoy en día puede ser aplicada a cuerpos elásticos, viscoelásticos o plásticos. Cuando se tienen cuerpos en contacto, es fundamental conocer la presión que se da en la dirección perpendicular a la superficie de contacto y las tensiones de fricción que actúan tangencialmente [11].

En gran parte de las estructuras y máquinas existen cuerpos sólidos en contacto, los cuales pueden tener movimiento relativo entre sí o permanecer inmóviles. En muchos casos las tensiones de contacto son las más importantes y son las que determinan el modo de fallo de uno o ambos cuerpos. Normalmente, los elementos de máquinas que trabajan en contacto entre sí tienen movimiento relativo por rodadura, deslizamiento, o bien mediante una combinación de ambos tipos de movimiento. Sin embargo, hay un gran número de casos en los que el movimiento es de rodadura pura o con deslizamiento no mayor al 1 %, cuyo análisis es abarcado por la formulación que arroja la situación de contacto estático (contacto entre cuerpos sin movimiento relativo entre sí o con movimiento de rodadura pura). El primer investigador que obtuvo resultados satisfactorios para estos casos fue Heinrich Hertz. Su obra “En el contacto de sólidos elásticos”, 1882, instauró las bases de la mecánica del contacto. Hertz trataba de comprender cómo cambiaban las propiedades ópticas de múltiples lentes apiladas unas sobre otras al variar la fuerza que las mantenía unidas. Las conocidas como “tensiones de Hertz” se refieren a los esfuerzos que tienen lugar cuando dos superficies curvas entran en contacto y se deforman ligeramente.

El caso general admite cualquier geometría tridimensional para cada cuerpo en contacto, pero su resolución es extremadamente compleja. Sin embargo, hay casos particulares en los que el planteamiento es más sencillo. La teoría de Hertz proporciona soluciones a problemas clásicos, incluyendo procedimientos para calcular el área y las tensiones de contacto cuando las geometrías son simples, partiendo de: la fuerza, los radios de curvatura de ambos cuerpos y las propiedades mecánicas de los mismos. Dicha teoría permite reducir la investigación únicamente a los niveles elásticos de deformación, ya que, en su formulación, no existe restricción para el nivel de carga que mantiene en contacto a los cuerpos, pudiendo ésta ser pequeña.

En el análisis se supone que no existe fricción y que la carga aplicada es normal a las dos superficies que se tocan, por lo que no existe deslizamiento relativo entre ellas.

Hertz consideró que los dos cuerpos podían tratarse como sólidos elásticos semi-infinitos sometidos a presiones distribuidas sobre la superficie de contacto. Para que esto pueda generalizarse, han de cumplirse

las siguientes condiciones:

- Los materiales deben ser homogéneos e isotrópos.
- La carga aplicada sobre los cuerpos ha de ser, además de normal a la superficie de contacto, cuasi-estática.
- El área de contacto debe ser pequeña en comparación con las dimensiones de ambos cuerpos.
- La concavidad presentada por la superficie de contacto ha de ser inapreciable, siendo posible considerar que es plana, y las deformaciones que se produzcan deben ser muy pequeñas, esto es, exclusivamente elásticas.

Del grado de aproximación de cualquier caso real a estas hipótesis dependerá el nivel de ajuste a la realidad.

4.2.1.2 Procedimiento

Para el problema que se ha decidido abordar en esta investigación, la mecánica del contacto presenta una solución que es aplicable. Se trata del contacto entre 2 cilindros de ejes paralelos (figura 4-6). Dicho caso permite modelar el contacto entre un sólido cilíndrico y otro plano seleccionando adecuadamente las particularidades geométricas de cada cuerpo [12]. Puede consultarse que, de forma análoga, en [13] se plantea el contacto esfera – plano a partir del problema esfera – esfera.

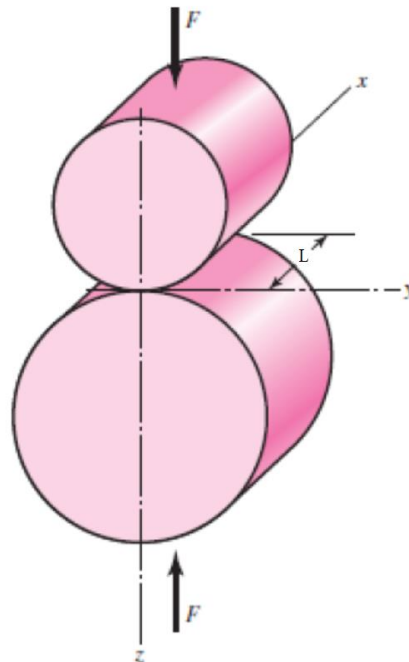


Figura 4-6: Contacto entre dos cilindros de ejes paralelos [14]

La probeta semicircular puede suponerse como un cilindro de radio $R_1 = 20 \text{ mm}$ y longitud $L = 6 \text{ mm}$. De igual forma, la superficie plana de la probeta en T puede interpretarse como otro cilindro de radio infinito, $R_2 = \infty$, e igual longitud, $L = 6 \text{ mm}$.

Utilizando los principios de la teoría de Hertz pueden estimarse, en primer lugar, las dimensiones del área de contacto. Tras ello es posible obtener la presión que se produce, y, en última instancia, la distribución de tensiones que tiene lugar en las cercanías del contacto. Finalmente y bajo el cumplimiento de las hipótesis anteriormente citadas, pueden estimarse las deformaciones que tienen lugar en las proximidades a la superficie de contacto haciendo uso de la ley de Hooke para materiales isotrópos (este cálculo presenta limitaciones que serán comentadas con posterioridad). Las conocidas como “ecuaciones de Lamé – Hooke” caracterizan el comportamiento de un sólido deformable elástico, homogéneo e isotrópo, relacionando los tensores de tensión y deformación mientras no se sobrepase el límite elástico del material [7].

A continuación se plasma la solución al caso, con la que estimar las magnitudes de mayor interés. Otros autores [12]-[14] reflejan la misma formulación asociada al contacto cilindro – cilindro (o cilindro – plano).

Superficie de contacto:

De forma general, la superficie de contacto que aparece cuando dos cuerpos se tocan es una elipse, o una ligera variación de esta forma geométrica. En casos particulares la superficie de contacto toma forma circular (contacto esfera – esfera) o rectangular (contacto cilindro – cilindro) [12]. Por tanto, el área de contacto entre dos cilindros, con ejes paralelos, es un rectángulo. Su longitud viene dada por la longitud de los cilindros, mientras que el semiancho a puede calcularse mediante la ecuación 4-1.

$$a = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \frac{\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2}}{\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}}} = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \frac{1/E^*}{1/D^*}} \quad (4-1)$$

siendo E_1, E_2 los módulos de elasticidad, D_1, D_2 los diámetros y v_1, v_2 los coeficientes de Poisson correspondientes a cada cuerpo. F hace referencia a la fuerza normal que comprime a los sólidos y L a la longitud de la huella en la dirección longitudinal de los hipotéticos cilindros ($L = 6 \text{ mm}$ para el caso bajo estudio).

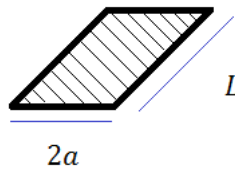


Figura 4-7: Área de contacto rectangular (perspectiva caballera)

Presión máxima en la superficie de contacto:

La relación entre fuerza normal y área es la presión media en la superficie entre los dos cuerpos:

$$p = F/2aL \quad (4-2)$$

La presión máxima se da en la línea central de la huella a lo largo de la longitud, y se calcula mediante la ecuación 4-3.

$$p_{m\acute{a}x} = 2F/\pi aL \quad (4-3)$$

Como se muestra en la figura 4-8, la distribución de presión es semielíptica a lo largo del eje x (identificando a las direcciones según dicha figura), por lo que se trata de un semielipsoide.

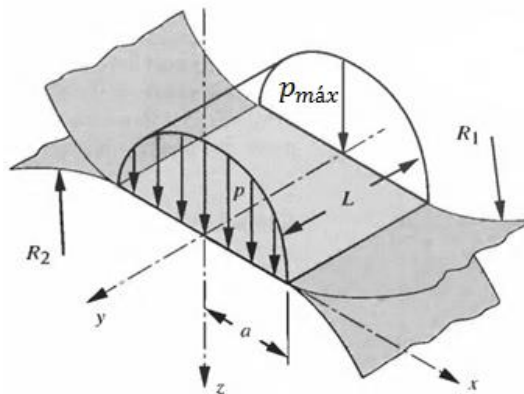


Figura 4-8: Distribución de presión [14]

Tensiones normales (σ):

En un entorno de la superficie de contacto y a lo largo de la dirección vertical (dirección en la que se aplica la carga), las tensiones principales se dan en las direcciones cartesianas, resultando la tensión normal mínima (máximas en módulo, es de compresión) en la dirección vertical [14].

En puntos del eje vertical muy cercanos a la superficie de contacto ($z < 0,436 a$, aproximadamente) se da:

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_2 = \sigma_y$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

Mientras que en puntos más alejados ($z > 0,436 a$, aproximadamente) sucede:

$$\sigma_1 = \sigma_y$$

$$\sigma_2 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

Cabe recordar que la identificación de las tensiones principales viene dada por la premisa: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ [7].

Estas tensiones se rigen por las siguientes expresiones:

$$\sigma_x = -2\nu p_{m\acute{a}x} \left(\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}} - \left| \frac{z}{a} \right| \right) \quad (4-4)$$

$$\sigma_y = -p_{m\acute{a}x} \left(\frac{1 + 2\frac{z^2}{a^2}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}}} - 2 \left| \frac{z}{a} \right| \right) \quad (4-5)$$

$$\sigma_z = -\frac{p_{m\acute{a}x}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}}} \quad (4-6)$$

dependiendo de la distancia, en dirección vertical, a la superficie de contacto.

Los niveles máximos se alcanzan en dicha superficie ($z = 0$):

$$\sigma_x = -2\nu p_{m\acute{a}x} \quad (4-7)$$

$$\sigma_y = \sigma_z = -p_{m\acute{a}x} \quad (4-8)$$

Tensión tangencial máxima ($\tau_{m\acute{a}x}$):

El esfuerzo cortante, incluso en su máximo valor, alcanza un nivel inferior respecto a los que llegan a darse de tensión normal. Para comprobar el grado de aproximación en los resultados videocorrelación – teoría es suficiente, en un principio, con analizar los efectos normales. Pese a ello, a continuación se indica cómo se obtendría dicha tensión tangencial máxima (por si fuese necesaria su determinación en un análisis más profundo del problema).

En puntos del eje vertical muy cercanos a la superficie de contacto ($z < 0,436 a$), su cálculo vendría dado por la ecuación 4-9:

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \quad (4-9)$$

Mientras que, en puntos más alejados, se tendría mediante la ecuación 4-10:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_y \\ \sigma_3 &= \sigma_z\end{aligned}$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_y - \sigma_z}{2} \quad (4-10)$$

Deformaciones:

Al introducir cargas pequeñas y tratarse de materiales homogéneos e isotrópos, calculando las tensiones a una cierta distancia de la superficie de contacto (hacia el interior del sólido que se quiera), es posible aproximar las deformaciones que se producen haciendo uso de la ley de Hooke, ecuación 4-11.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad \begin{cases} \delta_{ij} & \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \\ \sigma_{kk} & = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \end{cases} \quad (4-11)$$

donde los subíndices 1,2,3 no hacen referencia a las tensiones principales sino a tres direcciones cualesquiera (perpendiculares entre sí).

Aplicando dicha ley al sistema cartesiano y deshaciendo su generalidad, se tienen las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (4-12)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (4-13)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xy} \quad (4-15)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{xz} \quad (4-16)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{yz} \quad (4-17)$$

Son las ecuaciones de Hooke, que establecen la relación tensión – deformación en el marco elástico lineal. Permitirán comparar los resultados en deformación con los dados por la técnica DIC y ANSYS cuando el análisis se realiza en cualquiera de los dos cuerpos.

4.2.2 Procedimiento experimental

El sistema VIC 2D ha permitido la evaluación de las deformaciones que se originan cuando las dos superficies están en contacto y se aplica una carga de compresión.

Los experimentos se realizaron bajo control en fuerza. Es fundamental evitar el control por desplazamiento una vez se ha producido el contacto entre los cuerpos; en ensayos que involucran la puesta en contacto de piezas, el modo de actuar ha de ser:

- 1) Fijación de los sólidos en las mordazas. En este caso se sujetó la probeta semicircular en la mordaza superior o fija, y la probeta en T en la mordaza inferior (la que se mueve por acción del actuador).

- 2) Aproximación mediante control en desplazamiento hasta que la distancia que separa a los cuerpos sea pequeña.
- 3) Cambiar el modo de control de la máquina y exigir la aplicación de una fuerza de 0 N. Esto hará que el acercamiento sea a una velocidad muy pequeña y garantiza que los sólidos no sufrirán picos de tensión al producirse el contacto entre ellos.
- 4) Una vez se tienen en contacto, ya pueden someterse al programa de carga – descarga (bajo control en fuerza) para introducir el nivel de carga que se desee.

El problema del control en desplazamiento (del cabezal) radica en que es probable que se introduzcan niveles elevados de forma indeseada, ya que un desplazamiento de tan solo micras puede suponer la aplicación de una fuerza considerable.

Con el sistema de videocorrelación se han extraído mapas de deformación de aquellas variables que resultan de mayor interés, fundamentalmente las deformaciones principales máxima y mínima. El enfoque se limitó a la zona en donde tiene lugar el contacto entre los sólidos, pues, en estos casos, los mayores niveles de tensión y deformación se dan en el área de contacto y sus proximidades.

La figura 4-9 muestra el montaje del sistema VIC 2D de Limes en la máquina universal empleada.

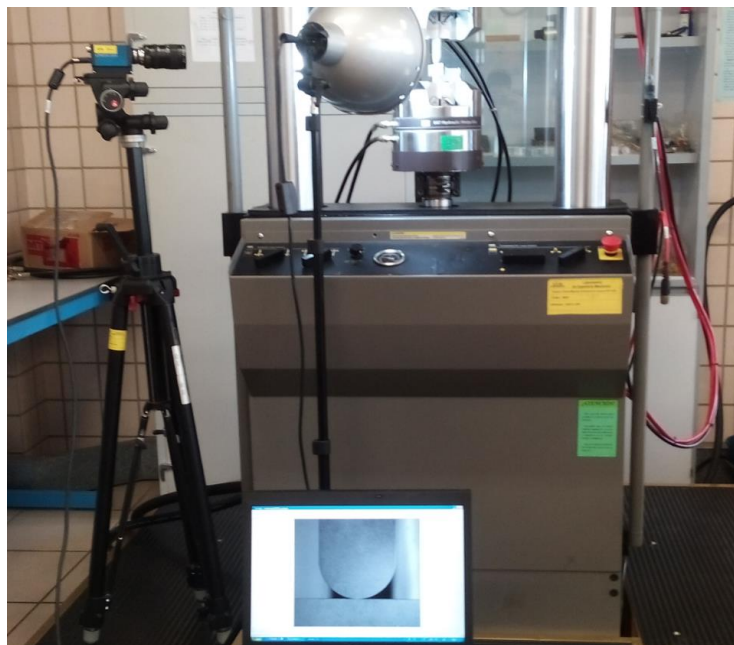


Figura 4-9: Sistema VIC 2D acoplado en la máquina universal de ensayos para el análisis del contacto

Al igual que en los ensayos del capítulo anterior, se empleó un foco de luz externa para aumentar la calidad de las imágenes. La figura 4-10 refleja la visualización de los sólidos por parte de la cámara digital.



Figura 4-10: Perspectiva de la cámara en los ensayos de contacto

4.2.3 Procedimiento para la simulación

Los sólidos fueron generados empleando SOLID EDGE (figura 4-11), un programa CAD 3D de diseño asistido por ordenador. Una vez creadas las piezas, se exportaron a la plataforma ANSYS Workbench (figura 4-12), un software de simulación ingenieril desarrollado para funcionar bajo la teoría de elementos finitos. Éste ha sido el programa con el que se han llevado a cabo las simulaciones virtuales, como ya se hiciera para el ensayo del capítulo anterior.

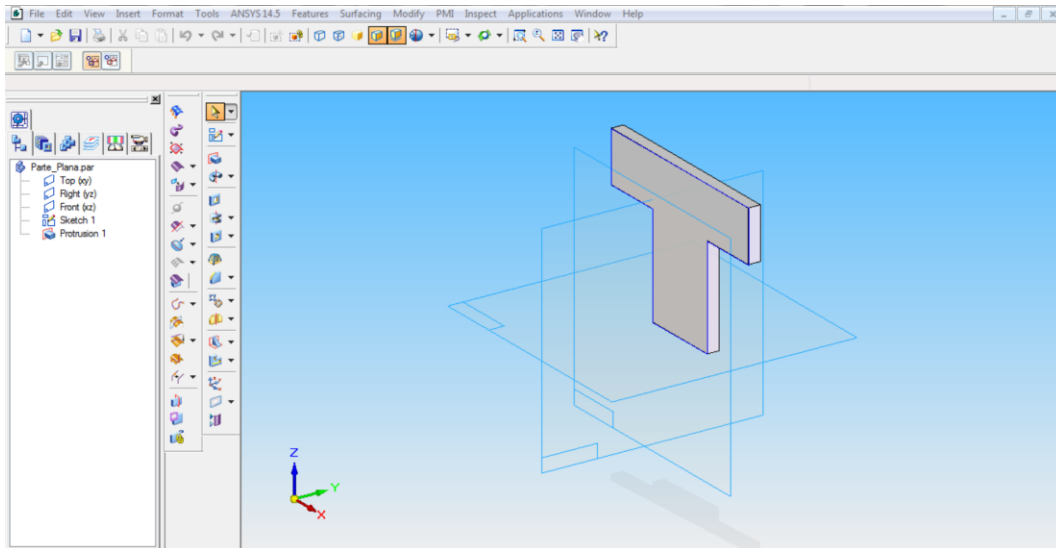


Figura 4-11: Interfaz de SOLID EDGE

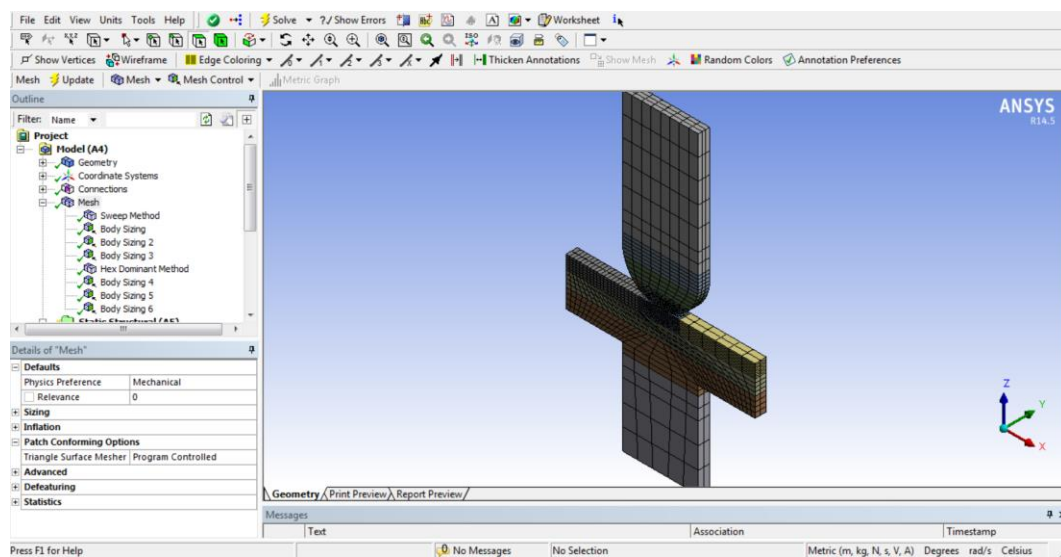


Figura 4-12: Interfaz de ANSYS Workbench

Una vez se tienen las piezas exportadas al programa de simulación, se ponen en contacto a través del módulo de geometría del que dispone el software. Se decide también llevar a cabo una serie de secciones ficticias que permitirán con posterioridad dividir el mallado en zonas, con el objetivo de seleccionar elementos de mayor tamaño en los lugares donde no es de interés obtener soluciones con elevada precisión.

Una vez definida la geometría, se dota a los sólidos de las propiedades mecánicas que los convertirán en sólidos físicos de cierto material.

El contacto se define como “frictional”, caracterizado por un coeficiente de fricción estática de 0,1. Este tipo de contacto es el más empleado, pues simula bien la realidad. Contribuye a evitar que se produzca movimiento relativo entre las superficies.

El proceso continua realizando el mallado. La selección de una malla adecuada conlleva un análisis más exhaustivo que en los ensayos de una sola probeta que han sido simulados en el capítulo 3. Se utilizan elementos de tipo “sweep” (“por barrido”) en las zonas alejadas del contacto, generando hexaedros rectangulares en los lugares que no presentan una geometría conflictiva. Para las zonas próximas al contacto, se emplean elementos “hex dominant”, modalidad que alterna hexaedros y tetraedros para optimizar la adaptación a la geometría y la conexión entre elementos. La densidad de elementos utilizados se ingresó de manera lógica. Se ejecutaron varios “body sizing” con la intención de tener una malla fina solamente en la zona de interés. Además, se realizaron diferentes ensayos aumentando consecutivamente la cantidad de elementos utilizados en dicha zona (proximidades del contacto) hasta conseguir una convergencia. Es importante buscar el equilibrio de forma que se obtengan aproximaciones ajustadas a la realidad al mínimo costo computacional. La figura 4-13 muestra la malla elegida.

Una vez realizado el mallado, se seleccionan las cargas y restricciones cinemáticas, esto es, se introducen las condiciones de borde en los nodos y elementos. Se manejaron condiciones de fuerza y desplazamiento para simular el comportamiento real de los cuerpos en la máquina de ensayos. La probeta en T se sometió a la fuerza vertical, de compresión, que correspondiese en cada caso y se impidió su desplazamiento en las direcciones perpendiculares a la de carga; se aplicó un empotramiento a la probeta semicircular en su base superior (analogía con los efectos de la mordaza fija).

Finalmente se obtiene la solución, dando paso a la visualización de los resultados. En este estudio son de interés las tensiones y deformaciones que tienen lugar en las direcciones principales.

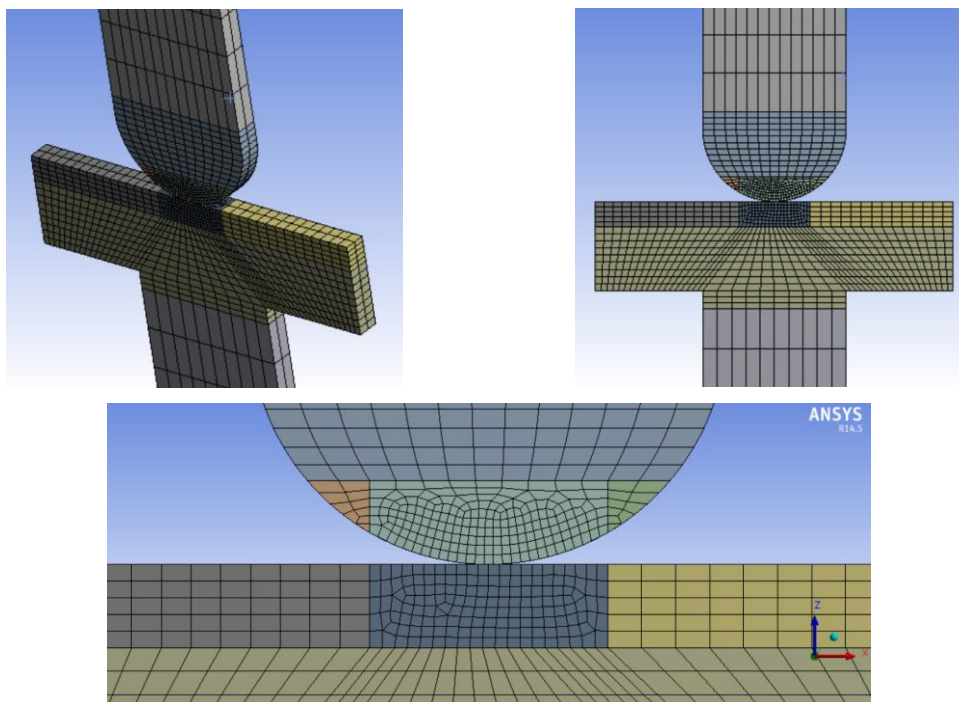


Figura 4-13: Malla empleada en la simulación del problema de contacto

4.3 Resultados

En primer lugar se mostrarán los análisis realizados usando las piezas de aluminio. Tras un estudio inicial utilizando este material, se observarán algunas discordancias en la comparación de los resultados que se tienen por los diferentes métodos. Como consecuencia, cuando se utilizan las piezas de acero, se amplifica el análisis abarcando otros aspectos para tratar de dar con la razón de dichas diferencias en los datos que se obtienen. Todo esto se plasma detalladamente a continuación.

Por cada material son varios los ensayos que se han realizado, bajo distintos niveles de carga. Por simplicidad y por similitud en las conclusiones, se detallará un ensayo en cada caso.

4.3.1 Empleando las probetas de aluminio

El material seleccionado para las dos piezas ha sido AA7075-T651, cuyas propiedades mecánicas se han mostrado en la tabla 4-1. El ensayo ha sido realizado aplicando una carga de compresión de 400 N.

4.3.1.1 Resultados experimentales

Desde el software de la máquina de ensayos se ejecutó un programa de control en fuerza que llevó a las probetas a experimentar los estados siguientes:

<u>Duración</u>	<u>Nivel inicial</u>	<u>Nivel final</u>	<u>Descripción</u>
5 s	0 N	0 N	Iniciación
40 s	0 N	-400 N	Proceso de carga
30 s	-400 N	-400 N	Carga constante
40 s	-400 N	0 N	Proceso de descarga
5 s	0 N	0 N	Finalización

Tabla 4-2: Programa de control en fuerza ejecutado en el ensayo de contacto con aluminio

Se impuso una velocidad en carga y descarga de 10 N/s; es aconsejable introducir la fuerza muy paulatinamente en situaciones que suponen concentración de tensión en determinadas zonas de los cuerpos. En consecuencia, la duración del ensayo fue de 120 s.

Cabe recordar un detalle que ya se indicó en el capítulo anterior: se tomaron fotogramas a razón de 1 captura/s, por lo que el número de imágenes procesadas (*file number*) coincide con el tiempo, en segundos, de duración. Cuando se muestra la evolución temporal de algún parámetro de deformación, en el eje de abscisas aparecerá el “file number”, por lo que realmente la gráfica refleja el nivel de deformación que se ha dado en cada uno de los fotogramas procesados.

Dado que se tiene la certeza de que los valores críticos de tensión y deformación se producen en el área de contacto, se pensó que la zona a estudiar mediante el sistema de videocorrelación debía contener a la línea (en 2D) de contacto. La deformación principal mínima es la magnitud de mayor trascendencia, que coincide con la deformación en el eje vertical (dirección de la carga) como ya se indicó en el apartado dedicado al procedimiento teórico. Las figuras 4-14 y 4-15 muestran el resultado de este parámetro en dos de los análisis realizados. Se trata de mapas de deformación obtenidos durante el tiempo en que permaneció aplicada la carga máxima (−400 N).

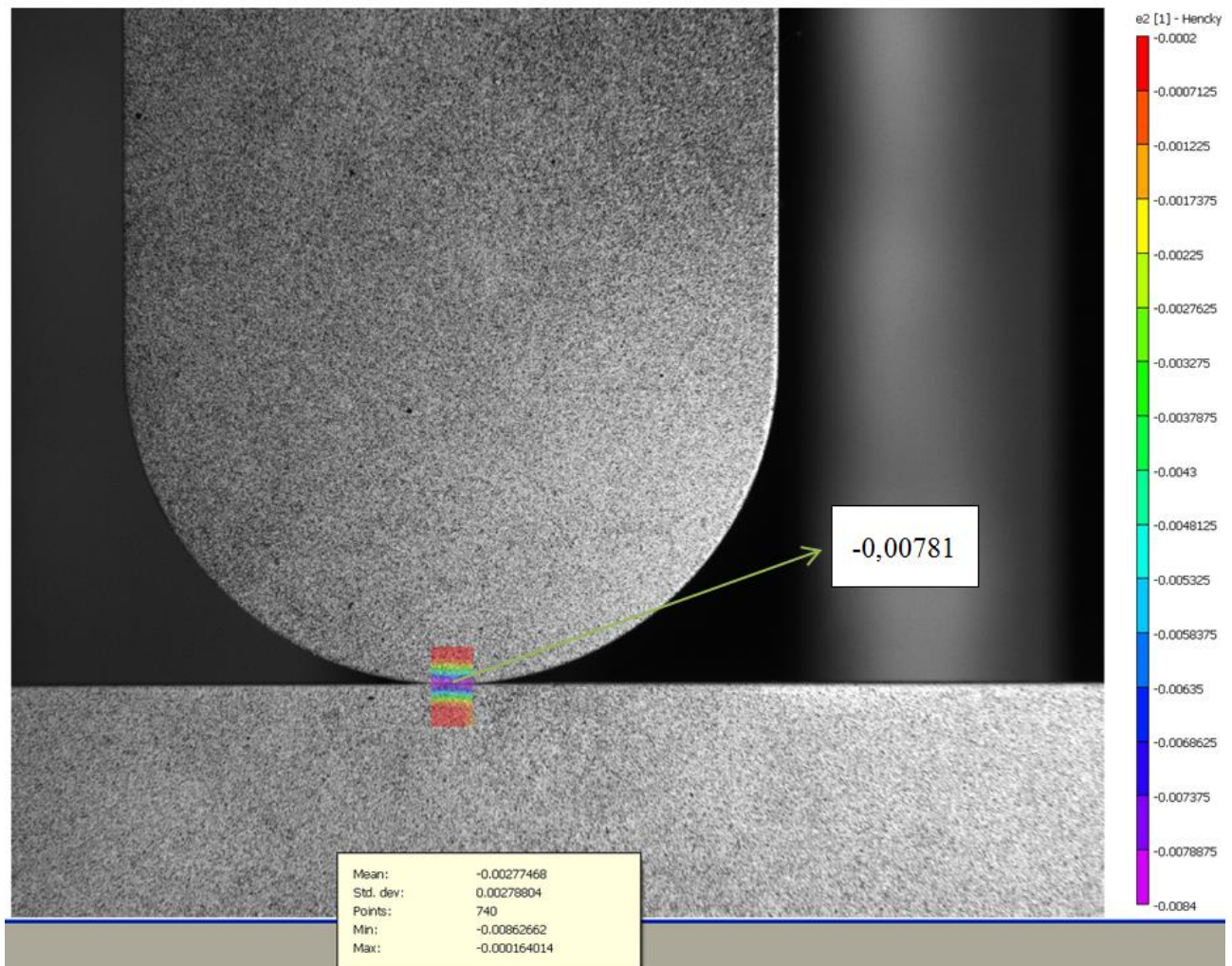


Figura 4-14: Mapa de deformación en la zona analizada; estudio 1 (aluminio)

El cuadro de diálogo que aparece en las figuras incluye parámetros que caracterizan en cierto modo la zona estudiada. Aparecen, entre otros, la media, el mínimo y el máximo de la magnitud que se ha procesado, en este caso la deformación mínima principal. En principio, para comparar el resultado dado por el sistema VIC 2D con los otros métodos, es suficiente con saber el nivel marcado en la superficie de contacto, valor que ha sido encuadrado (con fondo blanco). Dicho valor se ha estimado como la media aritmética del nivel que se da en los 30 fotogramas en los que la fuerza ha permanecido constante.

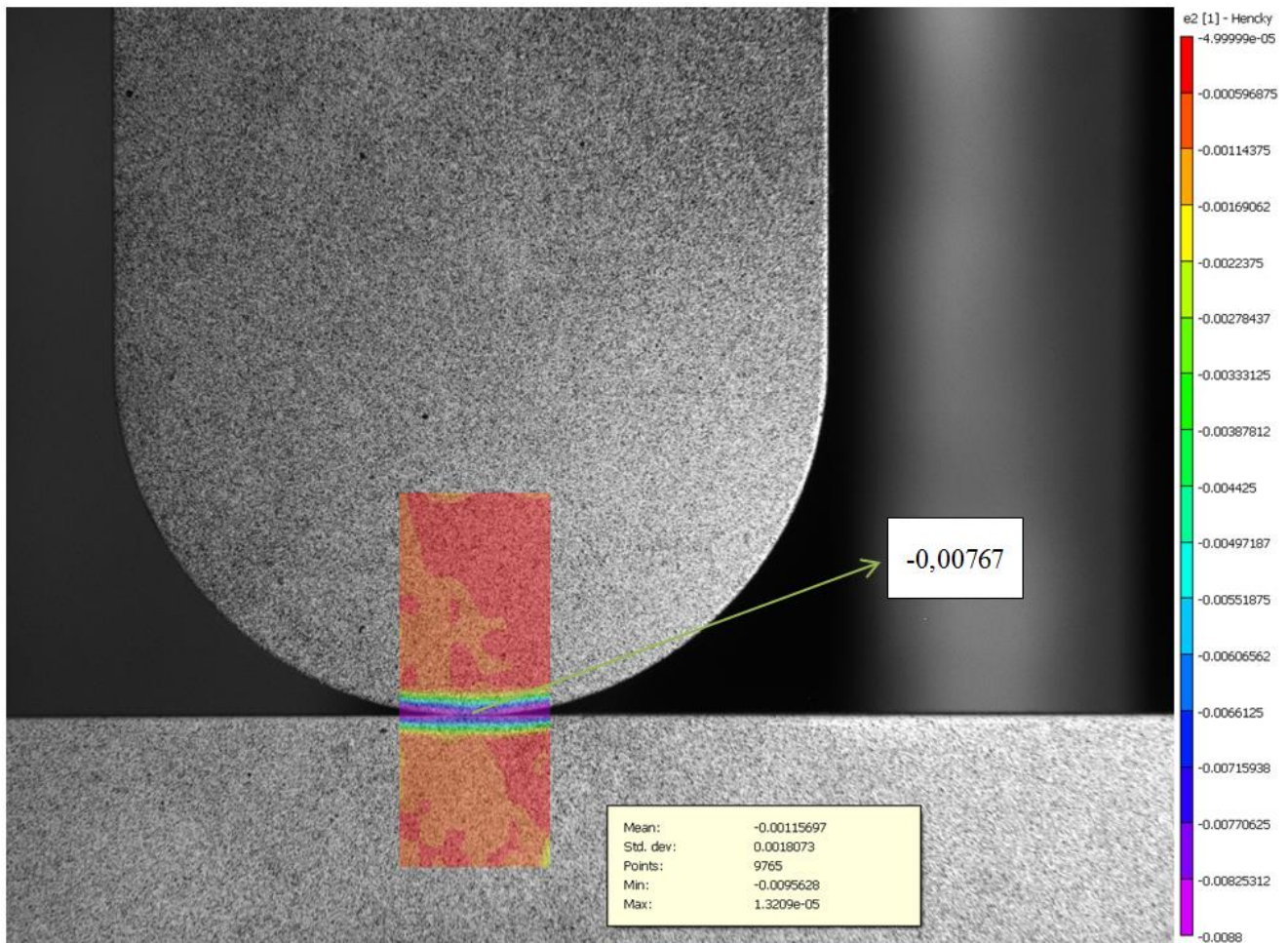


Figura 4-15: Mapa de deformación en la zona analizada; estudio 2 (aluminio)

Ambos análisis arrojan un resultado similar. La figura 4-16 muestra la evolución temporal de la deformación vertical (o principal mínima) en la línea de contacto. No se aprecia diferencia en la evolución aportada por uno u otro estudio, por lo que se inserta la gráfica correspondiente a uno de ellos. Queda reflejado el proceso de carga y descarga que ha tenido lugar.

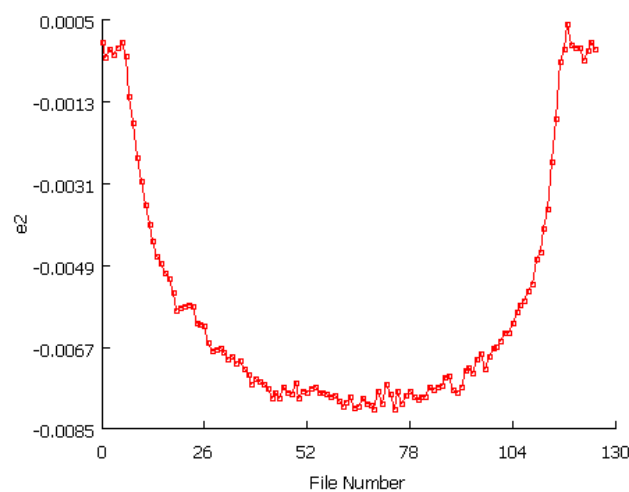


Figura 4-16: Evolución en tiempo de la deformación principal mínima en la línea de contacto (Al)

4.3.1.2 Resultados en la simulación

Definido el modelo según las indicaciones del apartado 4.2.3 “procedimiento para la simulación”, se ejecuta la búsqueda de la solución. La visualización de resultados se ha centrado en los efectos verticales, tanto en tensión como en deformación.

Las figuras 4-17 y 4-18 muestran el estado de deformación principal mínima (máxima en módulo) al que han sido sometidos los sólidos.

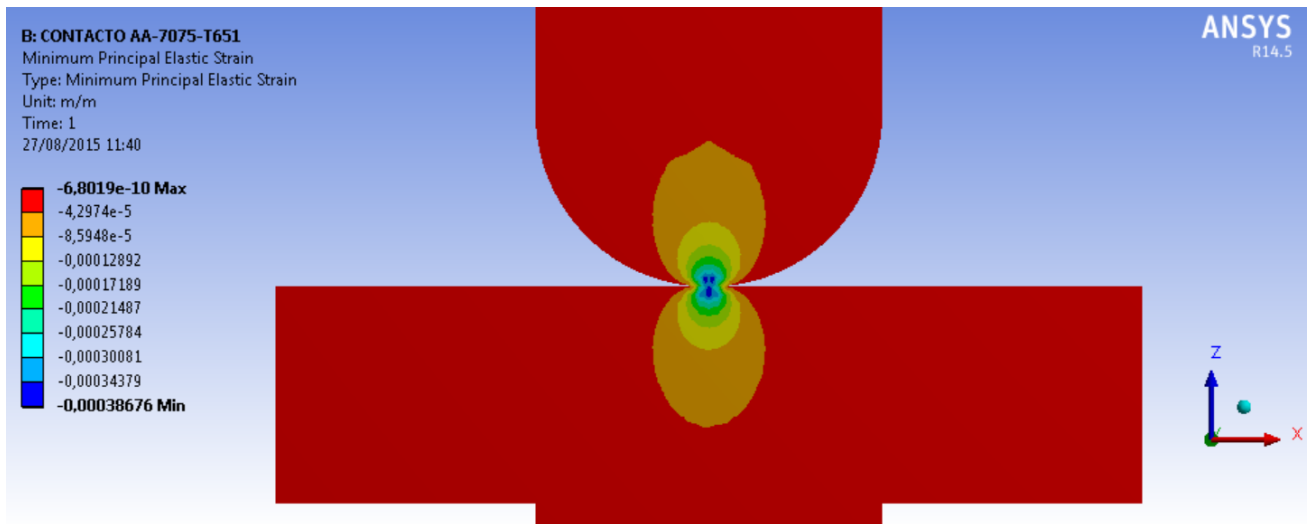


Figura 4-17: Distribución de la deformación principal mínima en el conjunto, resultado de la simulación (AI)

Debido a la geometría que presentan los sólidos, los mayores niveles (en módulo) de tensión y deformación aparecen en la probeta inferior. Es la probeta semicircular la que ejerce mayor presión.

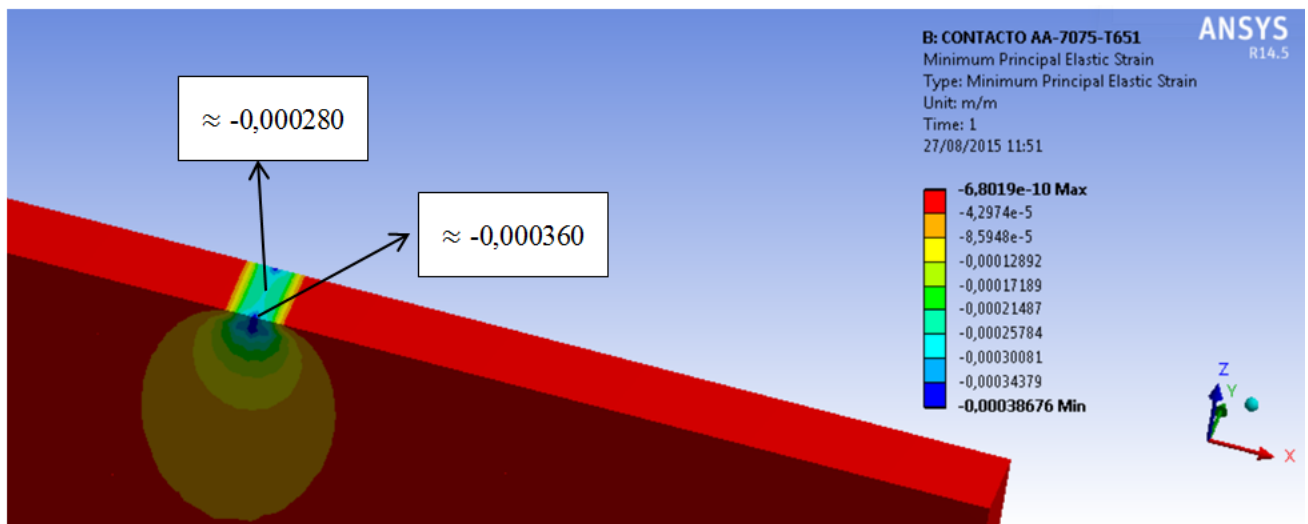


Figura 4-18: Distribución de la deformación principal mínima en la superficie plana, resultado de la simulación (AI)

Se observa que se tienen valores muy inferiores a los dados por el sistema de videocorrelación. Se analizará este aspecto en la discusión que se hará tras calcular los resultados mediante el procedimiento teórico, para que también estos formen parte de dicha comparación.

En cuanto a tensión, se obtienen los resultados que muestran las figuras 4-19 y 4-20.

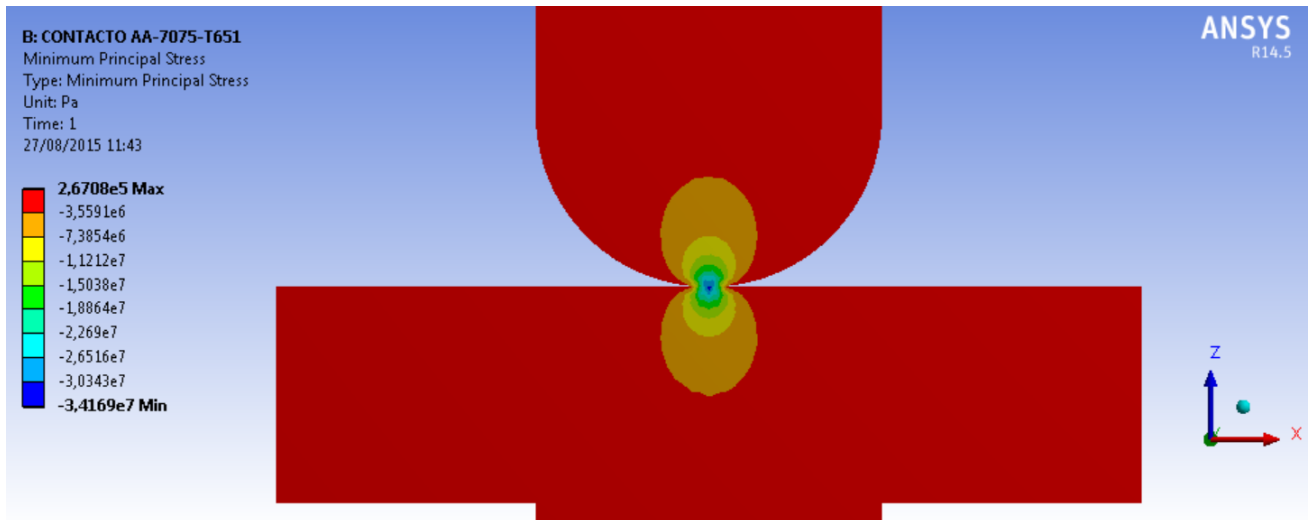


Figura 4-19: Distribución de la tensión principal mínima en el conjunto, resultado de la simulación (AI)

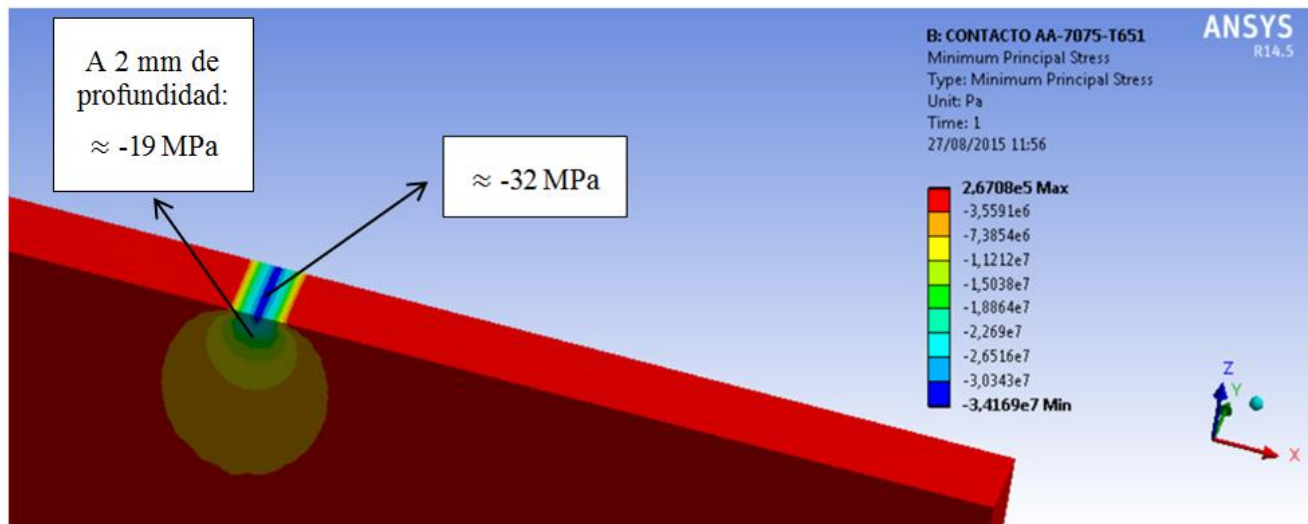


Figura 4-20: Distribución de la tensión principal mínima en la superficie plana, resultado de la simulación (AI)

4.3.1.3 Resultados teóricos

Se trata ahora de llevar a cabo numéricamente el procedimiento teórico indicado en la sección anterior. Tratándose de probetas de aluminio 7075-T651, los parámetros que intervienen en los cálculos son:

$$\begin{aligned}
 \nu_1 &= \nu_2 = 0,35 \\
 E_1 &= E_2 = 72000 \text{ N/mm}^2 \\
 L_1 &= L_2 = 6 \text{ mm} \\
 D_1 &= 40 \text{ mm}, D_2 \approx \infty \\
 F &= 400 \text{ N Compresión}
 \end{aligned}$$

Para llegar a obtener resultados de tensión, hay que estimar primeramente las dimensiones de la superficie de contacto. Una de ellas ya se conoce, $L = 6 \text{ mm}$. Se calcula el semiancho, a , mediante la ecuación 4-1.

$$a = 0,2034 \text{ mm} = 203,4 \mu\text{m}$$

La presión máxima se obtiene empleando la ecuación 4-3.

$$p_{\text{máx}} = 208,66 \text{ N/mm}^2$$

Estos resultados han sido validados mediante una página web (*tribology-abc*) preparada para dar solución a problemas de ingeniería mecánica de diferente índole. Incluye, entre otros, un calculador cuyo algoritmo interno contiene el procedimiento que arroja la literatura para resolver casos de contacto hertziano “lineal”.

Ese tipo de contacto corresponde al que se está analizando en este capítulo. Es conocido como contacto lineal debido a la pequeña dimensión que presenta el ancho del rectángulo de contacto en comparación con la dimensión longitudinal. Para obtener la solución en dicho portal web, simplemente hay que introducir las propiedades y características geométricas de los cuerpos, así como la fuerza que ha sido aplicada. La fuerza se introduce por unidad de longitud; en el caso bajo estudio, como la longitud de los hipotéticos cilindros es $L = 6 \text{ mm}$, la fuerza ha sido introducida en el programa como:

$$F = \frac{400}{6 \cdot 10^{-3}} \text{ N/m} = 66,67 \cdot 10^3 \text{ N/m}$$

La figura 4-21 muestra los resultados dados por la web, que coinciden con los calculados.

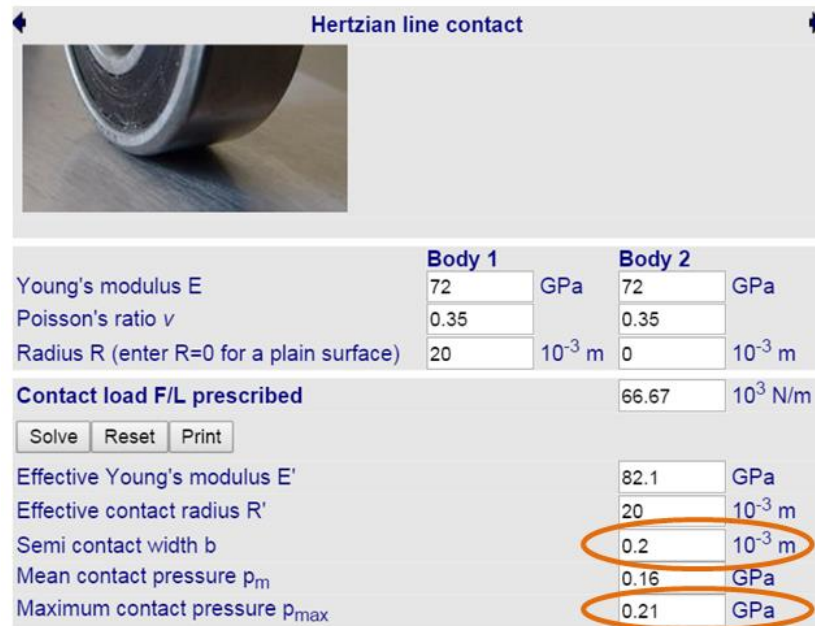


Figura 4-21: Resultados del contacto obtenidos en *tribology-abc* (aluminio)

Como, en los otros métodos, el análisis se ha centrado en la superficie de contacto, se hace de la misma forma en este apartado para tener resultados comparables.

En puntos del eje vertical muy cercanos a la superficie de contacto se da:

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_2 = \sigma_y$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

Justamente en dicha superficie los resultados en tensión vienen dados por las ecuaciones 4-7 y 4-8. En este caso se obtiene:

$$\sigma_x = -146,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_y = -208,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_z = -208,7 \text{ N/mm}^2$$

Esto indica que, limitando el estudio a la propia superficie de contacto, se estima una tensión principal mínima de $-208,7 \text{ MPa}$. Este valor difiere notablemente del obtenido mediante la simulación. Sabiendo que justo la zona donde los sólidos se tocan es muy vulnerable y que, además, el proceder deducido a partir de los estudios de Hertz está supeditado a numerosas hipótesis, se analizará también la información que arroja este procedimiento a una cierta distancia del contacto (pero en una zona muy próxima).

Antes cabe indicar que, teniendo en cuenta los efectos reales, cuando el análisis se limita al plano en que se produce el contacto la ley de Hooke no puede ser aplicada, puesto que la relación entre las tensiones y deformaciones no es linealmente elástica. Por ello, la obtención rigurosa de niveles de deformación en dicho plano supondría una resolución extremadamente compleja, que no suele abordarse mediante

formulación analítica. Sin embargo, cuando el estudio se adentra en cualquiera de los cuerpos, las ecuaciones de Hooke toman validez, permitiendo la relación tensión – deformación del modo expuesto anteriormente en el apartado 4.2.1.2. de la subsección “procedimiento teórico”.

En los resultados de la simulación (apartado anterior) y en lo que a tensión principal mínima se refiere, se ha indicado el valor tanto en la superficie de contacto como a una profundidad de 2 mm desde la misma. ¿Qué valor aporta el procedimiento teórico a dicha distancia? El cálculo a realizar viene dado por la ecuación 4-6:

$$\sigma_z = -\frac{p_{\text{máx}}}{\sqrt{1 + \frac{z^2}{a^2}}} = -\frac{208,7}{\sqrt{1 + \frac{2^2}{0,2034^2}}} = -21,1 \text{ MPa}$$

Este resultado, al contrario que el obtenido en la superficie de contacto, sí es muy aproximado al dado en la simulación.

4.3.1.4 Deducciones

De este caso, en el que se han realizado los ensayos empleado las probetas de aluminio, se extraen algunas conclusiones:

- Se pensó que lo ideal sería obtener resultados similares por los 3 métodos incluyendo en el análisis la superficie (o línea, en 2D) de contacto. Por ello, los estudios con el sistema de videocorrelación se llevaron a cabo en una zona del conjunto que involucrara dicha superficie. Tras haber obtenido los resultados, se aprecia que mediante la correlación de imágenes digitales se tienen niveles en deformación de hasta el 0,8 %, mientras que la simulación ha marcado máximos (en módulo) del 0,04 %. Las diferencias son muy grandes. Sin tener muy en claro la causa, se decidió abordar el problema utilizando los sólidos de acero con el fin de observar si se reducen estas diferencias al cambiar de material. Además, ante la posibilidad de que el problema permaneciese llevando a cabo el análisis de la misma forma, el estudio fue extendido a diferentes zonas para tratar de esclarecer el motivo de error.
- Es realmente difícil obtener, por varios métodos de estudio diferentes, resultados similares justo en la superficie de contacto. Por ejemplo, es sabido que una de las hipótesis en las que se fundamenta el modelo teórico de Hertz, es que se mantiene la validez del comportamiento elástico en todos los puntos. Hechos como éste hacen prever desvíos de su solución respecto al comportamiento en los casos reales cuando el estudio se limita a la superficie de contacto. Se ha observado en este problema que, cuando se estudian las zonas próximas a dicha superficie y no tan solo ella misma, se tienen resultados muy similares para el procedimiento basado en la teoría y el basado en elementos finitos. Concretamente se ha visto que la simulación en ANSYS ha dado una tensión normal en la dirección de carga de -19 MPa a distancia de 2 mm (sobre la vertical) del plano de contacto, mientras que el procedimiento teórico proporciona -21 MPa en las mismas circunstancias, resultados muy similares. En cierto modo, este hecho hace ver que el problema se ha tenido en el análisis experimental, que aunque transmite una interpretación correcta del problema (de mayor a menor deformación a medida que aumenta la distancia a la superficie de contacto), ofrece resultados mucho más elevados que la simulación por elementos finitos, a lo que de momento no se ha dado explicación y se tratará de esclarecer en lo que sigue.

4.3.2 Empleando las probetas de acero

Se aborda el problema con las probetas de acero S235JR y una carga de compresión de 1000 N.

El objetivo es, mediante un análisis más amplio respecto al del caso anterior, ver si es posible obtener por videocorrelación resultados similares a los que se tienen con los otros métodos. De ser así, se podrá certificar la validez de la técnica DIC para extraer información en casos de contacto e indagar acerca de los errores cometidos en el ensayo anterior, con el fin de que no vuelvan a cometerse en investigaciones futuras. Con este acometido, se evaluará la deformación principal mínima, magnitud de mayor relevancia.

4.3.2.1 Resultados experimentales

El conjunto fue sometido a los estados que se indican en la tabla 4-3.

<u>Duración</u>	<u>Nivel inicial</u>	<u>Nivel final</u>	<u>Descripción</u>
5 s	0 N	0 N	Iniciación
25 s	0 N	-1000 N	Proceso de carga
25 s	-1000 N	-1000 N	Carga constante
25 s	-1000 N	0 N	Proceso de descarga
5 s	0 N	0 N	Finalización

Tabla 4-3: Programa de control en fuerza ejecutado en el ensayo de contacto con acero

La duración total del ensayo fue de 85 s, tomando 1 imagen/s. Los procesos de carga y descarga tuvieron lugar a razón de 40 N/s, velocidad baja, recomendable.

En un primer análisis, se tomó una zona que incluyese la línea de contacto, al igual que se hizo en el estudio anterior.

Zona 1 de análisis:

La figura 4-22 muestra la situación del parámetro bajo investigación durante el tiempo en que se aplicó la compresión de -1000 N. Se detalla su valor en dos lugares: justo en el contacto, donde se calcula un nivel del 0,6 %, y en puntos adentrados 2 mm en el cuerpo inferior, donde se tiene 0,02 %.

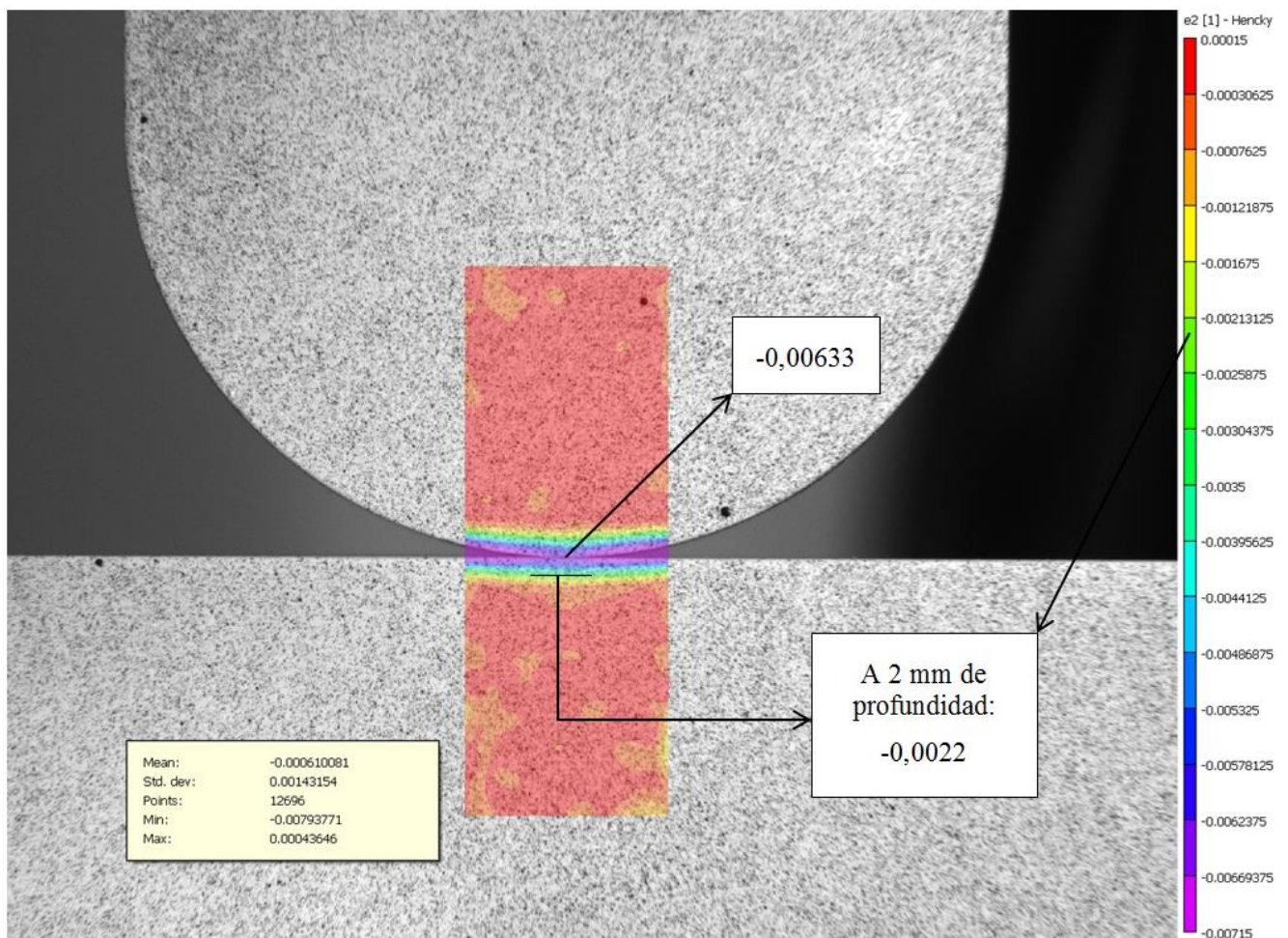


Figura 4-22: Mapa de deformación principal mínima en la zona 1 analizada (acero)

Al igual que cuando se analizó el problema de la misma forma usando las probetas de aluminio, parecen niveles elevados para la carga tan baja que se ha introducido. Previendo que pudiera darse el mismo error que en aquel estudio, se adoptan otras formas de actuación para tener resultados en distintas circunstancias. Se decide excluir del análisis a la superficie de contacto, pensando que puede resultar conflictiva para el algoritmo del sistema de correlación de imágenes digitales. Se presentan a continuación los nuevos resultados.

Zona 2 de análisis:

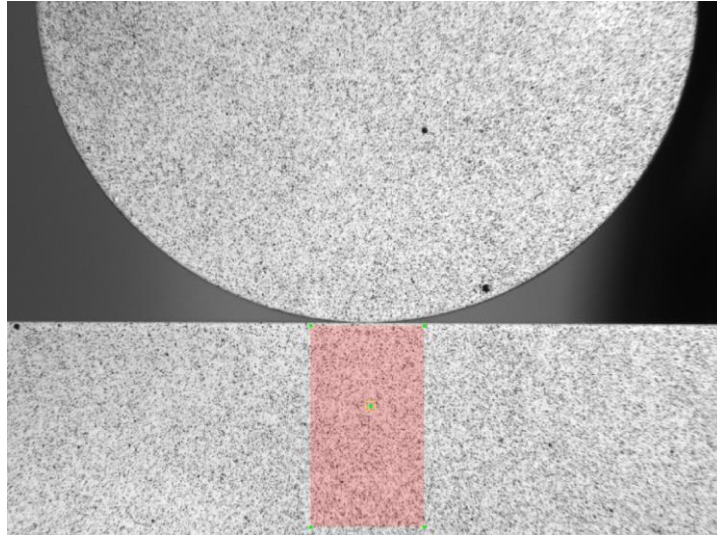


Figura 4-23: Zona 2 analizada (acero)

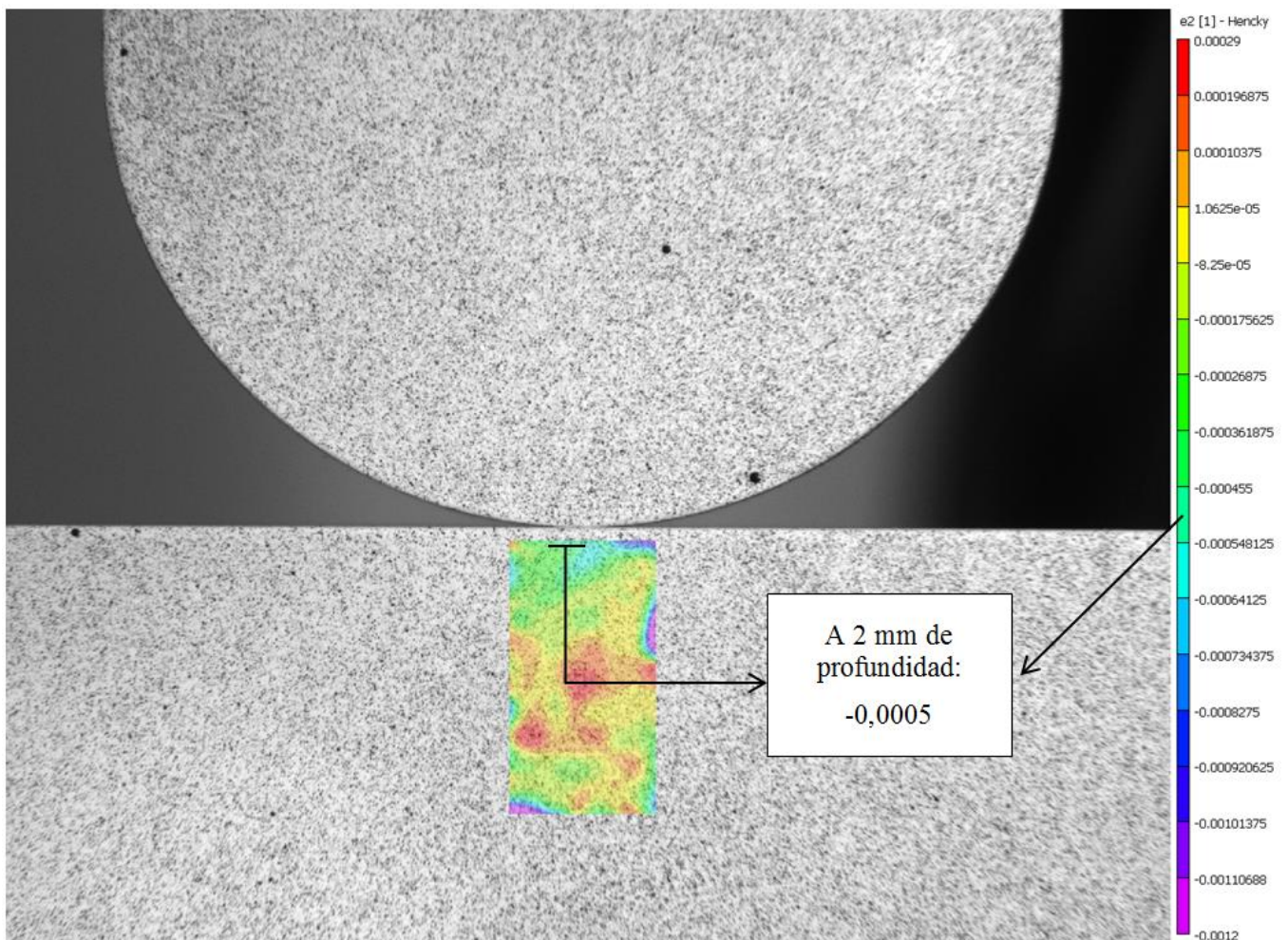


Figura 4-24: Mapa de deformación principal mínima en la zona 2 analizada (acero)

La figura 4-24 refleja una situación bien distinta a la dada en la figura 4-22. Se tienen niveles que no superan el 0,01 % en zonas donde el análisis anterior ha marcado valores muy superiores. Ciñendo el interés a una profundidad de 2 mm desde el plano de contacto, se tiene un dato reducido en un 80 % respecto del mismo valor dado en el análisis anterior. Este hecho será importante de cara a las conclusiones del proyecto. En el siguiente capítulo se indagará sobre la causa.

4.3.2.2 Resultados en la simulación

Las figuras 4-25 y 4-26 muestran el estado de deformación principal mínima al que han sido sometidas las probetas según los resultados de la simulación por elementos finitos.

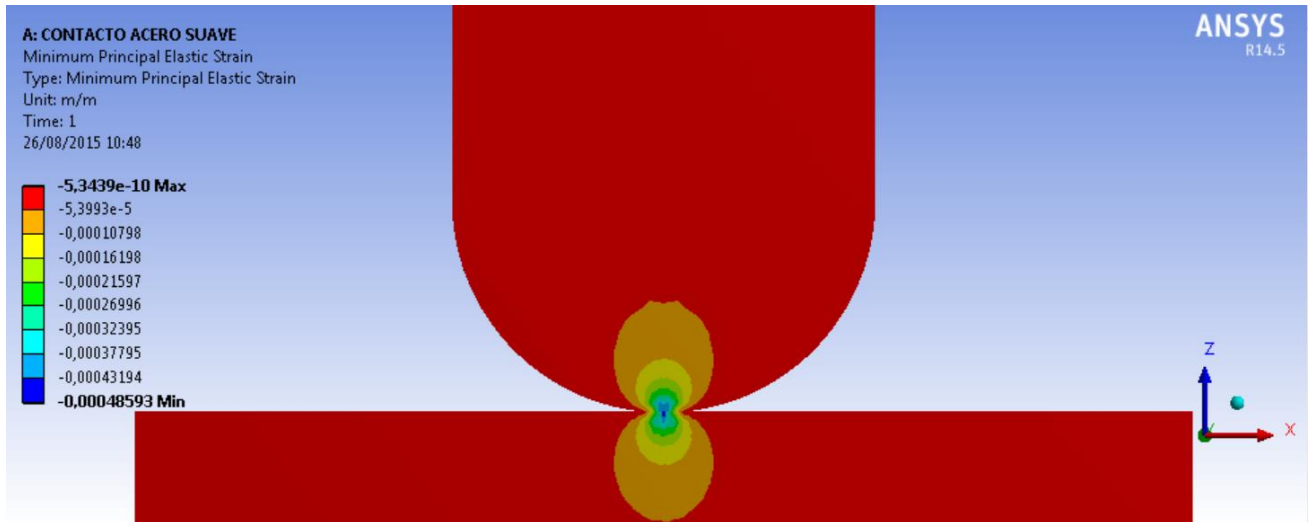


Figura 4-25: Distribución de la deformación principal mínima en el conjunto, resultado de la simulación (acero)

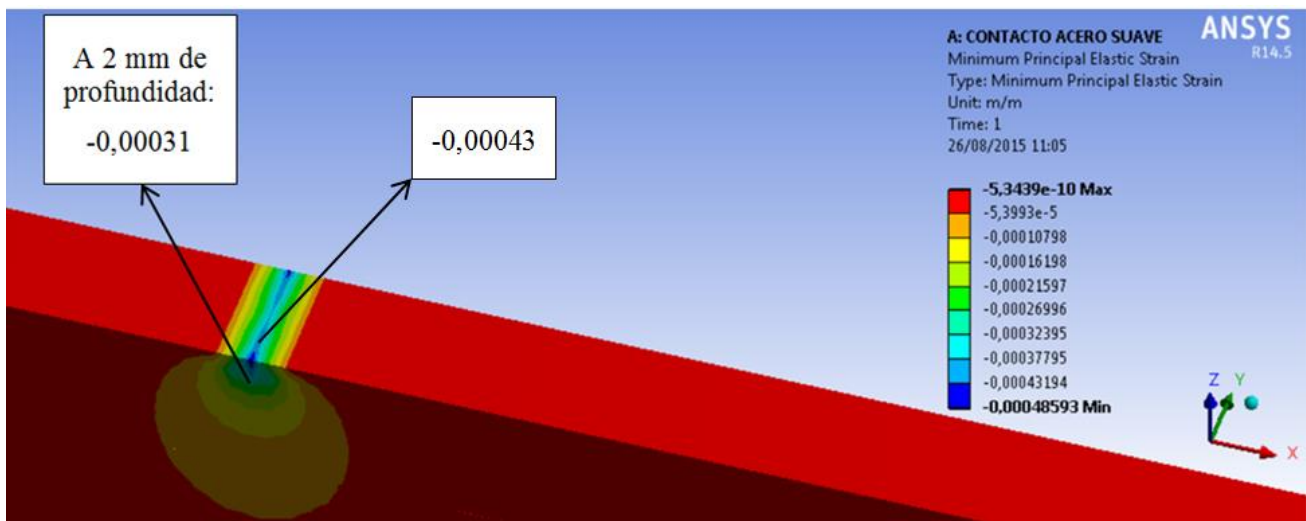


Figura 4-26: Distribución de la deformación principal mínima en la superficie plana, resultado de la simulación (acero)

Tras ver, en el apartado anterior, lo que sucede cuando se analiza el caso mediante videocorrelación, los efectos que se tienen a 2 mm de la superficie de contacto (en el sólido inferior) pasan a ser de gran interés en este apartado y el siguiente, ya que podrían resultar un indicio para validar los resultados del equipo de medición óptica de deformaciones cuando se utiliza bajo ciertas directrices. Es más, se observa en la figura 4-26 que la simulación arroja un valor en torno al 0,03 % en dicho lugar, resultado muy próximo al dado por el sistema VIC 2D cuando se ha llevado a cabo el análisis en la zona 2 (0,05 %).

En cuanto a tensión, las figuras 4-27 y 4-28 muestran la distribución de tensión normal vertical.

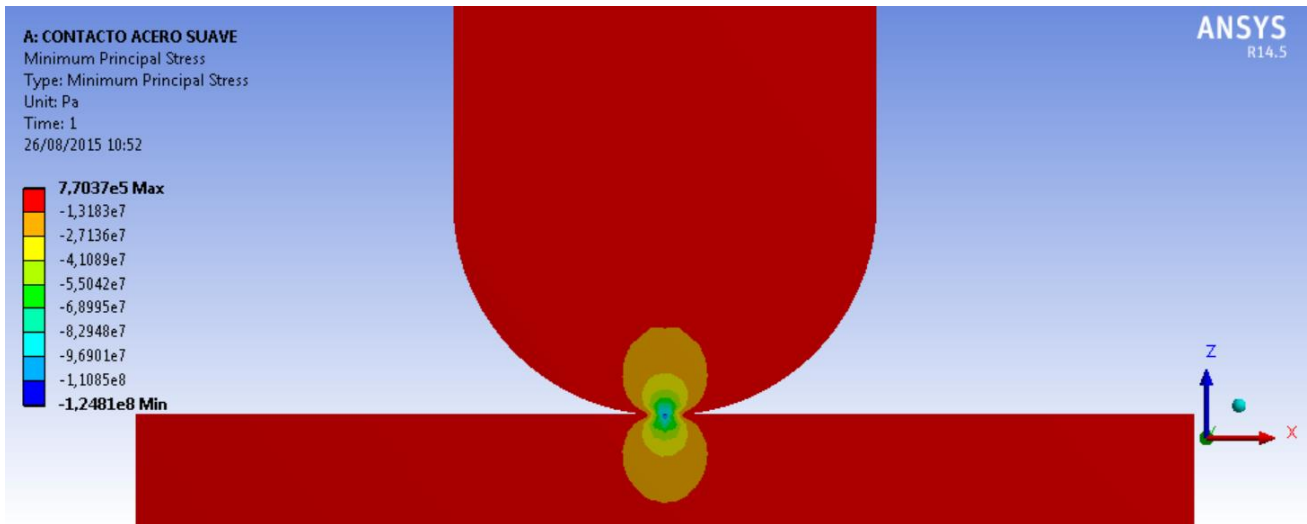


Figura 4-27: Distribución de la tensión principal mínima en el conjunto, resultado de la simulación (acero)

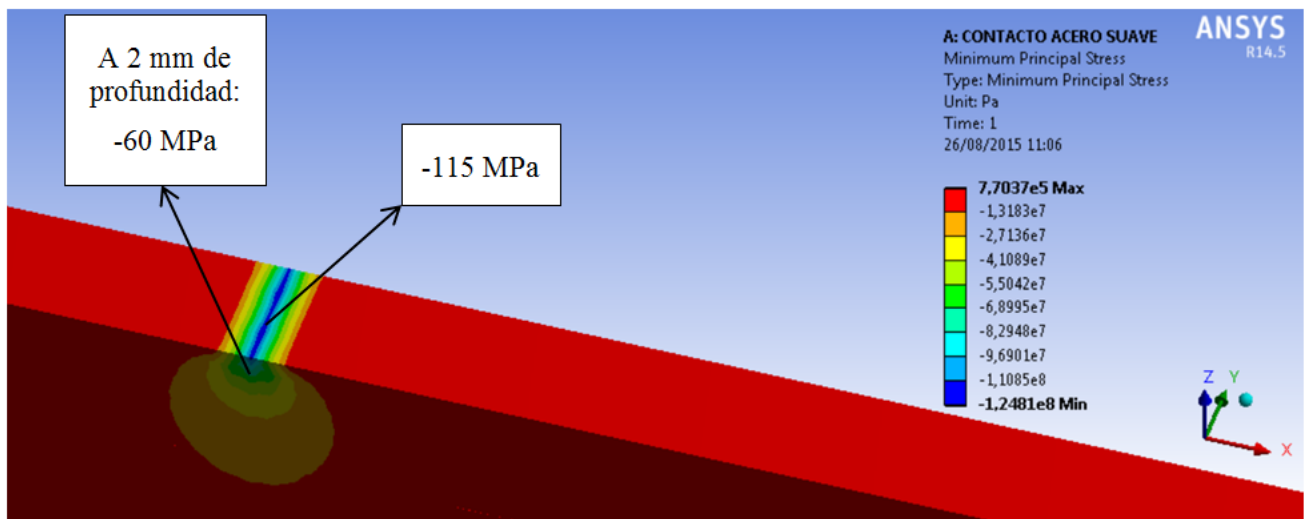


Figura 4-28: Distribución de la tensión principal mínima en la superficie plana, resultado de la simulación (acero)

4.3.2.3 Resultados teóricos

Por los resultados de videocorrelación y ANSYS pueden ya observarse las diferencias existentes entre los métodos cuando el análisis se centra en la superficie de contacto, al igual que ocurriera con las probetas de aluminio. Sin embargo, excluyendo a ésta del procesamiento en el software DIC, se observan coincidencias. Concretamente, en esa situación, se ha focalizado el estudio a una profundidad de 2 mm respecto de la superficie de contacto y se han tenido resultados muy similares en deformación. Se pretende ahora calcular tensiones y deformaciones a la misma profundidad con el procedimiento teórico de Hertz y ver si también se tienen similitudes con este método.

Tratándose de probetas de acero S235JR, los parámetros que participan en los cálculos son:

$$v_1 = v_2 = 0,28$$

$$E_1 = E_2 = 207 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$L_1 = L_2 = 6 \text{ mm}$$

$$D_1 = 40 \text{ mm}, D_2 \approx \infty$$

$$F = 1000 \text{ N} \text{ Compresión}$$

Para obtener las tensiones normales, previamente hay que dimensionar la superficie de contacto (obteniendo el semiancho mediante la ecuación 4-1) y calcular la presión que tiene lugar en ella (ecuación 4-3).

$$a = 0,1968 \text{ mm} = 196,8 \text{ } \mu\text{m}$$

$$p_{\text{m}\acute{a}\text{x}} = 552,9 \text{ N/mm}^2$$

Se comprueban estos resultados en el portal web *tribology-abc* (figura 4-29). Recordar que, en este programa, la fuerza debe ser introducida por unidad de longitud.

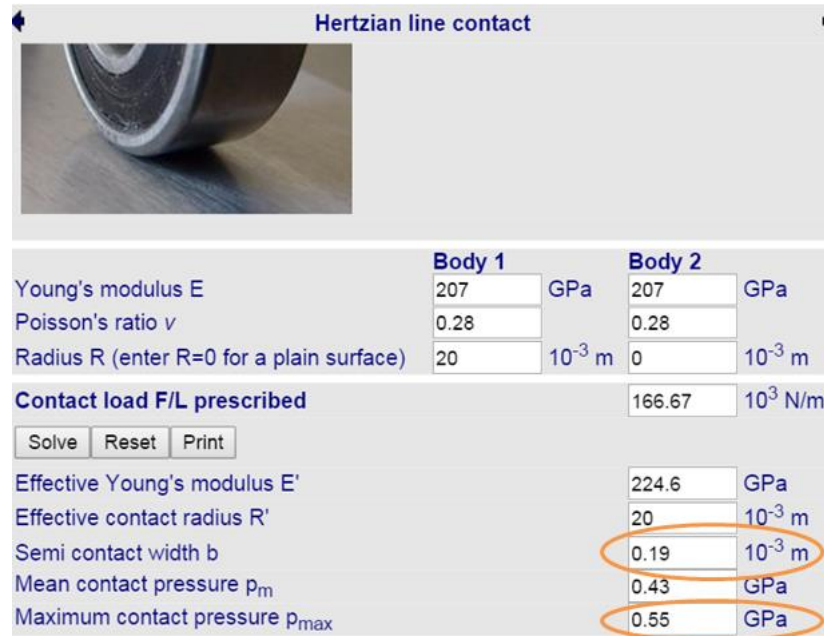


Figura 4-29: Resultados del contacto obtenidos en *tribology-abc* (acero)

En puntos del eje vertical y cuando la distancia a la superficie de contacto es superior a $0,436 \cdot a$, sucede:

$$\sigma_1 = \sigma_y$$

$$\sigma_2 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = \sigma_z$$

El cálculo de estas tensiones normales a una profundidad de 2 mm viene dado por las ecuaciones 4-4, 4-5 y 4-6. Se obtienen los siguientes resultados:

$$\sigma_1 = -552,9 \cdot \left(\frac{1 + 2 \frac{2^2}{0,1968^2}}{\sqrt{1 + \frac{2^2}{0,1968^2}}} - 2 \frac{2}{0,1968} \right) = -0,13 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = -2 \cdot 0,28 \cdot 552,9 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2^2}{0,1968^2}} - \frac{2}{0,1968} \right) = -15,20 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = -\frac{552,9}{\sqrt{1 + \frac{2^2}{0,1968^2}}} = -54,14 \text{ MPa}$$

Es posible aproximar las deformaciones que conllevan (en esa misma zona) haciendo uso de la ley de Hooke para materiales isotrópicos. Para conocer la deformación principal mínima, parámetro de interés, hay que emplear la ecuación 4-14, y su resultado es:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{207000} [-54,14 - 0,28 \cdot (-0,13 - 15,20)] = -2,41 \cdot 10^{-4} = -0,000241$$

Este valor de deformación principal mínima (vertical) es muy próximo tanto al obtenido por videocorrelación (figura 4-24) como al dado por la simulación (figura 4-26). Cabe también destacar que la tensión principal mínima calculada, σ_3 , presenta un valor muy similar al obtenido en la simulación (- 60

MPa).

4.3.2.4 Deducciones

Este estudio vuelve a mostrar algo que ya fue observado en el que se realizó con las probetas de aluminio: si se analiza con el sistema VIC 2D una zona del conjunto que involucre a la superficie de contacto, los valores de deformación que resultan son irreales, a pesar de que la interpretación es correcta, es decir, pese a entender que los niveles máximos se dan en el contacto y decrecen hacia el interior de los sólidos. El motivo de este hecho está relacionado con la pérdida de información que supone la inclusión de discontinuidades (irregularidad en el patrón estocástico, ausencia de moteado) al llevar a cabo el análisis con el equipo de correlación de imágenes digitales. Se detallará esta causa en el capítulo siguiente.

Sin embargo, cuando la zona de interés en el sistema de videocorrelación se marca de modo que sólo forme parte del análisis uno de los cuerpos, pudiendo incluir las cercanías al contacto, los niveles de deformación que se obtienen son acordes con los dados tanto por la simulación en ANSYS como por el procedimiento propuesto por la mecánica del contacto. Esta circunstancia ha sido mostrada llevando a cabo un estudio a tan sólo 2 mm de profundidad respecto de la superficie de contacto. Los resultados se reúnen en la tabla 4-4.

<u>Método</u>	<u>Deformación principal mínima</u> ⁶	<u>Observaciones</u>
DIC	-0,00050	Zona 2 analizada
Simulación	-0,00031	-
Teoría	-0,00024	-

Tabla 4-4: Resultados a una profundidad de 2 mm en el problema de contacto con acero

Las diferencias son mínimas, más aun teniendo en cuenta los niveles tan bajos de deformación a los que se ha ceñido la investigación.

⁶ Es máxima en módulo; se da en dirección vertical, en la que se imprime la fuerza que mantiene en contacto a los sólidos.

5 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Con el presente estudio se ha tratado, en primer lugar, de revelar información acerca del algoritmo interno de un sistema de correlación de imágenes digitales y su funcionamiento.

Tras ello, el equipo VIC 2D de Limesh con el que se cuenta en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla se ha puesto a prueba en circunstancias en las que todavía no había sido utilizado: la medida de pequeñas deformaciones y su aplicación al problema del contacto.

En un inicio se han llevado a cabo ensayos para caracterizar experimentalmente el régimen elástico de probetas de aluminio 7075. El objetivo perseguido: observar la respuesta del sistema ante pequeñas deformaciones al tiempo que validar, en caso de responder de forma adecuada, su calibración y resultados, poniendo también de manifiesto un buen proceder por parte del usuario en el tratamiento de los datos.

Posteriormente se han analizado los resultados que ofrece el equipo en ensayos de contacto estático entre dos sólidos metálicos, habiéndose adquirido el conjunto en dos tipos de material, aluminio y acero. En función de los resultados, se han ido abarcando distintos aspectos en los análisis con el objetivo de hallar una buena forma para abordar el problema.

Los resultados arrojados por el sistema VIC 2D se han comparado con los dados por otros métodos, empleando tanto procedimientos analíticos como simulaciones virtuales mediante el programa de elementos finitos ANSYS.

El fin último por el que se ha indagado sobre la respuesta del equipo a tales situaciones ha sido el de conocer si, en investigaciones futuras, podría ser implementada la técnica en el mundo ferroviario, concretamente para la adquisición de información sobre la interacción rueda – carril.

5.1 Conclusiones

Tanto en los ensayos con una sola probeta como en los casos de contacto, se han conseguido resultados satisfactorios ante sollicitaciones que han supuesto niveles en deformación de tan sólo un 0,05 %. A pesar de todos los factores que rodean a esta técnica y de los que depende la calidad de los resultados (aspectos como el patrón generado en la muestra, la resolución de las imágenes, etc.), se ha probado que es posible obtener de buena manera mapas y evoluciones en tiempo de deformación limitando el estudio al comportamiento elástico de los materiales. Por tanto, el potencial de la videocorrelación no sólo radica en la versatilidad y en el gran campo de medida que permite, sino que se ha demostrado que además es una técnica precisa.

La caracterización experimental de probetas del tipo “dogbone” de aluminio 7075 en la terminación T-651 (capítulo 3), ha sido útil para validar la calibración y los resultados el equipo, y también para poner de manifiesto un correcto proceder en cuanto al manejo de su software en la presente investigación.

En cuanto al problema de contacto, a pesar de las dificultades que se han encontrado, finalmente se ha podido conocer el modo de actuación para obtener información real referente a las cercanías del contacto, habiéndose comparado en todo momento los resultados experimentales con los aportados tanto por estudios teóricos como por simulaciones con elementos finitos. Para ello, en el análisis con el software del sistema, se ha de limitar la zona de interés a uno de los cuerpos, sin involucrar a la propia superficie de contacto (figura 5-1). Ésta supone una discontinuidad o irregularidad para el algoritmo interno del sistema de videocorrelación, lo que deriva en un cálculo irreal de los niveles de deformación si forma parte del análisis. Este error también se da en otros problemas en los que de igual forma existen zonas “conflictivas”

y éstas no son excluidas del área de interés, como, por ejemplo, en estudios de la deformación alrededor de concentradores de tensión (agujeros o grietas, entre otros). Queda reflejado en las figuras 5-2 y 5-3.

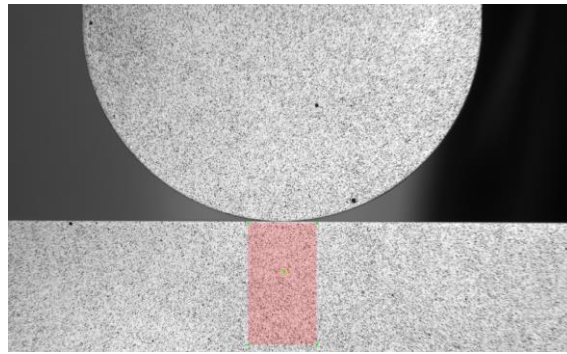


Figura 5-1: Zona de análisis para una correcta interpretación por parte del algoritmo VIC 2D

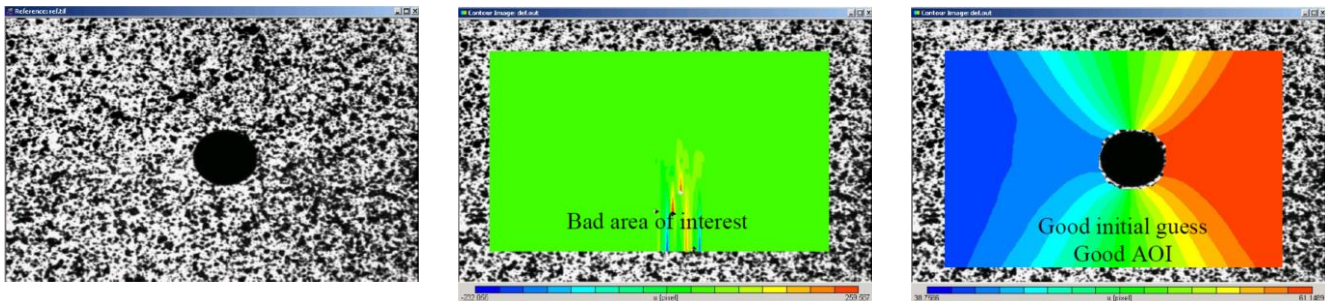


Figura 5-2: Error asociado a la selección del área de interés [5]

La figura 5-2 muestra el error que se produce al incluir un concentrador de tensión en el área de cálculo y cómo éste se solventa al evitar la zona problemática.

Existen otros trabajos que ponen de manifiesto este fallo. La figura 5-3 refleja un caso que puede consultarse en [15], en el que se comparan las medidas de deformación alrededor de una grieta dadas por DIC y por elementos finitos. A la izquierda, en la medida por videocorrelación, puede apreciarse un “parche” sobre la grieta (en color azul, lo que resulta confuso por la abundancia de este color en el mapa de deformación), de modo que se intentó excluirla del análisis. Sin embargo, se observan niveles muy elevados en los bordes de la grieta (zonas redondeadas), como consecuencia de pequeñas discontinuidades que quedaron en la zona de cálculo. El autor del artículo indica este fallo de la siguiente forma: “se pueden ver en las zonas remarcadas que alcanzan valores de 1, esto es debido a la dificultad de la definición de la máscara a la hora de seleccionar la región de interés en el análisis mediante Correlación Digital de Imágenes y no poder definir el contorno exacto de la grieta. Estos valores serían obviados en los resultados”.

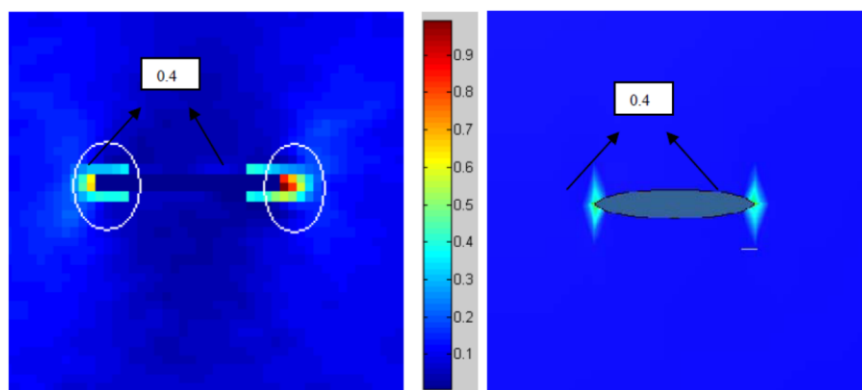


Figura 5-3: A la izquierda, fallo en DIC asociado a la selección del área de interés [15]

En la presente investigación se ha comprobado que, cuando la irregularidad es solamente una pequeña parte respecto del total del área de análisis, el error radica en la muestra de valores irreales, pero el cálculo es posible (figura 5-4). Cuando se incluyen grandes zonas con ausencia del patrón moteado (fondo blanco y motas negras), se produce el colapso y no se ejecuta el cálculo (figura 5-5).

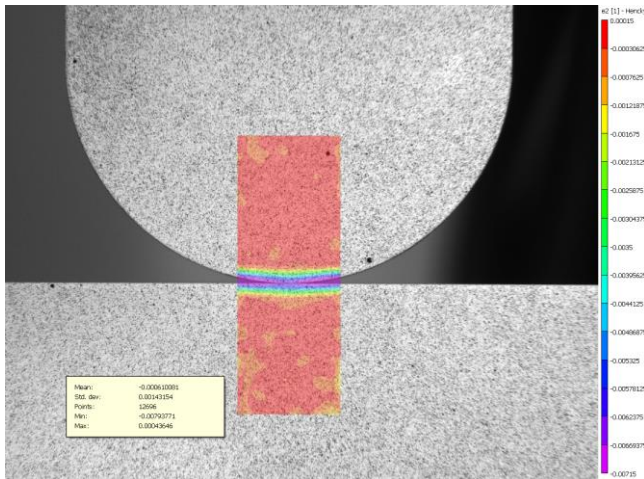


Figura 5-4: Resultados irreales por incluir la superficie de contacto

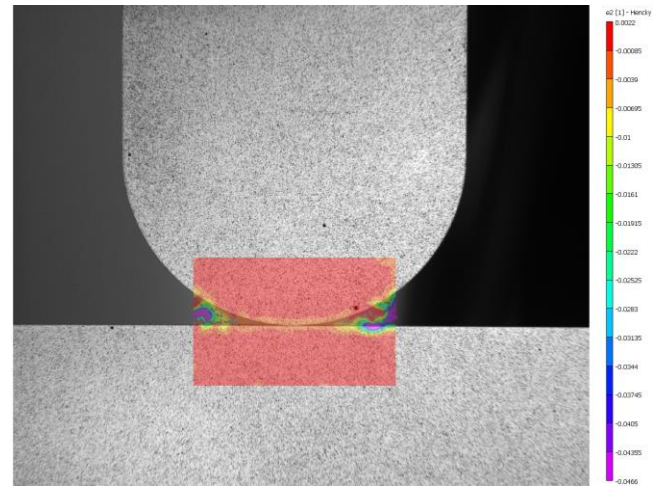


Figura 5-5: Colapso

El hecho de tener que evitar la superficie de contacto es un pequeño inconveniente, ya que en ella se producen los mayores niveles de tensión/deformación, y por tanto se pierde información del problema. Esto es: en casos de superficies que se tocan, rápidamente se reducen los niveles de tensión y deformación al profundizar en los cuerpos; por tanto, aunque se estudien las cercanías del contacto hay que tener presente que los niveles son mayores cuanto menor sea la distancia al plano de contacto. La pérdida de información es menor cuanto mayor sea la compresión a la que se someten los sólidos, ya que la zona de máxima tensión se extiende a un rango más amplio.

5.2 Líneas de investigación futuras

El equipo VIC 2D de Limesh puede ser usado en un gran número de problemas y ante todo tipo de materiales, ofreciendo además una alta precisión, como se ha demostrado en esta investigación.

Son dos los aspectos fundamentales que limitan su campo de aplicación:

- Casos de deformación plana (figura 5-6).
- Ensayos estáticos.

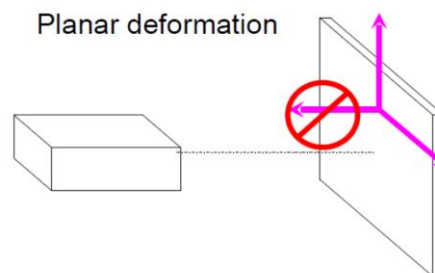


Figura 5-6: Medición en 2D [5]

En problemas cuya resolución no se enmarque dentro de la Elasticidad Plana, lo ideal es utilizar un equipo 3D que permite la adquisición de datos simultáneamente en 3 direcciones. Un equipo de este tipo dispone de dos cámaras digitales y calcula los efectos 3D mediante una técnica conocida como “stereo-

triangulación”. Sin embargo, para algunas geometrías y cuando no importa si los datos son tomados de forma simultánea o no, podría emplearse el sistema 2D tomando imágenes desde dos posiciones, alzado y perfil, de modo que puedan conocerse los desplazamientos o deformaciones en las tres direcciones de interés. Ante perfiles notablemente curvos, esta solución aproximativa será viable o no en función de la distancia cámara - muestra, pues de ello dependerá la nitidez con la que el patrón moteado se aprecia en las imágenes tomadas sobre la dirección radial.

Existen cámaras de alta velocidad que permiten capturar hasta un millón de imágenes por segundo. Hacen posible la adquisición de imágenes nítidas en situaciones dinámicas. Se ha indagado en búsqueda de ensayos en presencia de movimiento absoluto que hayan sido analizados mediante equipos DIC, y en todos los casos encontrados se emplean cámaras digitales de alta velocidad. En [16], una es utilizada para caracterizar la tenacidad de fractura dinámica de un acero estructural, obteniendo la historia en tiempo de deformación; en [17] puede encontrarse un caso en el que se ha medido la deformación de un neumático al subir un escalón (figura 5-7), indicándose en la descripción del ensayo: “mediante el uso de la videocorrelación podemos conocer la deformación en tres dimensiones a la que se ve sometido un neumático al subir un escalón, permitiendo al diseñador del mismo optimizar el material utilizado. Para la grabación se han utilizado cámaras de alta velocidad”. Éste último caso resulta de especial interés, puesto que se trata de una situación dinámica de contacto; además de comprobar que se utilizan cámaras de alta velocidad, puede observarse que el estudio se ciñe a uno de los sólidos, eludiendo la superficie de contacto.

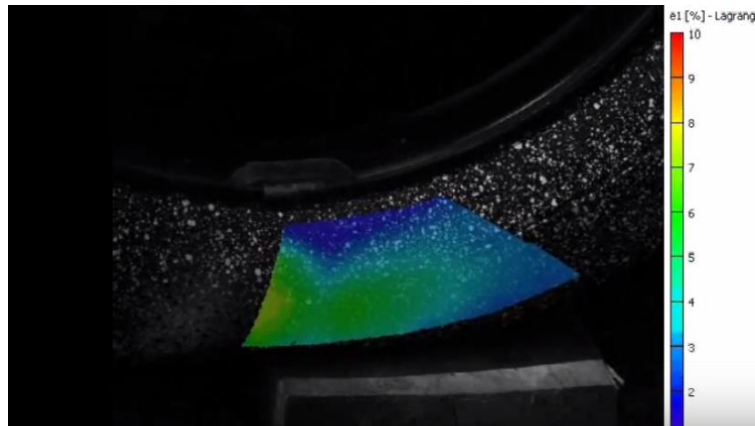


Figura 5-7: Medida de la deformación en el contacto neumático – escalón [17]

Pensando en una futura aplicación del sistema VIC 2D de Limes para adquirir información acerca de la interacción rueda – carril en trenes ferroviarios:

- La situación estática puede ser abordada de forma análoga a como se ha hecho en los ensayos de esta investigación.
- La toma de datos en el caso dinámico se antoja más difícil, pero quizás posible. La obtención de imágenes aptas para su procesamiento requiere de la anulación de cualquier movimiento como sólido rígido. No bastaría solamente con preparar un utillaje que, mediante fijación al tren, permita el avance horizontal de la cámara digital a la misma velocidad que lo hace la rueda de interés, sino que también debe suprimirse el giro. No es tarea sencilla, pero, sin duda, supone un estudio interesante.

REFERENCIAS

- [1] Correlated-Solutions (2008). Strain measurement system, Vic2D
- [2] López-Alba E., López-García R., Dorado R., Díaz F.A. (2012). *Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto*. Dpto. Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas. Jaén.
- [3] Correlation Solutions, The VIC2D system. <http://www.correlatedsolutions.com/vic-2d/>
- [4] Martínez-Donaire A.J. (2012). *Análisis del efecto del gradiente de deformaciones en el conformado de chapa metálica*. Tesis. Universidad de Sevilla. Sevilla.
- [5] McNeill S.R., Schreier H., Lichtenberger R. (2007). *Experimental Considerations for 2-D Digital Image Correlation*, Limes. Manual.
- [6] Vacher P., Haddad A., Arrieux R. (1999). *Determination of the forming limit diagrams using image analysis by the correlation method*. CIRP Annals.
- [7] Paris Carballo, F. (1998). *Teoría de la Elasticidad*. Ed. 2. Universidad de Sevilla.
- [8] Fundiciones Gómez S.A., tracción plana. <http://www.fundicionesgomez.com/Probeta-para-ensayo-de-TRACCION-PLANA-80x10x2>
- [9] Área Ingeniería Mecánica, E.T.S.I. US. <http://www.esi2.us.es/ingmec/html/inicio.php?codpag=equi>
- [10] Rodríguez-Montés J., Castro-Martínez L., del Real-Moreno J.C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. Ed. 2. Madrid.
- [11] Johnson K.L. (1985). *Contact mechanics*. Cambridge University Press.
- [12] Vanegas Useche L. (2011). Esfuerzos de contacto. <http://www.utp.edu.co/~lvnegas/disI/Cap6.pdf>
- [13] Miranda González P. (2003). *Diseño de materiales multicapa resistentes al daño por contacto*. Tesis. Universidad de Extremadura. Badajoz.
- [14] Di Iorio J.M. (2012). *Tensiones de contacto – Fatiga superficial*. Universidad de Buenos Aires.
- [15] López-Alba E., López-García R., Dorado R., Díaz F.A. (2010). *Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes*. Dpto. Ingeniería Mecánica y Minera, Campus las Lagunillas. Jaén.
- [16] García N., Cendón D., Gálvez F., Sánchez-Gálvez V. (2010). *Metodología para la obtención de la tenacidad de fractura dinámica, aplicación a un acero estructural*. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- [17] Álava Ingenieros, Image Correlation. <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/sistemas-para-ensayos/ensayos-de-materiales-y-no-destructivos/ensayos-de-materiales/image-correlation---videocorrelacion/videos/>

El Anexo A recoge información referida al sistema VIC 2D de Limes y el manejo de su software, con la intención de prestar soporte a futuros investigadores que necesiten hacer uso del equipo.

A. SISTEMA VIC 2D

A.1. Preparación de las muestras

En primer lugar, es conveniente lijar de forma suave la superficie de las muestras para optimizar la adhesión de la pintura que se aplicará con posterioridad.

Para generar el contraste de blancos y negros, lo habitual es utilizar pintura en spray. Primeramente se aplica una base de pintura blanca mate y, una vez seca, un patrón de finas motas negras. Se recomienda una distancia de unos 50 cm entre el bote de pintura y la muestra a la hora de rociar la misma, sobre todo para la aplicación de las motas negras, ya que si la distancia es muy pequeña el patrón resultará inadecuado.

La figura A-1 muestra la pintura utilizada en este proyecto.



Figura A-1: Pintura empleada para la preparación de las muestras

Los botes fueron adquiridos en *Sevillana de pinturas SL*, empresa con varias sedes en Sevilla. La relación calidad – precio es muy buena en comparación con la de otras pinturas que se han probado.

A.2. Consideraciones generales

La figura A-2 muestra el maletín en donde se depositan la cámara digital, el ordenador y los accesorios.



Figura A-2: Maletín VIC 2D de Limess

La figura A-3 refleja el aspecto de la cámara y del foco de luz utilizado para mejorar la calidad de las imágenes.



Figura A-3: Fuente de luz externa y cámara digital en su soporte

En cuanto a la visualización de las muestras, es muy importante emplear el enfoque adecuado para cada caso, así como regular las opciones de visión para conseguir la mayor nitidez posible. Según la distancia existente entre la cámara y la muestra, se ha de utilizar un enfoque u otro, el cual viene determinado por el anillo (o la combinación de ellos) que se coloque en la unión objetivo – cuerpo de la cámara. Para situaciones en las que la cámara ha de colocarse lejos de la muestra, se utilizan enfoques de tamaño reducido para la obtención de imágenes nítidas (disminuyendo el número de anillos acoplados al objetivo), y de igual forma se emplean enfoques de tamaño aumentado cuando la cámara se coloca muy cerca de la muestra. Además, el objetivo dispone de 3 reguladores, cuyo ajuste permite adecuar la visión a cada circunstancia. De abajo a arriba según la posición del objetivo en la figura A-4, la primera rueda regula la luminosidad, la segunda el zoom y la tercera la nitidez.



Figura A-4: Objetivo de la cámara y anillos de enfoque

A continuación se exhibe una guía para facilitar el uso de los dos programas a utilizar, uno para la toma de imágenes y otro para su procesado, mostrando la secuencia de instrucciones que ha sido ejecutada en los ensayos de este proyecto para la obtención de mapas y evoluciones en tiempo de deformación. Estos programas son: VIC SNAP 2010 y VIC 2D 2009. Ambos se hallan en el escritorio del ordenador del sistema.

A.3. VIC SNAP 2010

Una vez se tenga el equipo montado, se ejecuta este programa para la captura de los fotogramas.

Al iniciarlo, emerge una pequeña ventana que indica ciertas condiciones referidas a la tarjeta gráfica; hay que pulsar “aceptar” sin más, con las condiciones preestablecidas. Luego, aparece una segunda ventana para seleccionar tanto la carpeta en donde guardar las imágenes como el nombre con el que identificarlas.

Este programa es fácil de usar, pues simula al disparador de la cámara. El primer paso consiste en tomar la imagen que servirá de referencia. Para ello, estando la muestra en estado de reposo (sin aplicación de las cargas), se captura el primer fotograma mediante la herramienta mostrada en la figura A-5.



Figura A-5: Herramienta para capturar una imagen

Tras ello, puede emplearse la opción marcada en la figura A-6 para capturar las sucesivas imágenes a medida que se desarrolla el ensayo. Puede elegirse tanto el tiempo entre capturas como el de duración total (este último es útil si se conoce el tiempo que durará el ensayo).

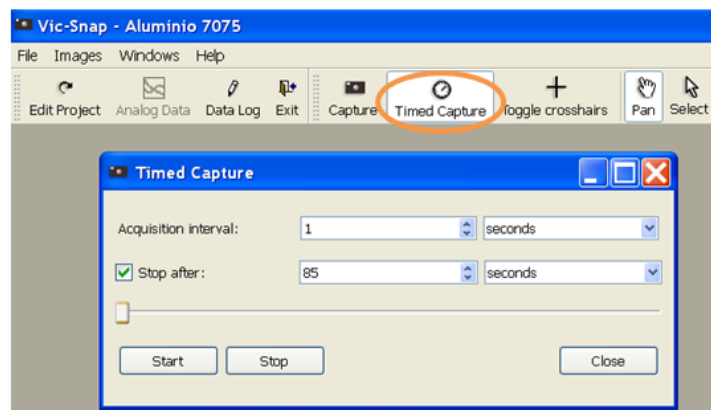


Figura A-6: Herramienta para la toma de imágenes consecutivas

A.4. VIC 2D 2009

Es el programa para procesar las imágenes y obtener los parámetros de interés, esto es, desplazamientos y deformaciones.

En el maletín del equipo se incluye una guía llamada “VIC 2D Reference Manual” en la que se detalla la función de cada una de las herramientas que posee este programa. En lo que sigue se indica la secuencia de instrucciones seguida en esta investigación, válida para cualquier tipo de problema, si bien el programa dispone de otras opciones en cuanto a la muestra de resultados que no han sido empleadas.

Al ejecutar el programa, se selecciona “speckle images” para cargar los fotogramas que se quieren procesar. En la figura A-7 se señala la ubicación de esta instrucción.

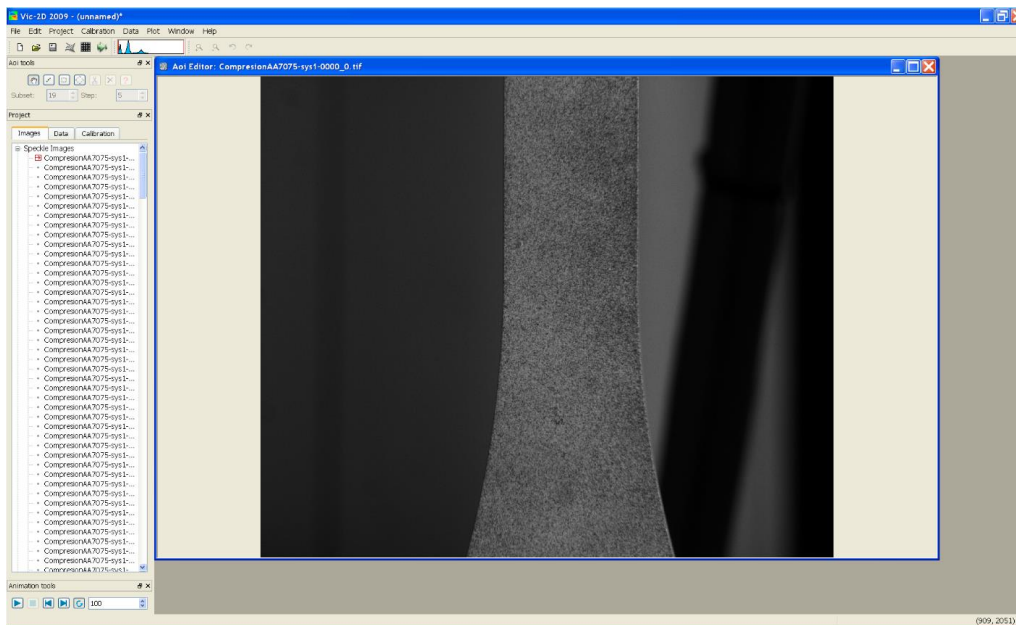


Figura A-9: Interfaz principal de VIC 2D 2009

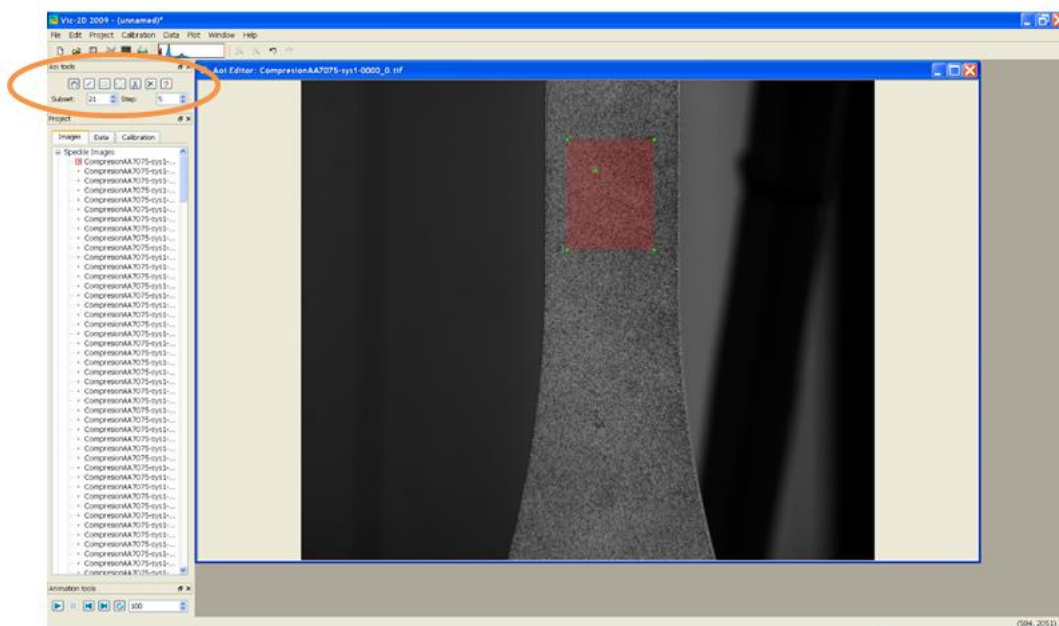


Figura A-10: Selección del área de interés

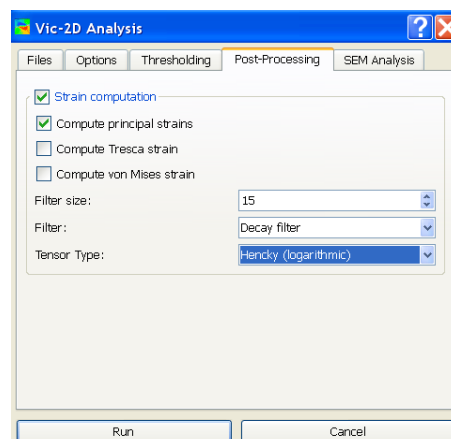


Figura A-11: Opciones de análisis

Cuando termine el análisis, el siguiente paso es calcular desplazamientos y deformaciones. Las instrucciones para ello se muestran en la figura A-12.

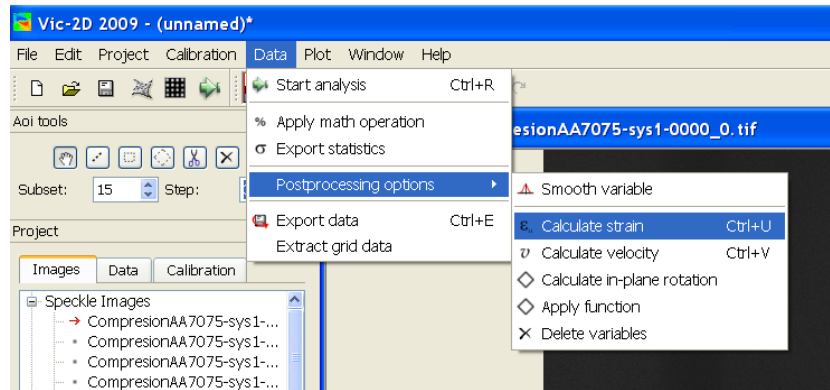


Figura A-12: Comandos para el cálculo de desplazamientos y deformaciones

Aparece la ventana que se muestra en la figura A-13, en donde se ha vuelto a seleccionar el tensor de Hencky y se ha iniciado el cálculo.

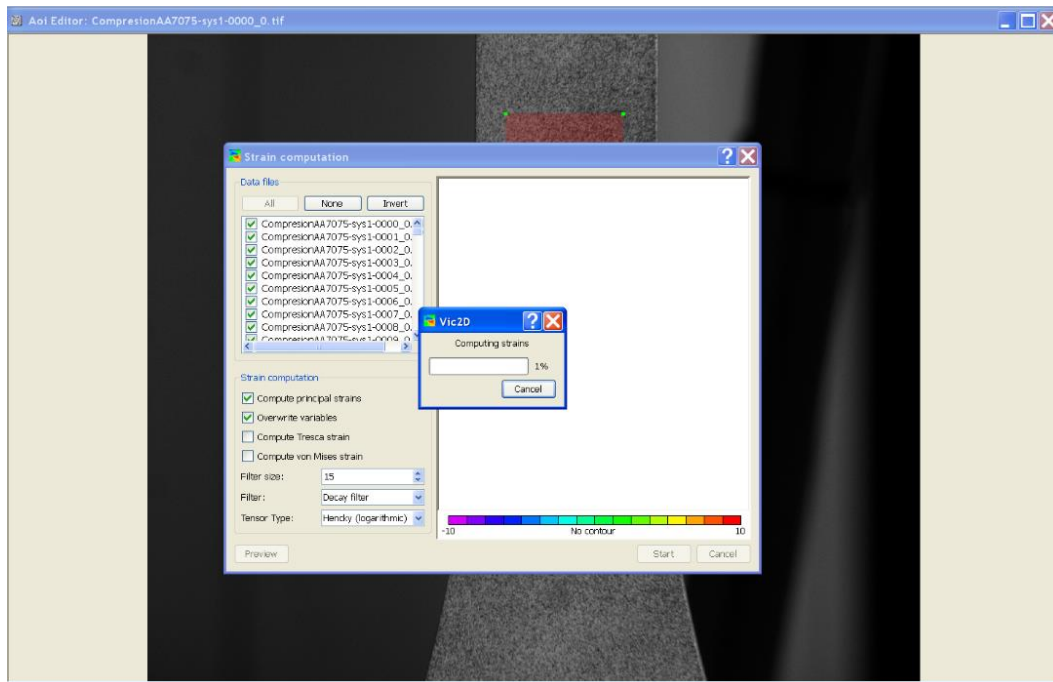


Figura A-13: Cálculo de desplazamientos y deformaciones

Una vez calculados los parámetros, se procede a la visualización de resultados.

Para observar mapas de deformación, hay que ir al menú vertical ubicado a la izquierda de la pantalla, seleccionando la opción "projects: data". Se hace doble click en la imagen de interés y se marca "contour" de entre las opciones que emergen. Solo queda seleccionar la variable que quiera observarse. Haciendo click derecho sobre la imagen pueden extraerse parámetros estadísticos, exportar el vídeo del proceso de deformación, etc.

Para conocer la deformación que ha tenido lugar en cada una de las imágenes procesadas y obtener la evolución temporal de los parámetros, hay que marcar la zona que quiera estudiarse por medio de las opciones de geometría que aparecen en "inspector tools" (figura A-15). Luego, se ejecuta la secuencia de comandos que se indica en la figura A-16. Emergerá la ventana que se muestra en la figura A-17, en la que puede seleccionarse el parámetro de interés y visualizar su historia. Es posible guardar tanto la gráfica como los valores numéricos. Se recomienda guardar éstos en .xlt para permitir su apertura en cualquier ordenador.

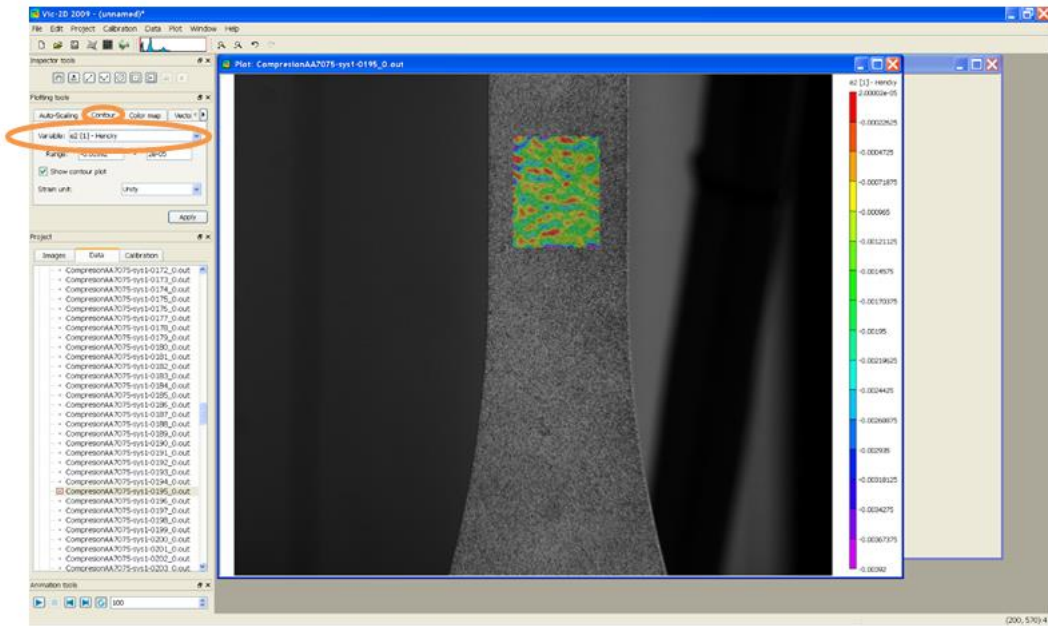


Figura A-14: Obtención de mapas de deformación

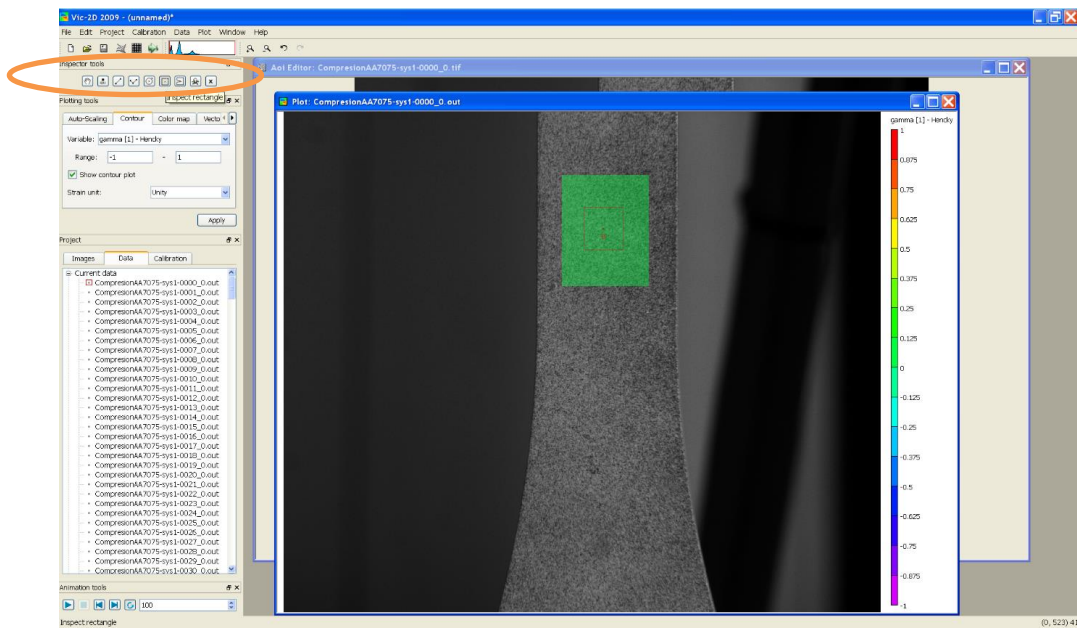


Figura A-15: Selección de la zona a evaluar

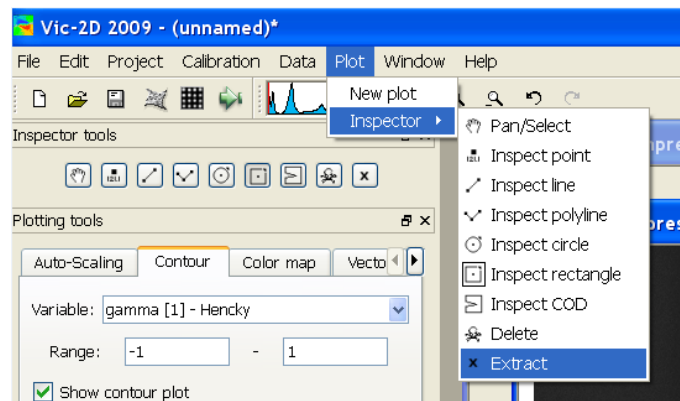


Figura A-16: Comandos para obtener la historia de desplazamientos y deformaciones

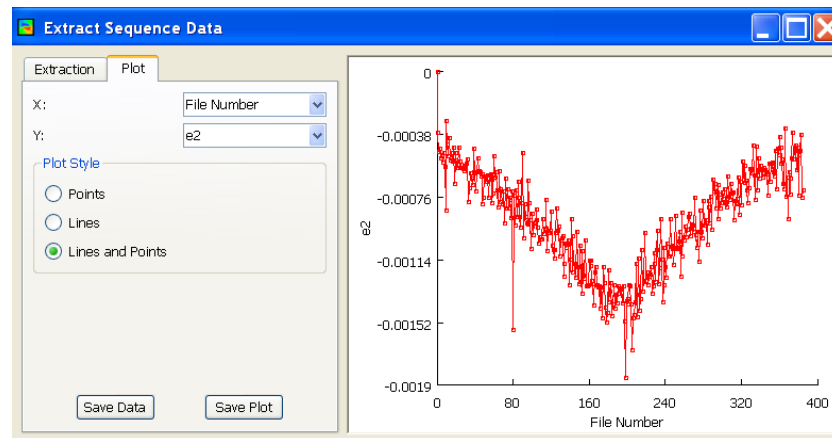


Figura A-17: Evolución temporal de deformaciones o desplazamientos