

Capítulo 6

Resultados y discusión

Contenido

6.1. DISTANCIA PENETRADOR -PROBETA.	73
6.2. DISTINTAS RESINAS Y GRADO DE CURADODE LAS MISMAS.....	75
6.3. TAMAÑO DE LA PARTÍCULA Y FORMA DE LA HUELLA.	81
6.4. ABSORCIÓN DE AGUA.....	86
6.5. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA.....	86
6.6. VARIACIÓN DE LA CARGA APLICADA.....	88
6.7. VELOCIDAD DE CAÍDA DEL PENETRADOR.	90
6.8. INTERRELACIÓN DE FACTORES.....	93
6.9. DISTINTOS TIPOS DE PARTÍCULAS.	95
6.10. OTROS MICRODURÓMETROS.	97
6.11. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA EMPLENDO VELOCIDAD LENTA DE CAÍDA DEL PENETRADOR.	100
6.12. SIMULACIÓN POR ORDENADOR.	101

Resultados y discusión

6.1. 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. Respecto a los resultados expuestos en este capítulo, se ha trabajado siempre con la carcasa protectora del penetrador, por lo que las distancias aquí expresadas se refieren a distancia entre la carcasa y la superficie de probeta.

Aunque en el manual del microdurómetro se recomienda una distancia determinada (0.5 ± 1 mm), éste no indica ningún motivo por el cual tenga que ser así. A falta de más información, se podría pensar en lo siguiente: como se ha expuesto en la secc. 4.2, el dispositivo para seleccionar cargas bajas es un balancín. Al variar la distancia entre la carcasa del penetrador y la probeta, el balancín quedará más o menos inclinado cuando la carga quede aplicada (ver figs. 6.1 y 4.1). En principio se podría pensar que esto distorsiona el valor de la carga elegida, pero no es así, ya que si se reflexiona sobre la figura 6.1, debido a que los extremos del balancín tienen libertad de giro, la carga que recibe la probeta es la diferencia entre lo que pesa el eje de carga y el contrapeso (siempre que el eje del balancín este situado en el centro de éste). Los resultados de las experiencias realizadas con una balanza para validar este razonamiento, variando la distancia ente carcasa y probeta, descritas en la sección 5.3.2, se presentan en la tabla 6.1. Se observa que no hay diferencia significativa entre ambos casos, cumpliéndose una desviación

6. Resultados y discusión.

estándar de $\pm 0.10 \div \pm 0.12$ g, que entra dentro del rango permitido por la norma^[81] (± 0.30 g).

Con independencia de los resultados mostrados, puede indicarse que para el caso de 2.5 mm de distancia entre la carcasa y la probeta, la carga tardó más tiempo en estabilizarse, del orden del tiempo de aplicación de la carga (10 \div 15 s), por lo que podría afectar al valor medido de microdureza. De todas formas, el tiempo que tarda la carga en estabilizarse cuando se le aplica a una balanza, debería ser mayor que cuando se le aplica a una probeta, ya que en el primer caso el penetrador está actuando sobre un muelle, que será menos propenso a estabilizarse que la probeta. Para comprobar los razonamientos directamente, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/A/3/20/0.60/15) variando la distancia entre carcasa y probeta, descritos en la sección 5.3.2. Los resultados se presentan en la tabla 6.2. De nuevo, no se observa una variación significativa, ya que ambos valores entran en la zona cubierta por la desviación estándar.

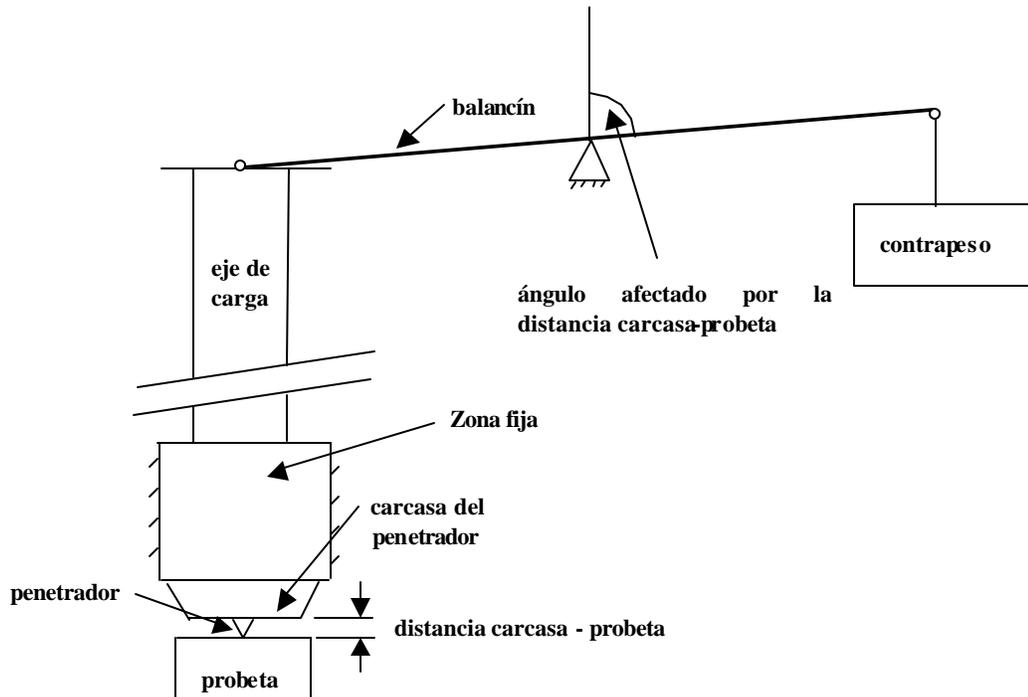


Figura 6.1. Esquema de la variación del ángulo de la balanza cuando varía la distancia entre la carcasa del penetrador y la probeta.

DISTANCIA (mm)	CARGA MEDIA (g.)	DESV. EST.
0.5	20.05	0.10
2.5	20.09	0.12

Tabla 6.1. Resultados de las experiencias para determinar la exactitud y precisión de la carga variando la distancia entre la carcasa del penetrador y la probeta a ensayar.

DISTANCIA (mm)	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (µm)	DESV. EST.	HV 0.02 MEDIA	DESV. EST.
0.5	26.13	0.34	54.38	1.44
2.5	26.34	0.44	53.53	1.77

Tabla 6.2. Resultados del ensayo de microdureza (Al-N2/A/3/20/0.60/15) variando la distancia entre la carcasa del penetrador y la probeta a ensayar.

Aunque no se han detectado variaciones significativas en los valores de microdureza obtenidos al variar la distancia entre la carcasa del penetrador y la probeta, con el objetivo de ir fijando variables, se ha tomado a partir de este punto y para el resto de las experiencias realizadas, la distancia recomendada por el fabricante, es decir, entre 0.5 y 1 mm.

6.2. DISTINTAS RESINAS Y GRADO DE CURADO DE LAS MISMAS.

Desde un primer momento, el motivo principal por el cual se pensó que se podría explicar la ausencia de precisión en la medida de microdureza, fue la variación de las propiedades de la resina (varían con el grado de curado, agua absorbida, etc.) en la que se empastillan las partículas. Como consecuencia de esto, se ha tenido presente este factor a lo largo de todo el proyecto.

Los razonamientos en los que se ha basado esta posible influencia se pueden explicar ayudándose de la figura 6.2. Ésta representa una sección transversal ampliada de una probeta que contiene partículas metálicas embebidas en un bloque de resina. Una partícula es sometida al ensayo Vickers. Al aplicar la carga, ésta se transmite por la partícula y llega a la resina, generándose una distribución de tensiones, decrecientes conforme nos alejamos de la zona de contacto del penetrador. La resina, al tener un comportamiento elastoplástico, puede llegar a deformarse. No obstante, como los valores de la tensión van disminuyendo conforme nos alejamos del penetrador, la resina no se ve afectada por tensiones tan altas como le ocurre a la partícula, por lo que aún siendo más blanda la primera, puede que no llegue a deformarse mucho. Esto último estará muy influenciado por el tamaño de la partícula, puesto que cuanto más grande sea ésta, menor será el valor de la tensión que llega a la resina. Si ésta ha sufrido un proceso de curado distinto de una vez

para otra, sus propiedades pueden diferir, por lo que si se deforma, lo hará de distinta manera.

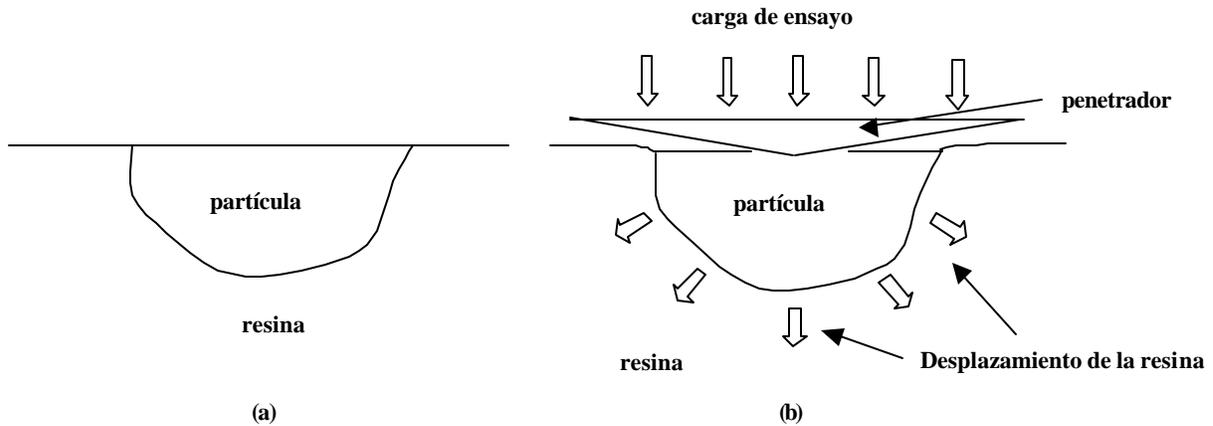


Figura 6.2. Esquema de: (a) una partícula metálica empastada en resina y pulida b) La partícula es sometida al ensayo Vickers.

En el ensayo se pueden establecer dos tipos de deformaciones ideales y bien diferenciadas, a saber:

- a) *Deformación solo de la resina*: La partícula se mantiene intacta (comportamiento de sólido rígido) experimentando un descenso de posición debido a la deformación de la resina. Esta deformación podría ser tanto elástica como plástica.
- b) *Deformación solo de la partícula*: La resina, ya estabilizada, ejerce de soporte rígido por lo que la carga la absorbe la partícula generándose una huella en ella.

Como se observa en la figura 6.2, en este problema entran en juego tres sólidos: penetrador, partícula y resina; que dan lugar a dos contactos: penetrador-partícula y resina-partícula. Cada contacto puede alcanzar un equilibrio, que vendrá influenciado por las propiedades mecánicas de los tres sólidos, valor de la carga, tiempo de aplicación de ésta, y en definitiva, por todos los parámetros del ensayo. Ambos equilibrios están acoplados. Por una parte, si la resina se está deformando, está absorbiendo carga que podría ejercerse sobre la partícula, por lo que no permitirá a ésta alcanzar el equilibrio con el penetrador. Por otra parte, si la partícula se está deformando, la tensión que le llega a la resina está variando, por lo que ésta puede seguir deformándose. No obstante, si la

6. Resultados y discusión.

partícula es suficientemente grande, las tensiones que le llegan a la resina serán muy pequeñas. En este caso se puede considerar que la partícula y la resina están en equilibrio frente al conjunto penetrador-partícula.

La deformación conjunta de partícula y resina da lugar a dos situaciones que se pueden presentar en el ensayo, íntimamente relacionadas con el tiempo de aplicación de la carga:

- 1) *Se alcanza el equilibrio de fuerzas:* Tanto el contacto entre partícula y resina como el contacto entre penetrador y partícula, alcanzan el estado estacionario de tensiones durante la aplicación de la carga, por lo que no habrá más deformación. Si el tamaño de la partícula fuese muy pequeño en relación al tamaño de la huella, aunque se ha alcanzado el equilibrio, puede que la huella esté muy afectada por la resina, debido a la plastificación que puede haber sufrido ésta. Si fuera así, no se estaría midiendo la verdadera microdureza de la partícula.
- 2) *No se alcanza el equilibrio de fuerzas:* Puede que alguno de los dos equilibrios (o ambos) entre penetrador, partícula y resina no alcance el estado estacionario durante la aplicación de la carga. Esto conlleva a que la huella en la partícula sea menor que la que se obtendría en el caso 1).

Con el fin de validar estos razonamientos, primeramente, y sin entrar todavía en ensayos de microdureza, se ha procedido a determinar la evolución de la dureza de tres resinas (secc. 3.2.2) variando el tiempo de curado, empleando el método de penetración de bola, como se describe en la secc. 5.3.3. Los resultados se presentan en la tabla 6.3 y la figura 6.3.

Días de curado	RESINA A		RESINA B		RESINA C	
	Dureza (N/mm ²)	Desv. est.	Dureza (N/mm ²)	Desv. est.	Dureza (N/mm ²)	Desv. est.
1	203.6	2.8	64.0	0.9	159.5	1.7
2	205.6	1.1	110.8	3.4	157.8	3.5
3	207.4	5.3	106.0	4.0	165.4	2.0
5	206.7	1.8	115.6	4.6	171.8	1.2
8	212.9	2.0	114.4	4.6	168.8	1.0
15	213.3	2.6	117.0	4.9	173.1	1.0

Tabla 6.3. Resultados de las experiencias realizadas para determinar la evolución de la dureza de las resinas empleadas con el tiempo de curado.

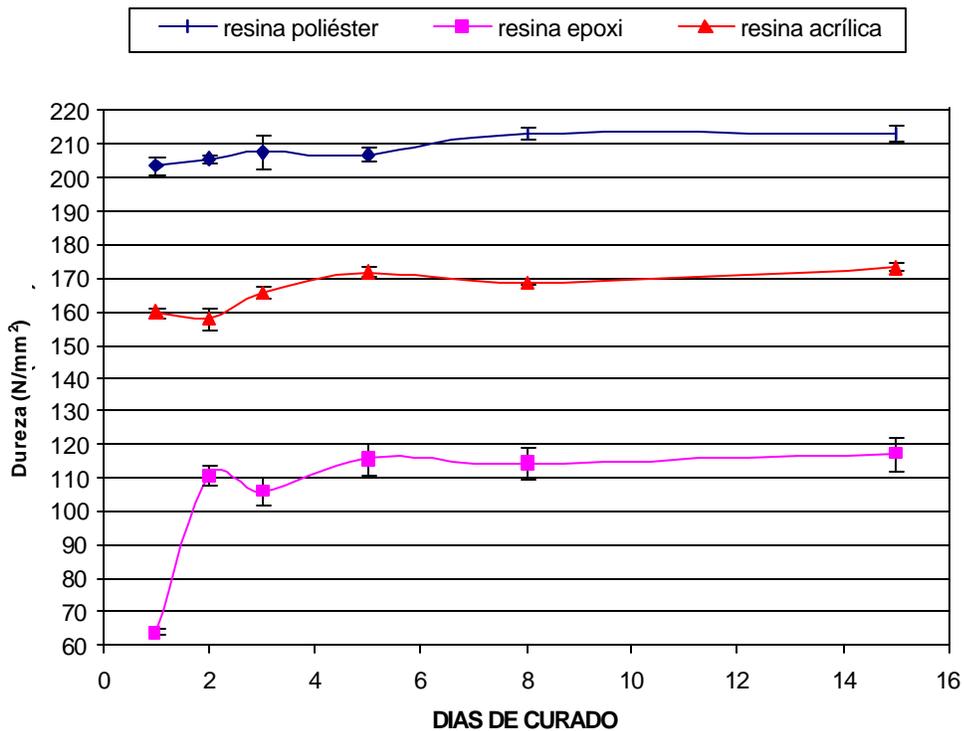


Figura 6.3. Resultados de las experiencias realizadas para determinar la evolución con el tiempo de curado de la dureza de las resinas utilizadas.

Se observa como:

- La resina más dura de las tres es la de poliéster, seguida de la acrílica y por último la epoxi.
- La que presenta mayores valores de desviación estándar es la resina epoxi, y la que menos, la resina acrílica.
- La resina de poliéster tarda 8 días en curarse, mientras que las otras dos tardan 5 días.

6. Resultados y discusión.

- Exceptuando la dureza del primer día de la resina epoxi, para una misma resina, todos los valores medios de dureza se encuentran en un rango de variación relativamente estrecho:
 - 5 % en poliéster.
 - 10 % en epoxi.
 - 8 % en acrílica.

Una vez determinada la evolución de la dureza de las tres resinas con el tiempo de curado, se ha procedido a realizar ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) sobre partículas de Al-N₂ empastilladas en las tres resinas anteriores, tal y como se describen en la secc. 5.3.3, para así validar directamente los razonamientos expuestos anteriormente. Los resultados se presentan en la tabla 6.4 y la figura 6.4.

Partículas Al-N ₂ empastilladas en resina de poliéster				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	24.75	0.69	60.67	3.36
2	25.63	0.63	56.57	2.88
3	25.40	0.49	57.55	2.18
5	25.80	0.77	55.85	3.16
8	26.66	0.35	52.22	1.38
15	24.43	0.61	62.29	3.05
Partículas Al-N ₂ empastilladas en resina epoxi				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	24.68	0.50	60.97	2.49
2	26.46	0.54	53.06	2.13
3	25.64	0.37	56.47	1.65
5	25.91	0.47	55.30	2.01
8	26.85	1.36	51.82	4.88
15	26.26	0.87	53.98	3.64
Partículas Al-N ₂ empastilladas en resina acrílica				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	25.73	0.85	56.20	3.77
2	26.60	0.53	52.50	2.15
3	25.82	0.43	55.71	1.83
5	26.51	0.70	52.89	2.91
8	26.39	0.35	53.28	1.43
15	26.03	0.56	54.83	2.41

Tabla 6.4. Valores obtenidos en los ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) realizados a partículas de Al-N₂, empleando las resinas de poliéster, epoxi y acrílica con varios grados de curado.

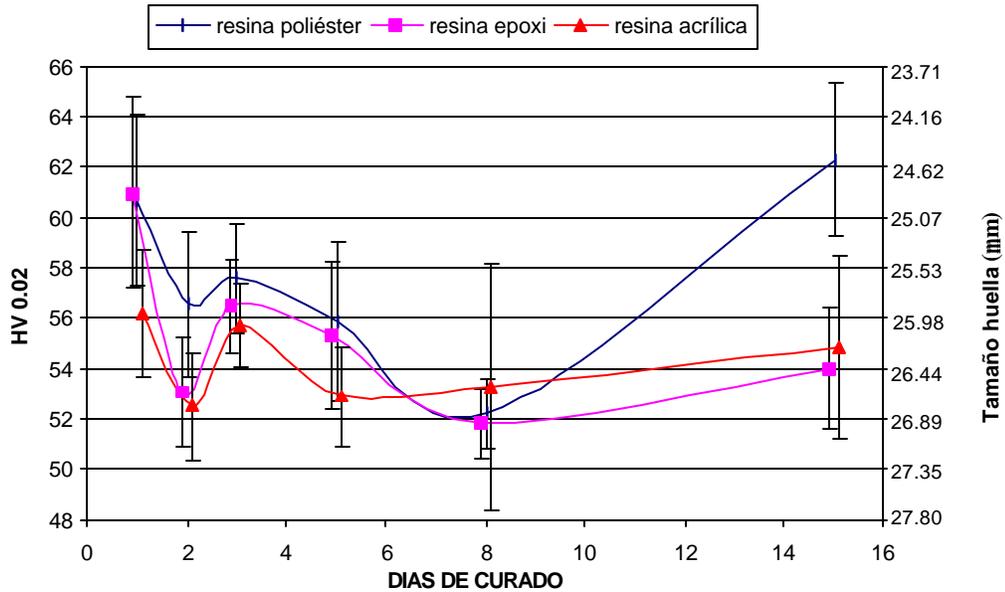


Figura 6.4. Valores obtenidos en los ensayos de microdureza ($Al-N_2^{*/*/20/0.60/15}$) realizados a partículas de $Al-N_2$, empleando las resinas de poliéster, epoxi y acrílica con varios grados de curado.

A la vista de estos resultados, se puede destacar:

- Primeramente, parece que se llega a la situación de equilibrio entre penetrador, partícula y resina, ya que si no fuera así, los valores obtenidos deberían tener una tendencia creciente o decreciente, de acuerdo a la variación de la dureza de la resina con el tiempo de curado, tal y como se ha razonado anteriormente. No obstante se ha seguido ahondando en esta cuestión en las siguientes experiencias.
- En general, y sobre todo para los primeros días de curado (fig. 6.4), la curva perteneciente a la resina de poliéster queda por encima de la resina epoxi y ésta por encima de la resina acrílica. No parece que esto sea especialmente significativo, ya que la diferencia entre unas y otras es muy pequeña ($3 \div 5 \%$). Además en los puntos de 8 y 15 días de curado se altera esa tendencia.

- Exceptuando 3 puntos de la gráfica, el resto se sitúa en un margen relativamente estrecho ($\pm 0.6 \mu\text{m}$ de desviación en el tamaño de huella), entrando dentro del margen de error que contempla la norma ($\pm 1 \mu\text{m}$).
- Se observa que la tendencia de las tres curvas tienen una evolución semejante. Esto difícilmente puede ser achacable al estado de las resinas porque no parece lógico que vayan a tener el mismo comportamiento relativo tres resinas completamente distintas. Se puede pensar en algún factor incontrolado de la máquina de ensayo, el cual toma un valor distinto cada día que se ensaya. En pruebas posteriores se ha intentado buscar explicación a esto.
- Hay 3 valores que sobresalen del resto. Estos son los correspondientes a los casos en los que se empleó resina de poliéster (1 y 15 días de curado) y resina epoxi (1 día de curado). En relación a esto, cabe decir que en el momento en que se ha hecho esta prueba, todavía no se era consciente de la gran influencia que tiene la velocidad de caída del penetrador (secc. 6.8) en los resultados, por lo que no se descarta que en estos casos se haya tomado una velocidad de caída algo distinta ($\pm 5\%$) a la del resto. Pruebas realizadas más adelante ratificarán este hecho.

6.3. TAMAÑO DE LA PARTÍCULA Y FORMA DE LA HUELLA.

En las probetas de partículas que en este proyecto se ensayan, se tienen partículas cuyo espesor es imposible conocer, ya que están embebidas en un bloque de resina. Esto conlleva a que se planteen situaciones como las presentadas en la figura 6.5, en la que se muestran varias geometrías representativas de las partículas.

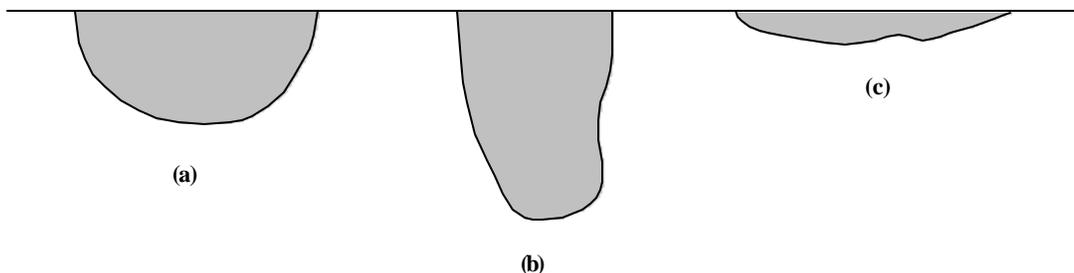


Figura 6.5. Diferentes formas de partícula empastilladas en resina y pulidas. (a) Partícula adecuada debido a su forma prácticamente semiesférica; (b) Partícula de pequeño diámetro a priori,

pero adecuada debido a su gran espesor; (c) Partícula adecuada a priori pero con pocas posibilidades de éxito debido a su pequeño espesor.

Debido a la forma del penetrador, la dirección predominante de la carga es vertical (7:1), por lo que el factor más influyente en la validez de la partícula para ser ensayada es su espesor. De hecho, la norma es más exigente en el espesor de la partícula que en el diámetro de la superficie a ensayar. En efecto, si se observa la figura 6.6, que representa el tamaño mínimo exigido por la norma, y se tiene en cuenta que $d/h = 7$, se obtiene que $H/h > 10.5$, mientras que $D > 3*d$, por lo que se requiere 3 veces más de partícula debajo de la huella que partícula al lado de la huella.

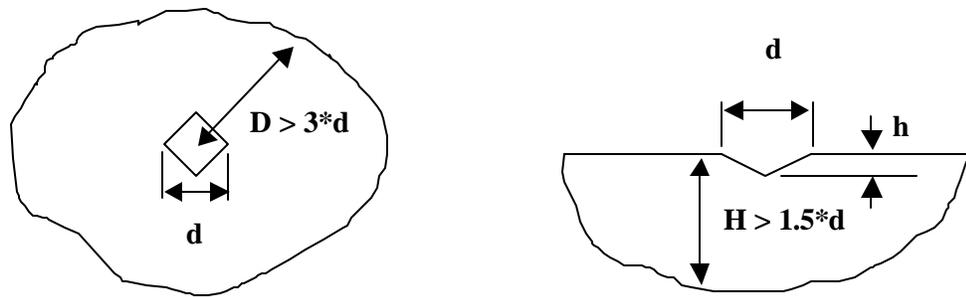


Figura 6.6. Dimensiones mínimas de las partículas, exigidas por la norma. (a) Vista en planta. (b) Vista de sección transversal.

Evidentemente, es aconsejable elegir partículas suficientemente grandes en relación al tamaño de la huella. De todas formas, nos podemos encontrar con que la partícula de la figura 6.5b puede dar resultado válido de microdureza, mientras que la partícula de la figura 6.5c, seguramente dará mal resultado.

Como se comentó en la secc. 6.2, la carga se transmite a través de la partícula, y llega a la resina generando una tensión que puede hacer plastificar a ésta última. Las probabilidades de que la resina se deforme, aumentan cuando disminuye el tamaño de la partícula porque la tensión llega a la resina con un valor mayor. En esta última situación, se pueden dar dos casos:

- 1) *Se llega al equilibrio:* La huella final en la partícula puede estar muy afectada por la plastificación de la resina, por lo que no se estará midiendo la verdadera microdureza de la partícula. Se puede decir que se está midiendo la microdureza del conjunto partícula-resina.

6. Resultados y discusión.

2) *No se llega al equilibrio*: Se presentan unidos dos factores que hacen que la huella no sea la adecuada:

- a) A igual que en el caso 1), la huella en la partícula puede estar muy afectada por la plastificación de la resina.
- b) Por el hecho de no alcanzar el equilibrio, como se comentó en la sección 6.2, se está midiendo una huella más pequeña que la que se mediría en el caso de equilibrio.

Para validar todos estos razonamientos, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) en partículas pequeñas (diámetro entre 65 y 100 µm) de Al-N₂, empastillándolas en las tres resinas ya mencionadas, tal y como se describe en la secc. 5.3.4. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.5 y en la figura 6.7.

Partículas pequeñas de Al-N₂ empastilladas en resina de poliéster				
Días curado	Huella (µm)	Desv. est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	31.00	5.72	41.83	12.71
2	28.36	2.49	47.06	7.52
3	28.21	3.17	48.03	9.15
5	30.76	4.85	41.88	12.27
8	30.55	5.65	42.91	12.45
15	27.17	3.08	51.79	9.63
Partículas pequeñas de Al-N₂ empastilladas en resina de epoxi				
Días curado	Huella (µm)	Desv. est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	31.21	6.31	42.20	14.89
2	29.61	5.74	45.08	10.10
3	27.39	1.94	50.10	6.44
5	29.12	3.55	45.32	9.30
8	29.82	3.87	43.56	10.17
15	30.59	6.21	43.69	14.54
Partículas pequeñas de Al-N₂ empastilladas en resina de poliéster acrílica				
Días curado	Huella (µm)	Desv. est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	30.01	3.65	42.76	9.20
2	29.41	3.20	44.09	8.10
3	27.27	1.46	50.29	5.17
5	26.62	1.82	53.00	6.74
8	28.09	2.36	47.86	7.40
15	27.93	3.69	49.49	10.51

Tabla 6.5. Resultados obtenidos en los ensayos de microdureza (Al-N₂/*/*/20/0.60/15) en partículas pequeñas variando las condiciones de la resina soporte.

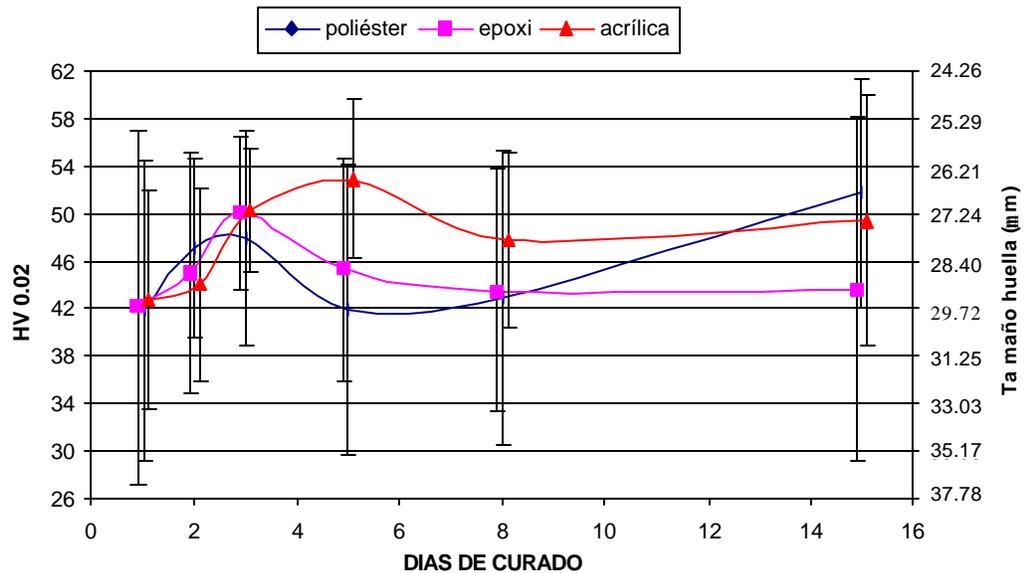


Figura 6.7. Resultados obtenidos en los ensayos de microdureza (Al-N₂*/*/20/0.60/15) en partículas pequeñas variando las condiciones de la resina soporte.

A la vista de los resultados se puede destacar:

- Se observa que el valor de la microdureza ha bajado (aproximadamente el 20%) y que la dispersión de los resultados ha aumentado considerablemente (aproximadamente 3 veces) en relación a lo obtenido en la secc. 6.2. Parece lógico pensar que se está midiendo la microdureza del conjunto partícula-resina, independientemente de que se haya llegado al equilibrio o no.
- Hay una misma tendencia entre las tres curvas de la figura 6.7. Es prácticamente la misma tendencia que la de las curvas de la figura 6.4, exceptuando los puntos para 1 día de curado. Las probetas ensayadas para obtener la figura 6.7, se han ensayado el mismo día que las probetas ensayadas para obtener la fig. 6.4, tal y como se comenta en la secc. 5.3.4, por lo que se podría pensar que esa tendencia corresponde a algún factor incontrolado de la máquina de ensayo.

Si se toma como referencia una huella con forma cuadrada y cuyo tamaño es el que corresponde exactamente al valor de su microdureza, a grandes rasgos, se pueden obtener

los tipos de huella que se esquematizan en la figura 6.8, la cual representa diferentes tipos de huella realizadas en partículas pequeñas.

Las huellas tipo (a) deben ser aceptadas como buenas. Si el valor de alguna de ellas es muy distinto a la media, debería ser descartada.

Las huellas tipos (b) y (c) siempre son mayores y siempre han de ser descartadas. El que sean mayores puede estar justificado porque la partícula sea tan fina que la huella se vea afectada por la resina, tal y como ya se ha comentado. En algunos casos, sencillamente puede ser por defectos de la propia partícula. La proporción de este tipo de huellas aumenta cuando disminuye el tamaño de partícula. En los ensayos de microdureza de la sec. 6.2 (con partículas cuyo tamaño está dentro de lo normalizado), este tipo de huellas representa aproximadamente el 10 % del total de las huellas, debiéndose probablemente a pequeños espesores en las partículas (fig. 6.5c). En los ensayos de microdureza realizados a partículas pequeñas, esta proporción sube a $40 \div 50$ % sobre el total.

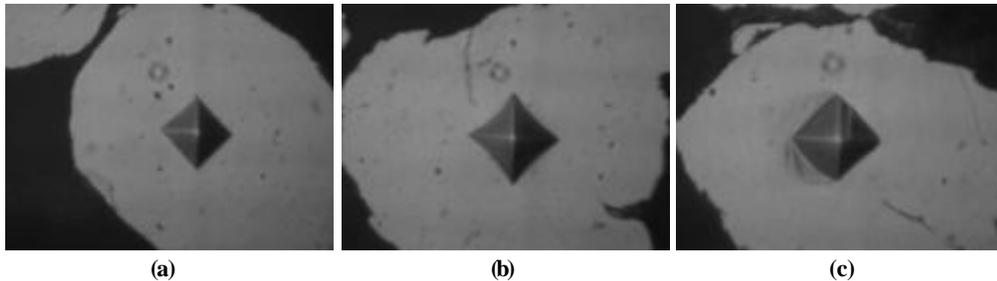


Figura 6.8. Tipos característicos de huella que se han encontrado al ensayar partículas pequeñas.

Por la experiencia adquirida a lo largo de todo el estudio, se podría cuantificar el tamaño de la partícula a elegir para el ensayo como aquella cuya distancia entre el centro de la huella y el borde de la partícula sea 4 veces el tamaño de la diagonal de la huella, reduciendo la exigencia de la norma que fija esa relación en 6 veces. La única forma de huella aceptable es la cuadrada (fig. 6.8a) y si algún valor es muy distinto a la media, se descarta.

A la vista de los resultados, se ha trabajado a partir de este punto solamente con la resina de poliéster para disminuir el número de variables.

6.4. ABSORCIÓN DE AGUA.

Una vez elegido un tipo de resina, a la hora de evaluar la variación de las propiedades de ésta, se ha pensado en dos factores fundamentales:

- *Tiempo de curado*: estudiado en las secciones 6.2 y 6.3.
- *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.

Se han realizado ensayos de microdureza a partículas de Al-N₂ empastilladas en una misma probeta de resina de poliéster, sometiéndola antes de cada ensayo a un secado cada vez más exhaustivo, tal y como se describe en la secc. 5.3.5. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.6.

MÉTODO DE SECADO	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (μm)	DESV. EST.	HV 0.02	DESV. EST.
15 s al secador	26.48	0.61	52.97	2.46
4 min al secador	26.82	0.46	51.61	1.76
4 min al secador + horno 35 °C, 24 h.	26.63	0.47	52.36	1.86

Tabla 6.6. Resultados obtenidos en los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/1/20/0.60/15) variando el método de secado.

Se puede observar que no hay variación significativa, estando los tres valores medios dentro de los intervalos de dispersión de los tres métodos. Si el estado de la resina tiene influencia en el resultado de microdureza del polvo, no parece que la absorción de agua por parte de la resina en el proceso de pulido sea importante.

A partir de este punto, se ha empleado el método de secado nº 2, es decir, se expone la probeta al aire caliente aportado por un secador durante 4 min aproximadamente, cuidando de no someter a la probeta a elevada temperatura.

6.5. TIEMPO DE APLICACIÓN DE LA CARGA.

6. Resultados y discusión.

Como se ha comentado en la secc. 6.2, el tiempo de aplicación de la carga influye directamente sobre el equilibrio de fuerzas entre el penetrador, la partícula y la resina. A mayor tiempo, más posibilidades de alcanzar ese equilibrio. No obstante, como se comentó en las secc. 6.2 y 6.3, si la partícula es pequeña en relación al tamaño de la huella, puede que aunque se alcance el equilibrio, la plastificación de la resina afecte directamente al tamaño y forma de la huella, con lo que no se estaría midiendo la verdadera microdureza de la partícula.

Para comprobar si existe un tiempo a partir del cual se detecta que se alcanza el equilibrio, en la tabla 6.7 y en la figura 6.9, se presentan los resultados de las experiencias descritas en la secc. 5.3.6, que consisten en ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.60/*) a partículas de Al-N₂ (grandes) empleando varios tiempos de aplicación de la carga.

TIEMPO (s)	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (µm)	DESV. EST.	HV 0.02	DESV. EST.
3	26.24	0.47	53.93	1.97
5	26.36	0.63	53.48	2.55
8	26.37	0.59	53.43	2.47
11	26.55	0.54	52.70	2.15
15	26.26	0.31	53.83	1.29

Tabla 6.7. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.60/*) variando el tiempo de aplicación de la carga.

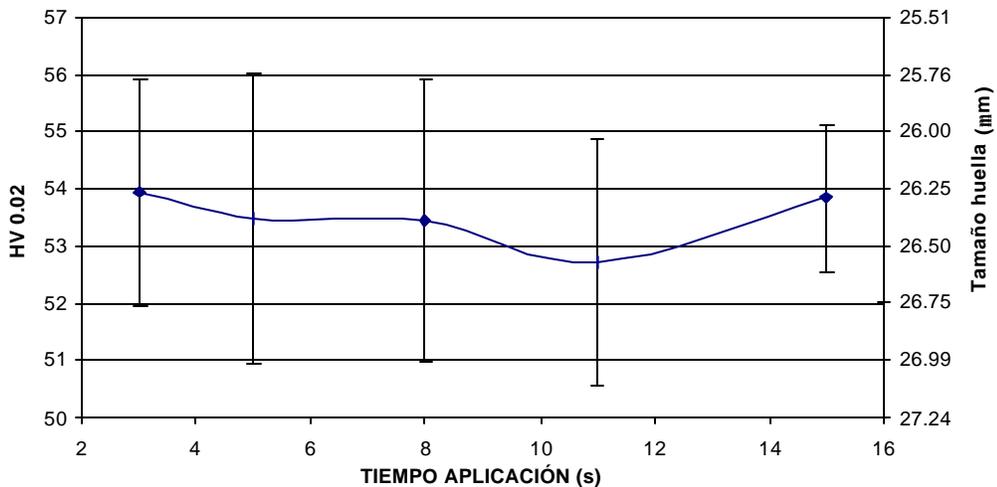


Figura 6.9. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.60/*) variando el tiempo de aplicación de la carga.

En principio, si este factor tuviera una influencia apreciable en el caso de las partículas empleadas en este estudio, cabría esperar tamaños de huellas más pequeños para tiempos pequeños pues todavía no se habría alcanzado el equilibrio, como se ha comentado al principio de este apartado. Atendiendo a los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que el equilibrio se produce en un tiempo muy corto debido a que no se observa diferencia significativa entre los valores obtenidos a distintos tiempos de aplicación de la carga. Hay que hacer notar que todos los intervalos de dispersión abarcan a todos los valores medios. Con el fin de ratificar estos resultados, se han realizado más adelante (secc. 6.8) nuevas experiencias que avalan lo indicado aquí.

6.6. VARIACIÓN DE LA CARGA APLICADA.

Al aplicar cargas mayores en el ensayo de microdureza, lógicamente se obtienen huellas mayores, ya que se alcanzan valores de tensión más altos (y viceversa cuando se aplican cargas menores). Cuando se elige una carga de ensayo, debido al propio mecanismo (balancín, roces, aceite, inercia, etc.), la carga real que le llega a la probeta difiere ligeramente (la norma permite ± 1.5 % de desviación) de la carga elegida, tal y como se comprobó en la secc. 4.8.2. A la hora de sustituir el diámetro de la huella en la fórmula de microdureza Vickers (ec. 2.3), se está considerando siempre que la carga es la elegida (en nuestro caso, 20 g). Se pretende evaluar si la variación de la carga real aplicada respecto a la elegida, incide en el tamaño de la huella en un rango estrecho a 20 g.

Los resultados obtenidos de las experiencias con una balanza, descritas en la secc. 5.3.7, para comprobar si existe variación de la exactitud y precisión de la carga al variar la magnitud de ésta, se presentan en la tabla 6.8. Se observa que no hay tendencia de variación de resultados, estando las desviaciones dentro de lo permitido por la norma.

CARGA IDEAL (g)	CARGA MEDIA MEDIDA (g)	DESV. EST.
15	15.09	0.12
20	20.08	0.16
25	25.09	0.08

Tabla 6.8. Resultados de las experiencias para determinar la exactitud y precisión de la carga variando el valor elegido de ésta.

6. Resultados y discusión.

Los resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/*/0.60/15) variando el valor de la carga de aplicación, descritos en la secc. 5.3.7, se presentan en la tabla 6.9. Una vez realizada la interpolación en torno a los 20 g de carga, que es lo que interesa, se obtiene la figura 6.10. Se recuerda que aunque se hayan utilizado cargas distintas a 20 g, a la hora de sustituir en la ecuación 2.3 para calcular la microdureza, se ha tomado como si la carga fuesen 20 g. Esto se ha hecho porque lo que se pretende evaluar es en cuánto varía la microdureza HV 0.02 al aplicarse cargas distintas a 20 g.

CARGA (g)	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (mm)	DESV. EST.	HV 0.02	DESV. EST
15	25.41	0.28	57.47	1.27
20	26.41	0.29	53.20	1.15
25	26.78	0.41	51.79	1.57

Tabla 6.9. Resultados de los ensayos (Al-N₂/A/curada/*/0.60/15) de microdureza variando el valor de la carga, presentados como HV 0.02.

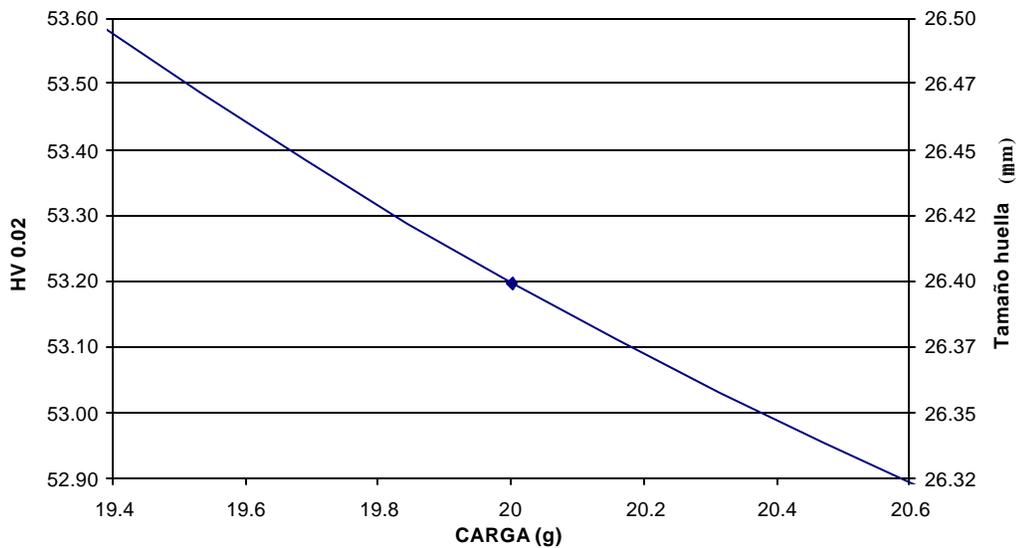


Figura 6.10. Interpolación en torno a 20 g de los valores de microdureza obtenidos en los ensayos (Al-N₂/A/curada/*/0.60/15).

Como se puede observar, la variación de la microdureza (53.20 ± 0.70 HV 0.02), o lo que es lo mismo, la variación del tamaño de la huella ($26.40 \pm 0.18 \mu\text{m}$), es bastante pequeña al variar la carga de aplicación en un rango estrecho a 20 g (en la secc. 6.2, se obtenían en casi todos los casos variaciones de $\pm 0.6 \mu\text{m}$). Esto puede abarcar a todos los efectos que hagan que la carga realmente aplicada difiera ligeramente de la carga ideal elegida, como podrían ser: mala colocación del eje de giro del balancín del sistema de cargas (fig. 4.3), mala colocación de la lámina que une el balancín con el eje de carga (fig. 4.3), algún pequeño roce entre piezas, etc.

6.7. VELOCIDAD DE CAÍDA DEL PENETRADOR.

Como se ha expuesto en la secc. 4.3, se puede hablar tanto de velocidad de caída del penetrador (v), como de tiempo de caída del penetrador (t), relacionados por la ecuación $6 \text{ (mm)} = v \cdot t$.

Los resultados obtenidos en los ensayos de microdureza variando la velocidad de caída del penetrador (Al-N₂/A/curada/20/*/15), que se describen en la secc. 5.3.8, se presentan en la figura 6.11 y la tabla 6.10. Se ha optado por representarlas para el tiempo de caída y no la velocidad de caída, porque al estar éstos relacionados por una ecuación no lineal, el intervalo de muestreo queda dividido más homogéneamente.

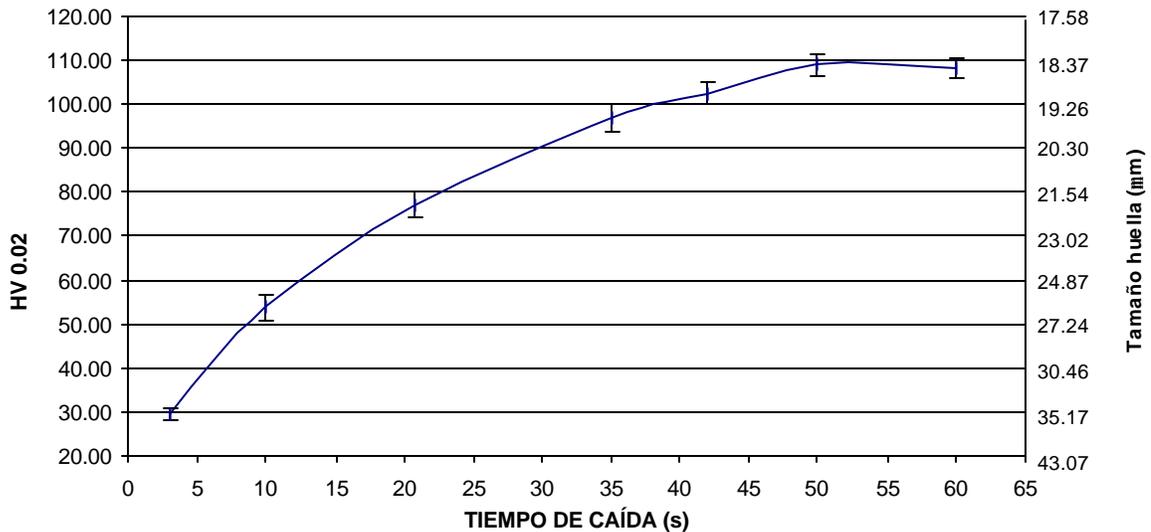


Figura 6.11. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/*/15) variando la velocidad de caída del penetrador.

VELOCIDAD DE CAÍDA (mm/s)	TIEMPO DE CAÍDA (s)	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (μm)	DESV. EST.	HV 0.02	DESV. EST.
0.10	60	18.52	0.19	108.17	2.22
0.12	50	18.46	0.25	108.97	2.59
0.14	42	19.03	0.22	102.47	2.62
0.17	35	19.61	0.35	96.57	3.42
0.29	21	21.98	0.42	76.86	2.93
0.60	10	26.25	0.70	53.94	2.90
2.00	3	35.38	0.84	29.68	1.41

Tabla 6.10. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/*/15) variando la velocidad de caída del penetrador.

Como se puede comprobar, la influencia es bastante acusada (la diagonal de la huella pasa de 18.52 μm a 35.38 μm) en comparación al efecto de variación de la carga aplicada (la diagonal de la huella pasa de 26.32 μm a 26.50 μm, secc. 6.6) y al efecto de variación del tiempo de aplicación (no hay tendencia en este caso, secc. 6.5).

Ahondando en el efecto de la velocidad de caída, se podría hablar de dos vías que contribuyen al tamaño final de la huella:

- 1) *Deformación por penetración*: Se puede definir como la deformación que produciría el penetrador si partiese con velocidad nula justamente encima de la superficie de la partícula y solamente fuese accionado por la fuerza peso.
- 2) *Deformación por la inercia del penetrador*: Se podría definir como la deformación que se produce al contactar el penetrador con la partícula con una determinada velocidad. Es indeseable. Esta deformación habrá que sumarla a la deformación producida por la fuerza peso.

Ambas deformaciones se esquematizan en la figura 6.12.

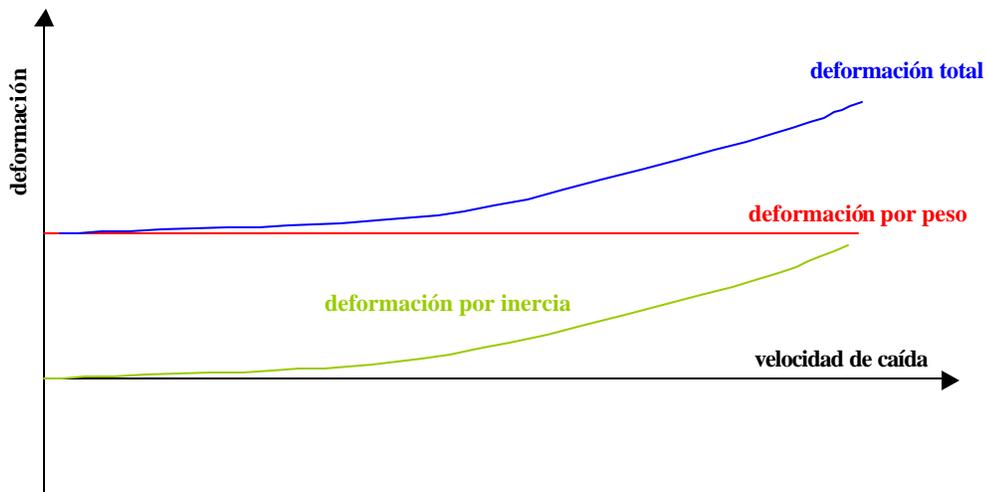


Figura 6.12. Deformaciones que afectan al tamaño de la huella variando la velocidad de caída del penetrador y manteniendo fija la carga.

En el microdurómetro que nos ocupa, a lo largo del ensayo, actúan cuatro fuerzas (peso, inercia, freno y reacción) sobre el penetrador de la siguiente manera (ver fig 6.13):

- 1) Antes de contactar partícula y penetrador (fig. 6.13a), éste último, debido a la velocidad que lleva en su caída, adquiere una inercia. Esta inercia se ve aumentada por la fuerza peso de la carga de ensayo, y disminuida por la oposición que se consigue con el sistema de ajuste de velocidad de caída. Lógicamente, la partícula no sufre ninguna deformación todavía.
- 2) Una vez el penetrador contacta con la partícula (fig 6.13b), la fuerza peso comienza a actuar sobre ésta desde el primer instante, generando una huella. La inercia que trae el penetrador, actúa en los primeros instantes hasta que la partícula la absorbe con su deformación (cuando se habla de partícula, se puede hablar del conjunto partícula-resina, como se ha comentado en varias secciones de este capítulo). La inercia hará que la huella sea mayor que la que infringiría solamente la fuerza peso. La partícula opone una fuerza de reacción, que será menor que la suma de la inercia y la fuerza peso, de ahí que se produzca deformación.
- 3) Una vez se ha alcanzado el equilibrio (fig. 6.13c), la fuerza de reacción que ejerce la partícula, iguala a la fuerza peso producida por la carga de ensayo (la inercia fue absorbida en los primeros instantes por la partícula), con lo que no se deforma más.

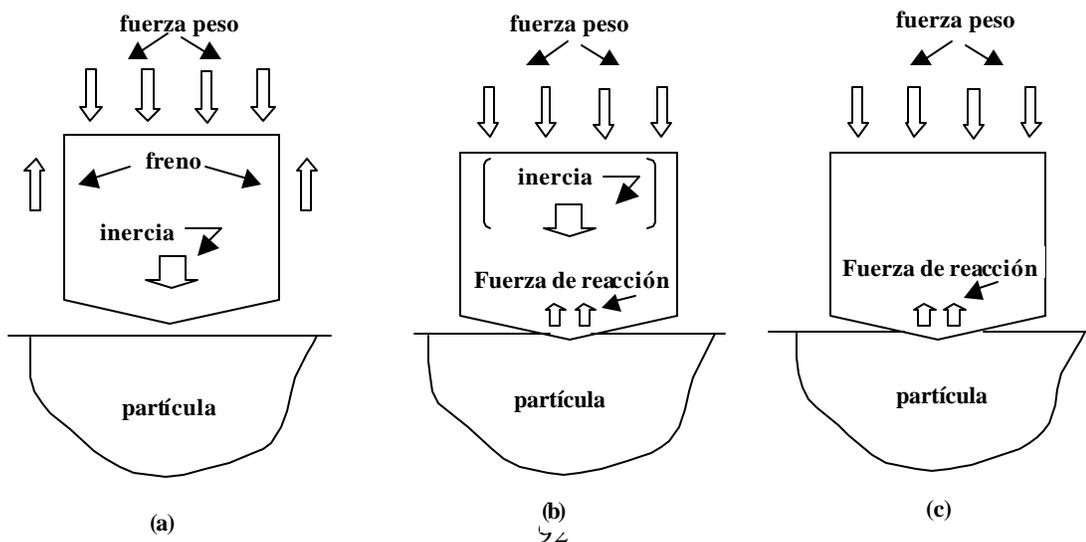


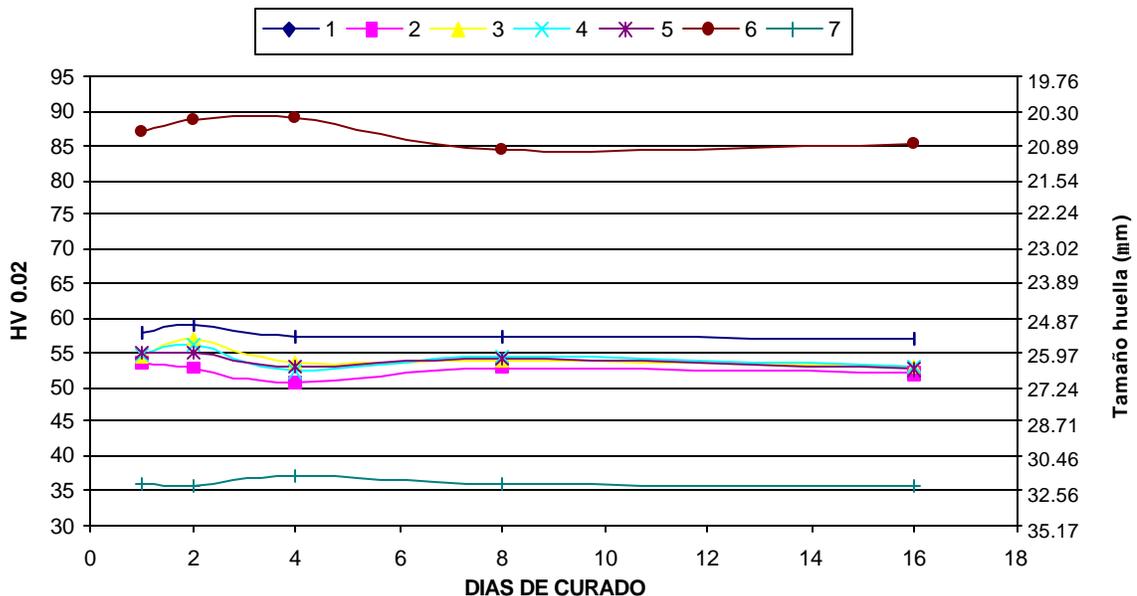
Figura 6.13. Fuerzas que actúan durante el ensayo Vickers empleando el microdurómetro ZWICK 3212. (a) El penetrador se está acercando a la probeta. (b) El penetrador está generando la huella. (c) Se ha llegado al equilibrio de fuerzas.

Ajustando este parámetro, se han obtenido mayores variaciones de las que se esperaban. Se puede llegar a triplicar la microdureza de la partícula Al-N₂. No se tenía constancia de este hecho hasta este momento.

6.8. INTERRELACIÓN DE FACTORES.

Con el fin de evaluar la posible influencia del tiempo de aplicación de la carga, carga de ensayo y velocidad de caída del penetrador, para distintos grados de curado de la resina, se han realizado, para distintos tiempos de curado (1, 2, 4, 8 y 16 días) la tanda de ensayos de microdureza que se reflejan en la secc. 5.3.9. Además, se ha intentado ver si de nuevo se repetía una misma tendencia de los valores de microdureza para cada día de ensayo, como ocurrió en las secc. 6.2 y 6.3.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 6.14 (no se representan las barras de error para mayor claridad en la figura) y en la tabla 6.11.



6. Resultados y discusión.

Figura 6.14. Valores obtenidos en los ensayos de microdureza variando la carga aplicada, el tiempo de aplicación de ésta, la velocidad de caída y el grado de curado de la resina de poliéster.

1 (tiempo 15 s, carga 15 g, velocidad 0.60 mm/s)					2 (tiempo 15 s, carga 25 g, velocidad 0.60 mm/s)				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	25.31	0.61	58.03	2.73	1	26.37	0.66	53.46	2.72
2	25.09	0.55	29.00	2.59	2	26.58	0.57	52.60	2.26
4	25.47	0.31	57.24	1.38	4	27.08	0.56	50.65	2.07
8	25.45	0.59	57.36	2.65	8	26.62	0.54	52.44	2.20
16	25.55	0.47	56.91	2.11	16	26.77	0.72	51.86	2.75
3 (tiempo 3 s, carga 20 g, velocidad 0.60 mm/s)					4 (tiempo 8 s, carga 20 g, velocidad 0.60 mm/s)				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	26.14	0.76	54.43	3.11	1	26.07	0.37	54.62	1.54
2	25.53	0.46	56.96	2.02	2	25.71	0.55	56.19	2.38
4	26.38	0.62	53.41	2.52	4	26.63	0.43	52.37	1.94
8	26.28	0.67	53.82	2.72	8	26.15	0.95	54.29	1.46
16	26.48	0.61	52.97	2.46	16	26.55	0.64	52.72	2.52
5 (tiempo 15 s, carga 20 g, velocidad 0.60 mm/s)					6 (tiempo 15 s, carga 20 g, velocidad 0.22 mm/s)				
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	26.00	0.57	54.98	2.40	1	20.65	0.54	87.13	4.43
2	26.00	0.72	55.01	3.00	2	20.46	0.34	88.69	3.00
4	26.50	0.90	23.00	3.55	4	20.41	0.40	89.15	3.52
8	26.24	0.52	23.96	2.13	8	21.00	0.66	84.36	5.29
16	26.56	0.45	52.65	1.79	16	20.88	0.39	85.16	3.20
7 (tiempo 15 s, carga 20 g, velocidad 2.0 mm/s)									
Días curado	Huella (µm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.					
1	32.16	0.72	35.91	1.61					
2	32.34	0.54	35.50	1.19					
4	31.69	0.66	36.98	1.50					
8	32.14	0.75	35.97	1.67					

6. Resultados y discusión.

16	32.26	0.46	35.66	1.02
----	-------	------	-------	------

Tabla 6.11. Valores obtenidos en los ensayos de microdureza variando la carga aplicada, el tiempo de aplicación de ésta, la velocidad de caída y el grado de curado de la resina de poliéster.

Se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Sigue sin detectarse una tendencia monótona creciente o decreciente con el tiempo de curado.
- Sigue existiendo una tendencia semejante para cada día en el que se hicieron las pruebas, de nuevo sin motivo aparente. Las curvas de velocidad de caída alta y baja (curvas 6 y 7 respectivamente), se separan un poco más de esta tendencia.
- Las curvas correspondientes a los ensayos en los que se ha variado el tiempo de aplicación de la carga (curvas 3, 4 y 5) se cortan entre sí, por lo que un corto tiempo de aplicación de la carga garantiza el equilibrio de fuerzas entre penetrador, partícula y probeta. Esto ratifica lo deducido en la secc.6.5.
- Las curvas de distinta velocidad de caída (curvas 5, 6 y 7), al igual que las de distinta carga (curvas 1, 2 y 5), mantienen aproximadamente el paralelismo entre ellas, por lo que no cabe esperar que el grado de curado de la resina agrave el efecto de variar los tres parámetros analizados: tiempo de aplicación (secc. 6.5), carga de ensayo (secc. 6.6) y velocidad de caída del penetrador (secc. 6.7).

6.9. DISTINTOS TIPOS DE PARTÍCULAS.

Los resultados obtenidos en los ensayos de microdureza (*A*/20/0.20/15) realizados a varios tipos de partículas (cuya elección se justifica en la secc. 5.3.10), empastilladas en resina de poliéster con varios grados de curado y resina epoxi (un solo grado de curado) se presentan en la figura 6.15 (con resina de poliéster) y en las tablas 6.12 (con resina de poliéster) y 6.13 (con resina epoxi).

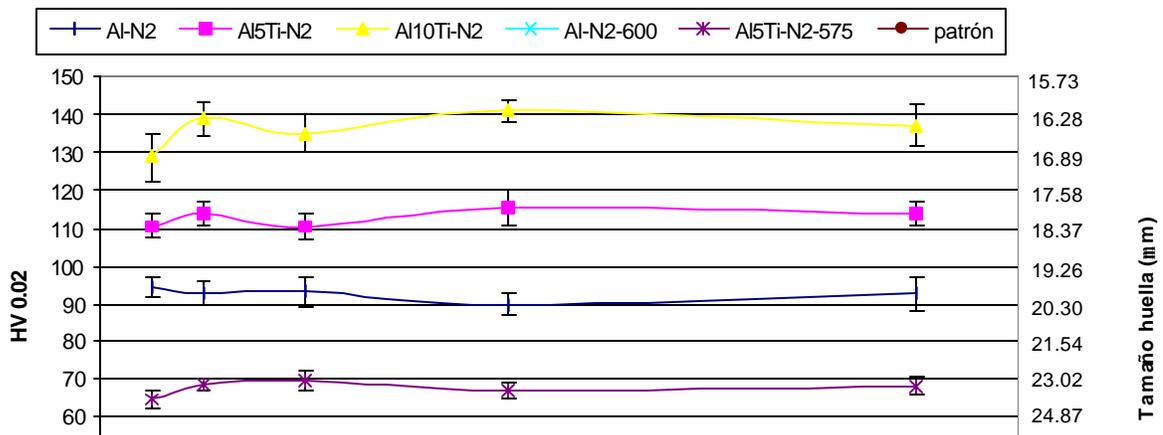


Figura 6.15. Resultados del ensayo de microdureza (*A*/20/0.20/15) en varias partículas variando el grado de curado de la resina de poliéster.

Al-N ₂					Al-N ₂ -600				
Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	19.86	0.27	94.13	2.58	1	30.62	0.34	39.58	0.88
2	20.00	0.31	92.82	2.88	2	31.19	0.28	38.14	0.69
4	19.97	0.41	93.16	3.80	4	30.90	0.35	38.87	0.87
8	20.33	0.33	89.91	2.91	8	30.82	0.38	39.08	0.94
16	20.04	0.47	92.55	4.23	16	30.71	0.26	39.36	0.66
Al5Ti-N ₂					Al5Ti-N ₂ -575				
Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	18.32	0.26	110.55	3.17	1	23.99	0.44	64.52	2.40
2	18.06	0.29	113.79	3.17	2	23.28	0.26	68.48	1.55
4	18.35	0.28	110.26	3.44	4	23.08	0.43	69.74	2.59
8	17.93	0.36	115.59	4.53	8	23.53	0.39	67.06	2.24
16	18.07	0.25	113.71	3.09	16	23.31	0.36	68.30	2.16
Al10Ti-N ₂					Patrón				
Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.	Días curado	Huella (mm)	Desv. Est.	HV 0.02	Desv. Est.
1	16.99	0.40	128.71	6.08	1	27.05	0.16	50.71	0.61
2	16.35	0.26	138.89	4.34	2	26.98	0.28	50.97	1.04
4	16.58	0.31	135.08	4.95	4	26.95	0.15	51.09	0.58
8	16.23	0.19	140.94	3.19	8	27.12	0.22	50.46	0.81
16	16.48	0.34	136.85	5.67	16	27.00	0.18	50.90	0.67

Tabla 6.1 2. Resultados del ensayo de microdureza (*A*/20/0.20/15) en distintos tipos de partículas variando el grado de curado de la resina de poliéster.

A la vista de estos resultados, cabe destacar lo siguiente:

- De nuevo se observa que el estado de la resina no influye en los valores obtenidos, siendo la precisión muy aceptable (alrededor de $\pm 0.60 \mu\text{m}$). Se observa como al ir aumentando el valor de la microdureza, hay mayor variación en los resultados obtenidos. No ocurre así con el tamaño de la huella. Esto ocurre por la no linealidad de la ecuación de la microdureza, tal y como se expuso en la secc.2.7.
- Se observa como al recocer los polvos disminuye considerablemente la microdureza (alrededor de un 50 %), y al añadir titanio, aumenta ésta (15 \div 20 % por cada 5 % de titanio añadido). La explicación a esto se expuso en la secc 3.1.3.2.
- Los ensayos sobre el patrón se introdujeron para intentar achacar la tendencia observada en gráficas anteriores (figs. 6.4, 6.7 y 6.14) a algún factor de la máquina de ensayo y no al estado de la resina. En este caso, no todas las curvas tienen la misma tendencia, por lo que la del patrón no aclara nada. Podría pensarse en que como las huellas de la fig. 6.15 se han medido con el sistema tradicional y las de las fig. 6.4, 6.7 y 6.14 con el sistema digital, pudiera achacársele a éste último algún defecto por el cual se obtuvieron las tendencias mencionadas. También se podría pensar que el sistema digital detecta unas variaciones que no detecta el sistema tradicional.

6.10. OTROS MICRODURÓMETROS.

Se han comparado algunos de los resultados obtenidos con el microdurómetro ZWICK 3212, con los obtenidos en otros microdurómetros de laboratorios afines a este Grupo: un microdurómetro de la marca NIKON, modelo MHT-4 y un microdurómetro de la marca KARL ZEISS JENA, modelo CBS.

En el resultado del ensayo de microdureza (secc. 5.3.11) realizado a partículas de Al-N₂ empleando el microdurómetro NIKON MHT-4, la diagonal de la huella obtenida mide 13.68 (± 0.30) μm . Este ensayo fue encargado a terceras personas por lo que no se tiene certeza segura de cómo se hizo. Como se ha expuesto en la secc. 5.3.11, la evolución de la carga de ensayo en esta prueba ha sido la que se recoge en la figura 6.16.



Figura 6.16. Evolución de la carga aplicada en el microdurómetro NIKON MHT-4, una vez contactan penetrador y probeta.

Antes de aplicar la carga de 15 g, transcurren 7.5 s en los que la carga se va aplicando progresivamente. Esto difiere claramente del método empleado en el microdurómetro ZWICK 3212, en el cual se aplican los 15 g desde un principio.

Empleando el microdurómetro ZWICK 3212 con 15 g de carga y una velocidad de caída del penetrador que anula el efecto de inercia (0.12 mm/s), se ha medido la microdureza de partículas de Al-N₂. El tamaño de huella obtenido en este caso es 16.86 (± 0.42) μm , 3 unidades mayor al obtenido con el NIKON MHT-4. Esta importante diferencia se podría explicar por lo siguiente: Al ir aplicando la carga como se presenta en la figura 6.16, durante los 7 primeros segundos, se transmite una carga menor de 15 g a través de la superficie de la huella (esta superficie va aumentando con la carga aplicada). Debido a esto, la secuencia de tensiones que se produce en la partícula, alcanza menores valores que en el caso en el que se aplican los 15 g desde un principio. Esto puede influir en el tamaño final de la huella.

A la vista de estos resultados y razonamientos, cabe pensar que los tamaños de huella obtenidos con el microdurómetro NIKON MHT-4, serán siempre menores que los obtenidos con el ZWICK 3212.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en la secc. 6.9 para distintos tipos de partículas, se han realizado ensayos de microdureza a éstas mismas, pero esta vez empleando el microdurómetro KARL ZEISS JEN A. Se ha empleado una carga de 25 g (carga mínima en ese equipo). 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), como se describe en la secc. 5.3.11. Los resultados se presentan en la figura 6.17 y la tabla 6.14.

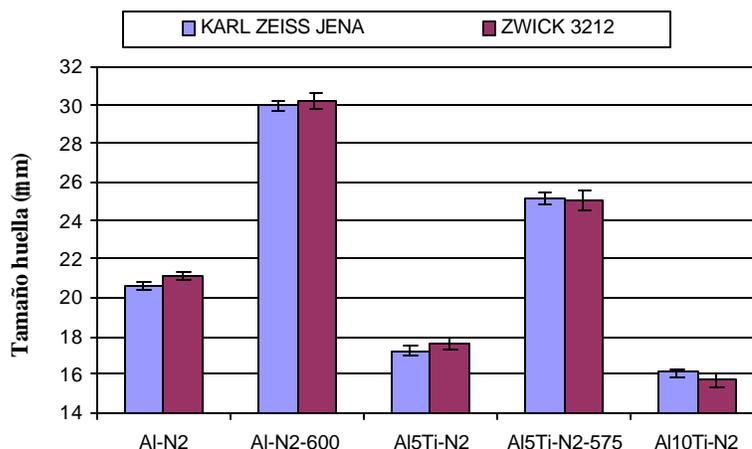


Figura 6.17. Comparación entre los tamaños de huella obtenidos en el microdurómetro KARL ZEISS JENA y el microdurómetro ZWICK 3212.

TIPO PARTÍCULA	PERITOS		ZWICK 3212	
	TAMAÑO HUELLA (μm)	DESV. EST.	TAMAÑO HUELLA (μm)	DESV. EST.
Al-N ₂	20.61	0.18	21.19	0.21
Al-N ₂ -600	29.94	0.27	30.22	0.45
Al ₅ Ti-N ₂	17.22	0.23	17.61	0.36
Al ₅ Ti-N ₂ -575	25.15	0.28	25.01	0.46
Al ₁₀ Ti-N ₂	16.09	0.28	15.71	0.31

Tabla 6.14. Comparación entre los tamaños de huella obtenidos en el microdurómetro KARL ZEISS JENA y el microdurómetro ZWICK 3212..

En el microdurómetro KARL ZEISS JENA, el penetrador llega con velocidad nula a la superficie de la partícula. Una vez ahí, la huella se genera gracias a la carga de ensayo. No hay efecto de inercia como en el microdurómetro ZWICK 3212.

En la secc. 6.7, se determinó que la velocidad de caída del penetrador con la que se elimina el efecto producido por la inercia en el microdurómetro ZWICK 3212, es 0.12 mm/s (50 s de tiempo de caída), por lo que empleando esta velocidad, se obtendrán huellas menores que las obtenidas empleando el microdurómetro KARL ZEISS JENA.

No se ha realizado un estudio del estado de éste microdurómetro, por lo que no se puede determinar con certeza su nivel de exactitud en los resultados.

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

Como se ha comprobado en la secc. 6.7, seleccionando una velocidad muy lenta de caída del penetrador (0.12 mm/s), se elimina la componente de inercia. En este caso, el penetrador puede desplazarse más lentamente mientras genera la huella, por lo que necesitaría más tiempo para alcanzar el equilibrio de fuerzas. Con el fin de comprobar este razonamiento, se han realizado ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.12/*) con esa velocidad y variando el tiempo de aplicación (secc. 5.3.12). Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 6.15 y la figura 6.18.

TIEMPO DE APLICACIÓN (s)	TAMAÑO MEDIO DE HUELLA (µm)	DESV. EST.	HV 0.02 MEDIA	DESV. EST.
3	18.57	0.17	107.79	1.96
15	18.45	0.21	108.97	2.52

Tabla 6.15. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N₂/A/curada/20/0.12/*) variando el tiempo de aplicación de la carga.

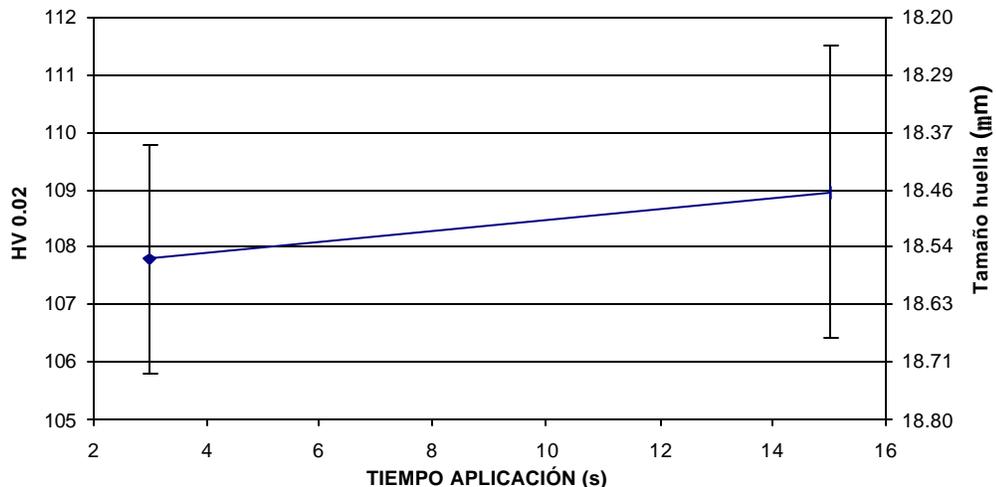


Figura 6.18. Resultados de los ensayos de microdureza (Al-N2/A/curada/20/0.12/*) variando el tiempo de aplicación de la carga.

Se observa que la diferencia es mínima entre ambos valores (1 punto de microdureza), y además cubiertos por la desviación. De nuevo se puede concluir que se alcanza el equilibrio en un corto tiempo de aplicación de la carga (menos de 3 s).

6.12. SIMULACIÓN POR ORDENADOR.

Como se ha comentado en la secc. 5.3.13, se ha intentado simular la interacción entre la resina y la partícula mediante el programa de análisis por elementos finitos ABAQUS 6.0. El problema a analizar consta de varios aspectos que lo hacen difícil de abordar: plasticidad, efectos de inercia, contactos entre sólidos, tridimensional, propiedades mecánicas desconocidas, etc. (ver secc. 5.3.13). Además, los resultados obtenidos con un programa de este tipo, debido a que entran en juego muchas variables, deben ser aceptados con la mayor precaución. En la medida de lo posible deberían ser comparados con los que se obtienen experimentalmente. No se han obtenido resultados por la no convergencia del algoritmo. Esto puede ser debido a los muchos factores que intervienen en la simulación: el contacto entre el penetrador y la partícula, el contacto entre la resina y la partícula, tipo de elemento, mallado, propiedades, intervalos de tiempo elegidos para el algoritmo, etc. Sin profundizar en demasía, se ha intentado simular el problema expuesto en la figura 5.9.

Primeramente, para caracterizar las propiedades de la resina, se han realizado ensayos de compresión. El resultado del único ensayo de compresión en el que la probeta no pandeó, realizado a resina de poliéster tras dos días de curado, se presenta en la figura 6.19.

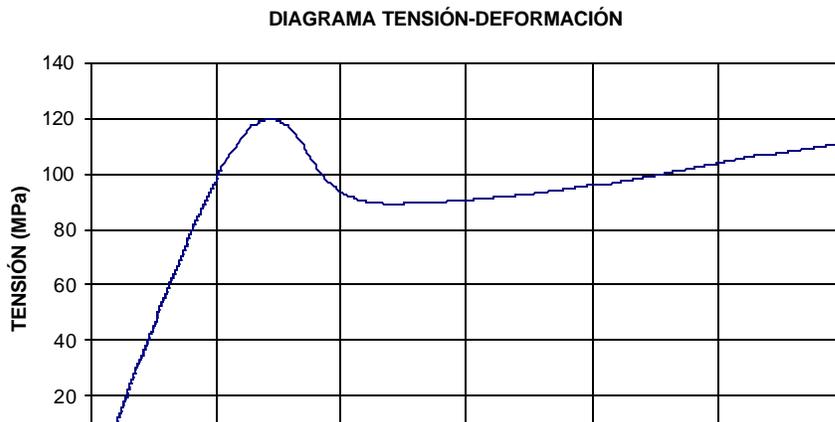


Figura 6.19. Resultados del ensayo de compresión realizado a la resina de poliéster tras dos días de curado.

De esta gráfica se obtiene que el módulo de Young de la resina de poliéster curada durante 2 días, es 4 GPa. También se obtiene información de la zona plástica en el caso de ser requerida.

En este análisis, en el que:

- Se ha eliminado el penetrador. La carga se aplica sobre una huella generada antes de aplicar la carga.
- Solo se han considerado deformaciones elásticas.
- Los valores asignados a las propiedades de la partícula y resina han sido:
 - Módulo de Young: 200 GPa a la partícula y 4 GPa la resina.
 - Coeficiente de Poisson: 0.25 a la partícula y 0.33 a la resina.

se ha obtenido la distribución de tensiones que se presentan a continuación.

La figura 6.20 representa la distribución de tensiones axiales en el eje vertical generadas en la partícula y la resina. En la figura 6.21 se amplía la zona de la partícula. Se observa una distribución de tensiones de compresión decrecientes en la partícula, conforme nos alejamos del penetrador en dirección vertical. En dirección horizontal ocurre lo mismo hasta llegar a una zona en la que se producen tracciones. La resina aparece comprimida en casi toda su extensión. Si se elige otra escala, se obtiene la figura 6.22, en la que se observa mejor el gradiente de tensiones en la resina.

6. Resultados y discusión.

En la figura 6.23 se representa la distribución de tensiones axiales en el eje horizontal. En la figura 6.24 se amplía la zona de la partícula. De nuevo, conforme nos alejamos del penetrador en dirección vertical, se observa una distribución de tensiones decrecientes en la partícula, hasta llegar a una zona en la que se producen tracciones. En la figura 6.25 se cambia la escala para ver mejor las tensiones en la resina.

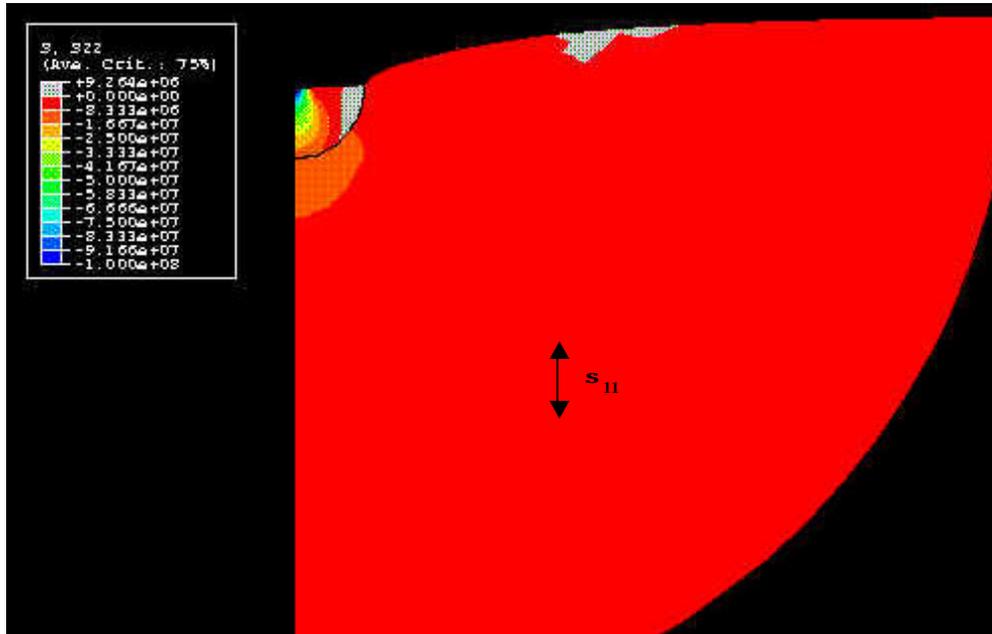


Figura 6.20. Distribución de tensiones axiales en dirección vertical S_{11} obtenidas en el análisis del problema simplificado.

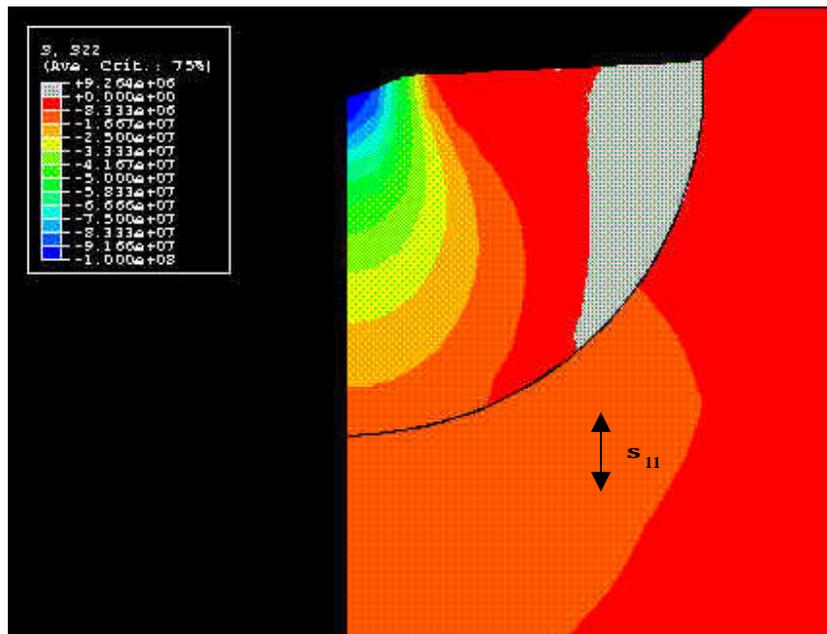


Figura 6.21. Distribución de tensiones axiales en dirección vertical S_{11} obtenidas en el análisis del problema simplificado. Zona próxima a la partícula.

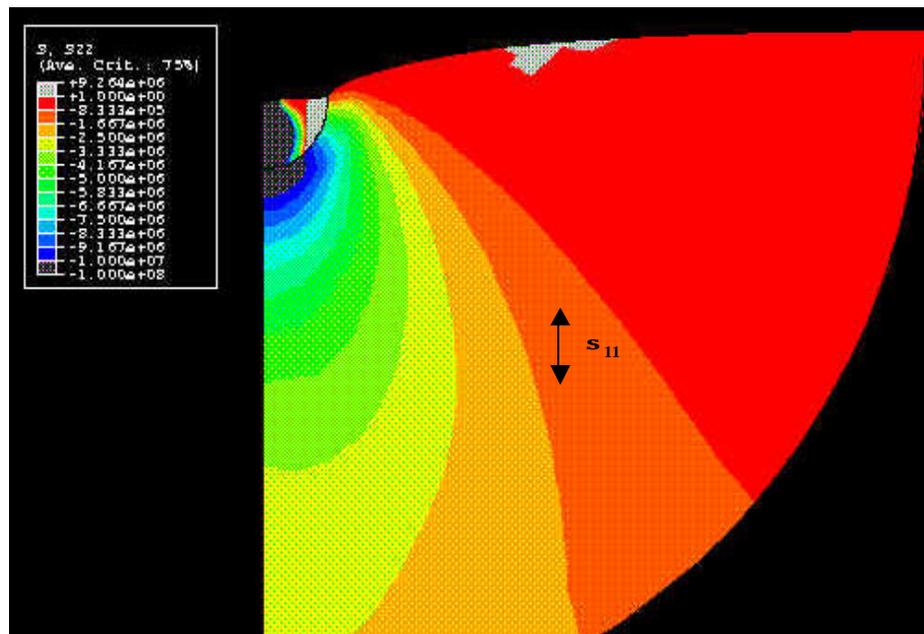


Figura 6.22. Distribución de tensiones axiales en dirección vertical S_{11} obtenidas en el análisis del problema simplificado.

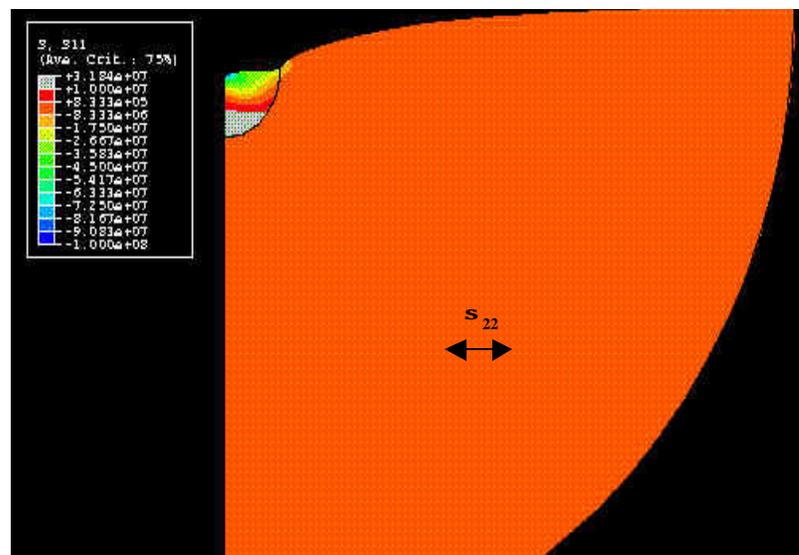


Figura 6.23. Distribución de tensiones axiales en dirección horizontal S_{22} obtenidas en el análisis del problema simplificado.

6. Resultados y discusión.

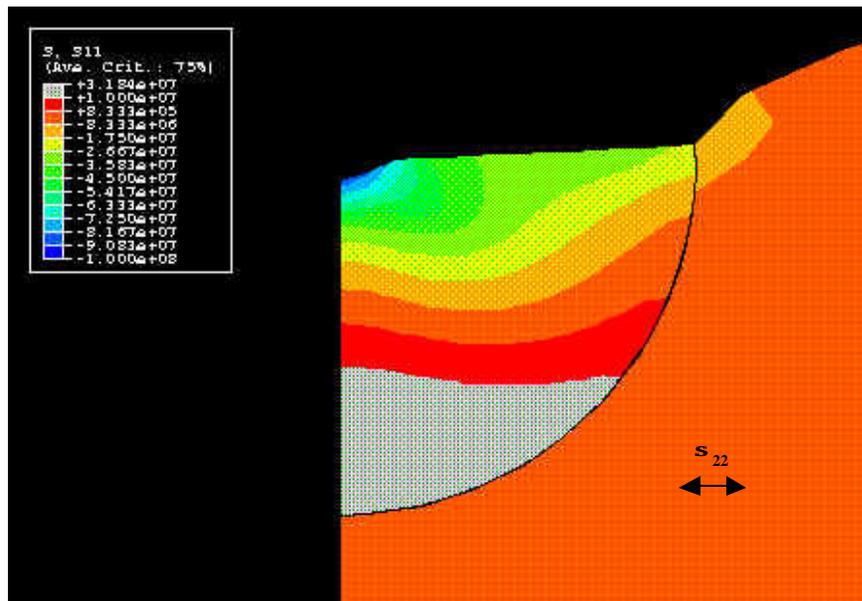


Figura 6.24. Distribución de tensiones axiales en dirección horizontal S_{22} obtenidas en el análisis del problema simplificado. Zona próxima a la partícula.

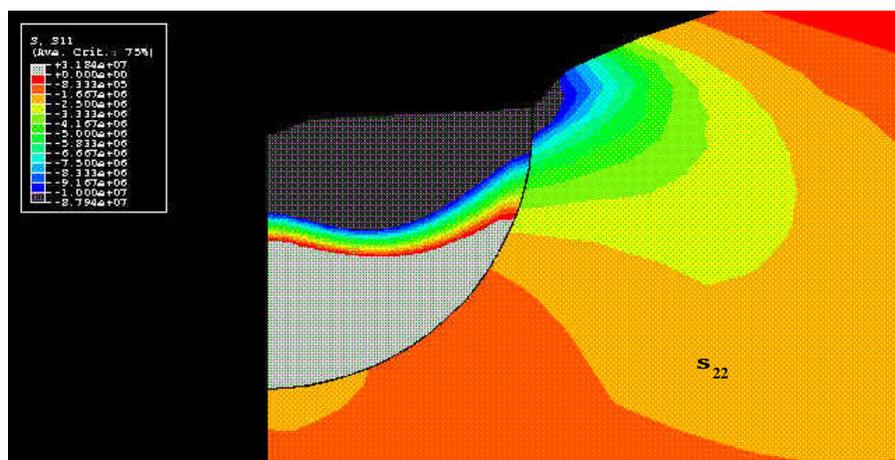


Figura 6.25. Distribución de tensiones axiales en dirección horizontal S_{22} obtenidas en el análisis del problema simplificado.



Debido a que no se ha entrado en profundidad en el análisis, estos resultados deben ser tomados con escepticismo ya que, aunque el algoritmo converja, no tiene porqué representar la realidad. De hecho, los saltos de tensión entre la partícula y la resina no parecen muy razonables.