

**INVESTIGACIÓN SOBRE LA INFLUENCIA DE MINERALES
INDUSTRIALES PROCESADOS EN LA FRACTURA DE PORCELANAS.
EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA FRACTURA POR FLEXIÓN EN TRES
PUNTOS
RESEARCH ON PROCESSED INDUSTRIAL MINERALS INFLUENCE IN
PORCELAINS FRACTURES
THREE POINT FRACTURE FLEXION STATISICAL EVALUATION**

Correa Agustín, Fuertes Luciano, García Gabriela.
SEGEMAR, Avenida General Paz 5445, San Martín, Buenos Aires, 1650
agustin.f.correa@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó la naturaleza de la fractura resultante al someter a un esfuerzo de flexión un material cerámico, producido a escala industrial por Porcelanas TSUJI. Este material es de la familia de las porcelanas obtenidas por cocción de mezclas de arcilla, cuarzo y feldespato. La empresa proveyó dos materiales: una porcelana esmaltada y otra sin esmaltar; para evaluar la injerencia del esmalte en la resistencia mecánica. La porcelana sin esmaltar se obtuvo por monococción a 1300 °C; la esmaltada, con un punto de partida similar en composición, se obtuvo en dos etapas: un bizcochado a 1050 °C y cocinada a 1300 °C, luego del esmaltado. La resistencia a la flexión por el método de *tres puntos* fue la evaluación elegida. Se informa el valor de tensión MOR, (*Modul Of Rupture*), que puede soportar un material antes de la ruptura. Para los ensayos se utilizó una prensa hidráulica con límites de detección de 9,81 N. En ambos materiales se observó un comportamiento diverso a la fractura. La fractura simple está asociada a los valores de ruptura más bajos, y la catastrófica a los más altos. Se dio identidad a este fenómeno, al definir poblaciones de rotura simple y catastrófica por medio de distribuciones de población. El desarrollo de los modelos permitió apreciar que en ambos materiales los distintos comportamientos estarían asociados a la heterogeneidad de la materia prima o las condiciones de procesos. Esto último debe ser investigado. Concluimos que además de evaluar el valor de ruptura (MOR) debe observarse el tipo de fractura y caracterizarse las piezas ensayadas.

Palabras Clave: porcelana dura, ensayo de rotura, análisis estadístico.

ABSTRACT

We analyzed the characteristics of fractures that occur when flexion is applied to ceramic materials produced on an industrial scale by Porcelanas TSUJI. These materials belong to the porcelain family, which is made of baking clay, quartz, and feldspar. The company provided us with two types of porcelain materials, one enameled and the other unenameled, to evaluate their effects on mechanical resistance. The non-enameled porcelain was produced through single baking at 1300°C, while the enameled porcelain underwent double baking—first at 1050°C and then at 1300°C after the enameling process. We measured the resistance to flexion using the 3-point method and reported the modulus of rupture (MOR)—the maximum tension the material can withstand before breaking. Our tests utilized a hydraulic press with a detection limit of 9.81 N. Both materials exhibited diverse fracture behavior. Simple fracture is associated with lower breaking values, while catastrophic fracture is linked to higher ones. This phenomenon was identified by defining populations of simple and catastrophic fracture using population distributions. The development of the models revealed that in both materials, the different behaviors are likely associated with the heterogeneity of the raw material or processing conditions. This last point must be investigated. We conclude that in addition to evaluating the breaking value (MOR), the type of fracture should be observed, and the tested pieces characterized.

Keywords: hard-porcelain, fracture test, statistical analysis

INTRODUCCIÓN

Los ensayos de rotura sobre los productos cerámicos sirven a su caracterización. En este caso se utilizó el método conocido como el *ensayo de tres puntos*, sobre probetas de forma rectangular [1]. Se aplica una fuerza incremental sobre la probeta sostenida por dos apoyos hasta que se logra la ruptura de la pieza, como se observa en la Figura 1.

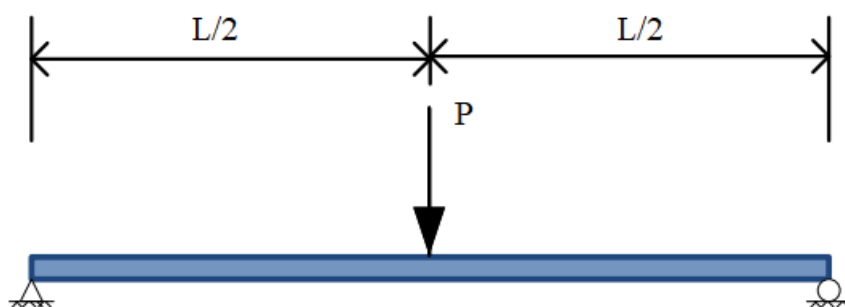


Figura 1. Esquema del ensayo de tres puntos.

Los diagramas de característica de corte y momento [2]. Se observan en la Figura 2.

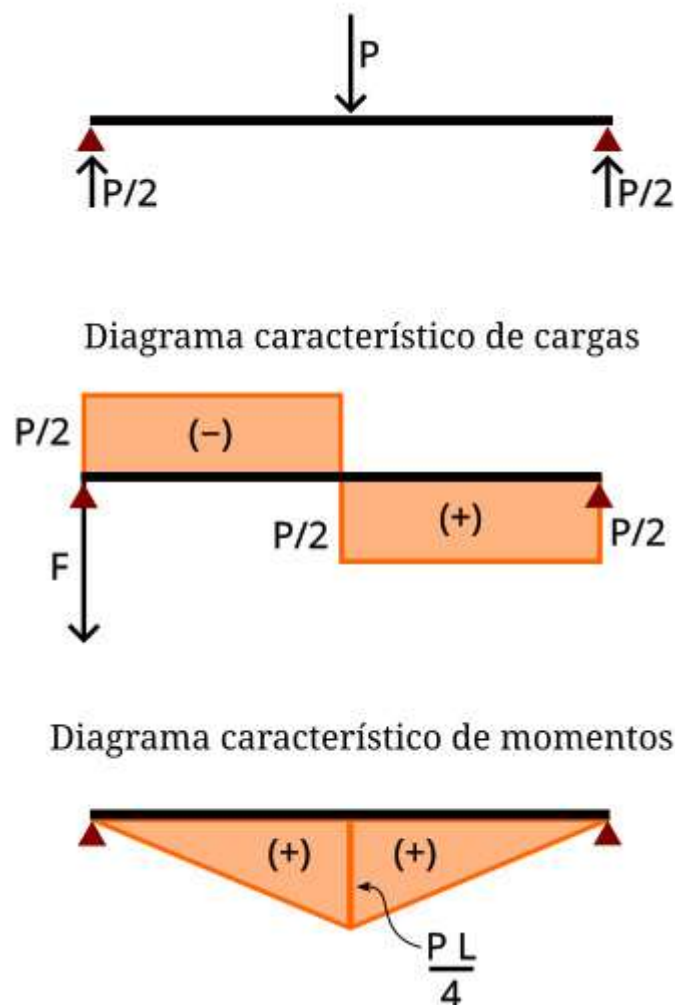


Figura 2. Diagrama de cargas y características de corte y momentos

Se observa que en la zona media la pieza a ensayar está sometida a un momento flexor y a esfuerzos de corte. La tensión necesaria para que se produzca la ruptura se conoce como MOR (*Modul Of Rupture*). En los casos que se tenga una adecuada cantidad de experiencias, el tratamiento estadístico se potencia porque en vez de calcular valores medios e intervalos de incertidumbre, se pueden organizar los datos de manera tal de tener una distribución que se ajuste a funciones de distribución como Weibull, Gamma, Beta, exponencial u otras.

Para esto se utilizaron dos lotes de muestras de 15 unidades representativas de las porcelanas, manufacturadas por la empresa TSUJI S.A., tomadas del resultado del proceso. El lote 1 representa a la porcelana esmaltada; el lote 2, a la porcelana sin esmaltar. Ambas se sometieron al ensayo de fractura por 3 puntos, luego del cual fueron reconstruidas usando sus trizas, con el objeto de observar cualitativamente la naturaleza de la fractura ocurrida.

Para construir la distribución estadística, los datos obtenidos se ordenan en forma creciente. A cada uno de los ensayos se le adjudica un número j de orden, y a cada experimento se le atribuirá un valor de la función de distribución acumulada $F(X)$ de acuerdo al *rank* mediano [3], donde X en nuestro caso es el MOR, y que es el número total de muestras ensayadas.

$$F(X) = \frac{j - 0,3}{q + 0,4} \quad (1)$$

La función de sobrevivencia o *reability function* es

$$R(X) = 1 - F(X) \quad (2)$$

La función de población diferencial pdf $f(X)$

	$f(X) = \frac{dF(X)}{dX} = - \frac{dR(X)}{dX}$	(3)
--	--	-----

Se define la *Hazard Function* $h(X)$ [4], también llamada de probabilidad o *muerte súbita* como.

$$h(X) = \frac{f(X)}{R(X)} \quad (4)$$

En este caso, las funciones con las que se modelaron estas subpoblaciones fueron: Tangente hiperbólica $T(X)$ [5] con exponente interno, limitada con el parámetro ψ , X_o es la (tensión mínima de rotura) y n exponente interno,

$$T(X) = \tanh \left\{ \left(\frac{X - X_o}{\psi - X_o} \right)^n \right\} \quad (6)$$

y la distribución Beta [6], $W(X)$; expresado como una integral limitada por los valores: X_o (mínimo MOR de rotura) y X_m (máximo MOR), con parámetros a y b . $B(a, b)$, es la función beta.

$$W(X) = \frac{1}{B(a,b)} * \int_{x_o}^X dY * Y^{(a-1)} * (1 - Y)^{(b-1)} \quad (7)$$

$$Y(X) = (x - X_o)/(X_m - X_o) \quad (8)$$

Esta distribución permite modelar las más comunes distribuciones acumulativas en general y también aquellas cuya población diferencial, (pdf), o $h(X)$ se manifiestan en forma de U (*bath-tube*) o J.

EXPERIMENTAL

El ensayo se realizó sobre piezas rectangulares de espesor e , ancho b y de distancia ente apoyos L , con una carga P . Se ensayaron tanto las 15 piezas esmaltadas como 16 no esmaltadas. El MOR o tensión de rotura se calcula para este tipo de ensayo [7] como

$$MOR = (3 * P * L) / (2 * b * e^2) \quad (9)$$

El cálculo se lleva a cabo con unidades MKS. El dato de MOR se expresa en bar ya que su valor unitario es cercano a la unidad de atmósfera técnica.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos se observan en la Tabla 1 y 2. Los que fueron graficados en la Figura 3; según los valores obtenidos de la fórmula (1). En ambos tipos de lotes, tanto en el de piezas no esmaltadas como en el de piezas esmaltadas, se observaron dos tipos de rotura; la simple en donde las piezas quedan fraccionadas en dos partes y la catastrófica donde las piezas se fracturan en trizas. Por consiguiente, se trabajó con la hipótesis que dentro de cada lote este tipo de rotura definía dos poblaciones de características propias.

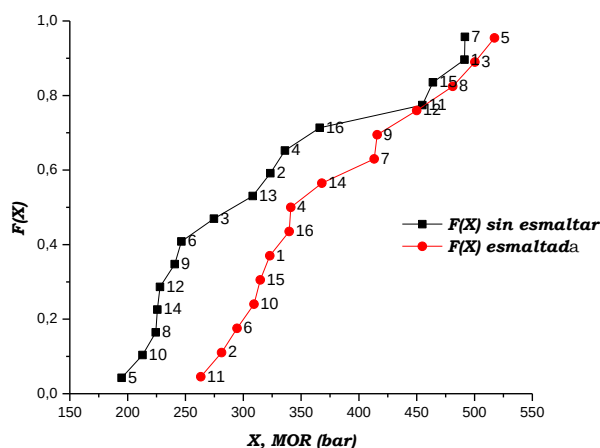


Figura 3 F(X) vs. MOR, Piezas esmaltadas y sin esmaltar.

Tabla 1. Datos del ensayo de rotura de piezas esmaltadas

Pieza	j	P	L	e	b	MOR	F(X)	F'(X)	Fragmentos	Rotura
		N	mm	mm	mm	bar	-			
11	1	844	30,2	5,80	43,16	263,3	0,0455	0,0833	2	S I M
2	2	922	30,2	5,84	43,54	281,3	0,1104	0,2024	2	
6	3	1040	30,2	6,12	42,70	294,6	0,1753	0,3214	2	

10	4	1020	30,2	5,88	43,22	309,3	0,2403	0,4405	2	P L E
15	5	1040	30,2	5,90	43,00	314,7	0,3052	0,5595	2	
1	6	1040	30,2	5,82	43,06	323,0	0,3701	0,6786	2	
16	7	1079	30,2	5,80	42,78	339,7	0,4351	0,7976	2	
4	8	1079	30,2	5,78	42,90	341,1	0,5000	0,9167	2	
14	9	1137	30,2	5,70	43,12	368,0	0,5649	0,0946	5	CA TAS TRÓ FI CA
7	10	1470	30,2	6,12	43,08	413,2	0,6299	0,2297	3	
9	11	1372	30,2	5,88	43,28	415,8	0,6948	0,3649	4	
12	12	1470	30,2	5,86	43,14	450,0	0,7597	0,5000	3	
8	13	1666	30,2	6,06	42,76	481,2	0,8247	0,6351	8	
3	14	1588	30,2	5,78	43,08	500,3	0,8896	0,7703	6	
5	15	1784	30,2	6,00	43,44	517,3	0,9545	0,9054	5	

Tabla 2. Datos del ensayo de rotura de piezas sin esmaltar

Pieza	j	P	L	e	b	MOR	F(X)	F'(x)	Fragmentos	Rotura
		N	mm	mm	mm	bar	-			
5	1	569	30,2	5,52	43,44	194,8	0,0427	0,0833	2	S I M P L E
10	2	628	30,2	5,54	43,54	212,9	0,1037	0,2024	2	
8	3	687	30,2	5,64	43,6	224,3	0,1646	0,3214	2	
14	4	628	30,2	5,4	43,22	225,7	0,2256	0,4405	2	
12	5	706	30,2	5,68	43,5	228,0	0,2866	0,5595	2	
9	6	746	30,2	5,66	43,8	240,7	0,3476	0,6786	2	
6	7	746	30,2	5,62	43,38	246,5	0,4085	0,7976	2	
3	8	765	30,2	5,38	43,6	274,7	0,4695	0,9167	2	
13	9	746	30,2	5,66	43,8	308,2	0,5305	0,0833	5	CA TAS TRÓ FI CA
2	10	628	30,2	5,55	43,62	323,4	0,5915	0,2024	3	
4	11	687	30,2	5,42	43,22	336,1	0,6524	0,3214	5	
16	12	765	30,2	5,48	43,66	366,1	0,7134	0,4405	6	
11	13	706	30,2	5,408	43,56	454,9	0,7744	0,5595	3	
15	14	746	30,2	5,58	43,68	464,0	0,8354	0,6786	7	
1	15	569	30,2	5,58	43,58	491,3	0,8963	0,7976	4	
7	16	628	30,2	5,62	43,50	491,7	0,9573	0,9167	5	

La descripción de estas poblaciones se realizó modelando y graficando los datos correspondientes. Nuevamente se aplicó el método definido en la ecuación (1) para definir las coordenadas de estas poblaciones a modelar como se observa que en las Tablas 1 y 2 que se vuelcan en la columna $F'(X)$, tanto para las poblaciones de ruptura simple como las de rotura catastrófica. En la Figura 4, se modeló con distribuciones Beta. las poblaciones esmaltadas En la Figura 5 se observa la modelación realizada para el lote de piezas no esmaltadas. La población de rotura simple no esmaltada se modeló con la distribución de tangente hiperbólica limitada, y la de rotura catastrófica con la función de distribución Beta. Además, en todos los casos, se graficó las respectivas $h(X)$, *Hazard function*.

En la Tabla 7 se expresan los resultados obtenidos de las modelaciones realizadas con los parámetros que caracterizan a las distribuciones.

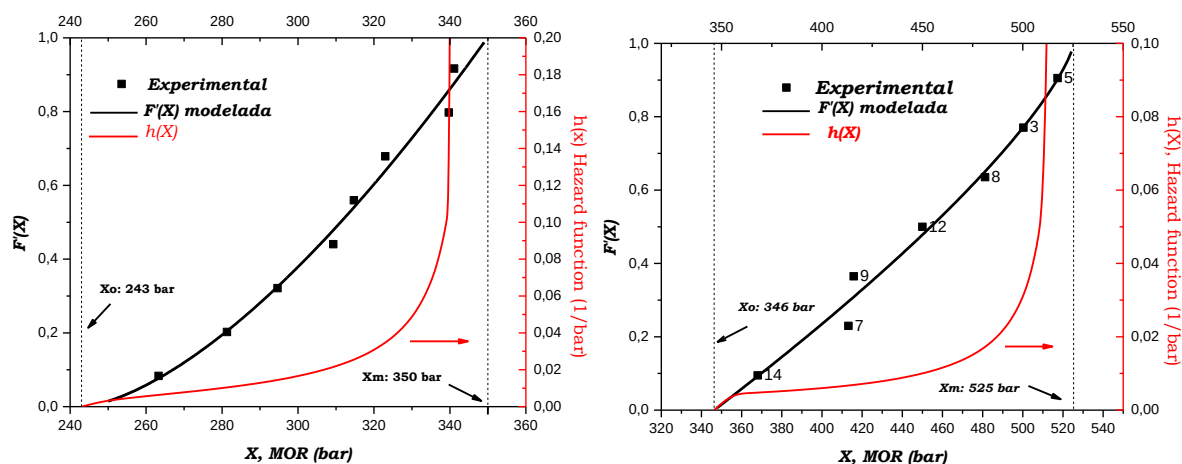


Figura 4. $F'(X)$ vs. MOR. Población esmaltada de rotura simple (izq.) y catastrófica (der.)

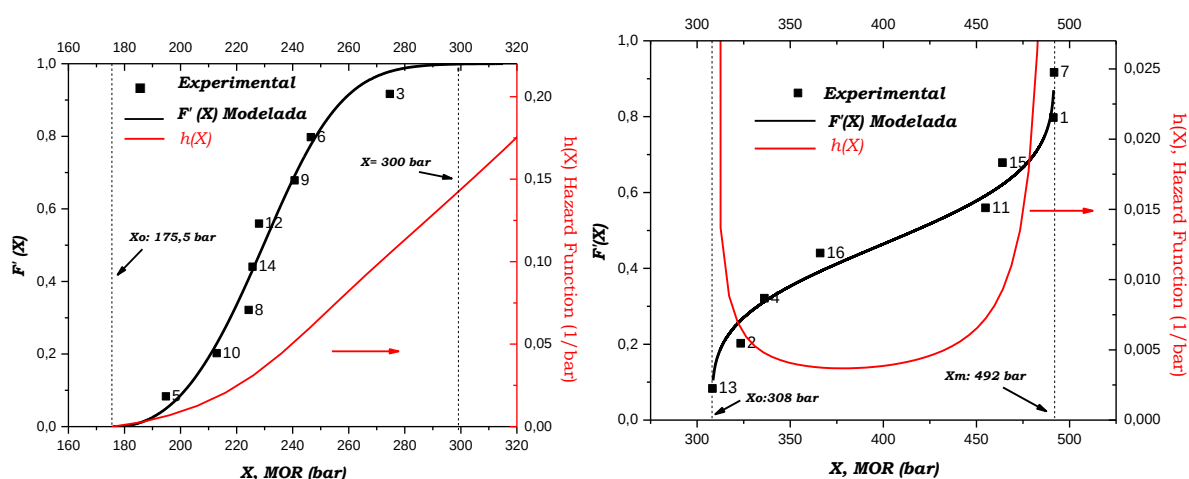


Figura 5. $F'(X)$ vs. MOR, Población sin esmaltar de rotura simple (izq.) y catastrófica (der.)

Tabla 7. Distribuciones modeladas en las poblaciones de las piezas ensayadas.

Muestras esmaltadas			Muestras sin esmaltar		
Rotura	Simple	Catastrófica		Simple	Catastrófica
Proporción (%)	53	47	Proporción (%)	50	50
Distribución	Beta, W(X)	Beta, W(X)	Distribución	T(X)	Beta, W(X)
X_0 (bar)	$243,0 \pm 18,8$	$346,3 \pm 12,6$	X_0 (bar)	$175,5 \pm 36,1$	$308,0 \pm 1,4$
X_m (bar)	$349,9 \pm 3,2$	$525,4 \pm 8,7$	X_m (bar)	300 *	$491,8 \pm 1,7$

a	1,54 ± 0,471	1	Ψ (bar)	245,4 ± 3,2	a:0,27 ±0,07
b	1	0,75 ±0,14	n	2,22± 1,01	b: 0,23 ± 0,06
Sigma (bar)	90,8	156,8	Sigma (bar)	21,6	203
Media (bar)	307,9	448,5	Media (bar)	229,9	409
Modo (bar)	n.a	n.a	Modo (bar)	230,1	401(antimodo)
Mediana	311,9	456,4	Mediana	229,6	383,4
Pearson (Skw)	-0,132	-0,151	Pearson (Skw)	-0,008	0,38
R ² coef. corr.	0,97	0,97	R ² coef. corr.	0,95	0,95

DISCUSIÓN

Los valores de MOR son levemente superiores en el lote de especies esmaltadas, pero tienden a igualarse en los valores más altos.

Las roturas catastróficas tienen un mayor MOR de ruptura. Tal vez, como consecuencia de las tensiones que acumulan cuando son sometidas a estados de carga de menor intensidad, y al producirse la rotura por un aumento de las cargas la placa se hace trizas.

En el lote de las piezas esmaltadas, la función $h(X)$, *Hazard function*, se manifiestan en forma de J. En este lote, la probabilidad de *muerte súbita* aumenta en forma hiperbólica al final de los esfuerzos que delimitan su existencia.

Se hace notar que las muestras sin esmaltar de rotura simple, a pesar de ser modelada por la función de tangente hiperbólica, tiene un comportamiento similar a una distribución normal de Gauss, ya que los valores de su media, mediana y modo son muy similares y *skewness* casi nula. Se observa que la población de rotura catastrófica de las muestras sin esmaltar $h(X)$ tiene una forma de U; predice una gran probabilidad de *muerte súbita* tanto al principio como al final de los esfuerzos que delimitan su aparición.

Cuando se comparan las roturas simples de los lotes sin esmaltar y esmaltados se ve que las piezas no esmaltadas comienzan su rotura en 175 bar y su existencia termina en un valor estimado de 300 bar, mientras que las esmaltadas su rotura simple empieza en 243 bar y su existencia termina en un MOR de 350 bar.

Algo similar sucede en las piezas de rotura catastrófica, en las piezas no esmaltadas la rotura comienza en 308 bar y termina en un MOR de 492 bar, mientras que las esmaltadas comienzan su rotura en 346 bar y terminan en 525 bar.

CONCLUSIONES

El tratamiento estadístico utilizado, además de ser un método que describe satisfactoriamente el comportamiento de las piezas esmaltadas y no esmaltadas frente al ensayo de rotura por el método de tres puntos, detecta la existencia de una fuente de heterogeneidad debido a la composición de la materia prima o las condiciones de proceso que amerita ser investigada en tempranas etapas del desarrollo tecnológico.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Porcelanas TSUJI por el suministro de las muestras cerámicas empleadas y en el apoyo en el estudio de sus propiedades mecánicas por un método no convencional.

Al Licenciado Julián SCABBILO (SEGEMAR) por sus tareas de apoyo bibliográfico.

Al Ph. D. Alfredo A. CORREA TEDESCO por el aporte de sus conocimientos actualizados del fenómeno de rotura, y en la edición de gráficos.

REFERENCIAS

1. D. Nguyen, T. Ngo and N, Tran. "Span length-dependent load-carrying capacity of normal concrete-hpfrc beam" *Journal of Science Technology in Civil Engineering*, Nuce 15(2), 26 – 37, 2021.
2. E.Fliess. "Estabilidad primer curso", 389 págs.
3. Ch. Lipson, N. Sheth. "Statistical design and analysis of experiments engineering", 18 pp, 1973.
4. Ch. Lipson, N. Sheth. "Statistical design and analysis of experiments engineering", 46 pp, 1973
5. T. Blickle, B.G. Lakatos, C. Mihalyko and Z. Ulbert. "The hyperbolic tangent distribution family", *Powder Technology*, 97(2), 100 - 108, 1998
6. Beta distribution." Wikipedia, The Free Encyclopedia, Wikimedia Foundation, 7 Jul 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_distribution.
7. J. Shackelford. "Ciencia de materiales para ingenieros", 391 págs.