

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL MURO DE FABRICA DE LADRILLO, CON CONSIDERACION DE COMPORTAMIENTO NO LINEAL

ANTONIO ROLANDO AYUSO (*)

RESUMEN. Se plantea el trabajo partiendo de una recopilación de estudios que nos permite conocer la evolución, estado actual y tendencias en la investigación sobre el tema, así como recabar datos y resultados de ensayos ya realizados.

La finalidad ha sido llegar a conocer el comportamiento estructural de la Fábrica de Ladrillo, material que se perfila con marcadas propiedades direccionales debidas a la actuación de las juntas como planos de debilitamiento, mostrando la clara conveniencia de un estudio sistemático en el espacio de las direcciones de las juntas, horizontal y vertical, como direcciones de ortotropía. Desde este punto de vista se limita el estudio a la no linealidad de las relaciones tensión-deformación en el material, abarcando distintos casos de elementos constructivos frecuentes que se pueden estudiar, en este sector, como estados tensionales planos. Se deja a un lado, por tanto, aspectos como la no linealidad geométrica, en la que entran consideraciones tales como el pandeo.

Las primeras conclusiones se concretan en el planteamiento teórico de un modelo informático, detallando el desarrollo de sus dos aspectos fundamentales: las relaciones tensión-deformación, y los modos, criterios y superficie de rotura, que, pudiendo arrancar de la toma de datos, según un programa completo de ensayos, nos pueda permitir la simulación, en su día, de una serie de ensayos sobre elementos constructivos y obtener ábacos y gráficos para análisis estructural.

ABSTRACT. *The work begins with a compendium of the studies that make it possible to know the development, present state and tendencies in the research into this question, together with setting out data and results from tests that have been carried out; this has been done with a view to knowing the structural behaviour of the Brick Factory, brick being a material that has emerged as having distinct directional properties as a consequence of the action of the joints as weakening planes; this shows that it is clearly advantageous to carry out a systematic study of the horizontal and vertical directions of the joints, in space, as orthotropic directions. From a this point of view, the study is restricted to the non-linearity of the stress/deformation relationship in the material, including different cases of common constructive elements that can be studied in this field, as plain tensional states. Aspects such as geometrical non-linearity, in which considerations like bulging arise, are therefore excluded. The first conclusions deal with the theoretical planning of a data processing model, specifying the development of its two basic aspects: the stress/deformation relationship, and the ways, criteria and cracking surface that, as they can be taken from the data, in accordance with a complete test-programme, allows us to simulate, when appropriate, a series of tests on constructive elements and obtain frames and graphs for structural analysis.*

INTRODUCCION

Con la llegada de las técnicas numéricas basadas en el uso del ordenador, para el análisis de estructuras, la necesidad de modelos de material más

realistas ha llegado a ser apremiante. Esto es de una manera particular relevante para la Fábrica de Ladrillo, ya que se ha realizado poca investigación sobre el tema.

Se trata de definir este material a través de un modelo continuo y homogéneo, con propiedades direccionales dentro del ámbito de un estado plano, con carácter bifase (lineal-no lineal) en las relacio-

(*) Dr. Arquitecto. Escuela Técnica Superior de Arquitectura (Madrid).

nes tensión-deformación y con comportamiento elasto-frágil.

Este modelo sería incluíble en un programa tipo incremental, iterativo, utilizando el Método de Elementos Finitos. Esto significa reproducir las relaciones tensión-deformación y el modo de rotura con sus efectos progresivos en dichas relaciones.

La evolución de la investigación en el campo que nos ocupa, viene marcada por unos hitos en los que el avance de las técnicas de ensayo ha sido fundamental. En ensayo uniaxial, base de la Norma MV-201 del año 72, y la mayoría de las extranjeras, plantean un primer modelo en el que todo gira alrededor de la comprobación, a posteriori, de la no superación de una resistencia única determinada. El ensayo uniaxial-inclinado, plantea el modelo bimaterial (ladrillo-junta mortero) con consideración de estado plano de tensión, considerando sus componentes intrínsecas a efectos de rotura, limitando esto a la resistencia de la junta. Por último, y de una forma generalizada en los años 80, aparece el ensayo biaxial que inicia un modelo de material, continuo y homogéneo, dejando la reproducción de la direccionalidad en cuanto a las propiedades a otras consideraciones de la teoría de elasticidad de la que hablaremos más adelante.

ENSAYOS

Los materiales a emplear seguirán la Norma Básica MV-201 1972 «Muros resistentes de fábrica de ladrillo». Como norma extranjera de referencia, en artículos estudiados, tenemos la SAA (Standards Associations of Australia, Brickwork code, 1974).

Los ensayos (fig. 1), se llevan a cabo sobre paneles de Fábrica de Ladrillo con diversos ángulos θ ($0, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$) entre la junta horizontal y una de las caras del panel, definiendo un sistema de ejes p, n paralelo y normal a la junta horizontal.

El estado de tensiones biaxial se reproduce en cada panel por aplicación de presiones normales a las caras con gatos hidráulicos. Durante cada ensayo se mantiene una relación constante entre estas presiones por medio de un dispositivo especial. Se logra así un estado de tensiones principales σ_1, σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$) con el ángulo θ entre la dirección de σ_1 y la de la junta horizontal, p , del panel.

El estado de tensiones en el espacio p, n (σ_p, σ_n, τ), lo obtenemos a partir del estado de tensiones ($\sigma_1, \sigma_2, \theta$), por un cambio de ejes.

El estado de deformaciones en el espacio p, n ($\epsilon_p, \epsilon_n, \gamma$), lo obtenemos a partir de las deformaciones en las direcciones a, b, c ($\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$), que nos proporciona una roseta de elongómetros.

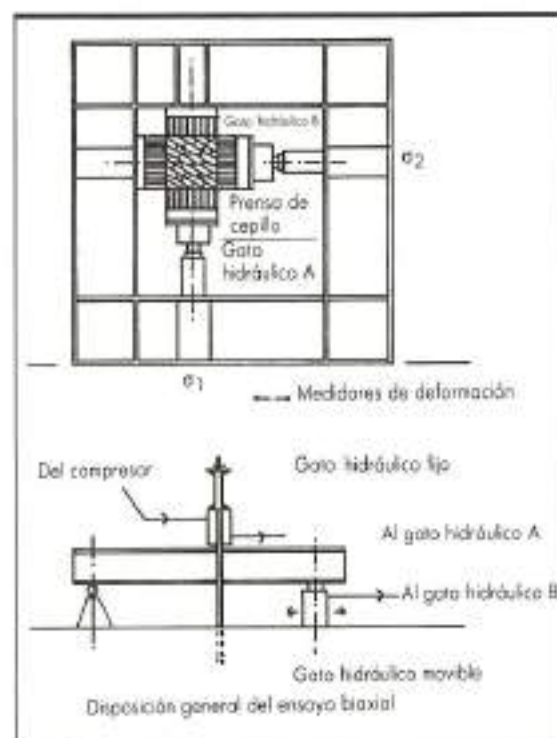


FIGURA 1.

Definimos como Dominio, un conjunto de estados tensionales en el espacio de las tensiones principales, resultando, según el signo de las componentes:

- Dominio 1 $\sigma_1 \geq 0, \sigma_2 \geq 0$; Tracción-Tracción.
- Dominio 2 $\sigma_1 > 0, \sigma_2 < 0$; Tracción-Compresión.
- Dominio 3 $\sigma_1 < 0, \sigma_2 < 0$; Compresión-Compresión.

Organizaremos para los cinco valores de θ y trece relaciones σ_1/σ_2 (entre 1 y -10), sesenta y cinco ensayos diferentes, llevando a cabo cinco por cada tipo, dando un total de trescientos veinticinco ensayos. Los realizados en el Dominio 1 se simularán con modelo MEF, utilizando un modelo bimaterial (fig. 2), en vez de ejecutar el ensayo real por dificultades en la realización.

RELACION TENSION-DEFORMACION

Casi todos los muros de fábrica de ladrillo, tales como muros de arriostramiento, paños de relleno en pórticos, etc., están sujetos a cargas en el plano, de aquí la base de partida de Estado Plano.

La Fábrica de Ladrillo se puede considerar como un cuerpo anisótropo, en particular ortótropo, cuya anisotropía, aunque impuesta de una ma-

Líderes en un mundo de cambio...



Programa Topográfico

SOKKISHA

SDR-VARIN

Distribuidor en exclusiva
para España:

Isidoro Sánchez, S. A.

RONDA DE ATOCHA, 16 - 28012 MADRID - Teléfs.: 228 38 34 - 230 40 08



corsán

EMPRESA CONSTRUCTORA, S.A.

ZURBANO, 76

28010 MADRID

Tel. 441 05 00

Fax 442 43 87

ANDALUCIA

— SEVILLA

Manuel Bermudez Barrera, 1, 2º
41004 SEVILLA
Teléfono 41 51 11
Fax 41 52 51

— GRANADA

Avda. de Madrid, 3, 2º C
18012 GRANADA
Teléfono 20 10 50 - 20 02 59
Fax 26 28 65

— CEUTA

Paseo del Revellín, 21, 2º C
11701 CEUTA
Teléfono 51 45 43
Fax 51 95 82

ARAGON

Paseo de San Francisco, 18
50006 ZARAGOZA
Teléfonos 35 52 00/4
Fax 55 41 27

ASTURIAS

Edición F.E.V.E.
33185 - EL BERRON (Asturias)
Teléfonos 74 15 35/7
Fax 74 20 12

CATALUÑA

Conde de Urgel, 95 - 5º
08011 BARCELONA
Teléfonos 323 77 00 - 323 74 61
Fax 323 09 94

MADRID

Melchor Fernández Almagro, 18, 7º C
28029 MADRID
Teléfono 730 27 83



PROGRAMA DE CONSTRUCCIONES METALICAS

Por Ramón Argüelles Álvarez



BELLISCO-SOFTWARE

C/ Jacometrezo, 4, 9.ª planta. Despacho 16

Edificio SANTO DOMINGO

Tel. 91/532 22 44 - 28013 MADRID

AUTODIMENSAMIENTO DE:

- CELOSÍAS
- PORTICOS DE EDIFICACION
- PORTICOS DE NAVES

OPTIMIZACION DE:

- VIGAS CARRIL
- VIGAS ARMADAS
- PANDEO DE PORTICOS Y
CALCULO DINAMICO

ORDENADOR PERSONAL I.B.M.
Y COMPATIBLES

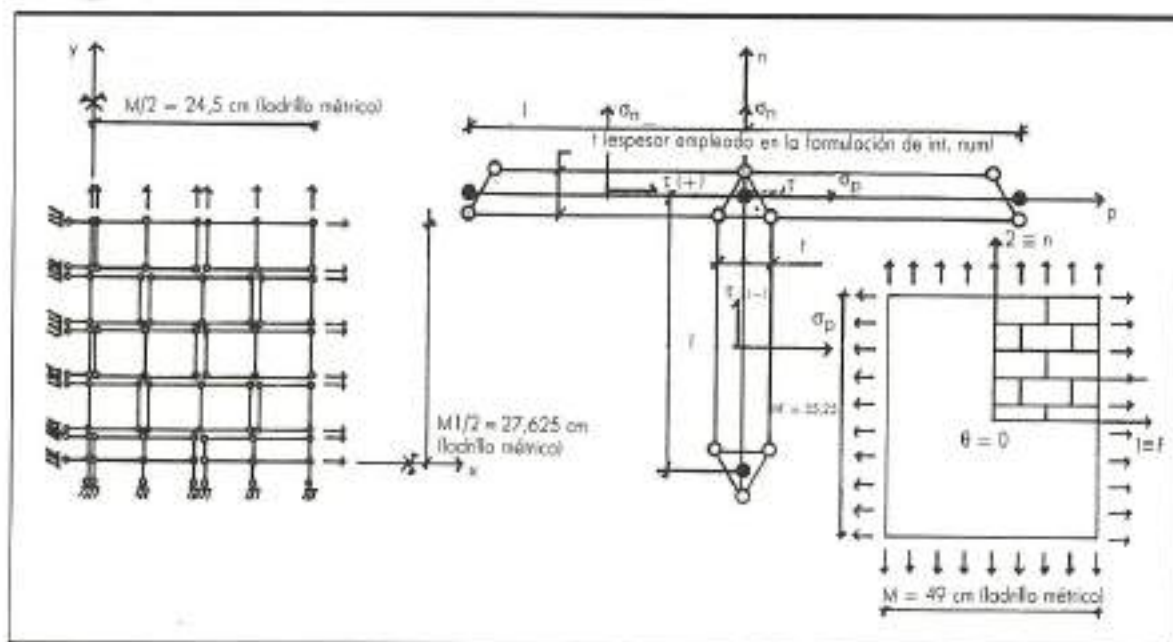


FIGURA 2.

nera artificial por la orientación de las hiladas, con las juntas horizontales como planos de debilitamiento, posee unas características que podemos considerar de anisotropía natural, ya que, salvo en los casos de los sardineles adovelados, las direcciones de ortotropía no responden siempre a la adecuación de los esfuerzos, sino más bien a la práctica constructiva tradicional de elementos que permiten cargas verticales.

Se estudiarán dos modelos de material: Uno no homogéneo, con dos tipos de material (ladrillo, mortero) (fig. 2), al que ya nos hemos referido, y otro homogéneo, en el que se considera un solo material (Fábrica de Ladrillo), en el que se tiene en cuenta la ortotropía marcada por la orientación de las hiladas y que tiene como gran ventaja respecto al anterior, de que el modelado de los elementos es geométricamente independiente de la drillo y de junta.

Este modelo ortótropo plano es definido en su fase lineal por las siguientes constantes:

- E_p : módulo de elasticidad en la dirección p .
- E_n : módulo de elasticidad en la dirección n .
- G_{pn} : módulo de elasticidad en la dirección transversal.
- ν_{pn} : coeficiente de Poisson p - n .
- ν_{np} : coeficiente de n - p .

Para cada ensayo del plan obtendremos las gráficas tensión-deformación (fig. 3), para cada componente (σ_p - ϵ_p , σ_n - ϵ_n , τ - γ).

Los ensayos en el Dominio compresión-compresión, a niveles altos de tensión muestran, en estudios realizados, cambios notables en el módulo de elasticidad (pendiente de las gráficas), es decir, no

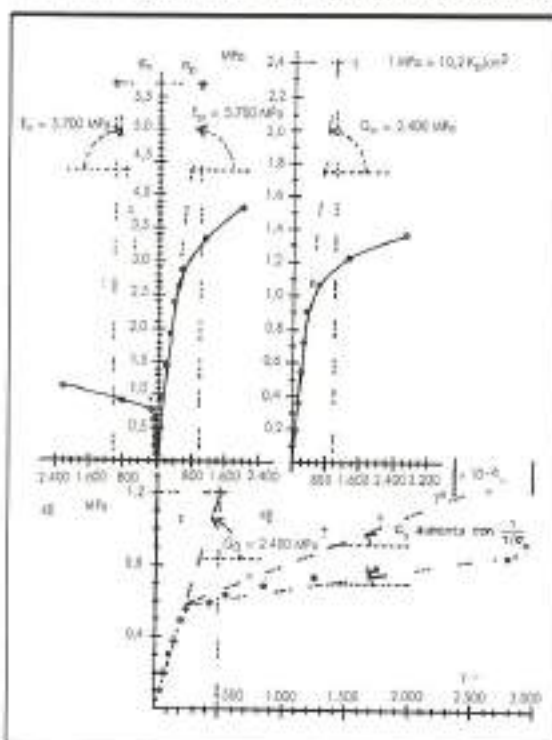


FIGURA 3.

linealidad, mientras que en los demás Dominios, la rotura aparece generalmente antes de que se produzca una clara no linealidad. Por lo tanto es razonable asumir que la Fábrica de Ladrillo puede ser modelada como un material elástico lineal-frágil si una de las tensiones principales es de tracción.

Podemos decir que en el Dominio compresión-compresión, las gráficas aparecen como resultantes de dos fases: una elástica lineal y una elástica no lineal, siendo esta última nula en un primer tramo recto inicial hasta su límite de proporcionalidad.

Tomando un punto del tramo recto de cada una de las gráficas tensión-deformación, previo al límite de proporcionalidad, para las componentes p , n y para todos los paneles ensayados, podemos establecer para cada uno de los Dominios el siguiente sistema de ecuaciones:

$$[A] [X] = [b]$$

en donde:

$$[A] = \begin{bmatrix} \sigma_{pi} - \sigma_{ni} & 0 \\ 0 & -\sigma_{pi} & \sigma_{ni} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sigma_{pi} - \sigma_{ni} & 0 \\ 0 & -\sigma_{pi} & \sigma_{ni} \end{bmatrix}; [b] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{pi} \\ \varepsilon_{ni} \\ \vdots \\ \varepsilon_{pi} \\ \varepsilon_{ni} \end{bmatrix};$$

$$[X] = \begin{bmatrix} \frac{l}{E_p} \\ \lambda \\ \frac{l}{E_n} \end{bmatrix}; \lambda = \frac{\nu_{np}}{E_p} = \frac{\nu_{pn}}{E_n};$$

l = número de paneles ensayados

con la consideración de mínimos cuadrados podemos obtener el vector de constantes elásticas, $[X]$, que minimizará la suma de los cuadrados de los residuos correspondientes. En el análisis de regresión, las constantes elásticas E_p , E_n , ν_{np} , ν_{pn} serán determinadas a partir de los términos de dicho vector.

Para la obtención del módulo de elasticidad transversal G_{pn} podemos utilizar el mismo procedimiento.

Del análisis de los resultados que aparecen en la tabla 1, podemos concluir que:

- No aparece diferencia significativa entre los módulos de elasticidad de las direcciones paralela y normal a la junta horizontal $E_p = E_n$ (en Dominio 3 coinciden exactamente).
- El valor medio de G_{pn} coincide, prácticamente, con el que sale aplicando la expresión para materiales isotrópicos.
- Ensayos realizados sobre paneles cargados alternativamente en compresión uniaxial, paralela y normal a la junta horizontal, dan también valores parecidos para p , n (fig. 4).

en conjunto podemos decir que como media los paneles de fábrica de ladrillo pueden ser considerados como isotrópicos en la fase elástica lineal, quedando las constantes elásticas reducidas a:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_p = E_n & E &= 5,700 \text{ MPa} \\ \nu &= \nu_{pn} = \nu_{np} & G &= 2,350 \text{ MPa} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} & \nu &= 0,19 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Según} \\ \text{figuras 3, 4} \\ \text{y tabla 1} \end{array}$$

Si representamos en un sistema de ejes p , n , s , los estados tensionales de rotura σ_p , σ_n , τ (fig. 5) obtenemos la superficie de rotura por ajuste. Proyectando del espacio de tensiones principales al de direcciones p , n , s , los estados tensionales de rotura para compresión-simple y tracción-simple, para

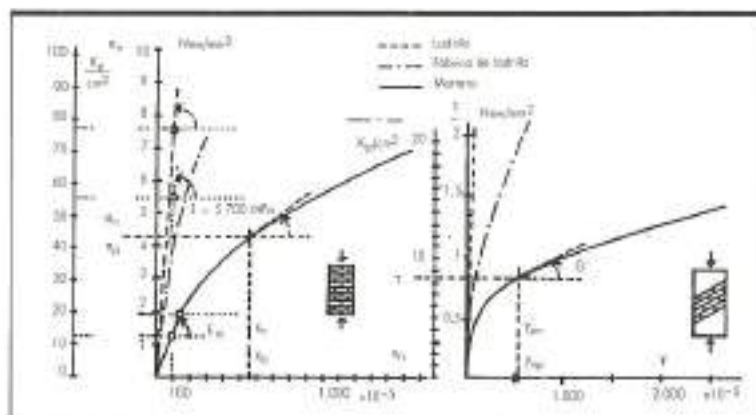


FIGURA 4.

ESTADO TENSION	N.º DE PANELES	E _n (MPa)		E _p (MPa)		ν_n		ν_p		G (MPa)		R ²
		$\bar{x}$	E.S.	$\bar{x}$	E.S.	$\bar{x}$	E.S.	$\bar{x}$	E.S.	$\bar{x}$	E.S.	
COMPRESION BIAXIAL	77	5.700	190	5.700	190	0,19	0,023	0,19	0,023	—	—	84 %
TRACCION-COMPRESION	35	5.200	280	5.500	590	0,15	0,048	0,15	0,050	—	—	88 %
AMBAS COMBINADAS	112	5.600	160	5.700	150	0,19	0,021	0,19	0,020	—	—	87 %
COMPRESION UNIAxIAL (ENSAYOS DE COMPROBACION)	4	6.200	—	6.100	—	0,24	—	0,18	—	—	—	—
CORTANTE SOBRE LA JUNTA TRANSVERSAL	37	—	—	—	—	—	—	—	—	2.350	120	—

TABLA 1. Tabla de valores medios y errores estándar de las constantes elásticas de los paneles de la fábrica de ladrillo (3-3).

los diferentes ángulos θ , obtendremos el límite de rotura de los Dominios 1, 2 y 3.

En esta representación un proceso de carga queda definido por una recta intersección de los planos $\sigma_n/\sigma_p = \text{cte.}$ y $\tau/\sigma_n = \text{cte.}$ Esta recta in-

terseccionará a la superficie para el estado tensional de rotura.

Podemos definir los modelos de relación tensión-deformación, según los distintos Dominios (fig. 5), como sigue:

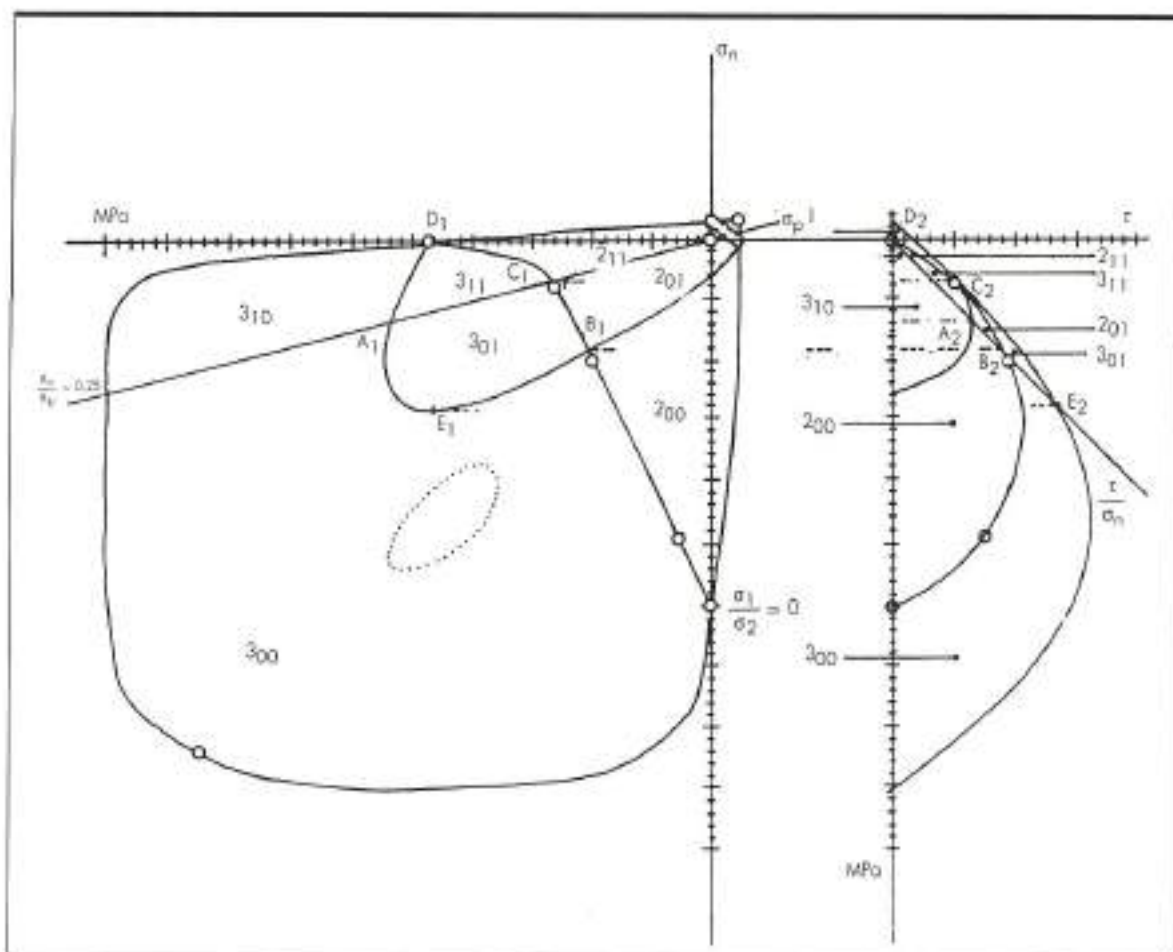


FIGURA 5.

DOMINIO 1. El modelo es elástico lineal (una sola fase), siendo el operador tensión-deformación de la forma:

$$[D_0] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu^2) \frac{G}{E} \end{bmatrix}$$

DOMINIO 2. El modelo es elástico lineal (una sola fase), menos en el caso en que la relación τ/σ_n sea ≥ 1 (Zonas 2₀₁ y 2₁₁), en el que la tercera componente transversal se cambia por una expresión bilineal de la forma:

$$G_0 \frac{\gamma_y}{\gamma} \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) + G$$

en donde:

$$\gamma \leq \frac{\tau_y}{G_0} \rightarrow G = 0 \quad (\gamma_y, \tau_y) \text{ límite elástico transversal}$$

$$\gamma > \frac{\tau_y}{G_0} \rightarrow G = 1$$

DOMINIO 3.

Zona 3₀₀ para estados tensionales con:

$$\left(\frac{\sigma_s}{\tau_p} > 0,25\right), \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \geq 1\right)$$

Para cada punto de la gráfica tensión-deformación del ensayo, se obtiene el estado de deformación elástico a partir del estado de tensiones, y se determinan las deformaciones plásticas deduciendo de las deformaciones totales las elásticas correspondientes componente a componente. Se representan, separadamente, cada componente paralela, normal y transversal y en un sistema de coordenadas con escalas logarítmicas, los pares de valores obtenidos, deformación plástica, tensión total (Fig. 6). Se puede observar que los puntos (logaritmo tensión-logaritmo deformación plástica) van apareciendo sensiblemente alineados, con lo que la relación deformación plástica-tensión total pueden expresarse para cada componente por una función potencial o de tipo Ramsberg-Osgood:

$$\epsilon_p^p = C_p \sigma_p^{n,p}$$

$$\epsilon_n^p = C_n \sigma_n^{n,n}$$

$$\epsilon_s^p = C_s \sigma_s^{n,s}$$

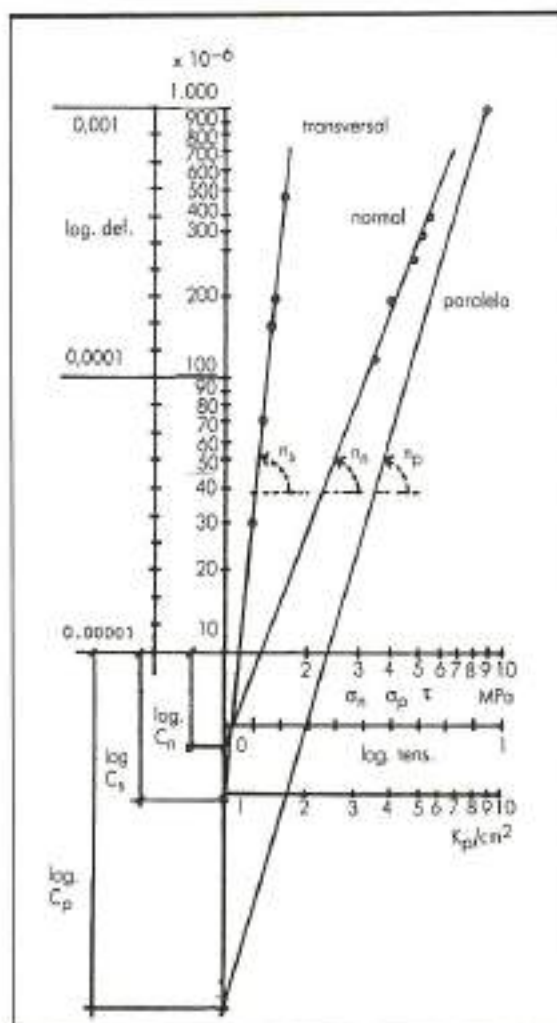


FIGURA 6.

Tomando logaritmos en estas expresiones, obtenemos las ecuaciones de rectas en las escalas logarítmicas (fig. 6), y haciendo pasar éstas por los puntos de referencia (B, ϵ_s), obtenemos las expresiones siguientes:

$$\epsilon_p^p = \left(\frac{\epsilon_{p,r}}{B_p^{n,p}}\right) \sigma_p^{n,p}$$

$$\epsilon_n^p = \left(\frac{\epsilon_{n,r}}{B_n^{n,n}}\right) \sigma_n^{n,n}$$

$$\epsilon_s^p = \left(\frac{\epsilon_{s,r}}{B_s^{n,s}}\right) \sigma_s^{n,s}$$

En la figura 7 se representan los valores de los parámetros B y n para variaciones relativas de las

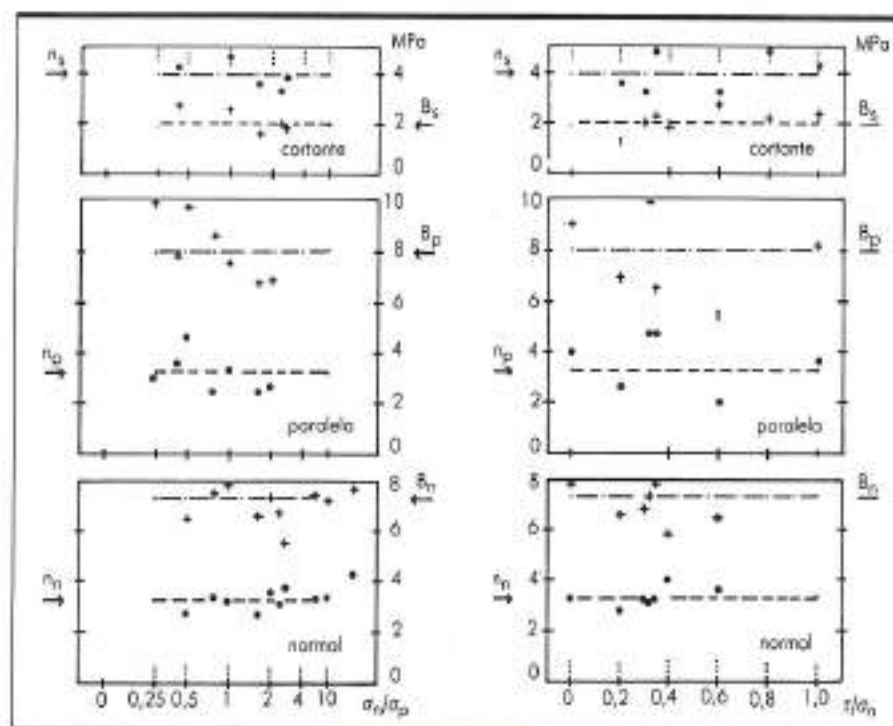


FIGURA 7.

componentes de tensión, es decir, para distintos valores de las relaciones σ_p/σ_p y τ/σ_p , siendo cada punto representado media de cinco ensayos. Tomando medias ponderadas de los puntos representados, obtenemos los valores medios globales que aparecen en la tabla 2.

A la vista de los resultados, y a pesar de cierta dispersión en algunos casos, se puede asumir que las componentes de deformación plástica dependen sólo de las correspondientes componentes de tensión, para cada relación tensión-deformación plástica, ya que como se ve, la variación relativa de las componentes de estado de tensión no afecta a relación tensión-deformación plástica de cada componente.

Despejando de las expresiones de arriba las distintas componentes de tensión, obtendremos los respectivos módulos de endurecimiento, pendien-

tes instantáneas de las correspondientes curvas tensión-deformación plástica:

$$H_p = \frac{\delta \sigma_p}{\delta \epsilon_p^p} = K_p (\epsilon_p^p)^{\frac{1}{n_p} - 1} \quad \begin{matrix} n_p \equiv n_p \\ n_n \equiv n_n \\ n_s \equiv n_s \end{matrix}$$

$$H_n = \frac{\delta \sigma_n}{\delta \epsilon_n^p} = K_n (\epsilon_n^p)^{\frac{1}{n_n} - 1}$$

$$H_s = \frac{\delta \sigma_s}{\delta \epsilon_s^p} = K_s (\epsilon_s^p)^{\frac{1}{n_s} - 1}$$

en donde:

$$K_p = \frac{1}{n_p} B_p \frac{1}{(\epsilon_{pr})^{\frac{1}{n_p}}}$$

DIRECCION	ϵ_r DEFORMACION DE REFERENCIA	B (MPa) TENSION DE REFERENCIA (VALOR MEDIO)	COEFICIENTE DE VARIACION DE B	n COEFICIENTE (VALOR MEDIO)	COEFICIENTE DE VARIACION DE n	K (MPa) COEFICIENTE PARA MODULO DE ENDURECIMIENTO
PARALELA		8,0	0,25	3,3	0,34	19,66
NORMAL	10^{-3}	7,3	0,19	3,3	0,29	17,94
TRANSVERSAL		2,0	0,19	4,0	0,40	2,81

TABLA 2.

$$K_n = \frac{1}{n, n} B_n \frac{1}{(\varepsilon_{n0})^{\frac{1}{n, n}}}$$

$$K_s = \frac{1}{n, s} B_s \frac{1}{(\varepsilon_{s0})^{\frac{1}{n, s}}}$$

módulos, que para los valores obtenidos en la tabla 2, resulta:

$$H_p = 19,7 (\varepsilon_p^0)^{-0,70} \text{ (MPa)}$$

$$H_n = 17,9 (\varepsilon_n^0)^{-0,70} \text{ (MPa)}$$

$$H_s = 2,8 (\varepsilon_s^0)^{-0,35} \text{ (MPa)}$$

Sumando la primera fase elástica lineal a la

$$[D_{\text{total}}] = \frac{\delta \sigma}{\delta \varepsilon} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{E}{H_p} & \nu & 0 \\ \nu & 1 + \frac{E}{H_p} & 0 \\ 0 & 0 & \left[\left(1 + \frac{E}{H_p} \right) \left(1 + \frac{E}{H_n} \right) - \nu^2 \right] \frac{G H_s}{H_p + G} \frac{1}{E} \end{bmatrix}$$

Zona 3₁₀ → para estados tensionales con:

$$\sigma_p/\sigma_p < 0,25$$

Modelo isotrópico elástico lineal, con una sola fase elástica exclusiva, siendo el operador tensión-deformación el definido para el Dominio 1.

Zona 3₀₁ → para estados tensionales con: $\tau/\sigma_p \geq 1$

Modelo isotrópico elástico lineal, más ortótropo plástico (componentes p, n), bilineal (componente s). Utilizaremos la matriz elástica tangente instantánea definida para la Zona 3₀₀ cambiando la tercera componente por la expresión dada para las Zonas 2₀₁ y 2₁₁, ya definidas en Dominio 2.

Zona 3₁₁ → para estados tensionales con:

$$\sigma_p/\sigma_p < 0,25 \text{ y } \tau/\sigma_p \geq 1$$

Modelo elástico lineal (con una sola fase) con la tercera componente transversal de tipo bilineal. Con expresiones iguales a las definidas para las Zonas 2₀₁ y 2₁₁.

MODELO DE ROTURA

Consiste en la implementación matemática de la forma de rotura del material que reproduzca la variación de su comportamiento con reestructuración de la relación tensión-deformación.

Para ello es necesario entender el mecanismo de la rotura, ver el fallo y analizar el estado ten-

segunda fase ortótropa elástica potencial, obtenemos:

$$\delta \varepsilon = [C] \delta \sigma$$

en donde:

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} + \frac{1}{H_p} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} + \frac{1}{H_n} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} + \frac{1}{H_s} \end{bmatrix}$$

de donde podemos obtener la matriz elástica tangente instantánea:

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{E}{H_p} & \nu & 0 \\ \nu & 1 + \frac{E}{H_p} & 0 \\ 0 & 0 & \left[\left(1 + \frac{E}{H_p} \right) \left(1 + \frac{E}{H_n} \right) - \nu^2 \right] \frac{G H_s}{H_p + G} \frac{1}{E} \end{bmatrix}$$

sional en cuanto a componentes y direcciones principales.

En la figura 8, y fijándonos en un punto cualquiera, por ejemplo el punto 12, vemos representado el estado de tensiones principales en rotura, y el resultado real que es la forma de rotura que se produce por cortante a lo largo de la junta horizontal. La Fábrica, así fisurada (estado de fisuración 1), significa un estado tensional σ_p, σ_n, τ de rotura, correspondiente al estado principal de tensiones, ya mencionado, que viene representado por un punto de lo que llamaremos Superficie de Rotura, y que es el lugar geométrico de los estados tensionales que suponen rotura. Este punto de la fábrica en estado de rotura, no significa que esté agotado, sino tan sólo que se produce una primera rotura, reduciéndose a una capacidad residual de rozamiento la resistencia en la componente transversal a través del correspondiente término de la matriz elástica tangente, quedando sin embargo capacidades resistentes en direcciones p y n. Esta reestructuración del comportamiento del material a través de la citada matriz, es lo que llamamos Modo de Rotura. Este modo de rotura presenta dos fases:

Rotura 1, ya mencionada, que reduce la matriz elástica tangente a diagonal con anulación o reducción de componentes según p, n, s.

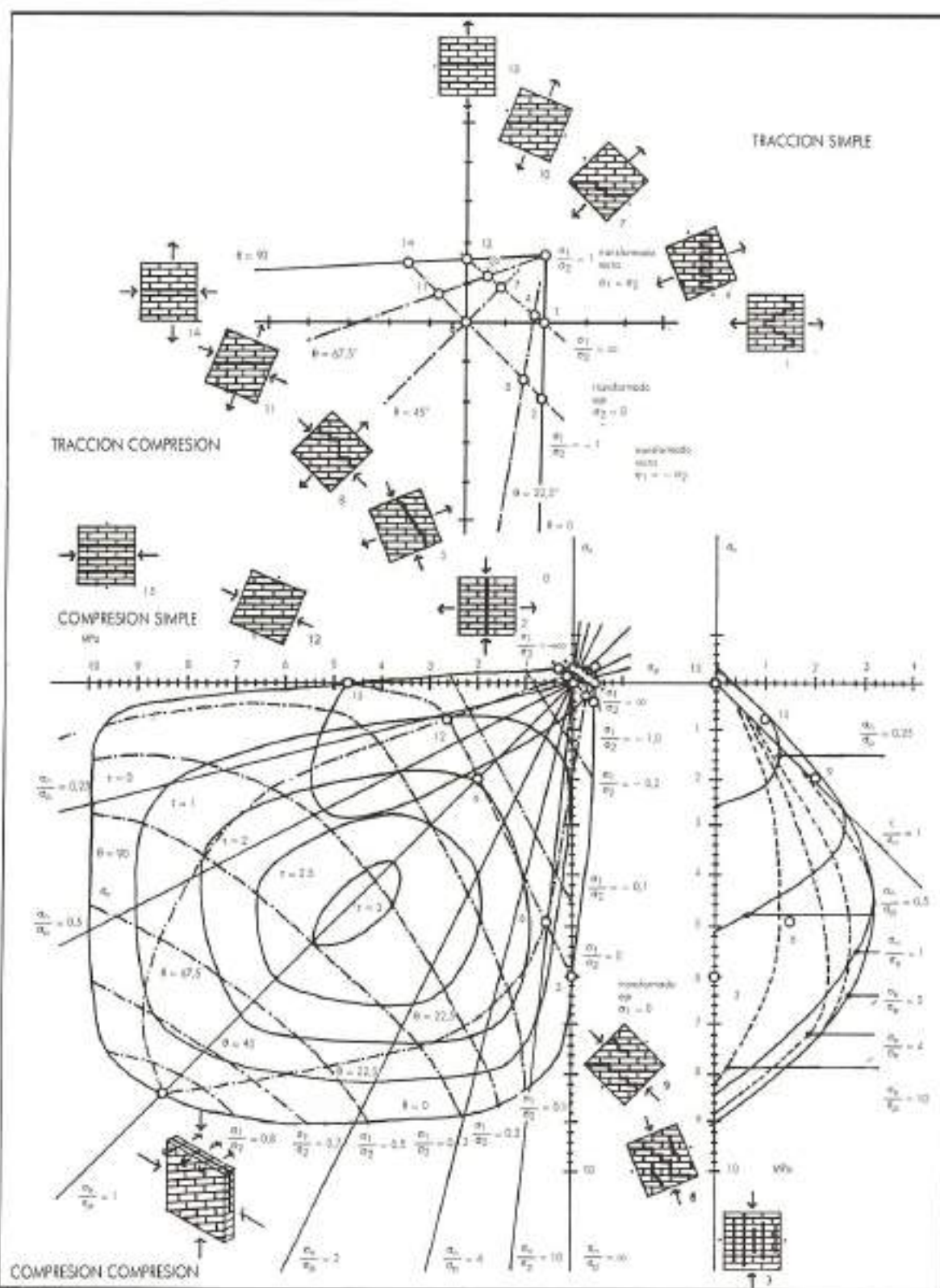


FIGURA 8.

Rotura 2, posterior a la anterior, con anulaci3n de todos los t3rminos de dicha diagonal, reproduciendo el colapso total de la f3brica en ese punto.

En la superficie de rotura, que aparece en la figura 8, a la que estamos aludiendo, se muestran proyectados los estados de tensiones que corresponden a relaciones $\sigma_1/\sigma_2 = \text{cte.}$ y $\theta = \text{cte.}$ en rotura. Estas relaciones definen l3neas sobre la superficie de rotura que nos permitir3n delimitar las Regiones, definidas 3stas como conjuntos de estados tensionales en rotura con caracter3sticas similares.

Pasaremos a continuaci3n a explicar la ubicaci3n de las distintas Regiones detectables.

DOMINIO 1

Regi3n 1. La rotura 1 es tambi3n rotura 2 con colapso total por anulaci3n de todas las resistencias.

DOMINIO 2

Regi3n 2₁ con $\theta < 45^\circ$ y $\sigma_n < 0$ (Ejemplos puntos 5, 2 fig. 8).

— Se produce anulaci3n de las resistencias seg3n p y s .

Regi3n 2₂ con $\theta \geq 45^\circ$, $\sigma_n < 0$ y $\sigma_p < 0$ (Ejemplos puntos 9 y 12 fig. 8).

— Se produce minoraci3n (resistencia residual) de la resistencia seg3n s .

Regi3n 2₃ con $\theta > 45^\circ$, $\sigma_n > 0$ y $\sigma_p < 0$ (Ejemplos puntos 11, y 14 fig. 8).

— Se anulan resistencias seg3n n y s .

Regi3n 2₄ con $\sigma_n > 0$ y $\sigma_p > 0$.

— Se anulan todas las resistencias. Se produce colapso total.

DOMINIO 3

Regi3n 3₀ con $\sigma_1/\sigma_2 > 0,1$.

— La rotura se produce a lo largo de un plano paralelo a la cara exterior de la f3brica, produci3ndose anulaci3n de todas las resistencias y colapso total.

— La resistencia a compresi3n m3xima $\sigma_{2\text{m3x}}$ se da para $\theta = 90^\circ$ y $\sigma_1/\sigma_2 = 0,4$ que resulta aproximadamente igual al doble de la resistencia a compresi3n uniaxial σ_2 en direcci3n p para $\theta = 90^\circ$ y $\sigma_1/\sigma_2 = 0$. Recordamos aqu3

que la Norma MV-201 no considera este aumento de resistencia, al considerar un estado uniaxial exclusivamente; aspecto de especial relevancia en caso como paneles trabajando transversalmente.

— La resistencia m3xima a cortante τ_{m3x} se da para el estado tensional de rotura que corresponde a $\theta = 45^\circ$ y $\sigma_1/\sigma_2 = 0,25$.

Regi3n 3₁ con $\sigma_1/\sigma_2 \leq 0,1$ y con $\theta < 45^\circ$ (Ejemplos puntos 6, 3 fig. 8).

— Se produce colapso total con anulaci3n de las resistencias en todas las direcciones.

— La fisura atraviesa el ladrillo. Es importante la resistencia del ladrillo en la total de la f3brica.

Regi3n 3₂ con $\sigma_1/\sigma_2 \leq 0,1$ y $\theta \geq 45^\circ$ (Ejemplos puntos 15, 12 fig. 8).

— Tras la primera rotura permanecen resistencias seg3n p y n , y la resistencia s queda reducida a un rozamiento residual que depender3 de la componente n .

La superficie de rotura de la figura 8 necesita un n3mero elevado de ensayos para su obtenci3n. Hay varias propuestas de superficies con aproximaci3n anal3tica simplificada que requieren menor n3mero de ensayos pero que presentan defectos graves, tales como la no consideraci3n de aumento de resistencias por compresi3n biaxial, o la ubicaci3n inadecuada de la m3xima resistencia a cortante.

Proponemos una superficie de rotura que venga definida para cada θ por una curva envolvente de la curva resistencia intr3nseca de Mohr (con ensayos de tracci3n simple, $\sigma_1/\sigma_2 = \infty$, cortante puro, $\sigma_1/\sigma_2 = -1$ y compresi3n simple, $\sigma_1/\sigma_2 = 0$), y pasando por los siguientes puntos:

- Punto de estado tensional a bicompresi3n sim3trica, para $\sigma_1/\sigma_2 = 1$ y com3n a todo θ .
- Punto de estado tensional a bitracci3n sim3trica, para $\sigma_1/\sigma_2 = 1$ y com3n a todo θ .
- Punto de estado tensional que corresponde a τ_{m3x} , para $\sigma_1/\sigma_2 = 0,25$ y el θ correspondiente.

DISEÑO PROGRAMA

Diseño de la estructura general del programa.

Módulos

Entrada

Material
(y proceso)

F. Ladrillo (Tipos de material → tipos de elemento)
1. Fase lineal. Constantes E , ν , G .
2. Fase no lineal. Coeficientes para H .
3. Superficie rotura. Puntos para ajuste.

Geometría
Apoyo
Carga

Datos macroprograma de solución

Validación de los datos de entrada

Procesamiento

Salida

Manejo de errores

CONCLUSIONES

Vemos que hay una influencia clara de θ en el comportamiento y forma de rotura que afecta a la totalidad de los estados tensionales, a excepción de la Región 3₀.

La resistencia a compresión de rotura de la fábrica $\sigma_{2 \text{ rot}}$ es menor en estado uniaxial (σ_1) que en estado biaxial para toda relación σ_1/σ_2 y θ .

La mínima resistencia a compresión de la fábrica se presenta, en estado uniaxial, compresión simple, para $\theta = 67,5^\circ$.

La resistencia a compresión en estado uniaxial, compresión simple σ_c , varía enormemente con el ángulo θ , mientras que en compresión biaxial no lo hace excesivamente, lo que con excepción de Dominio 3 muestra por lo tanto la direccionalidad del comportamiento del material.

Para el ángulo $\theta = 67,5^\circ$ es para el que más se acusa la relación σ_1/σ_2 en la resistencia a compresión de la fábrica.

Por último podemos decir que la realización de un plan de desarrollo completo nos permitirá ampliar el estudio en lo relativo a los estados de tensiones que se sitúan en las fronteras entre Dominios, Zonas y Regiones que, como hemos visto, significaban un distinto comportamiento tensión-deformación y modo de rotura, en particular aquellos estados de tensiones para las relaciones σ_1/σ_2 comprendidas entre 0,1 y -0,1.

BIBLIOGRAFIA

1. WOOD, R. H. (1952): «Studies in Composite Construction Part I. The Composite Action of Brick Panel Walls Supported on Reinforced Concrete

Beams», National Building Studies, Research Paper N.º 13, Building Research Station, United Kingdom.

2. ROSENHAUPT, S., y SOKAL, Y. (1965): «Masonry Walls on Continuous Beams», Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 91, N.º ST1, Proc. Paper 4226, Feb., 155-171.
3. PLOWMAN, J. M. (1965): «The Modulus of Elasticity of Brickwork», Proceeding of the British Ceramic Society, 4, 37-44.
4. SINHA, B. P., y HENDRY, A. W. (1966): «Further Investigations of Bond Tension, Bond Shear, and the Effect of Precompression on the Shear Strength of Model Brick Masonry Couplets», Technical Note N.º 80, Heavy Clay Division, British Ceramic Research Association, Stoke-on-Trent England, Mar.
5. PAGE, A. W. (1963): «The Strength of Brick Masonry Under Biaxial Compression-Tension», Int. J. Masonry Cons., 3, marzo, N.º 1, 26-31.
6. NGO, D., y SCORDELIS, A. C. (1967): «Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams», Journal of the American Concrete Institute, Vol. 64, N.º 3, Mar., 152-163.
7. GOODMAN, R. E., TAYLOR, E. L., y BREKKE, T. L. (1968): «A model for the Mechanics of Jointed Rock», Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 94, N.º SM3, Proc. Paper 5937, May, 637-659.
8. ZIENKIEWICZ, O. C., VALLIAPPAN, S., y KING, I. P. (1969): «Elastic-Plastic Solutions of Engineering Problems 'Initial Stresses', Finite Element Approach», International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 1, 75-100.
9. JOHNSON, F. B., y THOMPSON, J. M. (1969): «Development of Diametral Testing Procedures to Provide a Measure of Strength Characteristics of

- Masonry Assemblages», *Designing, Engineering and Constructing with Masonry Products*, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 51-57.
10. PARISEAU, W. G.; VOIGHT, B., y DAHL, H. D. (1970): «Finite Element Analysis of Elastic-Plastic Problems in the Mechanics of Geologic Media: An Overview», *Proceeding of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, 311-323.
 11. ZIENKIEWICZ, O. C. et al. (1970): «Analysis of Non linear Problems in Rock Mechanics with Particular Reference to Jointed Rock Systems», *Proceeding of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Belgrade, Yugoslavia, 501-509.
 12. FIORATO, A. E.; SOZEN, M. A., y GAMBLE, W. L. (1970): «An Investigation of the Interaction of Reinforced Concrete Frames with Masonry Filler Walls», *Civil Engineering Studies, Structural Research Series N.º 370*, University of Illinois, Urbana, Ill., Nov.
 13. SMITH, B. S. et al. (1970): «The Diagonal Tensile Strength of Brickwork», *Struct. Engr.* 48, June, N.º 6, 219-225.
 14. YETTRAM, A. L., y HIRST, M. J. S. (1971): «An Elastic Analysis for the Composite Action of Walls Supported on Simple Beams», *Building Science*, Vol. 6, 151-159.
 15. SHALIN, S. (1971): «Structural Masonry», Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
 16. STAFFORD, SMITH, B., y RAHMEN, K. M. K. (1972): «The variations of Stress in Vertically Loaded Brickwork Walls», *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 43, N.º 689, London, England, 689-700.
 17. LIU, T.; NILSON, S., y SLATE, F. O. (1972): «Biaxial Stress Strain Response and Fracture of Concrete», *Journal of Structural Division, ASCE*, 98, N.º ST5, May, 1025-1034.
 18. KHOO, C. L., y HENDRY, A. W. (1973): «Strength Tests on Brick and Mortar under Complex Stresses for the Development of a Failure Criterion for Brickwork in Compression», *Proc. Br. Ceram. Soc.*, Apr., N.º 21, Load Bearing Brickwork (4), 51-66.
 19. SAW, C. B. (1974): «Linear Elastic Finite Element Analysis of Masonry Walls on Beams», *Building Science*, Vol. 9, 299-307.
 20. GRIMM, C. T. (1975): «Strength and Related Properties of Brick Masonry», *J. Struct. Div. Am. Soc. Civ. Engrs.*, 101, Jan., N.º ST1, 217-231.
 21. YOKEL, F. Y., y FATTAL, S. G. (1976): «Failure Hypothesis for Masonry Shear Walls», *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 102, N.º ST3, 515-532.
 22. HENDRY, A. W. (1978): «A note on the Strength of Brickwork in Combined Racking Shear and Compression», *Proceeding of British Ceramic Society*, N.º 27, Load Bearing Brickwork (6), 47-52.
 23. HEGEMIER, G. A.; NUNN, R. O., y ARYA, S. K. (1978): «Behaviour of Concrete Masonry Under Biaxial Stress», *Proceedings of the North American Masonry Conference*, Boulder, paper 1, University of Colorado, Boulder, 1.1-1.28.
 24. TASUJI, M. E.; LLOYD, F. O., y NILSON, A. H. (1978): «Stress Strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loadings», *American Concrete Institute Journal*, 75 (7), July, 306-312.
 25. HENDRY, A. W. (1978): «A note on the Strength of Brickwork in Combined Racking Shear and Compression», *Proc. Br. Ceram. Soc.*, Dec., N.º 27, Load Bearing Brickwork (6).