

CIENCIAS

FISICAS Y MATEMATICAS

LO QUE HOY SE SABE ACERCA DE LAS CAUSAS DE LA ROTURA EN LOS CUERPOS SOLIDOS

POR EL PROF. JULIO CARRIZOSA VALENZUELA
JEFE DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO DE MATERIALES
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL

ESPECIAL PARA "UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA"

Introducción.—Aunque a primera vista parece sencillo descubrir y precisar las causas que producen la rotura en los cuerpos sometidos a un género de esfuerzo determinado, a poco que se profundice esta cuestión, aparecen dificultades que todavía no han sido resueltas satisfactoriamente. Nos proponemos en esta publicación dar alguna idea sobre el estado actual del problema, complementando lo dicho en nuestro curso de resistencia de materiales con las ideas y experiencias más recientes.

Sobra hacer hincapié respecto de la importancia que tendría para la ciencia una completa dilucidación de este fenómeno. No solamente si se considera la ciencia del ingeniero constructor, quien debe dictar las normas para que una estructura resista y perdure, sino si se mira a la ciencia en general, que está interesada en todo proceso que depende, como éste de la rotura, de la íntima constitución molecular de la materia.

Una definición de rotura.—La primera dificultad se presenta cuando tratamos de precisar el concepto mismo de rotura. Se discute aún sobre si la sollicitación llamada de rotura ha de ser la que produce una separación en pedazos del material, o la que provoque el desalojamiento plástico del mismo. Sin embargo, cualquiera de estos extremos es igualmente vago. Son muchos los estados que acusarían una disgregación de la materia, y muchos los estados de plasticidad, y no hay que olvidar que una definición científica debe consistir en la expresión unívoca y cuantitativa del fenómeno, la que sólo se obtiene mediante una ex-

presión analítica del mismo. De aquí que R. M. L'Hermite (Les methodes modernes d'étude physique et mecanique des corps solides) haya tratado de caracterizar la rotura analíticamente por el potencial interno del cuerpo, conforme al teorema de Lagrange, o sea, que la rotura del equilibrio elástico se produce cuando dicho potencial es máximo. La interpretación física de este principio en general conduce al establecimiento de una expresión del potencial en la cual habrá que tener en cuenta no sólo el trabajo total de las fuerzas exteriores, sino la parte de este trabajo empleada en transformaciones plásticas irreversibles y el equivalente energético del calor absorbido. (Véase también Markus Reiner and Alfred Freudenthal: A dynamical theory of strength. Proceedings of the fifth International Congress for applied Mechanics). Mediante estas consideraciones puede decirse que *“la rotura se produce cuando el incremento de la energía disipada en las transformaciones plásticas y térmicas es igual al incremento de la energía exterior”*.

Puede decirse, naturalmente, que la rotura se produce cuando las tensiones interiores concomitantes de la sollicitación de fuerza respectiva, ha logrado vencer la cohesión de la materia. Sería preciso, según este modo de ver el problema, estudiar la naturaleza de estas fuerzas intermoleculares e interatómicas de cohesión, y definir las condiciones en que ellas pudieran ser superadas o anuladas. Esto nos llevaría al análisis de las hipótesis sobre las diversas formas de agrupación atómica en los cuerpos cristalinos, vítreos y policristalinos, a fin de deducir las acciones recíprocas moleculares de carácter mecánico llamadas *enlaces*, que se traducen en el fenómeno de cohesión, el cual debe poder explicar todas las demás propiedades de la materia sólida, como la tenacidad, plasticidad, fragilidad, etc., que son otras tantas cualidades mecánicas de la materia considerada desde un punto de vista macroscópico.

Sin embargo, a pesar de que el derrotero señalado es el que se presenta como más lógico al espíritu, es poco lo que se ha progresado en el conocimiento de estas fuerzas de cohesión. Desde Laplace, y como consecuencia obligada de la ley de Newton, se extendió al campo atómico la acción gravífica, a pesar de que el mismo Newton y sus continuadores consideraron que estas fuerzas eran de naturaleza distinta (1).

(1) V. Todhunter and Pearson. A History of the Elasticity, p. 93.

Laplace supuso por consiguiente que dos moléculas ejercen entre sí una atracción proporcional a sus masas y que esta atracción depende de la distancia que las separa, conforme a una ley no conocida, es decir: $mm'f(r)$ en que m, m' , son las masas de las moléculas, r su distancia y $f(r)$ una función desconocida de esta distancia (2).

Poisson partió también como Laplace de la acción mutua molecular para deducir una expresión de la tensión en los cuerpos elásticos, y así mismo, Cauchy, dándose además una determinada estructura molecular, dedujo las llamadas relaciones de Cauchy que él creyó eran una consecuencia obligada de esta hipótesis, aunque más tarde se demostró lo contrario (3).

Trabajos recientes (4) parecen llevar a la conclusión de que, si no por el momento, en un futuro próximo, será posible establecer una conexión entre las magnitudes que determinan la conducta de un material bajo la deformación elástica, y las respectivas fuerzas de cohesión o enlaces atómicos y moleculares. Según estos puntos de vista no parece posible considerar las fuerzas de cohesión sino como la resultante de fuerzas atractivas y repulsivas. De otra manera sería imposible explicar la resistencia que presentan los cuerpos a ser dilatados y también comprimidos. Por otra parte, tampoco puede prescindirse en la consideración de estas acciones recíprocas, de la variación de la temperatura.

Esquemáticamente puede representarse la variación de la fuerza interatómica según el diagrama siguiente, fig. 1:

Puede distinguirse en el diagrama la variación de la fuerza atractiva que, según A. F. Joffe: *The Physics of crystals*, obedece a la ley:

$$\sigma_a = \frac{mA}{r^{m+1}}$$

Así mismo la fuerza repulsiva está expresada por la fórmula:

$$\sigma_R = - \frac{nB}{r^{n+1}}$$

(2) V. H. Poincaré. *Capillarité*.

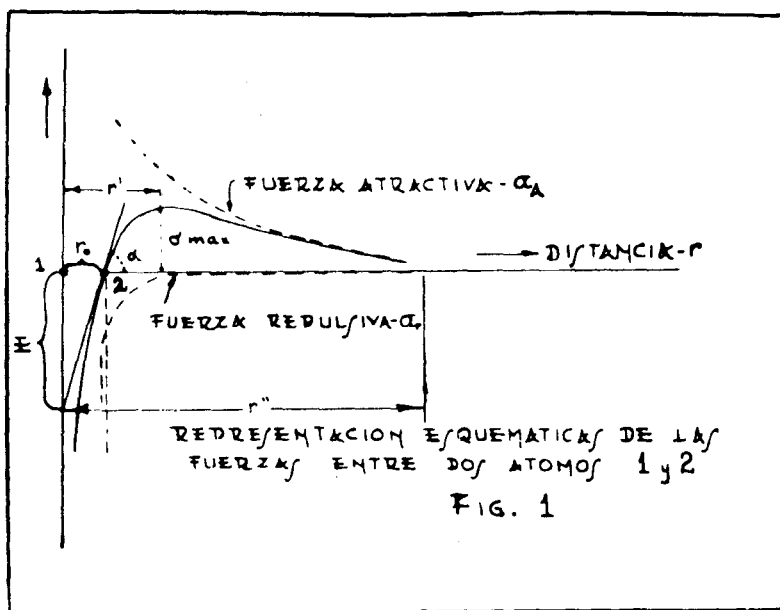
(3) Cauchy: *Exercices de Mathematiques*, to. 2, p. 42. — V. A. E. H. Love. *A treatise on the mathematical theory of elasticity* 4th Edition, p. 616.

(4) V. Dr. R. Houwink: *Elasticity, Plasticity and Structure of Matter*, p. 22.

en que n , m , A y B son constantes. Evidentemente la fuerza resultante representada en la parte rayada del diagrama tendrá por expresión:

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_R = \frac{mA}{r^{m+1}} - \frac{nB}{r^{n+1}}$$

en la cual el valor de n ha de ser siempre mucho mayor que el de m .



Como aparece en el gráfico, a la distancia interatómica r_0 , es decir, a la separación que los átomos guardan cuando no están influenciados por una fuerza exterior, la resultante σ entre ambas fuerzas es nula, y los átomos sólo ejecutarían vibraciones caloríficas alrededor de su posición de equilibrio, siempre que la amplitud de tales vibraciones no sea tal que le permita vencer las energías de enlace en un sentido cualquiera, pues en este último caso se admite la posibilidad de que los iones y átomos puedan desplazarse a otras regiones.

Al desalojarse el átomo 2 hacia la derecha se producirá una resistencia creciente hasta alcanzar la distancia r'' . Desde este punto la resistencia disminuye como se ve, de tal manera que después de r'' la atracción interatómica será prácticamente

nula. Esta distancia mínima a partir de la cual deja de sentirse la atracción interatómica se llama *radio de acción molecular*. Si nos atenemos a la representación anterior, la energía necesaria para vencer la cohesión estaría representada por la expresión:

$$e = - \int_{r_0}^{\infty} \sigma dr$$

o sea, el área rayada de la figura 1. Además, la distancia r'' a partir de la cual deja de ser eficaz la atracción debe satisfacer a la condición:

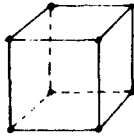
$$\int_{r''}^{\infty} \sigma dr = 0$$

Al lado de las hipótesis anteriores sobre la expresión cuantitativa de las fuerzas intermoleculares, es preciso considerar otras hipótesis, relativas a la constitución molecular o disposición regular en forma de rejilla o retícula de los átomos y iones, constitutivos de la estructura cristalina. Estas otras hipótesis de estructura han sido posibles gracias principalmente al descubrimiento y método de Max von Laue (1) quien tuvo la idea genial de que la estructura de los cristales hace el papel de una red especial natural para los rayos de Roentgen, y por lo tanto se puede establecer una relación entre la longitud de onda de los rayos X y las distancias reticulares de los cristales. Este descubrimiento de von Laue, ha hecho posible el análisis de la estructura cristalina, haciendo pasar un haz de rayos X al través de un cristal, y estudiando la imagen formada en una placa fotográfica por los rayos emergentes, con lo cual se puede sacar una idea sobre la ordenación de los átomos o iones en el cristal, y establecer los diversos géneros de enlaces atómicos que causan la cohesión, y, por lo tanto, las diversas cualidades físicas, mecánicas, etc., atrás enumeradas (fig. 2).

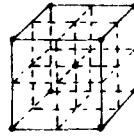
Como resultado de estos estudios y experiencias parece que el fenómeno de cohesión tiene lugar en la parte cortical del átomo.

(1) Para un resumen de las investigaciones de Laue puede consultarse *Jahrbuch für Radioaktivität und Elektronik* II, p. 308. 1914.

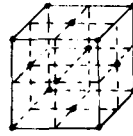
REJILLAS CUBICAS



SIMPLE

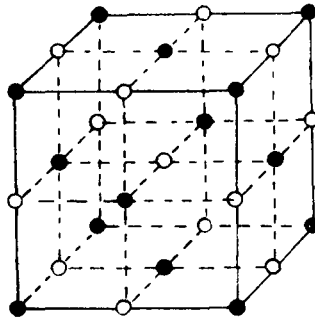


ESTEREOCENTRICO



PLANOCENTRICO

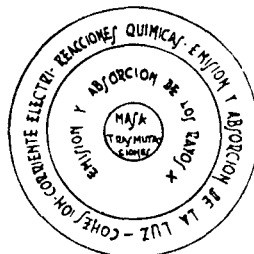
CRISTALES DE CLORURO DE SODIO:



● IONES SODIO

○ IONES CLORO

DE LA RADIOGRAFIA CORRESPONDIENTE
DE LAUE SE DEDUCE LA ESTRUCTURA
ANTERIOR



LOCALIZACION DE LOS FENOMENOS EN LAS
TRES REGIONES DEL ATOMO ~

FIG. 2

mo, como se señala en la figura 2, y depende estrechamente de la microestructura de la materia considerada. Son directamente responsables de la cohesión los llamados enlaces atómicos y moleculares. Se distinguen dos clases de enlaces: enlaces primarios cuya energía es del orden de 100 kgs. Cal. y que representan un papel muy importante en la formación molecular, y enlaces secundarios o intermoleculares que presentan un contenido mucho menor de energía. Parece que el género de deformación y sus propiedades elásticas y plásticas está condicionado por la energía relativa de estos tipos o géneros de enlace. Así es que se afirma que un sólido cuya constitución molecular presenta fuertes enlaces primarios tendrá altos límites de fluencia y gran resistencia; por otra parte, la fragilidad se explica por la existencia de enlaces igualmente fuertes en todos sentidos (1).

Se comprende, pues, que cuando el conocimiento de la microestructura de la materia en los cuerpos vítreos y cristalinos se encuentre más avanzado, es bien posible llegar a explicar las propiedades elásticas de un cuerpo, y aún modificarlas en el sentido conveniente, alterando para ello dicha estructura. Sin embargo, hasta donde se nos alcanza, estas investigaciones están aún en sus comienzos, y no deja de sorprender la gran divergencia que se observa entre la cohesión calculada a partir de estas hipótesis y la cohesión que realmente se deduce de las experiencias ordinarias de rotura. (Por lo general la resistencia técnica es de $1/500$ a $1/1000$ de la resistencia teórica) (2).

Según Smekal, la causa de esta divergencia reside, sobre todo, en las irregularidades, o, quizás, discontinuidades, existentes en la masa cristalina, que él designa con el nombre de "Lockerstellen", lugares flojos o fisuras, accidentalmente distribuidas, donde se originan concentraciones de esfuerzos que explican las variaciones anotadas. De ser esto así habría que convenir en que tales "Lockerstellen" dejan de ser una irregularidad para convertirse en un fenómeno antagónico comparable a la misma cohesión. Sobre la existencia de tales discontinuidades se han edificado teorías de la rotura, como la de Griffith (3), quien ha demostrado también experimentalmente que un filamento delgado de vidrio resiste mucho más relativamente que

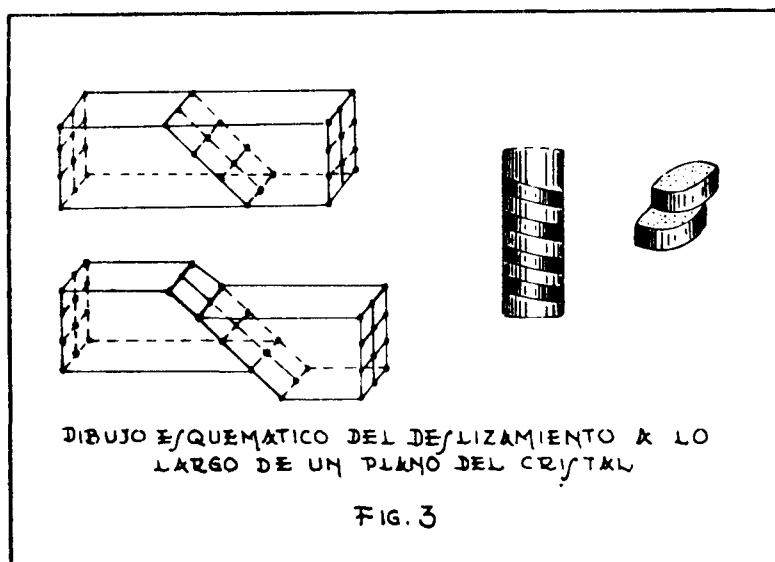
(1) V. Dr. R. Houwink, Ob. cit.

(2) V. A. Joffé, A. Smekal, E. Orowan. International Conference on Physics, London, 1935. Vol. II.

(3) A. A. Griffith, The Theory of Rupture, Proc. 19 Intern. Congress for Applied Mechanics.

otro más grueso; así encontró que para un diámetro de 1 milímetro la resistencia a la tracción era de 18 kilos por milímetro cuadrado, mientras que para 0.003 milímetros la resistencia era de 360 k/mm². De esta experiencia deduce Griffith la existencia de una tensión superficial que unida a las discontinuidades anotadas pueden explicar el resultado experimental.

Saliendo del espacio interatómico e intermolecular, se ha estudiado el comportamiento de los cristales ante la acción de fuerzas capaces de producir la rotura en ellos. Se ha llegado a establecer así que, por regla general, la rotura se inicia por el deslizamiento de los cristales, según planos determinados, los que coinciden con las direcciones en que la densidad de agrupación atómica es máxima en la retícula cristalina, figura 3. De



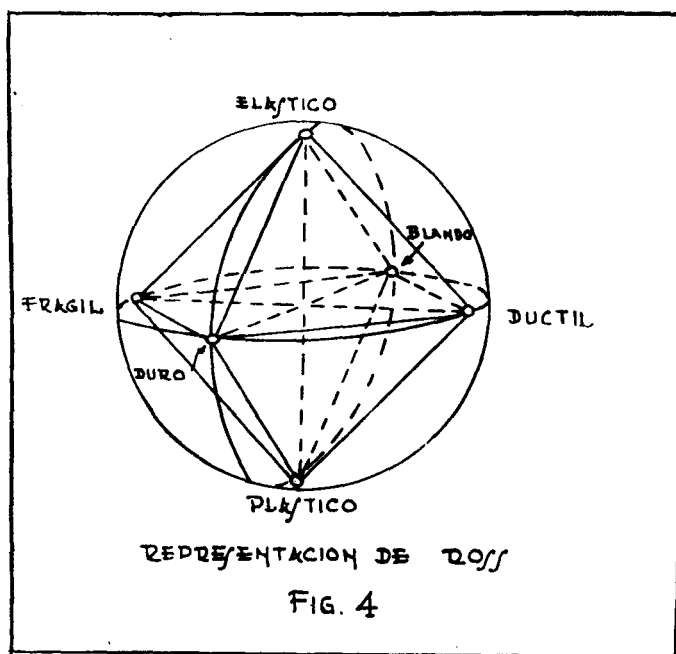
aquí se deduce que el cristal presenta siempre un deslizamiento según el plano de exfoliación más desfavorablemente orientado con respecto al esfuerzo secante, sin que intervenga el esfuerzo normal correspondiente (1). El comportamiento anterior se refiere naturalmente a los cristales de materias plásticas, como los cristales metálicos ensayados por Schmid-Boas (2). Cuando se

(1) V. Timoshenko, Strength of Materials, p. 665.

(2) V. Schmid Boas: Kristallplastizität. Berlín, 1935.

trata de cristales únicos también, pero de materiales reconocidamente frágiles, como los cristales de sal, por ejemplo, es de suponer que este período de desalojamiento según los planos de exfoliación sea mucho menos importante, y la rotura se producirá sobre todo por separación de estos planos para esfuerzos de tracción normales a ellos, cuya magnitud alcanza el límite de rotura al desgarramiento antes de que el esfuerzo secante capaz de iniciar el deslizamiento llegue a producirse (3). No obstante, las experiencias sobre el particular son quizás poco concluyentes si se quiere precisar el mecanismo que precede a la rotura en esta clase de materiales, hasta poder afirmar que se han vencido las fuerzas de cohesión produciendo el desgarramiento en sentido perpendicular a una superficie. Adelante discutiremos más detalladamente esta cuestión.

Si de la rotura en cristales homogéneos pasamos a la rotura en los cuerpos policristalinos, como en los metales emplea-



dos en la industria, que pueden considerarse como conglomerados de cristales dispuestos al azar en todas direcciones, el fenó-

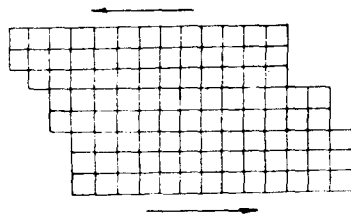
(3) U. Dehlinger: Physikalische Grundlagen des metallischen Zustands.

meno de la rotura se ha clasificado macroscópicamente en dos clases: rotura por desgarramiento, y rotura por deslizamiento, siendo la primera una característica de los materiales frágiles, y la segunda de los dúctiles. Estas características de la materia: elasticidad y su contraria plasticidad; ductilidad y su contraria fragilidad, así como dureza y blandura, deberían tener su explicación a partir de la constitución molecular del cuerpo, ya que parecen ser manifestaciones más o menos próximas de la cohesión apreciada desde un punto de vista macroscópico; sin embargo, hasta el presente no se ha podido sistematizar una teoría científica sobre el particular, salvo en casos muy especiales.

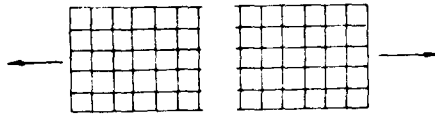
Sin adelantar nada sobre la interdependencia que pueda haber entre estas cualidades, mencionaremos aquí la representación de Ross, quien las ha agrupado en los vértices de un octaedro, de manera que cada propiedad aparece aquí con su contraria en los vértices opuestos de este sólido, figura 4.

Quizás sea más útil conectar estas cualidades con la idea energética como lo hace Weissenberg (1), por medio del triángulo de propiedades mecánicas de los cuerpos (fig. 5), utilizando las coordenadas normales del triángulo para un punto cualquiera situado en el interior de éste. Como es sabido, estas coordenadas tienen la propiedad de que la suma de sus valores es una constante proporcional al área, la cual representa aquí la totalidad de la energía mecánica bajo la acción de las fuerzas consideradas. Según Weissenberg, cada punto representa un estado posible de repartición de la energía en energía cinética, potencial y disipada. Como se ve en la figura, cada vértice del triángulo representa un estado energético simple; así, cuando toda la energía es disipada se tendrá el punto B, vértice del triángulo, donde toda la energía, o sea el 100%, ha sido empleada en acciones irreversibles, según se definió antes al hablar de la rotura como un concepto energético. Por otra parte, si una de las tres energías es nula, el punto caerá sobre uno de los lados del triángulo. Cada uno de estos lados representa un estado conocido macroscópicamente como estado simple de elasticidad, plasticidad y de relajación (relaxation). Se deja, pues, aquí de lado la dureza o blandura y la fragilidad, propiedades éstas que pa-

(1) *Mechanik deformierbarer Körper: Mitteilungen der deutschen Materialprüfungsanstalten.*



DÉFORMACIONES EN LA RETÍCULA
POR DESLIZAMIENTOS



ROTURA DE LA RETÍCULA POR SEPARACIÓN DE
LOS ÁTOMOS

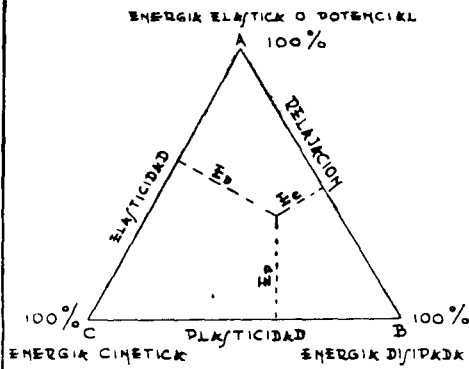


FIG. 5

recen estar menos directamente condicionadas por las formas de energía consideradas.

Diversas hipótesis acerca de las causas de la rotura.

a) *Hipótesis del esfuerzo principal máximo.*—Se atribuye a Rankine (1850), también a Lamé y Clapeyron (1833), y consiste en suponer que el equilibrio elástico se rompe cuando la tensión (1) máxima alrededor de un punto, ya sea de compresión o de tracción, llega a un máximo igual al límite de elasticidad del material a la tensión simple correspondiente, cualesquiera que sean los otros esfuerzos simultáneos con el anterior. Según esta hipótesis, si los esfuerzos principales alrededor de un punto son:

$$n_x > n_y > n_z \quad \text{se debe tener:} \quad n_x = \sigma_f$$

límite de fluencia a la tracción, por ejemplo.

b) *Hipótesis de la deformación máxima.*—Entre los partidarios de esta teoría hay que distinguir a quienes opinan que la rotura depende de la dilatación máxima, como Poncelet (1839), Saint-Venant (1864) y Grashof (1858), y quienes suponen que de este fenómeno depende la deformación angular o distorsión máxima, como Coulomb (1776), Tresca (1868) y otros.

Según Saint-Venant, la máxima dilatación, extensión del material, es lo que determina la rotura por fractura o por deslizamiento (flujo plástico o fluencia). De acuerdo con esta hipótesis, el límite de elasticidad, si se trata de un material dúctil, en el caso de triple tensión, estará dado por la fórmula:

$$\frac{n_x}{E} - \frac{1}{mE} (n_y + n_z) = \frac{\sigma_f}{E}$$

en que σ_f es el límite de fluencia del material.

c) *Esfuerzo secante máximo.*—En esta hipótesis, que es una de las más importantes, habrá que distinguir la hipótesis del esfuerzo secante puro debida a Guest (1900), Tresca, de la hipótesis del esfuerzo secante combinado con esfuerzo normal, debida a Coulomb y Mohr (1882), quienes modifican la de Guest en el sentido de que se tiene en cuenta el cizallamiento máximo

(1) Llamaremos tensión todo esfuerzo por unidad de superficie, ya sea esfuerzo de tracción o de compresión.

según una superficie determinada, pero además se considera una acción proveniente de la presión normal sobre dicha superficie, o sea, una especie de frotamiento (Coulomb) cuyo valor estará representado por el producto del esfuerzo normal y el coeficiente de roce entre la materia considerada. Es decir, si llamamos en esta hipótesis, p la tensión tangencial total que produce el deslizamiento en el sentido del plano correspondiente, n el esfuerzo de compresión sobre dicho plano, y t la tensión tangencial pura que produce la rotura, se tiene:

$$p = t + nf.$$

Se ve que cuando n es nulo, la tensión se reduce a la de Guest.

d) *Hipótesis energéticas.*—También es preciso aquí diferenciar dos modalidades de esta hipótesis: la que considera la energía total máxima de deformación por unidad de volumen, y la que tiene en cuenta solamente la energía de distorsión máxima por unidad de volumen. La primera se debe a Beltrami (1885), Haigh (1927), y, según ella, la resiliencia de prueba del material solicitado por una tracción simple (1) debe ser igual a la energía por unidad de volumen, es decir:

$$\frac{\sigma_r^2}{2E} = \frac{1}{2E} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) - \frac{1}{mE} (n_x n_y + n_z n_x + n_y n_z) \quad (1)$$

(puede consultarse la ecuación 7 del N° 42, Tomo II de nuestras conferencias o cualquier otro texto de Resistencia).

La segunda modalidad de esta hipótesis se debe a Huber (1904), Mises (1913), Hencky (1925), y se basa en la distinción entre la energía de deformación y la de distorsión que está implicada en aquélla. Surgió esta teoría por la dificultad de explicar con la primera, la imposibilidad ya reconocida de producir la rotura con esfuerzos triples de compresión o presión hidráulica. Para encontrar la expresión correspondiente de esta modalidad de la hipótesis energética basta restarle a la expresión del segundo miembro de (1) que representa la energía total de deformación, el trabajo por unidad de volumen, empleado solamente en la variación del volumen del cuerpo, o sea:

$$\frac{p \theta}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{n_x + n_y + n_z}{3} \right) (a_x + a_y + a_z) = \frac{m-2}{6mE} (n_x + n_y + n_z)^2$$

siendo $1/3 (n_x + n_y + n_z)$ la tensión llamada media, o, más propiamente, la compresión media. Deduciendo esta expresión del trabajo de deformación, de la anterior expresión (1), se obtiene:

$$\frac{m+1}{6 m E} [(n_x - n_y)^2 + (n_x - n_z)^2 + (n_y - n_z)^2], \quad (2)$$

la que en el caso de un esfuerzo simple de tensión σ_r se convierte:

$$\frac{m+1}{3 m E} \sigma_r^2$$

Se tiene así que la condición de rotura en este caso se realiza cuando igualamos esta última expresión a la (2), o sea:

$$2 \sigma_r^2 = (n_x - n_y)^2 + (n_x - n_z)^2 + (n_y - n_z)^2 \quad (3)$$

Si se trata de una triple tensión de tracción hidrostática sigue siendo aplicable la primera modalidad expresada analíticamente por (1); si se trata, en cambio, de una distorsión, la segunda expresión (3) es la adecuada.

No podríamos decir que las hipótesis anteriores resumen completamente el pensamiento moderno en cuanto a las causas del fenómeno en referencia. Habría que agregar algunos ensayos muy recientes, difíciles de enunciar someramente, y que dejan comprender que a medida que las experiencias se perfeccionan, la explicación del hecho al parecer simple de la rotura, se complica cada vez más. De estas ideas más recientes daremos una explicación en un próximo escrito, donde discutiremos también las bases experimentales de las principales hipótesis antes enunciadas, para resumir lo más brevemente posible el estado actual del problema, y señalar los derroteros que valdría la pena seguir en experiencias posteriores.

(1) V. nuestras conferencias de Resistencia de Materiales N° 34. Tomo I.