

5 Preparación experimental

En el presente apartado se hará inicialmente una breve descripción de los ensayos llevados a cabo, especificando los distintos montajes considerados, tipología de probetas, parámetros de los ensayos, etc... Por otro lado se explicarán algunos conceptos básicos sobre las técnicas ópticas de medición de deformaciones sin contacto mediante algoritmos de correlación de imágenes digitales (DIC, Digital Image Correlation).

5.1 Montaje experimental y ensayos realizados

A fin de poner a prueba las distintas metodologías experimentales presentadas, se han llevado a cabo una serie de ensayos de estirado (stretching tests) y de estirado con flexión (stretch-bending tests). A tal fin, las probetas se fijaron por los bordes y fueron estiradas sobre tres tipologías distintas de punzones hasta el fallo. Se llevaron a cabo dos montajes distintos: (1) punzón hemiesférico tipo Nakajima de $\text{Ø}100\text{mm}$, donde se espera un campo de deformación prácticamente uniforme a través del espesor (stretching test); (2) punzones cilíndricos de $\text{Ø}20\text{ mm}$ y $\text{Ø}10\text{ mm}$, los cuales inducen un significativo gradiente de deformación localizado en el espesor, debido a los efectos de la flexión (stretch-bending tests). En la Fig. 5-1, se esquematiza el montaje experimental con punzón cilíndrico.

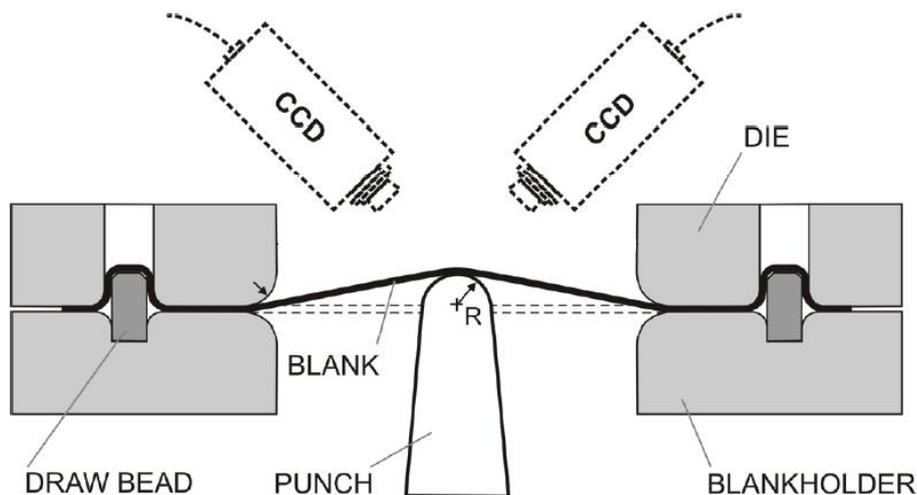


Fig. 5-1: Esquema del montaje experimental con punzón cilíndrico

El material de trabajo fue chapa de aleación de aluminio en estado recocido 7075-O y un espesor de 1,6mm.

Los elementos básicos que componen el montaje para los ensayos son: la máquina de embutición, la matriz, los punzones, el sistema de prensa-chapa con cordones de estirado (Draw-beads) y el sistema de medidas de deformaciones ópticas ARAMIS® sin contacto (cámaras digitales, equipo de iluminación y software de procesado). En la Fig. 5-2 se presentan algunas fotos de los distintos punzones empleados, prensa-chapas y el montaje del conjunto sobre una máquina de embutición.

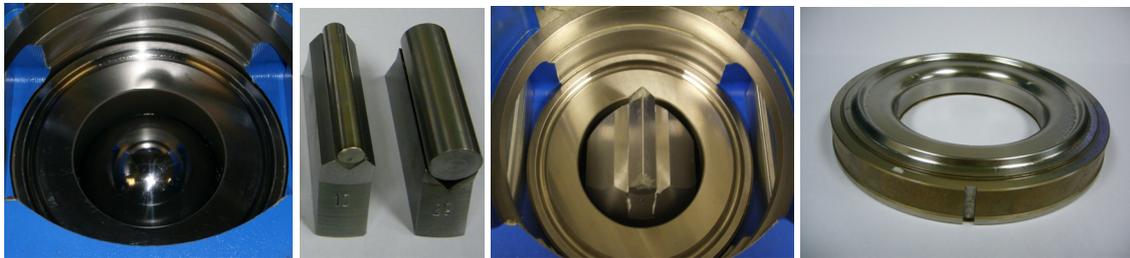


Fig. 5-2: Punzones Nakajima Ø100mm y cilíndricos Ø10 y Ø20 mm, montaje experimental, prensa-chapas

Los ensayos tipo Nakajima con punzón hemiesférico de 100mm se han llevado a cabo bajo estados cercanos a deformación plana, tracción pura y zona biaxial, mientras que los de ensayos con punzones cilíndricos (stretch-bending tests) se han realizado únicamente en condiciones próximas a deformación plana. La obtención de los distintos caminos de deformación, como ya se indicó con anterioridad, ha requerido un laborioso diseño de distintas geometrías de probeta. En la Fig. 5-3 se muestran cada una de las probetas ensayadas y en la Fig. 5-4 las dimensiones acotadas de las probetas de tracción pura y deformación plana.



Fig. 5-3: Tipología de probetas ensayadas: tracción pura, deformación plana, zona biaxial

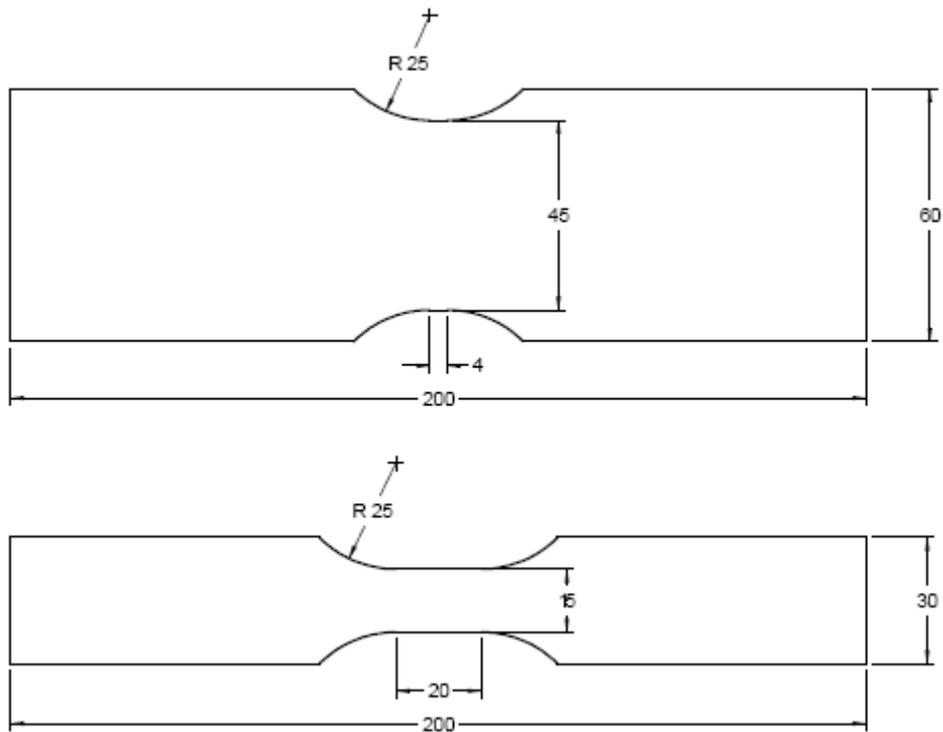


Fig. 5-4: Dimensiones acotadas de las probetas de deformación plana (arriba) y tracción pura (abajo)

Dicha variedad de caminos de carga se realiza a fin de obtener los límites de conformado del material ante distintas situaciones y dibujar de esta forma, en un diagrama de deformaciones principales, la curva límite de conformado (CLCE). Los caminos de deformación habitualmente empleados comprenden desde tracción pura hasta tensión biaxial equilibrada, pasando por estados intermedios de deformación plana y zona biaxial no equilibrada (Fig. 5-5). Una selección de ellos se han considerado en el presente trabajo.

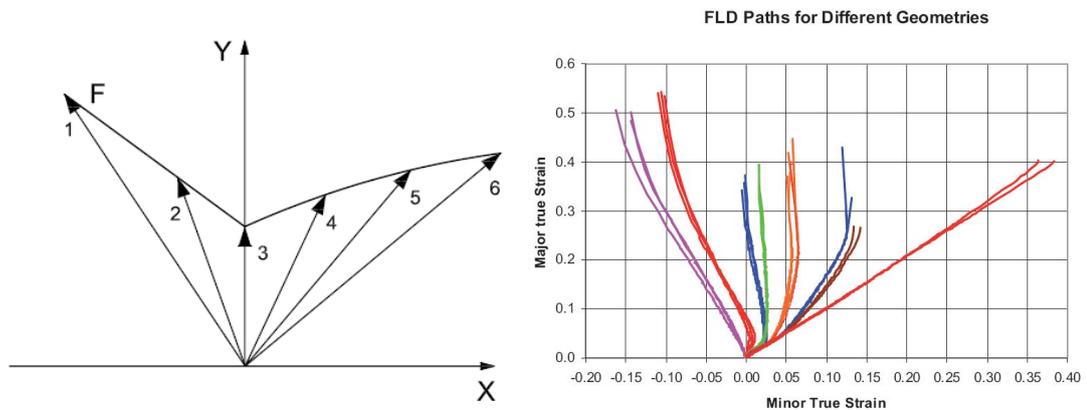


Fig. 5-5: Caminos de deformación evaluados típicamente (izqda), evoluciones reales obtenidas en función de la geometría de las probetas (Hotz, 2008) (dcha)

Para la realización de los ensayos, se empleó una máquina universal de embutición de chapa, modelo Erichsen 142-20. Las probetas se fijaron con una fuerza de prensa-chapa de 70 kN y se usaron cordones de estirado para reducir el riesgo de deslizamiento de las mismas. El sistema de lubricación fue vaselina + PTFE + vaselina y la velocidad del punzón se fijó en 1 mm/s, de acuerdo a las condiciones recomendadas por la norma ISO 12004-2:2008. El esquema global del montaje, junto con el sistema óptico de medición, se muestra en la Fig. 5-6.

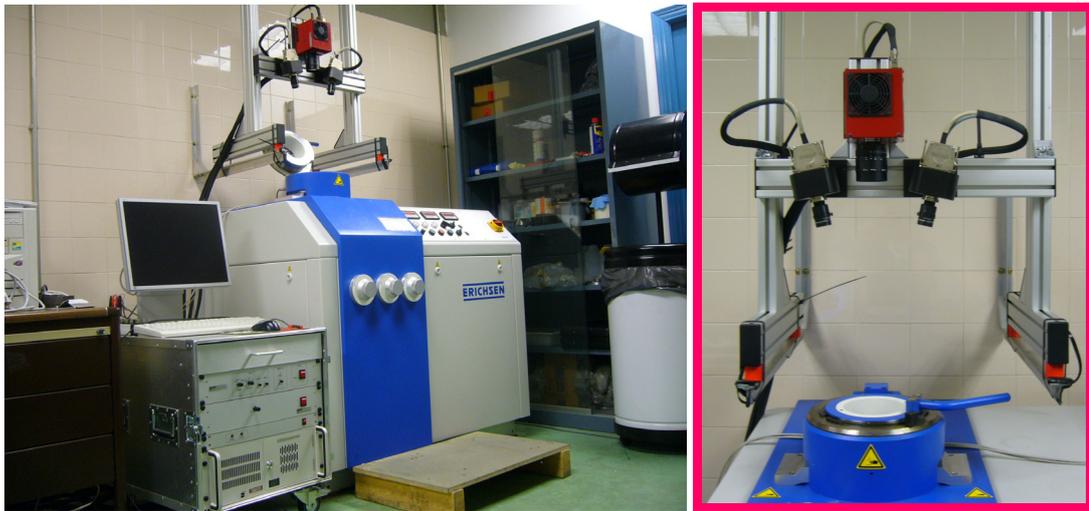


Fig. 5-6: Máquina de ensayos Erichsen y sistema de medición óptico ARAMIS®

Uno de los aspectos importantes en la preparación de los ensayos es el sistema tribológico o de lubricación. Según la normativa ISO 12004-2:2008, se considera que el diagrama límite de conformado representa las deformaciones límites intrínsecas de un material asumiendo rutas de carga proporcional y suponiendo que en la zona de evaluación no existe rozamiento. Por ello, el sistema tribológico ha de estar ajustado a fin de reducir al mínimo dicho rozamiento en la zona de contacto y conseguir de esta forma que la fractura comience dentro de las inmediaciones del domo (Fig. 5-7), concretamente a una distancia menor de un 15% del diámetro del punzón empleado.

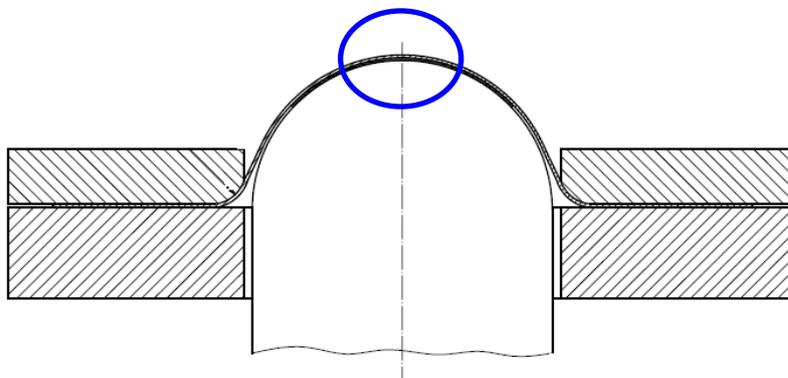


Fig. 5-7: Indicación del domo del punzón, zona donde debe comenzar la fractura

Sólo si la rotura comienza en esa zona el ensayo, según la normativa ISO, será aceptable. La mayor problemática de las roturas fuera de la zona recomendada, debido al rozamiento, ocurre en los ensayos biaxiales con punzones hemiesféricos. En estos casos, además, si la lubricación no es buena se pueden generar dos frentes de estricción simétricos respecto al domo del punzón, los cuales son indeseables. Sin embargo, tanto los ensayos con punzón hemiesférico en el resto de probetas (tracción pura y deformación plana) como los ensayos con punzones cilíndricos no presentaron ningún problema a este respecto. En la Fig. 5-8 se pueden observar algunas probetas con roturas fuera de la zona recomendada y por tanto consideradas no aceptables.



Fig 5-8: Probetas biaxiales con roturas fuera de la zona recomendada

La disposición de las fibras en las probetas mecanizadas de aluminio 7075-O fue, según indicaciones de la ISO 12004-2:2008, en dirección longitudinal (Fig. 5-9).

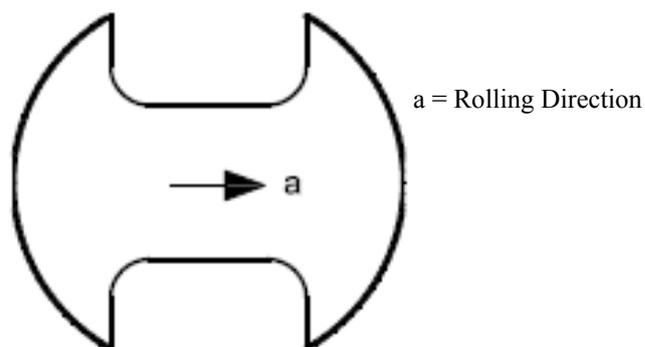


Fig. 5-9: Disposición de las fibras en las probetas

Adicionalmente, se instaló una tarjeta de adquisición de datos (Fig. 5-10) y se realizó un programa en Labview a fin de capturar directamente desde la máquina de embutición los parámetros de fuerza del punzón, desplazamiento y fuerza del prensa-chapa. Dicha información no ha sido aun empleada para los análisis pero nos será muy útil en un futuro.



Fig. 5-10: Tarjeta de adquisición de datos

En lo referente al sistema de medición óptica de deformaciones sin contacto ARAMIS[®], la superficie exterior de cada una de las probetas ensayadas fue continuamente grabada por medio de dos cámaras digitales CCD (Charge Coupled Device) de 1,3 MPx hasta la fractura. Según las indicaciones de ISO 12004-2:2008, se capturaron imágenes a una frecuencia de 10 fotogramas por segundo. La historia de deformaciones en tiempo y espacio se obtuvo posteriormente fuera de línea (off-line) usando el software de procesamiento de ARAMIS[®], basado en técnicas de correlación de imágenes digitales. Para ello, se requiere la aplicación de un patrón estocástico sobre la superficie exterior de las probetas. Tras un desengrase inicial, se aplicó mediante spray una base de pintura blanca mate, flexible y adherente sobre la superficie de las probetas. Una vez seca, se aplicó un fino patrón de puntos aleatoriamente distribuidos de pintura negra (Fig. 5-11).

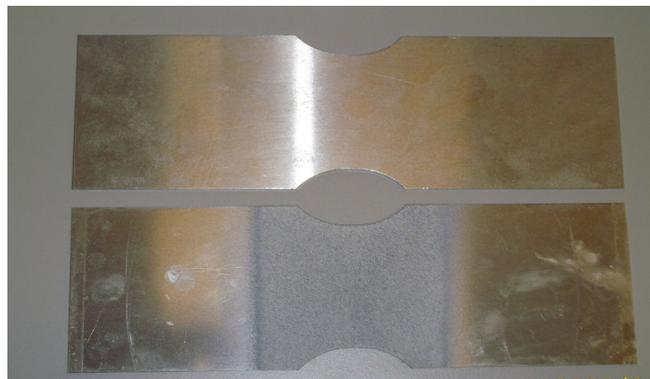


Fig. 5-11: Probeta original y probeta con patrón estocástico aplicado

Los patrones estocásticos aplicados sobre las probetas han de ser regulares en toda la superficie y han de poseer un alto contraste de blancos y negros, con objeto de que el sistema óptico funcione correctamente (Fig. 5-12)

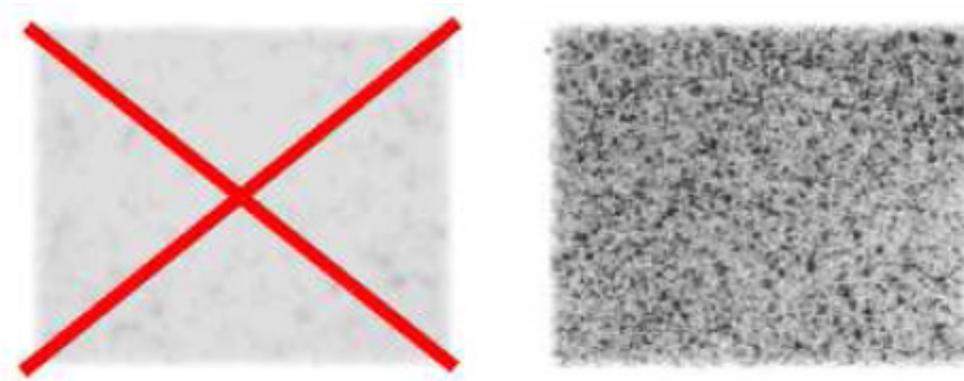


Fig. 5-12: Patrón estocástico incorrecto (izqda) y patrón con buen contraste (dcha)

5.2 Técnicas de correlación de imágenes digitales (DIC)

Las distintas metodologías para la detección del inicio de la estricción y estimación de los límites de conformado de una chapa metálica requieren las evoluciones temporales y espaciales de las deformaciones en la cara exterior de las probetas como dato de partida. A partir de esta información básica, se articulan distintas metodologías, algunas ya presentadas, basadas en el análisis temporal y/o espacial de las mismas. Por ello, la determinación de las deformaciones en la cara exterior de los especímenes necesita ser fiable y requiere una metodología precisa.

Hasta hace poco, la determinación de deformaciones se realizaba usando un patrón, habitualmente de círculos, depositados sobre la superficie de la probeta indeformada mediante procesos electroquímicos, láser, impresión, etc... Tras ensayar el espécimen, y haciendo uso de dispositivos ópticos (lupas, microscopios, etc...) se determinaba el nivel de deformación de forma manual. Las marcas circulares iniciales de dimensiones conocidas, tras sufrir la deformación, se convertían en elipses. Las deformaciones principales se podían estimar midiendo las longitudes de los dos ejes de la elipse y relacionándolos con las dimensiones iniciales del círculo (Fig. 5-13).

Sin embargo, estos métodos tienen como fundamental inconveniente el tiempo de proceso, la poca precisión de la medida, la disponibilidad de información sólo en el instante final del ensayo y la baja resolución de información. Este último concepto está relacionado con el tamaño de los círculos marcados, que habitualmente rondan de 2,5 a 5mm de diámetro. Aunque éstos están relativamente superpuestos (overlapping), la resolución de información es más discreta que continua sobre la superficie del espécimen.

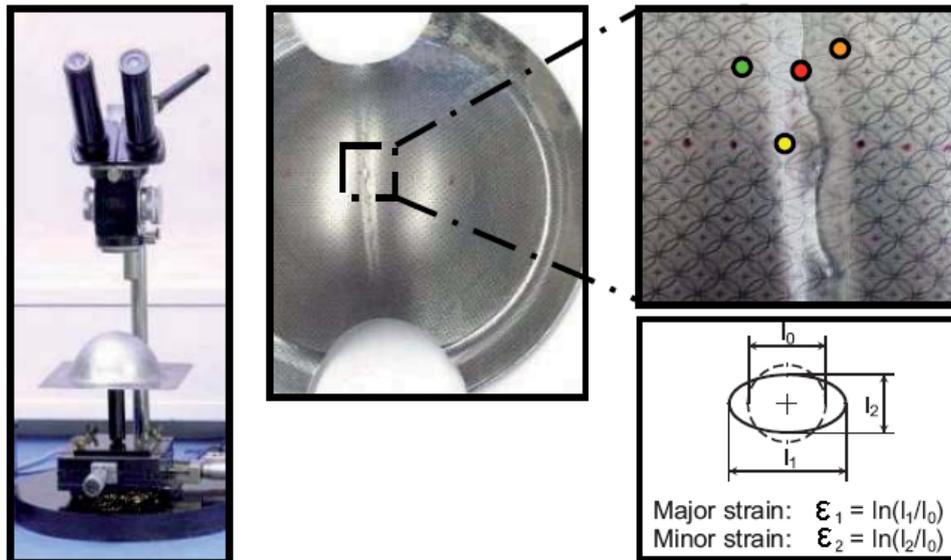


Fig. 5-13: Determinación manual de deformaciones

Posteriormente, han aparecido en el mercado sistemas de medición óptica, capaces de evaluar automáticamente las deformaciones a través de la medición automatizada del patrón de círculos una vez la probeta ha sido deformada. Estas técnicas conducen a una reducción sustancial del tiempo de evaluación e incluso a una mejora en la precisión o fiabilidad de las medidas, pero sin embargo, la baja resolución de información sigue latente debido al tamaño finito de los patrones empleados. A fin de paliar y mejorar estas problemáticas se han desarrollado otros sistemas de medición óptica (p.e. ARAMIS[®]), basados en las técnicas de correlación de imágenes digitales (DIC) para evaluar las deformaciones. Estos sistemas son capaces de reducir el tiempo de proceso y entregar gran precisión en la evaluación. Dichos sistemas emplean un patrón estocástico continuo sobre la probeta, mediante aplicación de pintura mediante spray. Se ha de prestar especial cuidado en la adherencia de la pintura, los brillos, y la flexibilidad de la misma a fin de reproducir adecuadamente las deformaciones reales de la probeta. Dicho patrón estocástico se consigue mediante aplicación de una fina capa de pintura blanca mate y posterior aplicación mediante spray de una nube de puntos aleatoriamente distribuidos de color negro. Un aspecto importante, en los casos en que se desarrollen altos niveles de deformación, es la necesidad de realizar el ensayo en un periodo corto tras la aplicación del patrón de pintura, antes de que se haya secado totalmente, a fin de reducir el riesgo de rotura frágil de la pintura durante el ensayo antes del fallo de la chapa. Aparte de necesitar una pintura capaz de absorber las grandes deformaciones desarrolladas durante el ensayo, es necesario que no haya brillos al iluminar con la luz del sistema de medición óptico, ya que dichas reflexiones impedirían el cálculo de deformaciones. Por ello, han de usarse pinturas de color blanco suficientemente mates.

Algunos de los aspectos destacables de ARAMIS® son su capacidad de obtener la historia de deformaciones durante todo el ensayo, ser un sistema sin contacto, permitir la obtención de una gran resolución espacial de información, ser capaz de capturar campos de deformaciones no uniformes y calcular con tiempos de procesado pequeños.

Una vez la probeta ha sido convenientemente preparada, se capturan fotogramas de la zona de interés in-situ con dos cámaras digitales CCD (Charge Coupled Device) a una frecuencia determinada durante el ensayo. Estas imágenes se comparan posteriormente usando un coeficiente de correlación del nivel de grises a fin de identificar los puntos de la imagen inicial (referencia) en las imágenes sucesivas con una precisión mucho menor que un píxel de la cámara (hasta 1/100 píxel de precisión). La identificación de estas facetas de una imagen a otra requiere el empleo de algoritmos de correlación. La obtención de las posiciones de cada punto objeto en 3D, mediante aplicación de dichos algoritmos, requiere conocer los parámetros intrínsecos de cada una de las cámaras y la orientación de una respecto a la otra (mediante un proceso de calibración).

La imagen en la que se desean calcular deformaciones, se divide virtualmente en una serie de facetas cuadradas formando una malla (subset ó grid) (Fig.5-14). Típicamente el tamaño de estas facetas ronda, en las aplicaciones que desarrollamos, entre los 9 x 9 hasta los 15 x 15 píxeles. El campo de desplazamientos será posteriormente calculado en cada una de estas facetas.

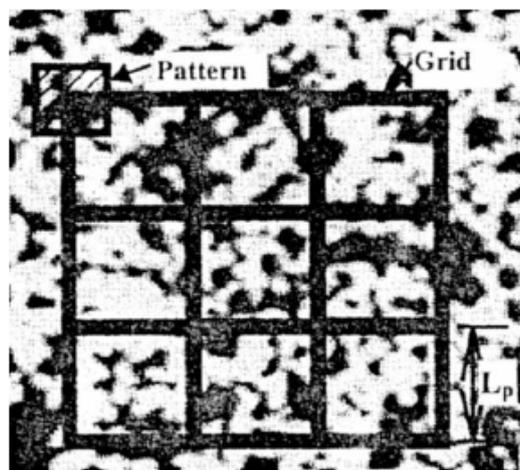


Fig. 5-14: Definición de las facetas y elementos de correlación

Alrededor de cada uno de los cuatro puntos que definen una faceta, se define una zona de análisis cuadrada de dimensiones variables, la cual está centrada precisamente en cada uno de

los puntos considerados. Dicha zona de análisis es conocida como elemento de correlación (correlation pattern ó pattern) (Fig. 5-14). El principio del método consiste en encontrar cada uno de los puntos de la malla en la imagen final mediante comparación del nivel de grises. El algoritmo de correlación hace un seguimiento del nivel de grises visto por cada cámara y transforma las posiciones de cada faceta, vista con ambas cámaras, a coordenadas 3D en cada instante (stage).

El nivel de grises de la imagen inicial se representa mediante una función discreta $f(x,y)$, con valores comprendidos entre 0 – 255, la cual se transforma en otra función $f^*(x,y)$ tras sufrir la deformación, esto es:

$$f^*(x, y) = f^*(x + u(x, y), y + v(x, y)) \quad (1)$$

donde $u(x,y)$ y $v(x,y)$ son los campos de desplazamientos para una faceta dada.

Dichos campos de desplazamiento se obtienen mediante una correlación entre las facetas de la imagen inicial y su correspondiente en la imagen deformada. El nivel de grises en la imagen deformada se puede obtener mediante interpolaciones bi-lineales o bi-cúbicas.

Existen diversas funciones o coeficientes de correlación típicamente empleados en estas técnicas, entre los que destacan, diferencia absoluta, mínimos cuadrados y correlación cruzada. En este caso se presenta como función de correlación el último de ellos, a fin de comparar las dos zonas:

$$Cor = 1 - \frac{\int f(x,y) \cdot f'(x',y') \cdot dx \cdot dy}{\sqrt{\int f(x,y)^2 \cdot dx \cdot dy \cdot \int f'(x',y')^2 \cdot dx \cdot dy}} \quad (2)$$

Siendo ΔS el área del elemento de correlación (pattern) en la imagen inicial.

En caso de tener una perfecta correlación, ambas funciones serán idénticas $f(x, y) = f^*(x^*, y^*)$ y por tanto $Cor = 0$. En caso de correlación imperfecta, se obtendrán valores entre $0 > Cor > 1$.

El parámetro de correlación considerado es independiente de una modificación global ó absoluta de los niveles de grises entre las dos imágenes. Se usa únicamente como indicador del grado de similitud entre dos elementos de correlación (pattern) entre la imagen inicial y la final.

Como hipótesis, puede considerarse que el campo de desplazamientos es bi-lineal, es decir, toma las expresiones siguientes:

$$u_x(x,y) = (du_B - du_A)(x - x_A)/L_p + du_D - du_A + (du_C - du_B + du_A - du_B)(x - x_A)(y - y_A)/L_p^2 + du_A \quad (3)$$

$$u_y(x,y) = (dv_B - dv_A)(x - x_A)/L_p + dv_D - dv_A (y - y_A)/L_p + (dv_C - dv_B + dv_A - dv_B)(x - x_A)(y - y_A)/L_p^2 + dv_A \quad (4)$$

Dichas expresiones contienen los términos correspondientes tanto a las traslaciones de sólido-rígido como a las deformaciones. Si empleamos otra notación para cada uno de los coeficientes de las ecuaciones anteriores, es fácil visualizar cada una de las transformaciones posibles (desplazamientos de sólido rígido y posibles deformadas) (Fig. 5-15).

$$x_t(a_0, a_1, a_2, a_3, x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy$$

$$y_t(a_4, a_5, a_6, a_7, x, y) = a_4 + a_5x + a_6y + a_7xy$$

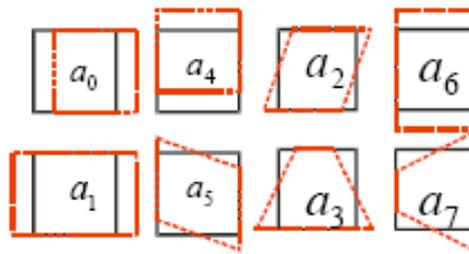


Fig. 5-15: Posibles transformaciones en los elementos

El cálculo de los desplazamientos es un proceso iterativo. Se da inicialmente una solución aproximada (típicamente un desplazamiento de sólido-rígido, sin considerar deformación) en la imagen final para un punto, y en el primer paso dicha solución se aplica a los cuatro elementos de correlación existentes A, B, C, D de cada faceta. El elemento de correlación alrededor de A se traslada a la imagen final. Sin embargo, el punto A* no es la solución y por lo tanto el elemento de correlación se deforma, acorde a las transformaciones vistas anteriormente, de cara a minimizar la función de correlación (Fig. 5-16).

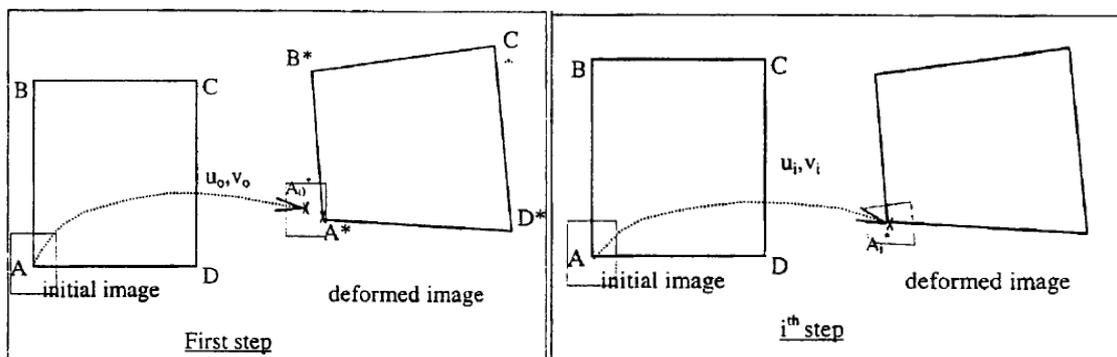


Fig. 5-16: Proceso iterativo para la determinación del campo de desplazamientos

Para dicho proceso, existen diversas metodologías pero la más ampliamente usada es la metodología del gradiente (Gradient-Based Minimization, First Order Method). Estas operaciones se llevan a cabo en B, C, D y por extensión a todas las facetas, obteniéndose de esta forma el campo de desplazamientos.

Una vez se tienen los valores de desplazamientos en los 4 puntos de cada una de las facetas en 3D, se pueden calcular el desplazamiento de la faceta por interpolación bi-lineal. En la fig. X se presenta el vector desplazamiento asociado a un elemento o faceta. El punto central P se desplaza del estado de referencia “u” al estado deformado “v” y con él el elemento de correlación a su alrededor (Fig. 5-17). Posteriormente, a partir de los vectores desplazamiento de cada punto de la superficie y del estado de referencia, se pueden calcular las deformaciones en la superficie de la probeta usando el gradiente del tensor de transformación F y el tensor de Green-Lagrange E.

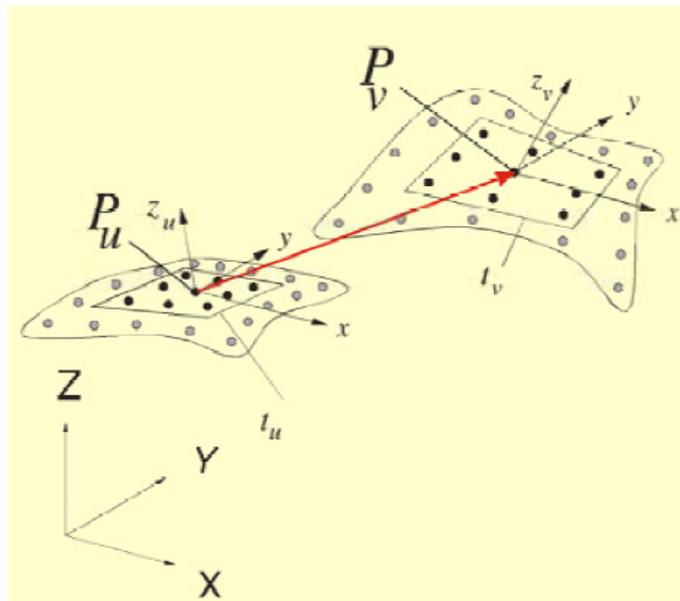


Figura 5-17. Determinación del vector desplazamiento 3D

Como se dijo anteriormente, dicho procedimiento requiere una calibración inicial del sistema. Para dicha calibración se emplean unas placas con una serie de círculos marcados en superficie de las que se conocen todas sus dimensiones. Durante el proceso de calibración, dicho objeto debe ser identificado y reconocido por las dos cámaras desde varios puntos de vista. El propósito de dicha calibración es tanto la determinación de los parámetros intrínsecos de las cámaras como la obtención de las posiciones y orientaciones de las mismas respecto a un sistema de coordenadas global. En Fig. 5-18 se presenta el esquema básico del sistema óptico.

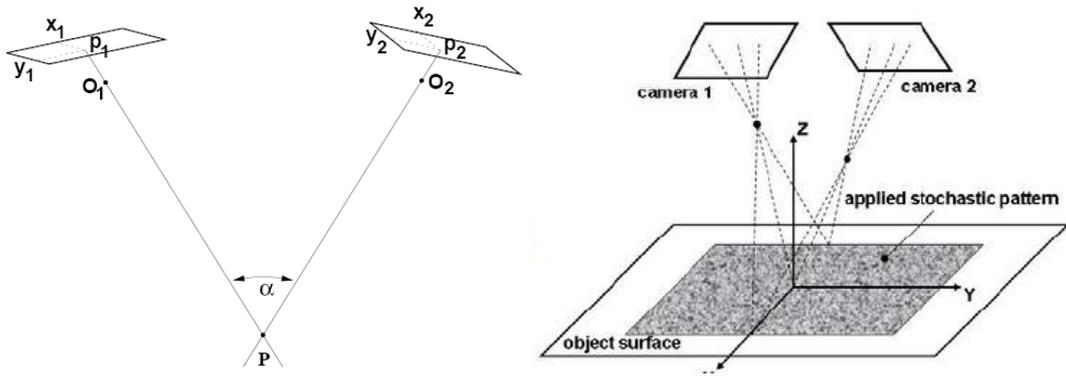


Fig. 5-18: Esquema básico del sistema óptico

Según el esquema anterior, si se conoce la posición de las dos cámaras y la de los dos puntos imagen homólogos, $p_1(x_1, y_1)$ y $p_2(x_2, y_2)$, las coordenadas del punto objeto $P(x, y, z)$ se puede determinar. Este procedimiento se conoce como intersección de espacios. Por ello, debe definirse un modelo geométrico, el cual transformará los puntos imagen en coordenadas 3D de los puntos objeto. A fin de realizar dicha transformación, se usa el modelo de proyección en perspectiva. Aparte del parámetro de matriz de rotación y del centro de proyección (parámetros externos dependientes de la orientación), es necesario conocer los parámetros intrínsecos de las cámaras (distancia focal, punto principal de las lentes, distorsión radial y tangencial de las lentes). Precisamente, la obtención de todos ellos es lo que se consigue con el proceso de calibración anteriormente mencionado, es decir, la correcta transformación de los puntos imagen sobre las dos CCD a las coordenadas 3D de ese punto objeto.

Los posibles desviaciones en la calibración son una fuente de errores de evaluación sistemáticos, limitándose de esta forma la resolución y precisión de los resultados.

De acuerdo al modelo empleado en la calibración para realizar la transformación comentada anteriormente, la proyección del punto objeto sobre la cámara se define como la intersección de la línea que va desde el punto objeto y pasa por el punto principal con la CCD (Fig. 5-19).

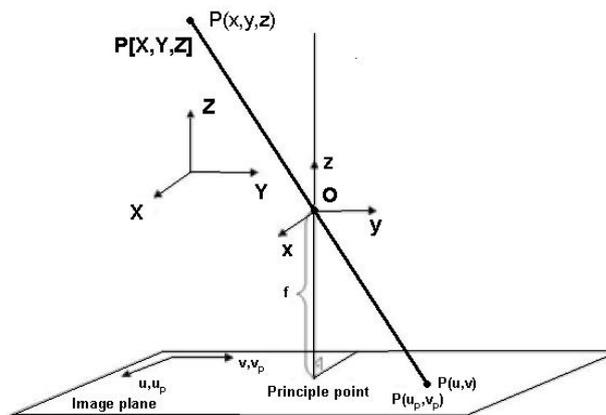


Fig. 5-19 Modelo de proyección considerado

La distancia del punto principal al plano de la imagen es la distancia focal “f”. La proyección sobre el plano de la imagen da la posición del eje óptico en la CCD. Toda desviación en la rectitud de la proyección genera distorsiones radiales α_r y tangenciales α_t :

$$\tilde{P} = (1 + \alpha_r)P + \alpha_t \quad (5)$$

donde P es el punto proyectado teórico de acuerdo al modelo, y \tilde{P} el punto distorsionado.

La distorsión radial existente se puede expresar como $\alpha_r = \alpha_2 r^2 + \alpha_4 r^4 + \dots$. El algoritmo de evaluación típicamente evalúa dicha distorsión hasta términos de 4º orden.

Por otro lado, las distorsiones tangenciales se deben a la falta de alineación de las lentes. En general dichas distorsiones son pequeñas en comparación a las radiales. Estas distorsiones se pueden describir como:

$$\alpha_t = \begin{pmatrix} 2t_x xy + t_y (r^2 + 2x^2) \\ t_x (r^2 + 2y^2) + 2t_y xy \end{pmatrix} \quad (6)$$

Siendo t_x y t_y los parámetros de distorsión tangencial.

La calibración se realiza tomando una serie de imágenes, simultáneamente con ambas cámaras, de una placa con marcadores (calibration target) (Fig. 5-20). La geometría de la placa y de los marcadores es conocida. De esta forma el sistema localiza los centros y orientaciones de la placa. Durante la calibración, dichos marcadores se detectan automáticamente por el sistema a la vez que la placa se sitúa en una serie de orientaciones espaciales definidas previamente.

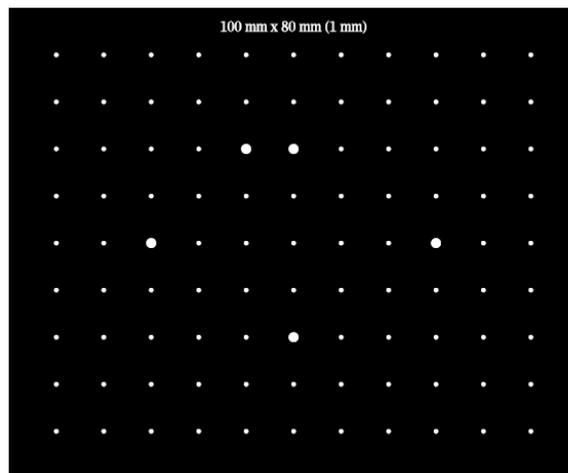


Fig. 5-20: Placa de calibración para el sistema ARAMIS®

El algoritmo de evaluación calcula los parámetros intrínsecos de las dos cámaras, los parámetros extrínsecos (vector de traslación y matriz de rotación) al igual que las incertidumbres de los parámetros de calibración resultantes de las desviaciones de los

marcadores detectados en comparación con el modelo de proyección/posición. Típicamente un número de 8 o 10 imágenes es suficiente para la obtención de todos los parámetros de calibración con precisión.

Una vez se ha realizado la calibración, el sistema nos presenta un resumen de los parámetros, es decir, ángulo entre las cámaras, volumen de medición calibrado, desviación en la calibración, etc...(Fig. 5-21).

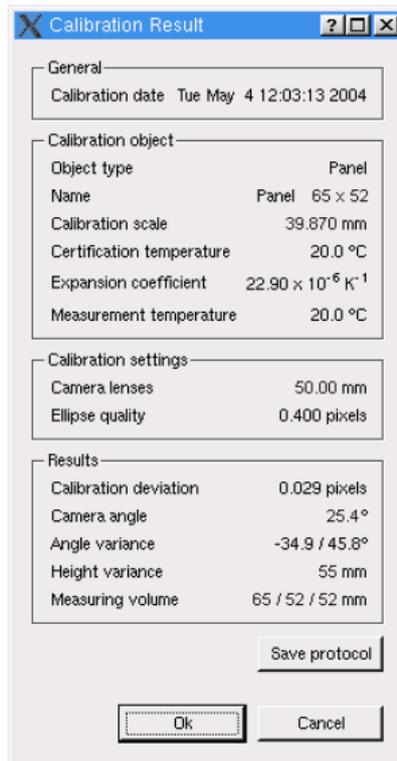


Fig. 5-21: Resultado de la calibración

Una vez el sistema ha sido calibrado, puede empezar a usarse. Para aplicar las técnicas de correlación a las imágenes capturadas de un ensayo a fin de evaluar desplazamientos y deformaciones, es necesario definir una serie de ajustes iniciales. Se van a comentar someramente algunos de los más relevantes (Fig. 5-22):

- ✚ Tamaño de las facetas (Facet size). Este valor se define en píxeles. La selección de este parámetro depende del patrón de pintura aplicado en la superficie de la probeta. Es necesario que dentro de la faceta haya una distribución de nivel de grises adecuada, es decir que el patrón sea lo suficientemente pequeño y se genere un contraste adecuado y suficiente en cada faceta. Típicamente se han usado valores desde 9 x 9 a 13 x 13 píxeles.

- ✚ Paso (Step). Indica la distancia entre los centros de dos facetas en píxeles. Típicamente si seleccionamos un tamaño de faceta de 15 px, es habitual elegir un paso de 13px. De esta forma habrá un solapamiento (overlapping) de 2 px. A medida que sea mayor este solapamiento, la información de desplazamientos y deformaciones tendrá mayor resolución, ya que ésta se calcula en el centro de cada faceta.

Por otro lado, una serie de parámetros relacionados con la precisión en el cálculo e identificación de facetas son los siguientes (Fig. 5-22):

- ✚ Accuracy. Se relaciona con la precisión con la que una faceta se puede identificar en la imagen (stage) siguiente. Dicho parámetro, basado en los niveles de grises de los píxeles, define el máximo desplazamiento admisible de las esquinas que definen la faceta al pasar de una imagen a otra. Usualmente se usa un valor de 0,04 px.
- ✚ Residual. Es la diferencia de brillos admisibles entre los niveles de grises de las facetas. Éste se determina para cada faceta en un stage a partir de las imágenes de ambas cámaras. Típicamente se considera como valor de referencia 20 niveles de grises como aceptable.
- ✚ Intersection deviation. La desviación existente entre la medición que hace cada una de las cámaras de un punto concreto. A medida que el valor es más grande, más probabilidades de que el sistema esté descalibrado. Habitualmente se considera 0,3 px.

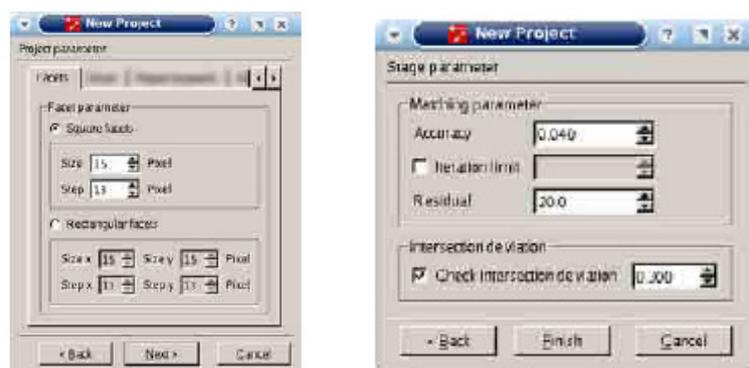


Fig. 5-22: Selección de tamaño, solapamiento de facetas y parámetros de precisión

Una vez que el sistema ha calculado el proyecto, éste nos arroja, en función de la última calibración realizada, una estimación del error medio obtenido en el cálculo realizado.

Ha de notarse que el cálculo, a partir de una serie de fotografías de un ensayo, puede realizarse tantas veces como se desee empleando distintos tamaños de malla (facetas) y nivel de solapamiento de las mismas. Sin embargo, como ya se comentó, tamaños de malla más pequeños requerirán la aplicación de patrones más finos.

En la Fig. 5-23 se puede observar el procedimiento de identificación de una faceta de referencia en los distintos fotogramas (stages). El cómputo del programa requiere la definición de dicho punto de referencia, el cual se localiza e identifica en todos los stages del proyecto. En la imagen se puede observar que los elementos muy distorsionados no son aceptables.

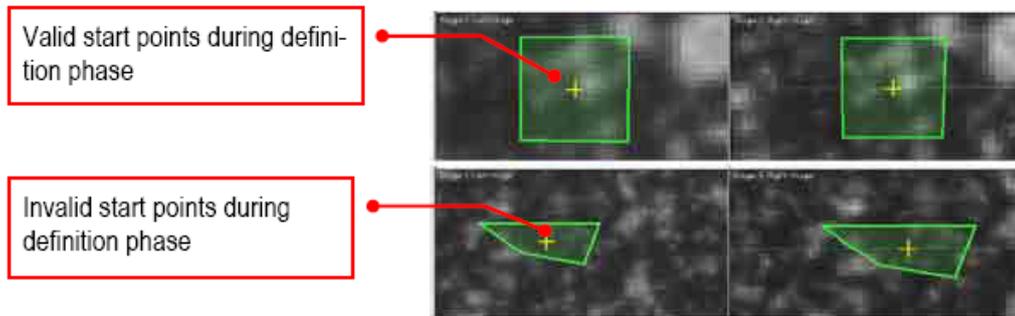


Figura 5-23. Identificación de facetas en distintos instantes

Una vez se han definido todos los parámetros y se ha seleccionado el punto o puntos de referencia, el sistema está en condiciones de realizar el cálculo de deformaciones. En Fig. 5-24 se muestran tanto la máscara de cálculo donde se han computado deformaciones como los datos de deformación mayor sobre la malla virtual considerada.

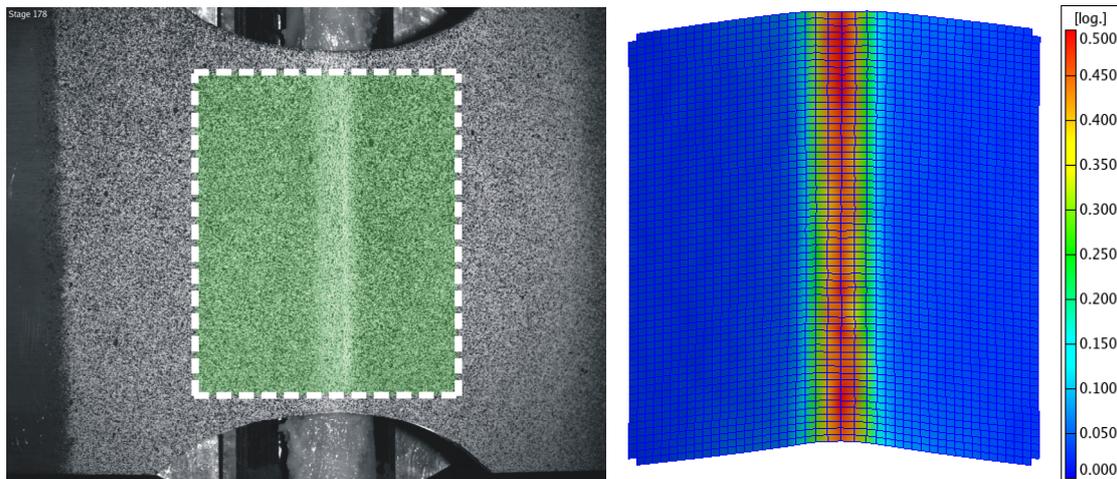


Fig. 5-24: Máscara de cálculo y representación de resultados ϵ_1 sobre la malla virtual empleada

Por último, las incertidumbres en los resultados obtenidos, originados de distintas fuentes, se pueden dividir en dos grandes grupos dependiendo del impacto en el proceso de evaluación:

- ✚ Errores de correlación, las cuales influyen la precisión de la correlación de imágenes
- ✚ Errores de calibración, los cuales tienen un impacto en la reconstrucción de las coordenadas 3D de las facetas correladas (errores de reconstrucción 3D).

Los errores de correlación describen las incertidumbres existentes en la correlación de las posiciones de las facetas en distintos instantes (stages). Estos errores se pueden dividir en estadísticos y sistemáticos. Los errores estadísticos ocurren por la existencia de un número limitado de píxeles y de niveles de grises en cada faceta. Además las posiciones de las facetas han de ser determinadas con precisión sub-píxel. Este error estadístico decrece proporcionalmente con la raíz cuadrada del número de píxeles por faceta. Otros aspectos que influyen son el ruido de las escalas de grises, las condiciones de iluminación diferentes en las dos cámaras, el tamaño del patrón en las probetas, etc... Los errores sistemáticos están influenciados por la discretización de un patrón real continuo mediante los píxeles de las CCD y potencialmente por la distorsión no lineal de las facetas (superficies curvas de la probeta, etc...).

Por otro lado, las incertidumbres de los parámetros de calibración (errores de calibración) conducen a errores cuando se reconstruyen las coordenadas 3D a partir de las facetas correladas entre las dos cámaras. Los errores de calibración aparecen de forma sistemática en función de la posición de las facetas en los distintos instantes (stages), generando distorsiones locales del espacio tridimensional generado.

Por último, ha de comentarse que la normativa ISO 12004-2:2008 hace referencia y establece la precisión mínima (accuracy) con la que ha de realizarse la medida de deformaciones. Según ISO, la precisión total del sistema de medida debe ser mejor de un 2%, basado una vez en la desviación Standard 1σ . En esa precisión total se incluye la resolución de las cámaras, campo de medición, algoritmo de cálculo, errores de calibración, etc... El sistema de cámaras digitales junto al software de procesado ARAMIS cumple muy holgadamente esta restricción, arrojando errores globales menores de un orden de magnitud inferior al recomendado.