

**INVESTIGACIÓN SOBRE LA INFLUENCIA DE MINERALES
INDUSTRIALES PROCESADOS EN LA FRACTURA DE PORCELANAS.
EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE LA FRACTURA POR FLEXIÓN EN
CUATRO PUNTOS
RESEARCH ON PROCESSED INDUSTRIAL MINERALS INFLUENCE IN
PORCELAINS FRACTURES
FOUR 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 la empresa TSUJI S.A. 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 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 *cuatro 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 detectó un comportamiento diverso sobre la base de la *Hazard Function*. Se detectaron dos poblaciones que se asimila a dos grupos de más bajo y más altos MOR. Se dio identidad a este fenómeno, al describir esos grupos 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. Concluimos que además de evaluar el valor de ruptura (MOR) debe observarse el tipo de fractura y caracterizarse las piezas ensayadas.

Palabras Clave: cerámicos, 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 Porcelenas 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. In both cases, we observed varying behaviors based on the Hazard function, identifying two populations with distinct low and high mortality rates (MOR). This phenomenon was recognized through the identification of two separate population distributions. The model we developed helps us understand that the differing behaviors of the two materials are likely associated with the heterogeneity of the base materials or the conditions under which they were processed. In conclusion, in addition to evaluating the MOR value, it is crucial to characterize both the type of fracture and the samples involved.

Keywords: hard-porcelain, fracture test, statistical analysis

INTRODUCCIÓN

Los ensayos de rotura de los productos cerámicos están destinados a su caracterización. En este caso se utilizó el método conocido como el *ensayo de cuatro puntos* sobre probetas de forma rectangular. En éste, se aplica sobre la pieza una fuerza incremental hasta que se logra la ruptura de la pieza, El cálculo de la tensión que se produce en la zona de ruptura se conoce como MOR (*Modul Of Rupture*). Debido a las observaciones realizadas en sobre los resultados obtenidos en la PARTE I del presente trabajo, se llevó adelante esta segunda parte a través del método de *cuatro puntos* (Fig. 1), con el objetivo de discernir si la heterogeneidad en el comportamiento de las porcelanas evaluadas mediante el método de los *tres puntos* es exógena al método de testeo. Esto tiene su asidero en las diferencias en la distribución de tensiones y esfuerzos que producen ambos métodos (Fig. 2).

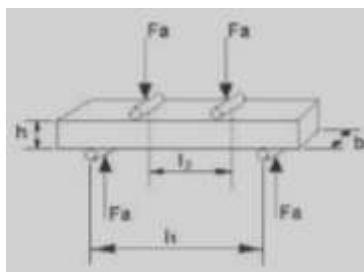


Figura 1. Esquema ilustrativo del ensayo de flexión por *cuatro puntos*.

El método de *cuatro puntos* es más adecuado para la medición del MOR en materiales cerámicos (en general, para materiales frágiles) [1], pero desde el punto de vista de la evaluación de la naturaleza de la fractura, se empleó en este caso para verificar si los

mismos materiales que aquellos ensayados en la PARTE I, presentaban un comportamiento heterogéneo en la fractura.

Para ello se llevó adelante el ensayo de una serie de muestras de porcelanas esmaltadas y sin esmaltar y se observó la forma en la cual se veían fracturadas. Luego se modelaron los resultados con distintas herramientas estadísticas, y siguiendo las observaciones realizadas.

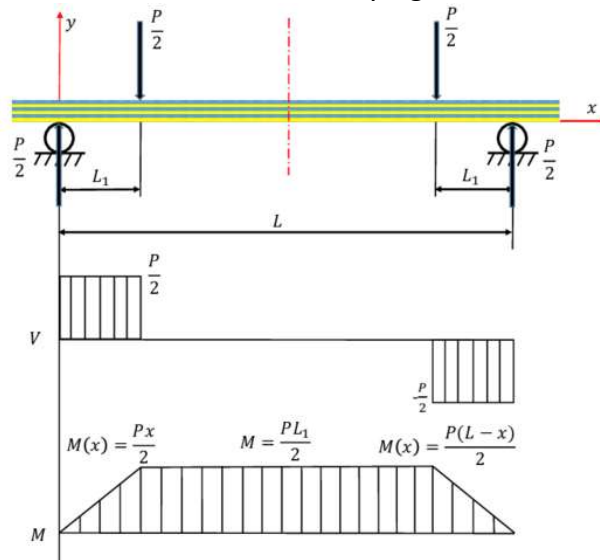


Figura 2. Esquema del esfuerzo de corte (V) y momento flector (M) resultantes.

Se puede apreciar que, a diferencia del método de *tres puntos*, éste sólo contempla esfuerzo de corte entre los apoyos de la muestra y el punto de aplicación de la fuerza. Entre ambos puntos de aplicación, el esfuerzo producido es de flexión pura. Por lo que la naturaleza del ensayo, aunque muy similar en apariencia, resulta por sobremanera distinta. Es por esto que toda creación humana es deleznable, excepto su ejecución.

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.

Para construir la distribución 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 $F(X)$ acuerdo al *rank* mediano, donde X en nuestro caso es el MOR.

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

La función de supervivencia, o *reability* $R(X)$ queda

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

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

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

También se define la *Hazard Function* $h(X)$, también llamada de probabilidad de ruptura o muerte súbita.

$$h(X) = \frac{f(X)}{dR(X)} = -\frac{d \ln R(X)}{dX} \quad (4)$$

La función de muerte súbita puede detectar en la distribución original situaciones que definen la existencia de sub familias de población. En este caso las familias se modelaron con la función Beta.

La distribución Beta, $W(X)$; es expresada como una integral imitada por los valores X_0 (mínimo MOR de rotura) y X_m (máximo MOR), con parámetros a y b .

$$W(X) = \frac{1}{B(a+b)} * \int_{x_0}^X dY * Y^{(a-1)} * \{1 - Y\}^{(b-1)} \quad (5)$$

$$Y = \frac{x - X_0}{X_m - X_0} \quad (6)$$

Esta función permite modelar distribuciones cuya función diferencial de población (pdf) cuyas formas puedan manifestarse con forma de U (*bathtub*) o J.

EXPERIMENTAL

Se trabajó sobre 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 se obtuvo en dos etapas: un bizcochado a 1050 °C y cocinada a 1300 °C, luego del esmaltado.

El ensayo se realizó sobre piezas rectangulares de espesor e , ancho b y de distancia entre apoyos L . El MOR o tensión de rotura se calcula como:

$$MOR = \{3 * Q * (L - L')\} / \{2 * b * e^2\} \quad (7)$$

En 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

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de rotura sobre las piezas esmaltadas; mientras que en la Tabla 2 los resultados sobre las piezas no esmaltadas.

Tabla 1. Datos del ensayo de rotura de piezas esmaltadas

Pieza	j	Q	L	L'	e	b	MOR	F(X)
-------	---	---	---	----	---	---	-----	------

		N	mm	mm	mm	mm	bar	-
12	1	1019,2	39,06	21,98	5,92	43,06	173,0	0,0486
14	2	1234,8	39,06	21,98	5,82	42,98	217,3	0,1181
9	3	1332,8	39,06	21,98	5,8	43,28	234,5	0,1875
4	4	1489,6	39,06	21,98	5,86	43,28	256,8	0,2569
5	5	1646,4	39,06	21,98	5,96	43,18	275,0	0,3264
6	6	1568	39,06	21,98	5,8	43,06	277,3	0,3958
3	7	1646,4	39,06	21,98	5,86	42,98	285,8	0,4653
13	8	1705,2	39,06	21,98	5,90	42,98	292,0	0,5347
8	9	1764	39,06	21,98	5,96	42,90	296,6	0,6042
11	10	2116,8	39,06	21,98	5,92	43,04	359,5	0,6736
10	11	2214,8	39,06	21,98	5,92	43,16	375,1	0,7431
2	12	2489,2	39,06	21,98	5,96	43,08	416,7	0,8125
1	13	2646	39,06	21,98	5,82	43,00	465,4	0,8819
7	14	3312,4	39,06	21,98	5,80	43,04	586,1	0,9514

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

Pieza	j	Q	L	L'	e	b	MOR	F(X)
		N	mm	mm	mm	mm	bar	-
14	1	823,2	39,06	21,98	5,28	43,6	173,5	0,0486
4	2	803,6	39,06	21,98	5,14	43,04	181,1	0,1181
12	3	921,2	39,06	21,98	5,16	43,54	203,6	0,1875
9	4	1254,4	39,06	21,98	5,36	43,54	256,9	0,2569
6	5	1332,8	39,06	21,98	5,42	43,24	268,8	0,3264
1	6	1254,4	39,06	21,98	5,24	43,54	268,8	0,3958
3	7	1313,2	39,06	21,98	5,34	43,3	272,5	0,4653
7	8	1391,6	39,06	21,98	5,38	43,7	281,9	0,5347
2	9	1352,4	39,06	21,98	5,12	43,28	305,4	0,6042
10	10	1587,6	39,06	21,98	5,5	43,56	308,7	0,6736
13	11	1587,6	39,06	21,98	5,18	43,58	347,8	0,7431
11	12	1862	39,06	21,98	5,38	43,76	376,6	0,8125
8	13	2077,6	39,06	21,98	5,44	43,8	410,6	0,8819
5	14	2273,6	39,06	21,98	5,50	43,68	440,8	0,9514

En la Figura 1 se grafican los de F(X) (CDF) vs MOR y además cálculo de la *Hazard Function* calculada numéricamente. Esta función indica una *muerte súbita* en 290 bar en la curva correspondiente a las muestras sin esmaltar, En cambio, en las muestras esmaltadas la frontera se encuentra en un rango entre 300 y 341 bar. Esto sirvió para separar las piezas ensayadas en un familia de más bajo Mor y otras de más alto.

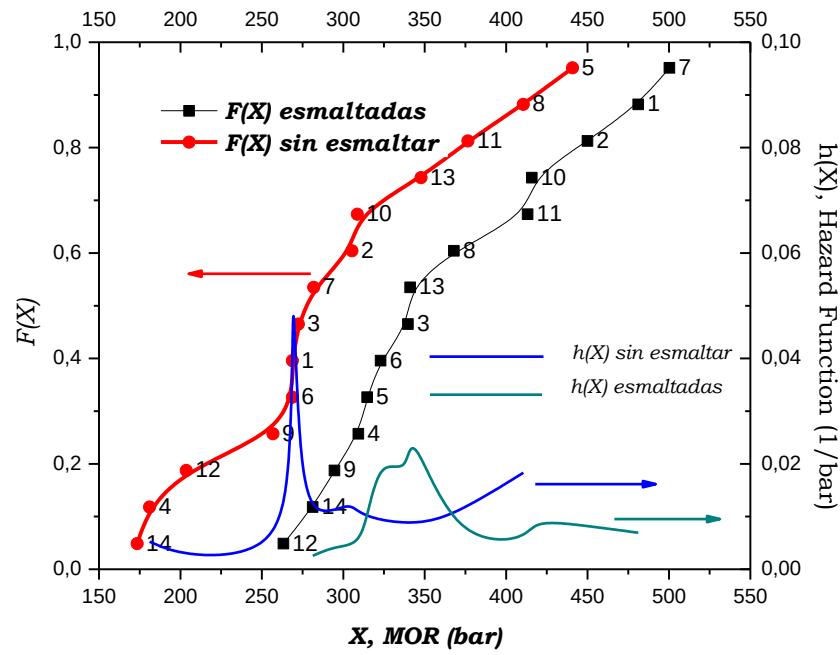


Figura 1. $F(X)$ vs. MOR, Piezas esmaltadas y sin esmaltar y Hazard functions

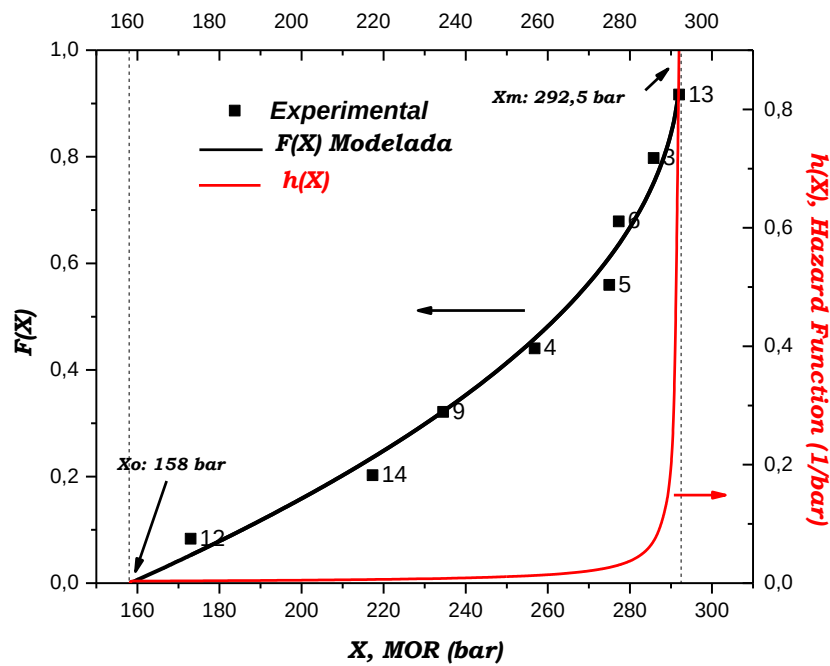


Figura 2. $F(X)$ vs. MOR. Población esmaltada de más bajo MOR.

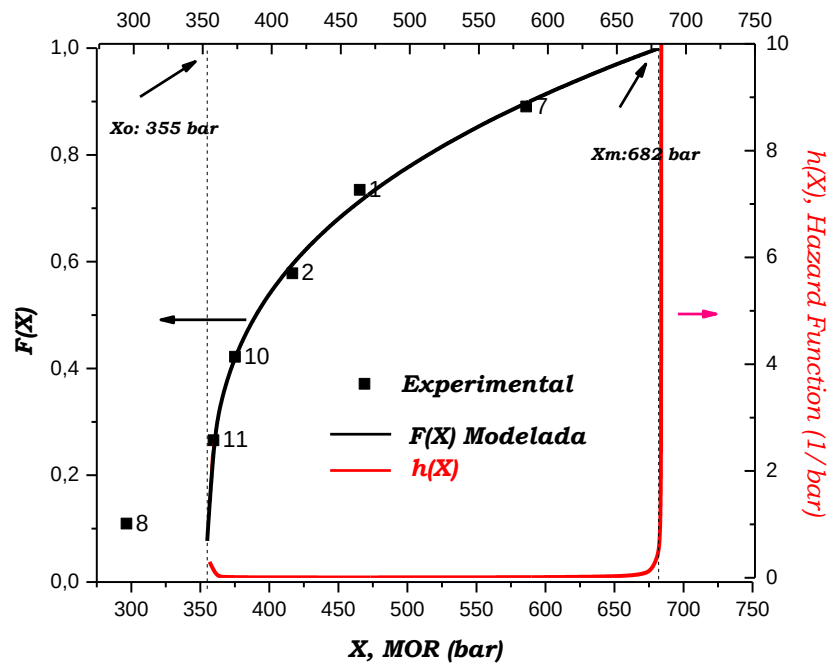


Figura 3. $F(X)$ vs MOR, Población esmaltada de más alto MOR

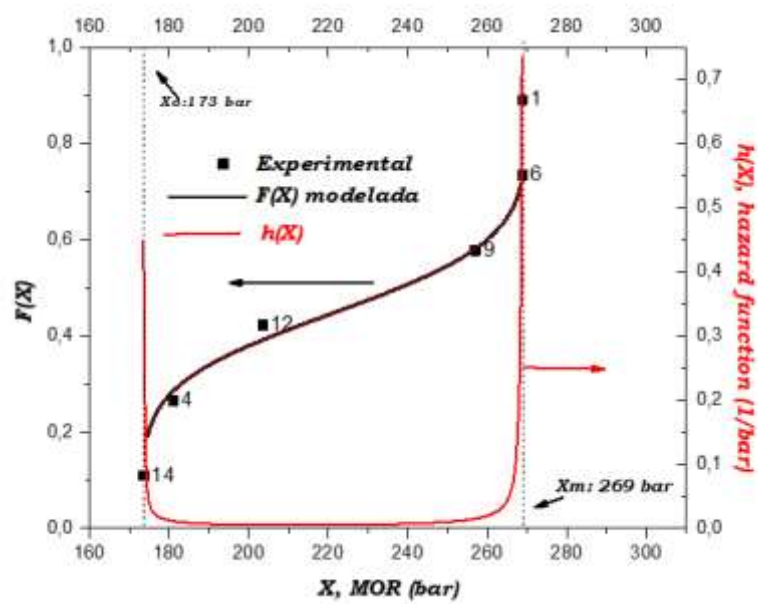


Figura4. $F(X)$ vs MOR, Población sin esmaltar de más bajo MOR.

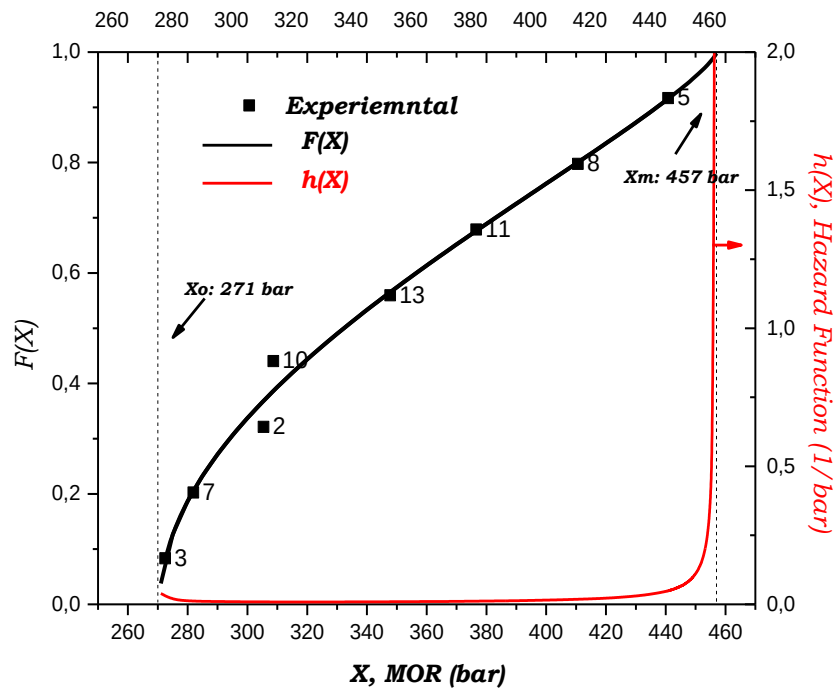


Figura 5. $F(X)$ vs MOR, Población sin esmaltar de más alto MOR.

Tabla3. Distribuciones modeladas en las poblaciones de las piezas esmaltadas.

	Rotura	
	Simple	Catastrófica
Proporción(%)	57,1	42,9
Distribución	Beta	Beta
X_0 (bar)	$158,2 \pm 11,7$	$354,9 \pm 5,4$
X_m (bar)	$292,5 \pm 1,12$	$682,4 \pm 92,2$
a	1	$0,311 \pm 0,083$
b	$0,463 \pm 0,0445$	1
Sigma (bar)	86,8	191
Media (bar)	250	433
Modo (bar)	n.a	n.a
Mediana	271	344
Skewnes	-0,71	-1,4
R2	0,97	0,95

Tabla 4. Distribuciones modeladas en las poblaciones de las piezas sin esmaltar.

	Rotura	
	Simple	Catastrófica
Proporción(%)	42,9	57,1
Distribución	Beta	Beta
X_0 (bar)	$173,4 \pm 0,93$	$270,6 \pm 1,76$
X_m (bar)	$268,9 \pm 1,82$	$457,2 \pm 19,8$

a	0,200 ± 0,107	0,510 ± 0,099
b	0,164 ± 0,095	0,789 ± 0,249
Sigma (bar)	114	203
Media (bar)	230,7	343,8
Antimodo (bar)	219,2*	401,8*
Mediana (bar)	211,7	322,7
Skewness Pearson	0,5	0,43
R2	0,92	0,98

CONCLUSIONES

Los ensayos demuestran que las muestras esmaltadas tienen MOR más alto que las piezas sin esmaltar.

Que en los dos tipos de muestras sin esmaltar y esmaltadas aparecen dos distintas poblaciones con valores medios de MOR diferentes.

Esto nos indica que este método de análisis estadístico de caja negra abre la sospecha de una heterogeneidad en los productos obtenidos debida a la materia prima utilizada, al proceso utilizado o a una interrelación entre ambos.

REFERENCIAS

1. Ch. Lipson, N. Sheth. "Statistical design and analysis of experiments engineering", 18 pp, 1973
2. Ch. Lipson, N. Sheth. "Statistical design and analysis of experiments engineering", 46 pp, 1973
3. Beta distribution." Wikipedia, The Free Encyclopedia, Wikimedia Foundation, 7 Jul 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Beta_distribution.
4. D, Hasselman. "Fracture Mechanics of Ceramics Measurements Transformations and High-Temperature Fracture", 3 pp, 1983