

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE ODONTOLOGÍA  
ÁREA BÁSICA  
CURSO FÍSICA MATEMÁTICA

# **DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES ODONTOLÓGICOS FRÁGILES**

**Documento de apoyo para laboratorio #4**

Elaborado por Ing. Fredy Alexander Contreras Castañaza



**2018**

# DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES MECANICAS EN MATERIALES ODONTOLÓGICOS FRÁGILES

## 1. DEFINICION DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Las propiedades mecánicas definen la capacidad del material para resistir acciones externas o internas que implican la aplicación de fuerzas sobre el mismo. Esencialmente, estas fuerzas son de **compresión**, **tensión** (o extensión o tracción), **flexión** y de **impacto**.

## 2. RESISTENCIA A LA COMPRESION

La resistencia a la compresión es la carga (o peso) por unidad de área a la que el material falla (se rompe) por fracturación por *cizalla* o *extensional* (Figura 6). Esta propiedad es muy importante en la mecánica de materiales, tanto en situación no confinada (i.e., *uniaxial*) como confinada (i.e., *triaxial*). Dado que los materiales cerca de la superficie terrestre, incluyendo los edificios, suelen estar sometidos a condiciones no confinadas, consideraremos exclusivamente esta situación. En este caso, la **resistencia a la compresión uniaxial** (i.e., **longitudinal**) se mide en una prensa hidráulica que registra el **esfuerzo compresor** ( $\sigma$ ) aplicado sobre una probeta de material en una dirección del espacio, y la **deformación lineal** ( $\epsilon$ ) inducida en esa misma dirección.

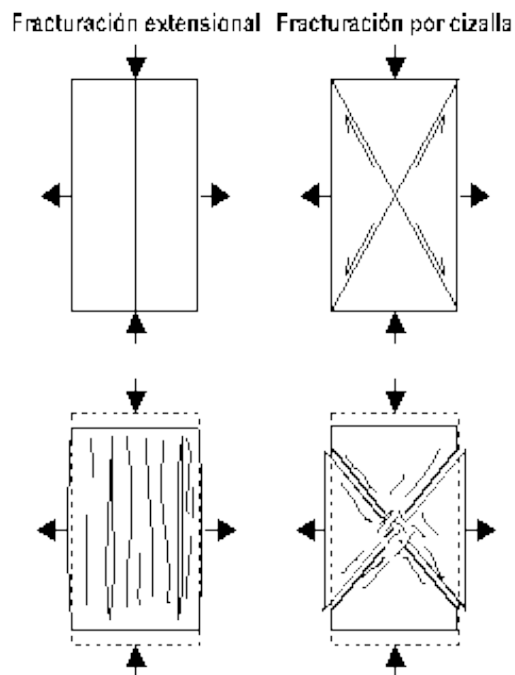


Figura 6. Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.

Es importante indicar que los resultados obtenidos en los experimentos de resistencia a la compresión para un mismo material dependen de la forma y tamaño de la probeta. Así, los prismas y cilindros largos presentan menores resistencias a la compresión que los cubos con la misma área de sección, y estos a su vez menor que los prismas y cilindros cortos (con alturas menores que sus lados o radios). Igualmente, la resistencia a la compresión depende de la tasa de aplicación de la carga, de forma que a mayores velocidades de compresión mayor es el valor de la resistencia. La metodología experimental puede seguir la norma ASTM D3148-86, según la cual las probetas de muestra serán cilíndricas, con una relación altura/diámetro comprendida entre 2.5 y 3 (e.g., 10 cm de altura por 4 cm de diámetro). Deben ensayarse al menos 5 probetas por cada tipo de material, manteniendo la tasa de aplicación de la carga constante (entre 0.5 y 1 MPa/s). Por otra parte, hay que evitar una mala colocación de la probeta en la prensa, para asegurar una distribución homogénea del esfuerzo compresor.

3. El **esfuerzo** es igual a la fuerza aplicada por sección o superficie:

$$\sigma_l = \frac{F_l}{S}$$

donde:  $F_l$  es la fuerza aplicada longitudinalmente, expresada en newtons en el sistema ( $N=kg \cdot m \cdot s^{-2}$ ), *dinas* en el sistema cgs o kilogramos-fuerza en el sistema técnico de unidades

$S$  es la sección de la probeta ( $m^2$ ) y

$\sigma_l$  es el esfuerzo lineal expresado en Pa ( $N/m^2$ ), *dinas/cm<sup>2</sup>* o *kg/m<sup>2</sup>* (las dimensiones del esfuerzo son las mismas que las de presión).

Dado que la fuerza es un vector, también lo es el esfuerzo. Así, dado que el signo de la fuerza se toma negativo por convenio cuando es compresiva, y positivo cuando es tensional, el esfuerzo compresor es negativo y el tensor es positivo.

4. La **deformación lineal unitaria** es igual al cambio de longitud experimentado por la longitud original de la probeta:

$$\varepsilon_l = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

donde:  $l_0$  (m) es la longitud original

$l_1$  (m) es la longitud final

$\Delta l$  (m) es el incremento de longitud de la probeta.

Puesto que al comprimir  $l_0$  es siempre mayor que  $l_1$ ,  $l$  y  $l$  son negativos (positivos para el caso de tensión). El valor de  $\varepsilon_l$  (que es adimensional) es generalmente muy pequeño para materiales pétreos (del orden de 0.01 y menores).

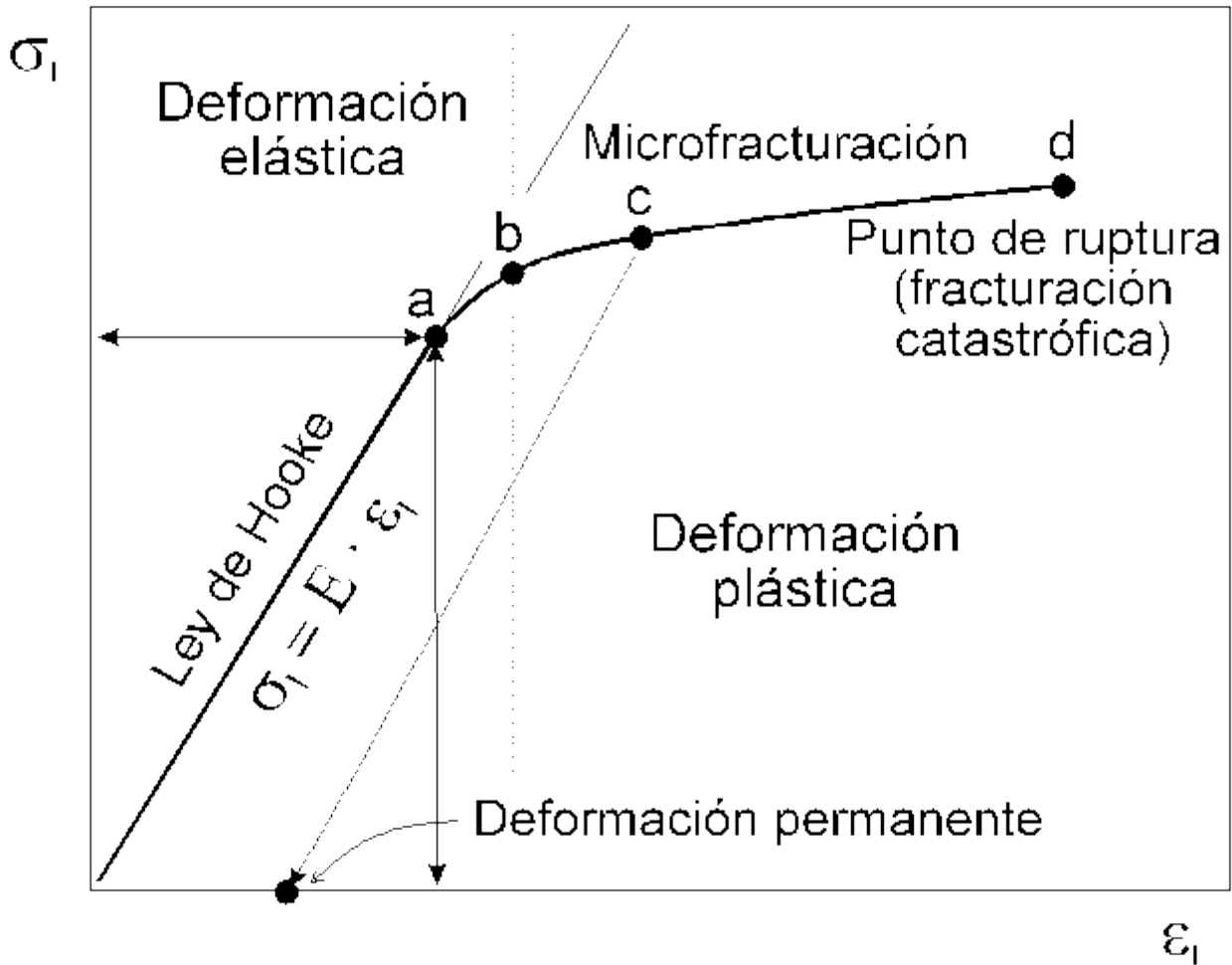
La deformación inducida sobre un cuerpo debida a la acción de un campo de fuerzas exteriores puede ser **elástica** o **plástica**. La deformación es elástica cuando el cuerpo recupera su forma y volumen iniciales una vez cesada la acción de las fuerzas externas. En caso contrario, la deformación es plástica (esto es, si la deformación persiste en parte). El que la deformación sea elástica o plástica depende de la naturaleza del cuerpo, de la temperatura, y del grado y tasa (velocidad) de deformación al que ha sido sometido. A temperatura constante, los materiales se comportan normalmente como elásticos cuando los esfuerzos aplicados son pequeños, si bien se tornan plásticos cuando los esfuerzos superan un cierto límite.

Para estudiar el comportamiento mecánico de los materiales, se recurre a la experimentación sometiendo a los mismos a esfuerzos progresivos y registrando la deformación resultante. Estos datos se expresan en diagramas  $\sigma_f - \varepsilon_l$  como los de la Figura 7, donde toma la forma de curvas similares (en forma) a las obtenidas en los ensayos de succión capilar. En la Figura 7 puede apreciarse un tramo de la curva  $\sigma_f - \varepsilon_l$  donde el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación. Este comportamiento constituye la **ley de Hooke**, que aplica solo para pequeñas deformaciones, hasta un límite denominado **límite de proporcionalidad**, representado en la Figura 7 por el punto **a**. En este tramo, el comportamiento del material es elástico, esto es, si se disminuye el esfuerzo aplicado lentamente, se recorre el mismo tramo de la curva en sentido contrario, hasta alcanzar el punto de origen donde el esfuerzo y la deformación son nulos. La proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación en el tramo de la ley de Hooke permite definir el **módulo de Young** o **módulo de elasticidad** ( $E$ ). Este módulo es la constante de proporcionalidad, de manera que:

$$E = \frac{\sigma_l}{\varepsilon_l}$$

donde el módulo de elasticidad  $E$  es positivo ( $\sigma_l$  y  $\varepsilon_l$  son negativos) y presenta las mismas dimensiones que el esfuerzo ya que  $\varepsilon_l$  es adimensional. El valor del módulo de Young es característico para distintos materiales, por lo que puede utilizarse para comparar las características mecánicas de los mismos.

(Tener en cuenta la figura 7 para la elaboración de la gráfica del reporte de laboratorio anotando los puntos principales con la tendencia de la gráfica a,c,d)



**Figura 7.** Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico.

Para deformaciones superiores al límite de proporcionalidad, existe un cierto tramo de la curva  $\sigma_f - \epsilon_f$  donde el comportamiento del material es elástico, aunque no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. El límite en el que el comportamiento del material deja de ser elástico se denomina **límite elástico**, representado por el punto **b** de la curva en la Figura 7.

Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico (punto **b**), la deformación aumenta rápidamente y es en parte permanente. Así, si se disminuye el esfuerzo aplicado lentamente a partir del punto **c** de la curva, se recorrerá el trayecto indicado por una flecha de puntos hasta alcanzar el punto donde el esfuerzo es nulo, pero existe una cierta deformación permanente (el cuerpo no recupera su longitud original). Al aumentar el esfuerzo se llega finalmente al punto **d**, denominado **punto de ruptura**, donde el cuerpo experimenta una fracturación catastrófica por cizalla o fisuración extensional. Este punto de ruptura define, en términos del esfuerzo compresivo, la **resistencia a la compresión** (R).

La resistencia a la compresión de los materiales es muy variable, oscilando entre las siguientes clasificaciones:

- **muy débiles** (<70 kg/cm<sup>2</sup>)
- **débiles** (70-200 kg/cm<sup>2</sup>)
- **moderadamente resistentes** (200-700 kg/cm<sup>2</sup>)
- **fuertes** (700-1400 kg/cm<sup>2</sup>) hasta
- **muy fuertes** (>1400 kg/cm<sup>2</sup>).

Las rocas naturales son relativamente resistentes a la compresión (no tanto a la tensión y flexión), aunque las rocas sedimentarias son las más débiles debido sobre todo a su mayor porosidad y variable grado de cementación, al igual que los hormigones (Tabla 3). Aunque no puede generalizarse el efecto del tamaño de grano, puede decirse que, en general, la resistencia a la compresión aumenta a medida que aumenta el tamaño de grano de los materiales, a igualdad de otras variables como composición mineral, estructura, porosidad, cementación, etc.

Tabla 3. Resistencia a la compresión de algunas rocas y materiales de construcción (modificado de Winkler, 1973).

	(Mpa)		kg/m <sup>2</sup> · 10 <sup>6</sup>		kg/cm <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup>	
Granito	97	310	10	32	1.0	3.2
Sienita	186	434	19	44	1.9	4.4
Gabro, diabasa	124	303	13	31	1.3	3.1
Basalto	110	338	11	34	1.1	3.4
Caliza	14	255	1	26	0.1	2.6
Arenisca	34	248	4	25	0.4	2.5
Gneiss	152	248	15	25	1.5	2.5
Cuarcita	207	627	21	64	2.1	6.4
Mármol	69	241	7	25	0.7	2.5
Pizarra	138	207	14	21	1.4	2.1
Hormigón	5.5	69	1	7	0.1	0.7

La resistencia a la compresión de rocas utilizada en monumentos granadinos son (valores obtenidos en seco por Guardia Olmedo et al., 1986, *Arte y Deterioro en los Monumentos Granadinos. Catedral, Chancillería y Palacio de Carlos V.* Universidad de Granada, 140 p.)

Tabla 4. Resistencia a la compresión de rocas utilizadas en monumentos granadinos (Guardia Olmedo et al., 1986).

Calcarenita:	75-500 kg/cm <sup>2</sup>
Travertino:	400-700 kg/cm <sup>2</sup>
Conglomerados:	200 kg/cm <sup>2</sup>
Caliza de Sierra Elvira:	600-900 kg/cm <sup>2</sup>
Mármol de Macael:	680-980 kg/cm <sup>2</sup>
Serpentinita:	400-700 kg/cm <sup>2</sup>

Las relaciones entre esfuerzo y deformación ilustradas en la Figura 7 son ideales, ya que representan un comportamiento estrictamente elástico para el material en el tramo lineal de la curva correspondiente a la ley de Hooke. No obstante, los materiales reales muestran relaciones esfuerzo-deformación más complicadas, no siguiéndose estrictamente la relación de linealidad. Esto significa que las curvas esfuerzo-deformación pueden presentar tramos **elásticos**, **casi-elásticos**, **semi-elásticos** y **no-elásticos** (o plásticos). Los tipos de curvas para materiales casi-elásticos, semi-elásticos y no-elásticos se representan en la Figura 8.

Por otro lado, los materiales pueden clasificarse como frágiles y dúctiles (Figura 9). Los **materiales frágiles** (como el vidrio) se rompen cuando se supera el límite elástico, (b y d son muy cercanos), mientras que los **materiales dúctiles** (como el acero o el cobre) presentan un tramo de comportamiento plástico amplio.

Los materiales pétreos pueden caracterizarse, en general, como frágiles bajo condiciones de temperatura ambiental (si bien a altas presiones y temperaturas presentan tramos plásticos más amplios, Figura 9). La deformación permanente entre el límite elástico y el punto de ruptura en los materiales heterogéneos como los pétreos se verifica a bajas temperaturas mediante una microfracturación frágil.

Esta microfracturación se produce sobre todo en el interior de los minerales que forman las rocas, a favor de su sistema de exfoliación, o entre microporos. El grado de microfracturación, que es controlado por las características texturales y estructurales de los materiales (e.g., tamaño de grano, porosidad, razón clastos/matriz, cementación, etc.), define en gran medida la forma de la curva esfuerzo-deformación. Así, puede generalizarse que los materiales pétreos con tamaño de grano fino tienden a ser casi-elásticos, mientras que los de grano grueso tienden a ser semi-elásticos, siempre a igualdad de otros factores.

Respecto de la porosidad, materiales compactos y poco porosos tenderán a un comportamiento casi-elástico o semi-elástico, mientras los materiales muy porosos y poco o moderadamente coherentes (esto es, escasamente cementados,

como las calcarenitas bioclásticas utilizadas en la construcción de edificios históricos de Granada o morteros de cal) tienden a un comportamiento semi-elástico o plástico. El comportamiento semi-elástico o plástico indica un rápido aumento de la deformación en los primeros incrementos de esfuerzo, lo cual se explica por acomodo de la carga por el movimiento relativo de los granos (gruesos) del entramado y/o deformación de los poros, pasándose a continuación a una situación en que la tasa de deformación es menor, esto es, de recuperación mecánica, en la que el esfuerzo y la deformación aumentan más o menos proporcionalmente una vez el entramado de granos ha adquirido cierta compactación (Figura 8).

Como puede deducirse de lo anterior, el módulo de Young sólo puede definirse en rigor cuando los materiales elásticos, ya que la proporcionalidad lineal entre esfuerzo y deformación no se verifica en los materiales casi-elásticos, semi-elásticos y plásticos. A pesar de ello, este módulo puede calcularse para partes determinadas de las curvas esfuerzo-deformación, aunque sin el conocimiento de sus formas este dato sirve de poco. No obstante, cuando los materiales son frágiles, y su comportamiento es elástico o casi elástico, el módulo de Young y la resistencia a la compresión nos permiten tener una idea bastante aproximada de las curvas esfuerzo-deformación, ya que en estos materiales el límite de proporcionalidad, el límite elástico y el punto de ruptura casi son coincidentes. En estos casos, el módulo de Young será muy útil para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales ante la acción de esfuerzos compresivos de tipo uniaxial.

Las anisotropías estructurales de los materiales, tales como superficies de estratificación o foliación, introducen lógicamente anisotropías mecánicas. Dado que estas superficies introducen debilidades mecánicas (i.e., los materiales se fracturan por extensión y cizalla más fácilmente a favor de las mismas), la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad disminuyen si el esfuerzo principal mayor (i.e., compresor,  $\sigma_1$ ) es paralelo u oblicuo (cercano a  $45^\circ$ ) a tales superficies. La resistencia a la compresión de materiales anisótropos es máxima cuando las superficies están orientadas perpendicularmente al esfuerzo principal mayor. Esto es importante en la estabilidad de las estructuras en los edificios y en los trabajos de restauración que impliquen sustitución de piezas por materiales estructuralmente anisótropos.



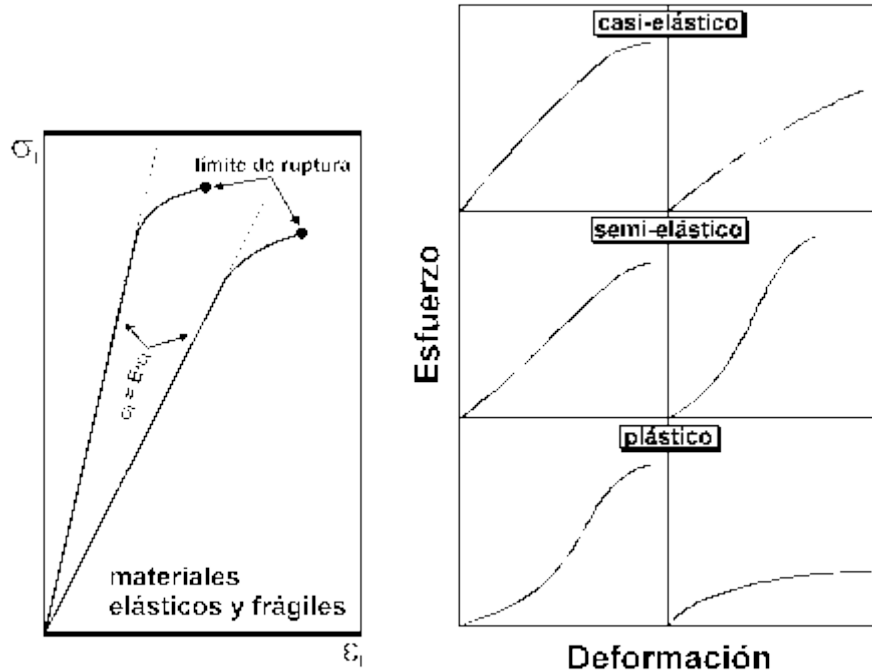


Figura 8. Curvas esquemáticas esfuerzo-deformación para materiales casi-elásticos (e.g., basaltos, granitos de grano fino), semi-elásticos (e.g., calizas, areniscas, mármoles) y plásticos (morteros de cal, morteros de yeso).

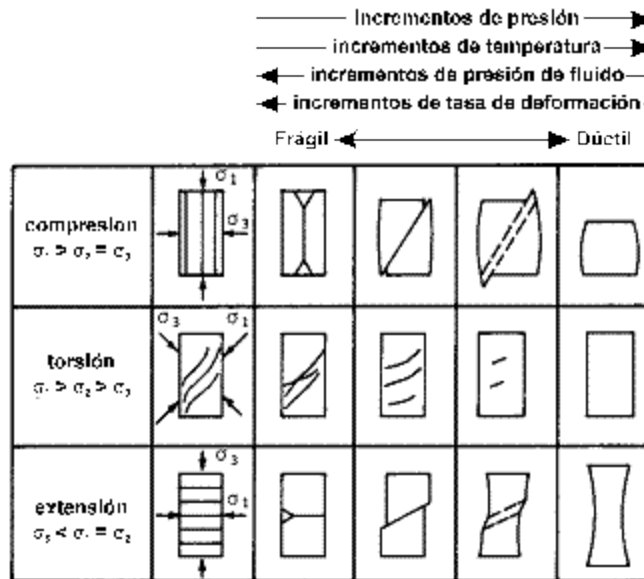


Figura 9. Deformación frágil y dúctil bajo compresión, torsión y extensión ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , son los esfuerzos principales mayor, intermedio y menor, respectivamente). Las flechas marcan las tendencias en el comportamiento de los materiales al variar la presión, la temperatura, la presión de fluidos localizados en los poros y la tasa de deformación.

Como se ha indicado más arriba, la presencia de agua en el interior del sistema poroso de un material altera sus propiedades mecánicas. Este efecto se debe dos causas: 1) al desarrollo de presiones hidráulicas en los poros rellenos de agua que afectan a los esfuerzos intergranulares (i.e., contactos de granos), y 2) a la alteración de las propiedades de superficie de los granos (minerales). Esto puede causar inestabilidad a lo largo de superficies más débiles y disminuir la resistencia a la cizalla o fricción, produciéndose una reducción más o menos significativa de su resistencia a la compresión.

5. La razón entre los coeficientes de resistencia a la compresión del material saturado en agua y seco, denominado **coeficiente de ablandamiento**, es una medida del efecto del agua sobre la resistencia a la compresión:

$$K_s = \frac{R_s}{R_d}$$

donde:  $K_s$  es el coeficiente de ablandamiento (adimensional)

$R_s$  (Pa) es la resistencia a la compresión del material saturado en agua y

$R_d$  (Pa) es la resistencia a la compresión del material seco.

Para algunos materiales muy porosos fácilmente empapables, este coeficiente tiende a 0, ya que  $R_s$  tiende a 0, mientras que otros materiales poco porosos como vidrios o aceros el coeficiente de ablandamiento tiende a 1, esto es, retienen sus propiedades mecánicas ante la presencia de agua. Los materiales con coeficientes de ablandamiento mayores de 0.8 se califican de resistentes mecánicamente respecto de la acción del agua. Los materiales con coeficientes menores de 0.8 nunca deben exponerse a la acción de la humedad (e.g., zócalos de elementos constructivos que sufren infiltración capilar), y en caso de exponerse, deben aislarse de la humedad con barreras impermeables o tratarse con productos hidrofugantes.

## 6. YESO UTILIZADO EN ODONTOLOGÍA

El yeso es un mineral que se encuentra en la naturaleza con cierta abundancia. Es materia cerámica, y si se analiza su estructura con microscopía electrónica o a través de difracción de radiaciones, puede detectarse su naturaleza multicristalina, similar a como está constituida una porción de esmalte dentario.

El análisis de la composición de esos cristales muestra que contiene azufre, oxígeno, calcio, en forma de sulfato de calcio e hidrógeno combinado con oxígeno en forma de agua de cristalización, lo que hace estable la estructura al igual que sucede en los cristales de fosfato de calcio que constituyen la hidroxiapatita.

Estequiométricamente, esa agua de cristalización está en relación de dos moles de agua por cada mol de sulfato de calcio, por lo que de modo esquemático es común representar o describir al yeso como un sulfato de calcio dihidratado.

## **7. ALMACENAMIENTO Y MANEJO DEL YESO**

Es conveniente conservar el polvo en algún recipiente con cierre hermético que lo proteja de la humedad. Conviene también agitar el recipiente que lo contiene previo a abrirlo, para lograr una distribución uniforme de partículas que se puedan formar y que posean diferente granulometría; lo que nos asegurará trabajar con un material homogéneo.

## **8. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL YESO UTILIZADO EN ODONTOLOGÍA**

La resistencia de los productos derivados del yeso se expresa en términos de la resistencia a compresión, a pesar de esto, también se debe tener en consideración la resistencia a tracción para asegurar una descripción completa de las características resistentes del material analizado.

Según la teoría del fraguado, la resistencia del yeso dental o piedra, aumenta con rapidez a medida que el material endurece después del tiempo de fraguado inicial. Sin embargo,, el contenido de agua libre del producto del fraguado afecta claramente su resistencia; por lo que se distinguen dos resistencias al momento de analizar yeso:

- Resistencia Húmeda
- Resistencia Seca

La resistencia húmeda es la obtenida cuando en la muestra existe exceso de agua respecto al requerido para la hidratación del mismo. Da una sensación seca semi-saturada al tocarlas muestras realizadas (humedad percibida al tacto sin escurrir).

La resistencia seca es cuando se elimina el exceso de agua de la muestra por desecación, el valor de la resistencia seca puede llegar a ser más del doble de la resistencia húmeda.

El efecto del secado en la resistencia a la compresión del yeso fraguado es interesante, ya que se considera resistencia húmeda durante las primeras 12 horas luego de fraguado. Según estudios, luego de 16 horas existe muy poco aumento en la resistencia. Durante las primeras 8 horas solo posee dureza superficial.

La resistencia seca se logra medir luego de 24 horas, asegurando un secado sin cambios significativos de temperatura (temperatura constante), para que el material no sufra cambios de volumen que originen grietas o microfracturas que debiliten la pieza.

La incorporación de un acelerador o retardador de fraguado, disminuye las resistencias tanto húmeda como secas del yeso. Esta disminución puede atribuirse parcialmente a que estos productos poseen sales que adulteran y/o reducen la cohesión intercrystalina del yeso.

Desde el punto de vista de las propiedades fisicomecánicas de los materiales, la selección de un producto derivado del yeso se basa no solo en su resistencia a compresión, sino en el tiempo de fraguado, granulometría (fineza), Expansión máxima y mínima luego de fraguado y sobre todo en la relación agua polvo al momento de la formulación.

En la tabla 5 se muestra la descripción de Tipos de productos derivados del yeso

*Tabla 5. Descripción de características fisicomecánicas de productos derivados del yeso (Sanchez A., Mejía F. Análisis de esfuerzos de compresión bajo normas E-9, E-11 y E-14, Universidad Pontificia Bolivariana, 2009)*

Tipo	Tiempo de fraguado (min)	Fineza		Expansión del fraguado en 2 h		Resistencia a la compresión 1 h*		Relación agua-polvo
		Pases 150 $\mu\text{m}$ (%)	Cribas 75 $\mu\text{m}$ (%)	Min (%)	Máx (%)	Kg/cm <sup>2</sup>	psi	
I. Yeso de Impresión	4 $\pm$ 1	98	85	0,00	0,15	40 $\pm$ 20	580 $\pm$ 290	0,50 - 0,75
II. Yeso para modelos	12 $\pm$ 4	98	90	0,00	0,30	90	1300	0,45 - 0,50
III. Yeso piedra dental	12 $\pm$ 4	98	90	0,00	0,20	210	3000	0,28 - 0,30
IV. Yeso piedra dental alta resistencia	12 $\pm$ 4	98	90	0,00	0,10	350	5000	0,22 - 0,24
V. Yeso piedra dental de alta resistencia y expansión	12 $\pm$ 4	98	90	0,10	0,30	490	7000	0,18 - 0,22

\*= Los valores representan el mínimo