

# Poster 29

## ESTUDIO DE LAS TENSIONES RESIDUALES SOBRE LAS PARTÍCULAS DE CUARZO EN EL GRES PORCELÁNICO

**\*Agenor De Noni Junior<sup>1,2</sup>, Dachamir Hotza<sup>2</sup>, Vicente Cantavella Soler<sup>3</sup>, Enrique Sanchez Vilches<sup>3</sup>.**

(1) Instituto Maximiliano Gaidzinski, IMG, Rua: Dr. Edson Gaidzinski, 352, CEP. 88845-000 Cocal do Sul, SC, Brasil.

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, PGMAT/UFSC, Florianópolis, Brasil.

(3) Instituto de Tecnología Cerámica, ITC. Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas, AICE, Universidad Jaume I de Castellón, España.

\*agenor@imgnet.org.br

Palabras clave: tensión residual, cuarzo, gres porcelánico, enfriamiento.

### Resumen

El presente estudio tiene por objeto determinar la influencia de la velocidad de enfriamiento en el desarrollo de tensiones residuales sobre las partículas de cuarzo. Para ello se prepararon probetas de gres porcelánico a partir de una composición industrial, y fueron sometidas a diferentes condiciones de enfriamiento. Las tensiones microscópicas en las partículas de cuarzo se midieron por DRX. Mediante un procedimiento de cálculo desarrollado en este trabajo, se determinó la tensión residual equivalente en toda la partícula, obteniéndose valores comprendidos entre 240-260 MPa. Este resultado es coherente con el modelo de Selsing, que postula una relación entre las tensiones residuales, las propiedades elásticas y la diferencia en el coeficiente de dilatación de la matriz y de las partículas de cuarzo independiente de la velocidad de enfriamiento. No obstante, los valores teóricos se encuentran comprendidos entre 560-600 MPa, lo que es aproximadamente el doble del valor medido. Esta discrepancia puede atribuirse a un desprendimiento parcial de las partículas de cuarzo, o a las fisuras que aparecen alrededor o en el interior de las propias partículas.

### 1. Introducción

Una partícula esférica de fase dispersa en una matriz vítrea infinita desarrolla tensiones residuales microscópicas cuya magnitud puede ser calculada de acuerdo con el modelo de Selsing<sup>1</sup>:

$$\sigma_{rr} = \frac{\Delta\alpha \cdot \Delta T'}{\frac{1+\nu_m}{2E_m} + \frac{1-2\nu_c}{E_c}} \cdot \left( \frac{R}{R+l} \right)^3 \quad (1) \quad \sigma_{\theta\theta} = \frac{-\sigma_{rr}}{2} \quad (2)$$

Siendo:  $\sigma_{rr}$ , la tensión radial;  $\Delta\alpha$ , diferencia entre los coeficientes de expansión térmica lineal de la partícula y la matriz;  $\Delta T'$ , o intervalo de temperatura de enfriamiento (en el caso de una matriz vítrea, se considera desde aproximadamente la temperatura de transformación vítrea hasta la temperatura ambiente);  $R$ , radio de la partícula;  $l$ , la distancia desde la superficie de la partícula hasta un punto dado en la matriz;  $\sigma_{\theta\theta}$ , la tensión tangencial.

En este trabajo se pretende determinar la influencia de la velocidad de enfriamiento del ciclo de cocción en el desarrollo de tensiones residuales microscópicas sobre las partículas de cuarzo, fase cristalina mayoritaria del gres porcelánico. Este estudio es parte de un trabajo publicado por los autores<sup>2</sup>.

### 2. Procedimiento Experimental

Para llevar a cabo el estudio, se prepararon probetas de 80x20x7 mm por prensado (40 MPa) a partir de un polvo atomizado industrial. La temperatura de cocción fue 1190 °C, con el objeto de alcanzar

la máxima densidad. Las probetas fueran sometidas a seis condiciones de enfriamiento distintas: combinando enfriamientos dentro o fuera del horno y con o sin empleo de convección forzada (velocidades variables entre 0.1 y 8.5 °C/s). Las tensiones microscópicas sobre las partículas de cuarzo fueron analizadas mediante DRX, y se midieron directamente sobre las probetas enteras.

Los valores de tensión residual microscópica ( $\sigma_r$ ) han sido obtenidos a partir de las distancias interplanares ( $d_{hkl}$ ) de las familias de planos (112) y (211) calculadas a su vez a partir de las medidas de DRX y la ley de Bragg, ecuación (3). Con esta información es posible la determinación de la deformación volumétrica de la celda unidad del cristal de cuarzo ( $\varepsilon_v$ ). A continuación, se define una deformación lineal equivalente ( $\varepsilon$ ) lo que permite finalmente determinar la tensión residual equivalente sobre las partículas. El procedimiento de cálculo está representado por la siguiente secuencia de ecuaciones:

$$d_{hkl} = \frac{n\lambda}{2 \cdot \sin \theta} \quad (3) \rightarrow \frac{1}{d^2_{[hkl]}} = \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{h^2 + h \cdot k + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4) \rightarrow V = 0,866 \cdot a^2 \cdot c \quad (5) \rightarrow$$

$$\rightarrow \varepsilon_v = \frac{V - V_o}{V_o} \quad (6) \rightarrow \varepsilon = (1 + \varepsilon_v)^{1/3} - 1 \quad (7) \rightarrow \sigma_r = \varepsilon \cdot E \approx \sigma_{rr} \quad (8)$$

Siendo:  $h, k, l$ , los índices de Miller;  $a$  y  $c$  los parámetros de red del cuarzo;  $V_o$ , el volumen de la celda unidad del cuarzo no tensionado;  $E$ , el módulo de elasticidad del cuarzo.

### 3. Resultados y conclusiones

En la Tabla I se recogen los datos experimentales obtenidos. Los valores de tensión residual sobre las partículas de cuarzo obtenidos están comprendidos entre 240-260 MPa. Este resultado es coherente con el modelo de Selsing, que postula una relación entre las tensiones residuales, las propiedades elásticas y las diferencias en el coeficiente de dilatación de la matriz y de las partículas de cuarzo independiente de la velocidad de enfriamiento.

Tabla I – Resultados experimentales de las medidas de tensión residual sobre las partículas de cuarzo

Ve* [°C/s]	$D_{(112)}$ [nm]	$d_{(211)}$ [nm]	V [nm <sup>3</sup> ]	$\sigma_r$ (MPa)
**	1.8179	1.5416	113.00	0
0.1	1.8235	1.5476	114.15	264
0.6	1.8233	1.5473	114.10	252
3.2	1.8233	1.5478	114.13	259
4	1.8232	1.5468	114.05	241
6.6	1.8235	1.5476	114.15	264
8.6	1.8231	1.5475	114.08	248

\*velocidad de enfriamiento, \*\*datos del cuarzo estándar (sin tensión residual).

Empleando la ecuación (1), cabría esperar una tensión residual en las partículas de cuarzo de 580 MPa (considerando:  $E_c = 78$  GPa,  $E_m = 70$  GPa,  $\nu_c = \nu_m = 0,2$ ,  $\Delta T' = 730^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{c(20-750^\circ\text{C})} = 203 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\alpha_{m(20-750^\circ\text{C})} = 74 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ). Este valor teórico es aproximadamente el doble de los valores determinados experimentalmente. Esta discrepancia puede atribuirse a un desprendimiento parcial de las partículas de cuarzo, o a las fisuras que aparecen alrededor o en el interior de las propias partículas, las cuales son fácilmente observables por microscopía electrónica. Finalmente, cabe resaltar que la metodología empleada, basada en la determinación de la deformación volumétrica experimentada por la celda unidad del cuarzo, permitió obtener un valor de tensión residual equivalente a toda la partícula, y no solamente a un plano cristalino dado.

### 4. Referencias bibliográficas

1. Selsing, J. Internal Stresses in Ceramics. Journal of the American Ceramic Society, v. 44, p.419, 1961.
2. De Noni Jr. A. Hotza, D. Cantavella, V. Sánchez, E., Estudo das propriedades mecânicas de porcelanato através da avaliação de tensões residuais microscópicas e macroscópicas originadas durante a

etapa de resfriamento do ciclo de queima. Tesis doctoral, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brazil, 2007.