

Capítulo 5

Técnica y procedimiento experimental

Contenido

5.1. INTRODUCCIÓN.....	54
5.2. TÉCNICA EXPERIMENTAL.....	55
5.2.1. MICRODUREZA DEL POLVO.....	55
5.2.1.1. TAMIZADO DEL POLVO.....	55
5.2.1.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	56
5.2.1.3. MEDIDA DE LA MICRODUREZA DEL POLVO.....	57
5.2.2. DUREZA DE LAS RESINAS.....	58
5.2.2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	58
5.2.2.2. MEDIDA DE LA DUREZA DE LAS RESINAS.....	59
5.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	59
5.3.1. INTRODUCCIÓN.....	59
5.3.2. DISTANCIA PENETRADOR-PROBETA.....	60
5.3.3. DISTINTAS RESINAS.....	61
5.3.4. TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	61
5.3.5. ABSORCIÓN DE AGUA.....	62
5.3.6. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA.....	62
5.3.7. VARIACIÓN DE LA CARGA APLICADA.....	63
5.3.8. VELOCIDAD DE CAÍDA DEL PENETRADOR.....	64
5.3.9. INTERRELACIÓN DE FACTORES.....	64
5.3.10. DISTINTOS TIPOS DE PARTÍCULAS.....	65
5.3.11. OTROS MICRODURÓMETROS.....	67
5.3.12. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA EMPLENDO VELOCIDAD LENTA DE CAÍDA DEL PENETRADOR.....	68
5.3.13. SIMULACIÓN POR ORDENADOR.....	68

Técnica y procedimiento experimental

5.1. INTRODUCCIÓN.

En este proyecto fin de carrera se han efectuado dos ensayos mecánicos:

- Microdureza del polvo.
- Dureza de resinas.

Primeramente se van a exponer los pasos necesarios para su ejecución y posteriormente, se expondrá el procedimiento experimental seguido en este proyecto.

5.2. TÉCNICA EXPERIMENTAL.

5.2.1. MICRODUREZA DEL POLVO.

5.2.1.1. TAMIZADO DEL POLVO.

Con el objetivo de facilitar la labor de encontrar partículas lo suficientemente grandes, en relación al tamaño de la huella producida en el ensayo de microdureza, se tamiza el polvo eligiendo las partículas de tamaño superior.

La norma^[8] contempla esa relación, estableciendo que la distancia entre el centro de la huella y el borde de la partícula ha de ser al menos 3 veces la longitud de la diagonal de la huella; y el espesor de la partícula ha de ser al menos 1.5 veces la longitud de la diagonal de la huella. Ver figura 5.1.

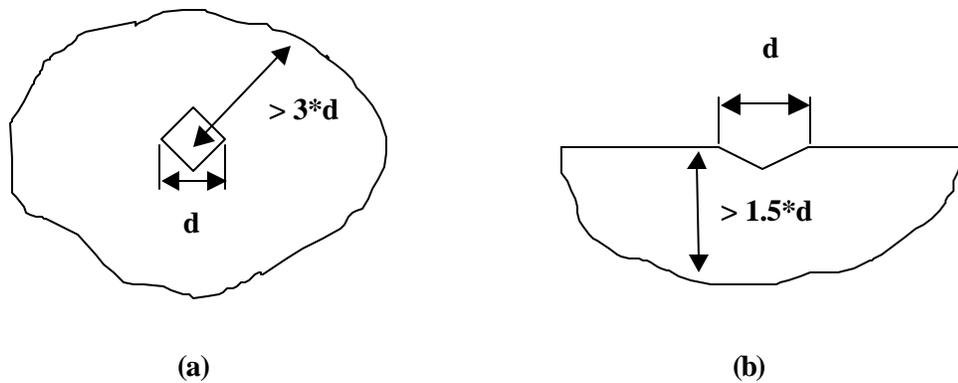


Figura 5.1. Dimensiones mínimas de las partículas, exigidas por la norma. (a) Vista en planta. (b) Vista de sección transversal.

La longitud de las diagonales de las huellas producidas en las partículas ensayadas en este estudio están comprendidas entre 15 y 30 μm , por lo que se ha empleado un tamiz con luz de malla 150 μm .

El procedimiento seguido para el tamizado se desarrolla en el manual de laboratorio^[26].

5.2.1.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Los pasos a seguir para la preparación de probetas son los siguientes:

- Empastillado.
- Pulido.
- Secado.

5.2.1.2.1. EMPASTILLADO.

Debido al pequeño tamaño de las partículas a ensayar, y por consiguiente su dificultad de manejo, se han empastillado en un bloque de resina, siguiendo el procedimiento descrito en el manual de laboratorio ^[26].

5.2.1.2.2. LIJADO Y PULIDO.

Tras el paso anterior, las partículas quedan recubiertas (en la superficie a ensayar) de una fina capa de resina. En este apartado se pretende tanto eliminar esa fina capa de resina, como pulir las partículas para dejar a exposición su plano medio aproximadamente.

Se han hecho pasar las probetas sucesivamente por una lija nº 600, paño de pulido con suspensión de diamante de 9 μm , paño de pulido con suspensión de diamante de 3 μm , y paño de pulido con óxido de magnesio. El tiempo empleado en cada paso ha sido aproximadamente 3-4 minutos. Finalmente, se han limpiado las probetas con agua y jabón para eliminar los restos de grasa provenientes de los materiales empleados en el pulido y se ha añadido un chorro de alcohol para garantizar un mejor secado.

5.2.1.2.3. SECADO.

Con el fin de eliminar todo resto líquido del proceso anterior, se procede a secar las probetas, teniendo la precaución de no someter la superficie de las partículas a una elevada temperatura. En este estudio se han empleado dos métodos de secado:

- 1) Se han expuesto las probetas al aire caliente aportado por un secador durante 4 minutos aproximadamente, cuidando de no someter a la probeta a elevada temperatura.
- 2) El método anterior y la posterior introducción de las probetas en una estufa a 35°C. durante 24 horas.

Como se verá posteriormente, no se han detectado cambios apreciables en los resultados empleando un método u otro.

Una muestra de las probetas obtenidas tras los procesos de empastillado, secado y pulido, se presenta en la figura 5.2.



Figura 5.2. Vistas de una probeta de partículas de polvo metálico empastillados en resina de poliéster.

5.2.1.3. MEDIDA DE LA MICRODUREZA DEL POLVO.

El equipo empleado ha sido el microdurómetro de la marca ZWICK, modelo 3212, ampliamente descrito en el capítulo anterior. Para la ejecución de este ensayo, se ha seguido el manual del microdurómetro^[25] y la norma de la dureza Vickers^[8].

5.2.2. DUREZA DE LAS RESINAS.

Se ha empleado el método especificado en la norma UNE-EN ISO 2039-1: “Plásticos. Determinación de la dureza. Método de penetración de bola.”^[27]

5.2.2.1. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

De acuerdo con el apartado 6 de la mencionada norma^[27], se han preparado probetas cilíndricas con dimensiones aproximadas de 50 mm. de diámetro y 12 mm. de altura. El procedimiento para preparar una probeta ha sido el siguiente:

- 1) Empleando un vaso cilíndrico de aproximadamente 50 mm de diámetro por 80 mm de alto, se ha procedido a la mezcla de resina y endurecedor. Se necesitan aproximadamente 35 g de mezcla. Se ha dejado endurecer tanto tiempo como se ha requerido en cada caso.
- 2) Con el objetivo de obtener sus dos bases planas y paralelas, primeramente se han lijado las probetas en una devastadora. Más concretamente, la base que endureció en contacto con el aire hasta dejarla plana.
- 3) Empleando la fresadora en su velocidad más lenta, se ha fresado la superficie antes desbastada hasta conseguir bases paralelas.
- 4) En una lija nº 600, se han eliminado los restos de marcas dejadas por la fresadora, teniendo cuidado de no estropear el paralelismo entre bases.
- 5) Se ha procedido al secado de la probeta exponiéndolas durante 4 minutos al aire caliente de un secador, siendo introducidas posteriormente, en una estufa durante 24 h a 35 °C.

El resultado de este proceso se muestra, a título de ejemplo, en la figura 5.3



Figura 5.3. Diferentes vistas de una probeta de resina de poliéster.

5.2.2.2. MEDIDA DE LA DUREZA DE LAS RESINAS.

Se ha empleado el durómetro de la marca EMCO, modelo M4U-025. Ayudado del manual de instrucciones de la máquina^[28], se han introducido los parámetros de operación en la memoria, según lo requerido por la mencionada norma^[27], que son:

- Penetrador en forma de bola de 5 mm de diámetro.
- Valores de dureza en las unidades N/mm².
- Precarga de 9.8 N.
- Cargas de ensayo de 49 N, 132 N, 358 N, 961 N. Estas cargas corresponden respectivamente a los ensayos marcados en la máquina con los códigos 42,43,44,45.
- 3 segundos de aplicación de la precarga.
- 30 segundos de aplicación de la carga.
- La profundidad de la huella ha de estar comprendida entre 0.15 mm y 0.35 mm.
- Entre los centros de la huellas ha de haber al menos, 10 mm de distancia, al igual que entre el extremo de la probeta y el centro de las huellas próximas al borde.

Una vez se han seleccionado estos parámetros en el equipo, la utilización del mismo para la ejecución del ensayo se describe en el manual de laboratorio^[26].

5.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

5.3.1. INTRODUCCIÓN.

Como se comentó en el capítulo 1, en este proyecto se intenta determinar la influencia de varios parámetros en la medida de microdureza de polvos metálicos de aluminio y aluminio-titanio. Dichos parámetros son:

- Propiedades de la probeta.
 - Tipo de resina.
 - Tiempo de curado.
 - Absorción de agua por parte de la resina durante el pulido.
 - Tamaño y tipo de partícula.

- Factores referentes a la máquina de ensayo.
 - Distancia penetrador-probeta antes de la indentación.
 - Velocidad de caída del penetrador.
 - Carga aplicada.
 - Tiempo de aplicación de la carga.

El orden en el que se van a presentar en este capítulo las distintas experiencias realizadas, es el orden cronológico en el que se han llevado a cabo éstas en el laboratorio, el cual se ha ido determinando conforme evolucionaba el desarrollo del proyecto y el nivel de conocimiento de los factores que afectan a la medida de la microdureza.

La notación empleada para cada ensayo de microdureza será:

([tipo partícula]/[resina]/[días de curado]/[carga (g)]/[velocidad (mm/s)]/[tiempo (s)])

Un “*” en alguno de los campos expresará que se emplearon distintos valores del factor correspondiente, para evaluar su influencia en el valor final de la microdureza.

5.3.2. DISTANCIA PENETRADOR-PROBETA.

La distancia entre el penetrador y la superficie de la probeta puede ser regulada tal y como se describió en la secc. 4.5. Se ha trabajado siempre con la carcasa protectora del penetrador, por lo que las distancias aquí expresadas se refieren a distancia entre carcasa y superficie de probeta.

Pensando en que esta distancia pudiera influir en la distorsión de la carga, primeramente, con la ayuda de una balanza como la definida en la secc. 4.8.2, se han hecho dos experiencias para determinar la discrepancia entre la carga que realmente llega a la probeta, y la carga ideal que se ha seleccionado. En una de ellas se ha elegido una

distancia carcasa-probeta de 2.5 mm, y en otra 0.5 mm. Las condiciones de las pruebas han sido:

- Carga: 20 g.
- Velocidad de caída del penetrador: 0.60 mm/s.
- Tiempo aplicación: Hasta estabilización.

Seguidamente, para evaluar directamente el efecto sobre el valor de microdureza, se han efectuado ensayos de microdureza (Al-N₂/A/3/20/0.60/15) con cada una de las distancias anteriores (0.5 y 2.5 mm).

5.3.3. DISTINTAS RESINAS.

Pensando en que la dureza de la resina en la que se empastillan las partículas para poder ensayarlas, pudiera tener influencia en la distorsión de los valores de microdureza, se han empleado los tres tipos de resinas presentadas en la secc. 3.2.2, habiéndose trabajado para cada una de ellas con distintos grados de curado.

Siguiendo el proceso descrito en la secc. 5.2.2.2, se ha determinado la evolución de la dureza de las tres resinas empleadas con el tiempo de curado. Para esto, se han realizado los ensayos tras 1, 2, 3, 5, 8 y 15 días de curado de las resinas.

Por otra parte, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) empleando como resina soporte de las partículas, las 18 combinaciones caracterizadas (3 resinas con 6 grados de curado distintos).

5.3.4. TAMAÑO DE PARTÍCULA.

La norma^[8] refleja que la distancia desde el centro de la huella al borde de la partícula será superior a 3 veces la diagonal de la huella; y que el espesor de la probeta será mayor de 1.5 veces la diagonal de la huella (ver secc. 5.2.1.1).

Con vistas a evaluar la distorsión del valor de microdureza al emplear partículas que no cumplen la norma en cuanto a tamaño en relación a la huella, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) empleando partículas de radio entre 32.5 y 50 micras (1.5 ÷ 2 veces la longitud de la diagonal de la huella).

Para además comprobar si esta relación entre tamaño de huella y partícula se ve afectada por la dureza de la resina soporte, se han empleado las mismas resinas (en sus diferentes grados de curado) que se han caracterizado en la secc. 5.3.3. Esto se ha conseguido ocupando la mitad de la probeta con partículas grandes (para ensayos de secc. 5.3.3), y la otra mitad con partículas pequeñas.

5.3.5. ABSORCIÓN DE AGUA.

Al pulir las probetas, se está sometiendo a la resina a un proceso de contacto con agua y alcohol. La absorción de éstos por parte de la resina, podría influir en sus propiedades. Con el fin de eliminar todo resto de estos agentes, se procede a secar las probetas (secc 5.2.1.2.3) antes de efectuar ensayos.

Para evaluar la influencia que tiene este factor en los valores de microdureza, se han efectuado tres ensayos de microdureza sucesivos (AI-N₂/A/curada/20/0.60/15) a una misma probeta de partículas a la que se le han realizado, entre ensayo y ensayo, un secado cada vez más intenso:

- 1) Se ha expuesto la probeta al aire caliente aportado por un secador durante 15 s.
- 2) Se ha expuesto la probeta al aire caliente aportado por un secador durante 4 min aproximadamente, cuidando de no someter a la probeta a elevada temperatura.
- 3) Se ha introducido la probeta en una estufa a 35 °C. durante 24 h.

El empleo de la resina ya curada, se justifica porque así se elimina la componente de variación de la dureza de la resina debido a la variación de su grado de curado.

5.3.6. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA.

En un ensayo de dureza o microdureza, para garantizar el equilibrio de fuerzas entre penetrador y probeta, ha de establecerse un tiempo de actuación de la carga durante el cual se generará la huella. En el caso de microdureza Vickers, la norma^[8] especifica que el tiempo durante el cual ha de estar actuando la plena carga, debe estar comprendido entre 10 y 15 s.

En vistas a determinar qué influencia tiene la variación de este parámetro en los resultados de microdureza, se han realizado ensayos (Al-N₂/A/curada/20/0.60/*) empleando los tiempos de aplicación de carga:

- 3 segundos.
- 5 segundos.
- 8 segundos.
- 11 segundos.
- 15 segundos.

5.3.7. VARIACIÓN DE LA CARGA APLICADA.

Como se ha hecho constar en la secc. 4.8.2, el valor ideal de la carga (20 g en la mayoría de los casos) puede diferir ligeramente del valor de la carga que realmente soporta la probeta. Para evaluar este efecto sobre la medida de la microdureza, se pretende evaluar la variación de ésta en un rango estrecho en torno a 20 g.

Se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada*/0.60/15) empleando las cargas:

- 15 g.
- 20 g.
- 25 g.

para después, interpolar en el rango 20 ± 0.6 g (algo mayor del que permite la norma, que es 20 ± 0.3 g).

Si la variación de la microdureza en el rango 20 ± 5 g es pequeña, cabe pensar que en el rango 20 ± 0.6 g sea aún más pequeña, ya que la amplitud de este último es un orden de magnitud menor.

No se ha ensayado con las cargas 19.4 g y 20.6 g porque la dispersión en los valores medidos de microdureza podría llevar a que, en un rango tan estrecho, un aumento de la carga no se reflejase en un aumento de la huella.

Antes de realizar los ensayos de microdureza, con el fin de comprobar si la discrepancia entre el valor real y valor ideal de la carga varía con la magnitud de ésta, se ha

procedido, igual que en la secc. 4.8.2, a evaluar la dispersión de la carga mediante una balanza, empleando 15, 20 y 25 g como carga de ensayo.

5.3.8. VELOCIDAD DE CAÍDA DEL PENETRADOR.

Debido al modo de funcionamiento del microdurómetro empleado en este proyecto, la inercia que adquiere el penetrador durante su aproximación a la probeta, puede influir en el valor de microdureza obtenido. La norma^[8] especifica que para ensayos de baja carga (200 g ÷ 3 kg) y microdureza (10 g ÷ 200 g), la velocidad de aproximación del penetrador no debe exceder de 0.20 mm/s. En discordancia con esto, el manual del microdurómetro empleado^[25] especifica que los mejores valores se obtienen para una velocidad de 0.30 mm/s.

Para evaluar la influencia de este factor, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20*/15) con los siguientes valores de velocidad de caída:

- 0.10 mm/s (60 s de caída).
- 0.12 mm/s (50 s de caída).
- 0.14 mm/s (42 s de caída).
- 0.17 mm/s (35 s de caída).
- 0.29 mm/s (21 s de caída).
- 0.60 mm/s (10 s de caída).
- 2.00 mm/s (3 s de caída).

5.3.9. INTERRELACIÓN DE FACTORES.

Una vez analizados los distintos factores en una primera tanda de ensayos, se ha pretendido evaluar la influencia de algunos de ellos de forma interrelacionada. En base a los resultados obtenidos en los ensayos realizados hasta este punto, se han fijado:

- La distancia penetrador-probeta (0.5 ÷ 1 mm),
- Método de secado (4 min al secador),
- Tipo de resina (resina de poliéster).

En apartados anteriores, la variación del tiempo de aplicación, así como la carga aplicada, y la velocidad de caída del penetrador, se han evaluado independientemente, empleando resina de poliéster curada. Con el fin de evaluar la posible influencia de estos

mismos parámetros para distintos grados de curado de la resina (1, 2, 4, 8 y 16 días), se ha realizado la tanda de ensayos de microdureza con las variables presentadas en la tabla 5.1. En pruebas anteriores (secc. 5.3.3 y 5.3.4) no se tuvo un control exhaustivo sobre la velocidad de caída del penetrador (10 ± 0.5 s, expresado en tiempo de caída). En las pruebas que aquí se presentan se corrigió este hecho.

TIPO DE ENSAYO	CARGA (g)	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (mm/s)
1	15	15	0.60
2	25	15	0.60
3	20	3	0.60
4	20	8	0.60
5	20	15	0.60
6	20	15	0.22
7	20	15	2.00

Tabla 5.1. Distintas condiciones de operación en los ensayos de microdureza realizados en esta sección.

Puede observarse que en los ensayos 1, 2 y 5 se varía la carga; en los ensayos 3, 4 y 5 se varía el tiempo de aplicación; y que en los ensayos 5, 6 y 7 se varía la velocidad de caída del penetrador.

5.3.10. DISTINTOS TIPOS DE PARTÍCULAS.

Con el fin de no ceñirse a un solo tipo de partícula, se ha efectuado una tanda de ensayos de microdureza (*A*/20/0.20/15) a los siguientes tipos de polvo, cuyas principales características aparecen reflejadas en la secc. 3.1:

- Al-N₂.
- Al-N₂-600
- Al5Ti-N₂.
- Al5Ti-N₂-575.
- Al10Ti-N₂.

Como se comentó en la secc. 3.1.3.2, la microdureza de las partículas de aluminio incrementa al alearlas con titanio, mientras que disminuye al darles un tratamiento térmico

de recocido. Al elegir varias combinaciones, se obtendrán distintas huellas para partículas del mismo tamaño y distintas propiedades mecánicas. Al decir mismo tamaño, se quiere referir que todas las partículas quedaron retenidas en un tamiz con luz de malla de 150 μm . No obstante, al adicionar titanio se forman partículas en forma de aglomerados, como se comentó en la secc. 3.1.3.3, por lo que pocas partículas serán aptas para el ensayo.

Se ha vuelto a emplear la resina de poliéster con varios grados de curado. También se han realizado ensayos de microdureza (*B/8/20/0.20/15) empleando la resina epoxi. El objetivo de emplear la resina epoxi en esta sección, no es determinar la evolución de la microdureza de las partículas variando el tiempo de curado de esta resina (se ha ensayado para 8 días de curado); solamente se pretende realizar un ensayo empleando una resina de distintas propiedades a la de poliéster.

Por un error en una primera determinación de la velocidad de caída, se ha utilizado hasta ahora 0.60 mm/s como velocidad base del estudio. Encaminados a buscar las condiciones del ensayo exigidas por la norma^[8], se ha empleado la velocidad máxima aconsejada por esta: 0.20 mm/s. Con esta elección nos alejamos lo menos posible de la velocidad aconsejada por el fabricante^[25]: 0.30 mm/s.

La norma^[8] recoge el rango de tamaños de la diagonal de la huella comprendido entre 20 μm y 1200 μm . Debido a que los tamaños de huella en las partículas estudiadas, con esa velocidad de caída del penetrador, están ligeramente por debajo de 20 μm , se planteó la posibilidad de emplear una carga mayor de 20 g. Se desestimó esta opción por:

- Mayores tamaños de huella conlleva a mayor problema de encontrar partículas suficientemente grandes en relación al tamaño de huella.
- En principio, no parece que pasar de 25 μm a 18 μm aproximadamente, vaya a representar una gran diferencia.
- En los ensayos de microdureza en películas delgadas, se generan huellas menores de 10 μm ^{[29][30][31]}.
- Tanto en un apéndice del manual del microdurómetro^[25], como en un apéndice de la correspondiente norma ASTM E-384^[10], se tabula la fórmula de la dureza Vickers a partir de 1 μm de diagonal de huella.
- Atendiendo a la fórmula de la dureza Vickers (ec. 2.10), aunque huellas mayores implican menor error relativo en la diagonal, un mayor valor de la carga sustituido en la fórmula, implica amplificar el intervalo de dispersión (secc.2.1.7), por lo que en definitiva, matemáticamente hablando, no se consigue una desviación más pequeña en los resultados.

También se ha medido la microdureza de un patrón existente en el laboratorio cuya microdureza es 414 HV 1 (nomenclatura en secc.2.7). La carga empleada para éste, ha

sido 150 g para así obtener huellas de tamaño aproximado a 20 μm . El objetivo de ensayar el patrón ha sido buscar explicación a la tendencia de los resultados que se ha ido observando conforme se realizaban las pruebas, achacable en principio a algún factor incontrolado de la máquina de ensayo, y no al estado de curado de la resina.

En esta sección, se ha utilizado el método tradicional de medida de huellas debido a que con el sistema digital es bastante engorroso encontrar partículas adecuadas para el ensayo cuando hay pocas, como es el caso de los nuevos tipos de polvo ensayados. Como se comentó en la secc. 3.1.3.3, conforme aumenta la adicción de titanio, aumenta el número de partículas aglomeradas, siendo éstas no válidas para el ensayo de microdureza.

5.3.11. OTROS MICRODURÓMETROS.

Como se ha comentado en la secc. 4.9, se han comparado algunos resultados con los obtenidos en otros microdurómetros.

En el caso del microdurómetro NIKON MHT-4, se ha realizado un ensayo a partículas Al-N_2 (empastillados en resina de poliéster, que estaba ya curada en el día del ensayo) empleando la curva de aplicación de carga que aparece en la figura 5.4. Como se puede observar, hay control absoluto sobre la aplicación de la carga.

En el caso del microdurómetro KARL ZEISS JENA CBS, se ha empleado una carga de 25 g (carga mínima en ese equipo), ensayando varios tipos de partículas. Para obtener aproximadamente los mismos valores en el microdurómetro ZWICK 3212, se han realizado en éste, ensayos de microdureza empleando también 25 g y ajustando el tiempo de caída del penetrador a 40 s (0.15 mm/s) para obtener valores semejantes de microdureza en ambos equipos.

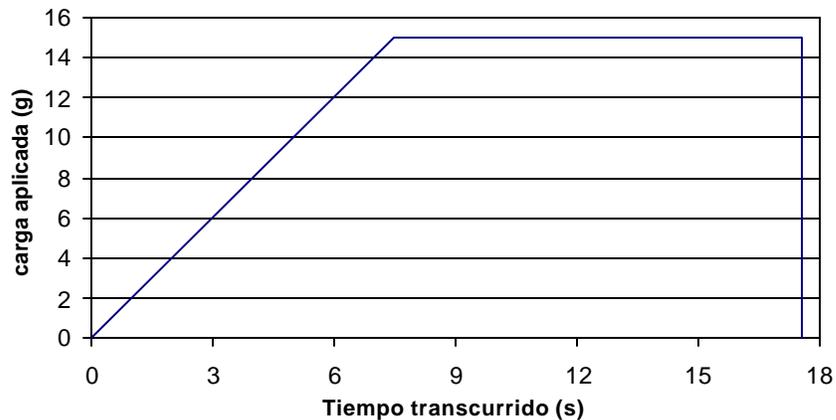


Figura 5.4. Evolución de la carga aplicada en el microdurómetro NIKON MHT-4, una vez contactan penetrador y probeta.

5.3.12. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA EMPLEANDO VELOCIDAD LENTA DE CAÍDA DEL PENETRADOR.

Para comprobar si con una velocidad muy lenta de caída del penetrador se acentúa el efecto de variar el tiempo de aplicación de la carga, se han realizado dos ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.12/*) empleando como tiempo de aplicación:

- 3 s.
- 15 s.

En ambos se ha utilizado 0.12 mm/s de velocidad de caída del penetrador.

Esta experiencia se justifica porque al eliminar la componente de inercia, el penetrador puede desplazarse más lentamente mientras genera la huella, por lo que necesitaría más tiempo para alcanzar el equilibrio.

5.3.13. SIMULACIÓN POR ORDENADOR.

Como se ha indicado anteriormente, uno de los factores que podría afectar al valor de medido de microdureza, y que se ha estudiado en este proyecto, es la influencia de las propiedades de la resina en la que se empastillan las partículas metálicas para poder ensayarlas. En la secc. 6.3 se expondrán razonamientos de cómo podrían interactuar la partícula y la resina que la rodea durante el ensayo de microdureza. Todos estos razonamientos se basan en fenómenos que no pueden ser comprobados directamente, ya que es imposible ver en la realidad las deformaciones que se producen tanto en el interior de la partícula como en la resina. Con el fin de determinar con más fiabilidad la interacción entre ambos materiales, se pensó en simular el problema con un programa de análisis por elementos finitos

En el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, por el hecho de pertenecer a una universidad de Andalucía, se pueden utilizar programas informáticos pertenecientes al CICA (Centro Informático Científico de Andalucía). Este centro tiene adquirida una licencia del programa de análisis por elementos finitos ABAQUS 6.0.

Se ha intentado abordar el problema con el apoyo de:

- La ayuda que trae el propio programa.
- Experiencia de personas que han trabajado en el campo de la simulación por ordenador mediante elementos finitos.
- Artículos^{[29][30][31]} en los que mediante programas de este tipo, se analiza la influencia de un sustrato metálico en la medida de la microdureza Vickers de una película metálica delgada depositada sobre él.

Se ha trabajado en los siguientes puntos:

- *Dimensiones espaciales:* Tal y como se representa en la fig. 5.5, la partícula se simula como un sólido semiesférico deformable, la resina como un bloque deformable de grandes dimensiones respecto a la partícula, y el penetrador como una pirámide rígida de base cuadrada. Solamente aparece la octava parte de los sólidos, porque el conjunto (tanto la geometría como las cargas, las cuales se comentan más adelante) presenta planos de simetría. La ubicación espacial de los tres sólidos se presenta en la fig. 5.6. Sin pérdida apreciable de información, se puede simplificar a un problema bidimensional trabajando con la mitad de la sección que contiene a la diagonal de la huella (ver fig. 5.7).

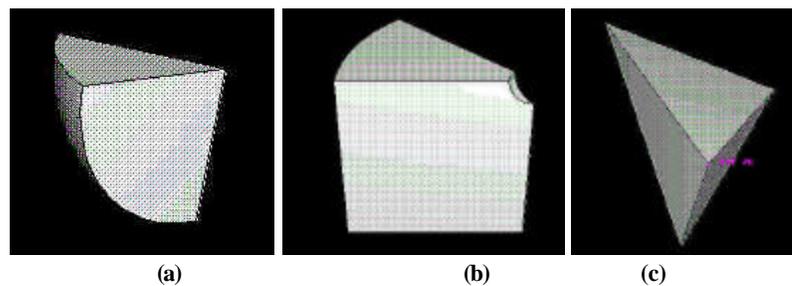
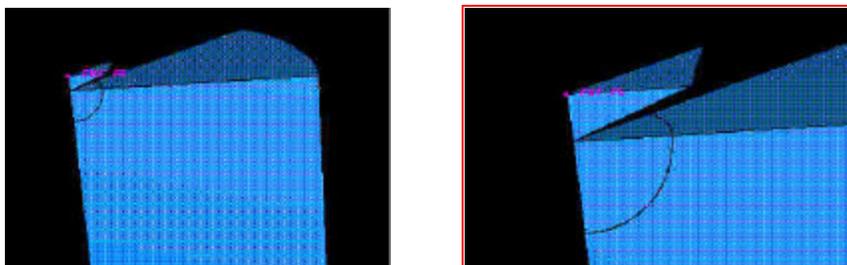
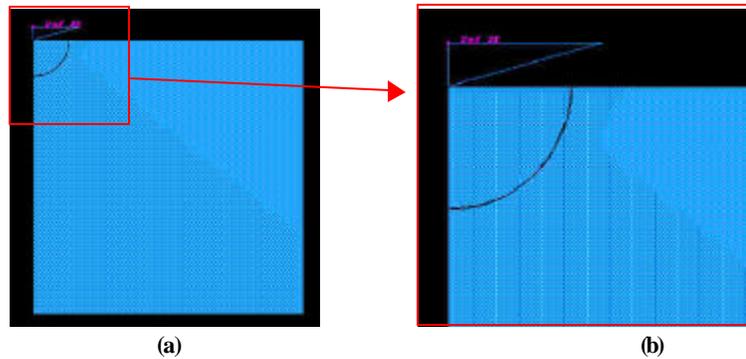


Figura 5.5. Forma con la que se han simulado los tres sólidos del problema. (a) partícula; (b) resina; (c) penetrador. Sólo se representa una octava parte de cada sólido debido a la simetría del problema.





- Si se considera la huella, deformaciones y simulación dinámica del problema. Esto complica sobremanera la simulación, ya que al introducir la variable tiempo, surgen mayores problemas en la convergencia del algoritmo. La simulación dinámica sería un aspecto a contemplar una vez resuelto el problema estático.
- **Deformación plástica:** Debido a que el problema es eminentemente plástico, se introduce una fuerte no linealidad que complica la simulación (problemas de convergencia, tipo de mallado, etc.). Habrá que emplear las opciones del programa reservadas a grandes deformaciones.
- **Interacciones entre sólidos:** En este problema se producen dos interacciones:
 - Partícula - resina: La resina, inicialmente líquida, solidifica adhiriéndose a la partícula. Esta unión se puede considerar completamente solidaria debido a la superficie rugosa de las partículas (secc. 3.1.3.3). Imponiendo la condición de unión, se elimina un problema de contacto.

- Partícula - penetrador: Este contacto es más problemático que el anterior ya que existe un coeficiente de rozamiento entre ambos sólidos (en torno a 0.3 ^[32]). Esto introduce otra no linealidad, y precisamente en la zona que ya existe una no linealidad debido a la plastificación. En este contacto hay que establecer unas condiciones de tolerancia en cuanto al movimiento relativo de ambas superficies, que deben ser estudiadas con detenimiento.
- *Propiedades mecánicas*: Tanto la partícula como la resina son sólidos deformables.
 - Las propiedades mecánicas de la resina pueden obtenerse mediante un ensayo de compresión ^[33]. Con este objetivo se ha ensayado la resina de poliéster. El mayor problema encontrado ha sido la preparación de las probetas para darle la forma y dimensiones requeridas. Por este motivo, de las 5 probetas ensayadas, 4 pandearon.
 - Las propiedades mecánicas de la partícula no pueden determinarse de forma exacta debido a que su pequeño tamaño la imposibilita para cualquier ensayo de compresión. Puede tomarse como aproximación las propiedades del aluminio.
- *Cargas y condiciones de contorno*: La carga se situará en la base superior del penetrador en forma de presión (los 20 g se dividen entre el área de la base mencionada). En cuanto a las condiciones de contorno, se establecen las propias de un plano de simetría en las superficies que cumplen esta condición, y se impiden todos los desplazamientos y giros de las superficies inferior y lateral de la resina (ver fig. 5.8).

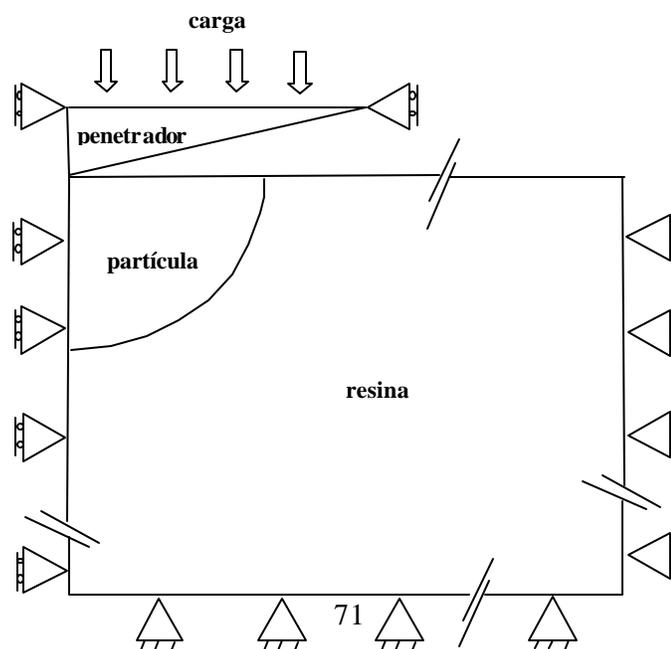


Figura 5.8. Cargas y condiciones de contorno del problema bidimensional.

En vistas a simplificar el problema, se ha intentado simular las tensiones que se producen al aplicar la carga sobre la partícula con la huella ya generada, tal y como se presenta en la figura 5.9. No se considera el penetrador por lo que se elimina el contacto entre él y la partícula. Sólo se consideran deformaciones elásticas.

Los valores asignados a las propiedades de la partícula han sido los característicos de un metal:

- Módulo de Young: 200 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0.25.

Los valores asignados a las propiedades de la resina han sido:

- Módulo de Young: 4 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0.33.

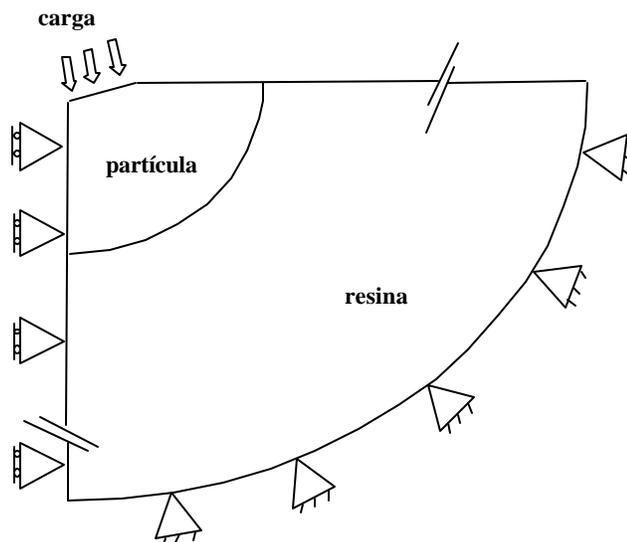


Figura 5.9. Carga y condiciones de contorno del problema simplificado.

Para el mallado, se ha elegido el tipo de elemento denominado como CPS4R, empleado en los dos ejemplos de la ayuda que trae el programa, en los que se trabaja con condiciones elásticas. La estructura de la malla utilizada se presenta en la figura 5.10.

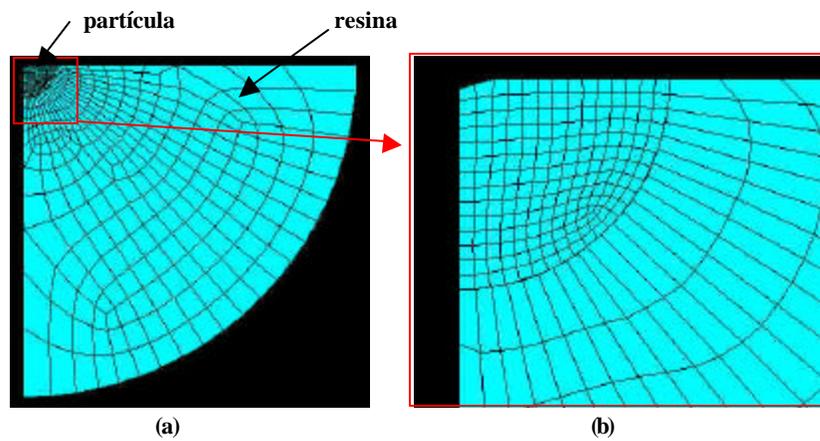


Fig. 5.10. Mallado empleado en el caso simplificado. (a) vista general. (b) ampliación de la zona de la partícula.