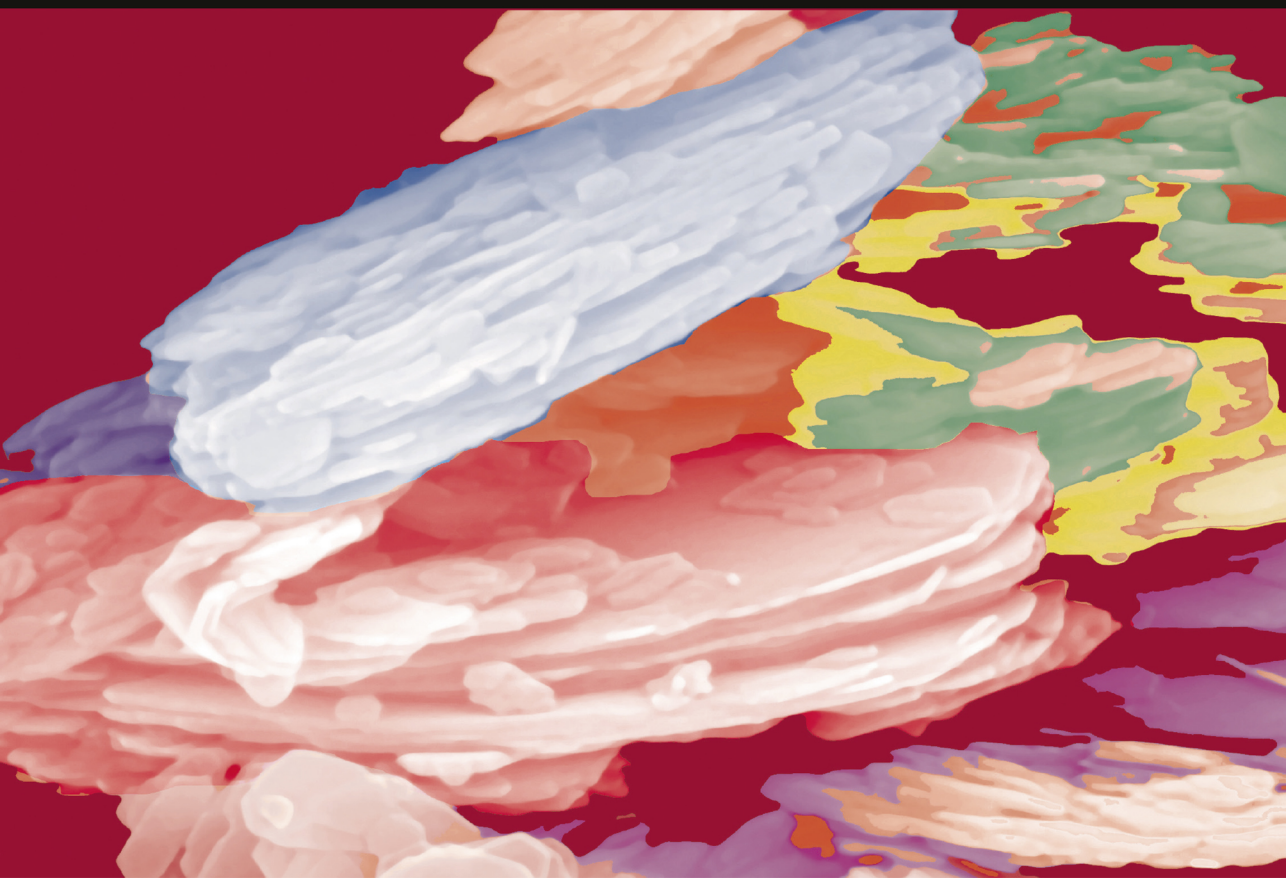


Fundamentos del proceso de fabricación de materiales de cerámica blanca

Volumen I

José Luis Amorós Álbaro
Encarna Blasco Roca



**FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN
DE MATERIALES DE CERÁMICA BLANCA
VOLUMEN I**

Col·lecció Universitas 49

José Luis Amorós Álbano
Encarna Blasco Roca

**FUNDAMENTOS DEL PROCESO
DE FABRICACIÓN DE MATERIALES
DE CERÁMICA BLANCA**

VOLUMEN I

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSITAT JAUME I. Datos catalográficos

Noms: Amorós Álbarno, José Luis, autor | Blasco Roca, Encarnación, autor | Universitat Jaume I. Publicacions, entitat editora

Títol: Fundamentos del proceso de fabricación de materiales de cerámica blanca / José Luis Amorós Álbarno, Encarna Blasco Roca

Descripció: Castelló de la Plana : Publicacions de la Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions, [2025] | Col·lecció: Universitas ; 49 | Inclou referències bibliogràfiques

Identificadors: ISBN 979-13-87886-06-6 (paper) | ISBN 979-13-87886-07-3 (pdf)

Matèries: Materials ceràmics | Materials ceràmics – Fabricació

Classificació: CDU 666.3.022 | THEMA TDCQ



Publicacions de la Universitat Jaume I es una editorial miembro de la UNE, cosa que garantiza la difusión y comercialización de las obras en los ámbitos nacional e internacional. www.une.es.



Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Diríjanse a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesitan fotocopiar o escanear fragmentos de esta obra.

© Del texto: José Luis Amorós Álbarno, Encarna Blasco Roca, 2025

© De la presente edición: Publicacions de la Universitat Jaume I, 2025

Imagen de la cubierta realizada a partir de la micrografía SEM de láminas de caolín apiladas, mostrando la microestructura esencial de las arcillas y su papel en la estabilidad de suspensiones cerámicas. Laboratorio de Microscopia de ITC

Edita: Publicacions de la Universitat Jaume I. Servei de Comunicació i Publicacions
Edifici Rectorat, planta 0. Av. Vicent Sos Baynat, s/n 12071 Castelló de la Plana
Tel. 964 72 8821 publicacions@uji.es

ISBN papel: 979-13-87886-06-6

ISBN pdf: 979-13-87886-07-3

DOI: <http://dx.doi.org/10.6035/Universitas.49>

Depósito legal: CS 840-2025



Este libro, de contenido científico, ha sido evaluado por personas expertas externas a la Universitat Jaume I, mediante el método denominado revisión por iguales, doble ciego.

ÍNDICE

Presentación. Arnaldo Moreno Berto	15
Preámbulo	17

CAPÍTULO 1

La respuesta del material en cada etapa del proceso: la clave
para la mejora de productos de cerámica blanca y de su fabricación

1.1. Introducción	19
1.2. Interrelación: procesado cerámico – microestructura – propiedades – usos	22
1.3. La relación: usos – propiedades – microestructura final	25
1.3.1. Revestimiento cerámico de calidez al tacto, ligero e impermeable	25
1.3.2. Materiales porosos (lozas y revestimientos cerámicos). Propiedades térmicas y mecánicas	27
1.3.3. Materiales altamente densificados (porcelana triaxial, eléctrica, gres porcelánico, esmaltes, etc.). Propiedades mecánicas	38
1.4. Procesado cerámico	46
1.4.1. Algunas consideraciones generales	46
1.4.2. La respuesta del material en cada etapa es la clave del procesado cerámico	48
1.4.3. Formulación de la mezcla de partida. Su relación con el procesado cerámico	50
1.5. Estabilización de suspensiones: fenómenos coloidales, fuerzas superficiales y mecanismos de estabilización	51
1.5.1. Comportamiento del material en la molienda y durante el almacenamiento de la suspensión resultante. Importancia de los fenómenos coloidales sobre la estabilidad de la suspensión y la aparición de defectos	52

1.5.2. Formación de agregados porosos de partículas en una suspensión inicialmente homogénea debido a la separación de componentes por sedimentación. Efecto sobre el desarrollo de la coacción y sobre la microestructura final	54
--	----

PARTE 1

Suspensiones de partículas: fenómenos coloidales, fuerzas superficiales y mecanismos de estabilización

CAPÍTULO 2

Análisis de algunos fenómenos coloidales de interés

2.1. Introducción	59
2.2. Movimiento browniano, difusión y sedimentación	61
2.2.1 Movimiento browniano	61
2.2.1.1. Planteamiento de Langevin	63
2.2.1.2. Teoría cinética del movimiento browniano de Einstein	66
2.2.2 Difusión traslacional en estado estacionario. Fuerza impulsora del proceso y coeficiente de difusión browniana	70
2.2.3 Sedimentación de Stokes y el equilibrio entre la difusión browniana y la sedimentación	73
2.2.3.1. Sedimentación de Stokes	73
2.2.3.2. Método para reducir o anular la velocidad de sedimentación	76
2.2.3.3. Equilibrio entre sedimentación coloidal y difusión. Determinación del tamaño crítico de partícula	78
2.3. Las fuerzas de interacción entre partículas y la estabilidad coloidal	81
2.3.1. Interacciones coloidales. Tipos y breve descripción de las más importantes	81
2.3.1.1. Interacción de London-Van der Waals	82
2.3.1.2. Interacciones electrostáticas	83
2.3.2. Interacciones estéricas y de depleción	85

2.3.2.1. Interacciones electroestéricas	86
2.3.2.2. Interacciones magnéticas	87
2.3.2.3. Interacciones debidas a la estructura del solvente	87
2.4. Aproximación de Dejarguin. Medida directa de las fuerzas superficiales	88
2.5. Combinación de diferentes energías de interacción. Estabilidad coloidal de suspensiones	91
2.6. Interrelación entre la estabilidad coloidal, la estructura de la suspensión y el comportamiento reológico	96

CAPÍTULO 3

Estabilización electrostática. La teoría DLVO

3.1. Introducción	111
3.2. Interacciones de London-Van der Waals	112
3.2.1. Fuerzas de London-Van der Waals entre átomos y moléculas	112
3.2.2. Fuerzas de London-Van der Waals entre cuerpos macroscópicos	115
3.2.2.1. Medidas experimentales de las fuerzas de van der Waals	122
3.3. La doble capa eléctrica	123
3.3.1. Desarrollo de cargas superficiales en medios acuosos	124
3.3.2. La doble capa difusa	130
3.3.2.1. Potencial eléctrico	130
3.3.2.2. La ley de distribución de Boltzmann	131
3.3.2.3. Teoría de Gouy y Chapman	132
3.3.3. La doble capa alrededor de una esfera	139
3.3.4. La capa de Stern y el potencial eléctrico superficial, ψ^0 , de Stern, ψ^d , y potencial zeta, ζ	141
3.3.5. Determinación experimental del potencial zeta, ζ . Su relación con la movilidad electroforética, μ_E	145
3.3.6. Repulsión entre dos dobles capas	147
3.3.6.1. Solapamiento de dobles capas planas y simétricas	147

3.3.6.2. Solapamiento de dobles capas asociadas a dos partículas esféricas iguales	153
3.3.6.3. Solapamiento de dobles capas asociadas a partículas de diversas geometrías	154
3.3.7. Medidas experimentales directas de las fuerzas EDL	156
3.4. La teoría de DLVO. Las fuerzas de Van der Waals y las EDL actuando juntas	158
3.4.1. Curva de interacción total, $W_{\text{tot}}(h)$	159
3.4.1.1. Superficies planas y simétricas	159
3.4.1.2. Esferas iguales	161
3.4.2. Tipos de curvas de interacción	165
3.4.3. La regla de Schulze-Hardy. Concentración crítica de coagulación, CCC	168
3.4.4. Mapas de estabilidad	169
3.4.5. Razón de estabilidad y cinéticas de coagulación	171
3.4.6. Limitaciones del modelo DLVO	173
3.4.7. Desfloculantes electrostáticos	178
3.4.7.1. Mecanismo de actuación	178
3.4.7.2. El ácido cítrico como desfloculante de la alúmina	179
3.5. Fuerzas NO DLVO	184
3.5.1. Fuerzas de solvatación	184
3.5.1.1. Fuerzas oscilatorias de solvatación	185
3.5.1.2. Fuerzas de hidratación monotónicas y repulsivas	186
3.6. Teoría DLVO ampliada (<i>extended DLVO Theory</i>) DLVOE	189

CAPÍTULO 4

Estabilización con polímeros

4.1. Introducción y conceptos generales	193
4.1.1. Mecanismos de estabilización	194
4.1.2. Tipos de polímeros y características. Su interacción con el disolvente	195

4.2. Estabilización estérica	198
4.2.1. Interacción entre capas de polímero al aproximarse las partículas	199
4.2.2. Repulsión entre capas de polímero anclados. Modelo De Gennes	202
4.2.3. Curvas de energía total de interacción. Efecto de algunas variables	203
4.2.3.1. Solubilidad del polímero. Efecto de la temperatura	205
4.2.3.2. Espesor de la capa de polímero adsorbido	206
4.2.3.3. Densidad superficial de polímero adsorbido	208
4.2.3.4. Grado de recubrimiento superficial de la partícula	209
4.2.4. Floculación por depleción y estabilización estructural	209
4.2.4.1. Adsorción negativa de polímeros. Atracción entre partículas coloidales por depleción a bajas concentraciones de polímero en solución	209
4.2.4.2. Fuerza estructural oscilatoria entre partículas. Estabilización de la suspensión a concentraciones elevadas de polímero disuelto	213
4.2.5. Estabilización electrostérica	215
4.2.5.1. Disociación de polielectrolitos débiles en solución. Caso de ácidos policarboxílicos y sus sales	216
4.2.5.2. Adsorción de polielectrolitos (PE) sobre la superficie de la partícula y características de la capa adsorbida	218
4.2.5.3. Curva de energía potencial de interacción	240
4.2.5.4. Mapas de estabilidad	243

CAPÍTULO 5

Coloide-química de las suspensiones arcillosas y de materiales de cerámica blanca

5.1. Introducción	249
5.2. Estructuras cristalinas de los minerales arcillosos más frecuentes en la industria cerámica	251
5.3. Características de las superficies de los minerales arcillosos	255

5.3.1. Las caras planas	256
5.3.2. Bordes y otros defectos de las partículas	257
5.4. Cargas eléctricas superficiales de los minerales arcillosos. Efecto de la estructura y del pH	259
5.4.1. Estructura de capa 1:1 (grupo de la caolinita)	259
5.4.2. Estructura de capa 2:1	260
5.5. Reacciones de intercambio catiónico	262
5.5.1. Equilibrio de intercambio catiónico	262
5.5.2. Selectividad	265
5.5.3. Capacidad de intercambio catiónico (<i>Cationic Exchange Capacity-CEC</i>)	265
5.6. Otras reacciones y procesos que afectan a las características fisicoquímicas de la interfase arcilla-agua	267
5.6.1. Adsorción/Intercambio aniónico	267
5.6.2. Procesos que conducen a un aumento de la concentración de iones (cationes y aniones) en solución	269
5.6.3. Reacciones de precipitación y formación de complejos	270
5.7. Propiedades electrocinéticas	273
5.8. Energía de interacción y estructuras de asociación de partículas	279
5.8.1. Minerales de capa 2:1 (talco)	279
5.8.2. Minerales de capa 1:1 (caolinita)	282
5.9. Estabilización de suspensiones de minerales arcillosos, arcillas y materiales de cerámica blanca. Desfloculantes más utilizados	284
5.9.1. Silicatos sódicos. Efecto del contenido en dispersante, X_s , y de la fracción volumétrica de sólidos, ϕ , sobre las características fisicoquímicas de la solución y sobre las propiedades electrocinéticas y estabilidad de suspensiones concentradas de caolín	286
5.9.1.1. Silicatos sódicos. Distribución de especies en solución	287
5.9.1.2. Silicatos y silicoaluminatos adsorbidos/precipitados sobre las partículas de caolín	288

5.9.1.3. Iones metálicos solubles procedentes de las partículas de caolín	292
5.9.1.4. Conductividad eléctrica, EC, fuerza iónica, I, espesor de la doble capa, κ^{-1} , y pH	293
5.9.1.5. Movilidad electroforética, μ_E	294
5.9.1.6. Estabilidad coloidal y propiedades reológicas	295
5.9.2. Polifosfatos	299
5.9.2.1. Distribución de especies en solución	299
5.9.2.2. El pH de soluciones acuosas y de suspensiones arcillosas	301
5.9.2.3. Adsorción sobre superficies arcillosas	303
5.9.2.4. Curvas electrocinéticas (potencial zeta, ζ , frente a pH)	305
5.9.2.5. Estabilidad de las suspensiones: su relación con el potencial zeta, ζ	307
5.9.3. Poliacrilatos	309
5.10. Efecto de la naturaleza y concentración de iones en solución	312
sobre la estabilidad de las suspensiones. Solubilidad de los componentes de las formulaciones	
5.10.1. Influencia de la concentración de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} en solución sobre la estabilización suspensiones de alto contenido en minerales arcillosos	312
5.10.2. Solubilidad en medio acuoso de los componentes de las formulaciones	319
5.10.2.1. Fritas cerámicas	322
Índice de tablas	335
Índice de figuras	337
Bibliografía	357

PRESENTACIÓN

Arnaldo Moreno Berto

Catedrático de Ingeniería Química de la Universitat Jaume I

Director de la Càtedra Altadia del Conocimiento Cerámico

La creación de la Cátedra Altadia de la Universitat Jaume I del Conocimiento Cerámico surge de la necesidad de contribuir de forma decidida a preservar los conocimientos en tecnología cerámica atesorados por el sector cerámico de la provincia de Castellón a lo largo de los últimos cuarenta años de trayectoria, coincidiendo con los distintos cambios tecnológicos sufridos por el sector y a los que se ha contribuido desde este con innumerables conceptos, evidencias, experimentos, mejoras de proceso, conocimiento de materiales, nuevas tecnologías, etc.

Para ello, la Catedra decide financiar la elaboración de una completa Enciclopedia actualizada de la materia, que constará de una serie de volúmenes, publicados tanto en formato físico como digital, el primero de los cuales es el que ahora presentamos. Se trata de un proyecto ambicioso de gran alcance, a cuya financiación contribuye el Grupo Altadia con recursos propios adicionales a los aportados a través de la Cátedra.

PREÁMBULO

Una de las razones que han motivado la elaboración de esta obra ha sido el interés del ITC-AICE y de la Cátedra Altadia del Conocimiento Cerámico de la Universitat Jaume I de disponer de una publicación, en diferentes partes o volúmenes, sobre las bases científicas en las que se fundamenta la fabricación actual de productos de cerámica blanca. Otra de las razones surge del interés de los autores de transmitir los conocimientos científicos-tecnológicos que han ido adquiriendo durante su dilatada trayectoria (docente, investigadora y de asesoramiento tecnológico en el ITC), de forma ordenada y racional, tratando, en todo momento, de acercar al lector a una interpretación científica de los fenómenos que se desarrollan en la fabricación cerámica. Consideramos que no solo es importante percatarse de forma inmediata de algún cambio o cambios en el proceso que, de forma aleatoria, afectan a la calidad del producto y cómo reaccionar para evitarlo, sino también, lo que consideramos aún más satisfactorio a nivel personal, y más rentable a medio y largo plazo: saber y comprender por qué sucede.

En el primer capítulo se analiza y describe la forma que proponemos para abordar el estudio de forma racional del procesado cerámico. Este se basa, por una parte, en el conocimiento de las relaciones que existen entre las propiedades de los materiales y sus características microestructurales (aunque, a veces, no sean del todo conocidas). Y, por otra, en la respuesta del material en cada etapa individual del proceso, es decir, cómo varían sus características microestructurales al modificar las variables de operación.

En capítulos posteriores se estudiarán las leyes y principios que gobiernan los procesos físicos y/o reacciones químicas que, en mayor o menor medida, dependiendo de la etapa del proceso considerada, influyen sobre los cambios microestructurales que experimenta el material. Así pues, los fenómenos coloidales, las fuerzas superficiales o entre partículas y los mecanismos de estabilización de suspensiones, que son la base para conseguir suspensiones estables, serán tratados en este volumen.

Siguiendo en el proceso de fabricación, se analizará, a continuación, la reología de las suspensiones y su relación con las operaciones básicas que tratan al material en este estado de consistencia.

El análisis del comportamiento en cada etapa de los restantes estados de consistencia, es decir, los sistemas particulados e insaturados (polvo impalpable, aglomerados,

polvo de prensas, masas plásticas y piezas en crudo y secas), comprenderá el estudio de los fenómenos capilares y superficiales, su comportamiento mecánico (flujo, compresión, deformación y resistencia del material) y su relación con el transporte y almacenamiento de polvos y aglomerados y conformado de piezas. Estos dos temas, que constituyen la base de la ciencia del procesado cerámico en crudo, serán tratados en dos partes consecutivas en próximos volúmenes.

Por otra parte, durante la cocción se produce la transformación de la microestructura cruda en cocida. El conocimiento científico-tecnológico que experimenta la pieza durante su tratamiento térmico en el horno requerirá, a su vez, el análisis y estudio de los siguientes temas: transporte de calor y materia; transformaciones físicas, tales como cambios alotrópicos, expansión térmica, fusión de cristales, cristalización, separación de fases, sinterización, etc.; y reacciones químicas, tales como: oxidaciones, reducciones, descomposiciones (generalmente con la intervención de la atmósfera del horno), reacciones sólido-sólido y sólido-líquido. Y, además, en el caso de piezas esmaltadas, debe analizarse la interacción entre el soporte y el vidriado, tanto desde el punto de vista físico como químico y mecánico. El conjunto de estos fenómenos de transporte y de reacciones y procesos a alta temperatura será tratado en un volumen posterior.

Por último, conviene señalar que todos los modelos y teorías que describen tanto la respuesta del material en cada etapa del proceso (relación: variables de operación-microestructura) como la relación microestructura-propiedades se han desarrollado, como no puede ser de otra manera, para materiales de composición y microestructura sencilla y uniforme.

Desafortunadamente, los pavimentos y revestimientos (porosos o densos), lozas y porcelanas, esmaltadas o no, que hemos englobado dentro de la denominada cerámica blanca –de acuerdo con la Sociedad Americana y Europea de Cerámica– presentan composiciones y microestructuras complejas y heterogéneas. En consecuencia, los modelos y teorías desarrollados solo pueden aplicarse de forma cualitativa; otros requieren una adecuación a las situaciones reales para obtener resultados cuantitativos; y, por último, es preferible, en estos materiales tan complejos, idealizar su microestructura, identificando las características más importantes en cada caso, para disponer de buenos modelos, que describan bien el efecto de las variables de operación más importantes sobre las características microestructurales simplificadas. Así pues, conviene recurrir a sistemas cerámicos simples cuando se pretende comprender y comprobar la validez de una teoría o modelo, dejando para el final de cada parte o volumen la aplicación correcta de estos principios, leyes o modelos a los materiales de cerámica blanca.

CAPÍTULO 1

La respuesta del material en cada etapa del proceso: la clave para la mejora de productos de cerámica blanca y de su fabricación

1.1. INTRODUCCIÓN

Probablemente, fue J. A. Pask hace más de cincuenta años (1979) el que, por primera vez, manifestó de forma contundente, en la reunión anual de la Sociedad Americana de Cerámica de aquel año, la importancia del conocimiento profundo de los fundamentos básicos del procesado cerámico. Con el título de su conferencia «Ceramic Processing – A Ceramic Science» reclama para el estudio de los fundamentos del procesado cerámico la categoría de ciencia. Desde entonces, multitud de congresos, reuniones técnicas y publicaciones (libros, artículos de investigación...) utilizan el término «Ceramic Processing» para referirse a este ámbito de estudio.

En aquellos años, también marcó un mito la publicación del libro «Ceramic Processing Before Firing» (Onoda y Hench 1978) en el que colaboraron más de cincuenta profesores e investigadores de reconocido prestigio, presentando más de treinta trabajos que abarcaban el estudio de los fundamentos científicos de prácticamente todas las etapas del proceso previas a la cocción. Al menos, para nosotros, destaca entre ellos, el presentado por el profesor Kingery, titulado «Firing – The Proof Test for Ceramic Processing», en el que se enfatiza el marcado efecto que

ejerce el desarrollo de las etapas previas a la cocción sobre la microestructura y propiedades del producto final, así como los defectos originados en las etapas previas.

Estos primeros trabajos y el prestigio de sus autores, junto a otros que omitimos por brevedad, han contribuido sobremanera al estudio de los fundamentos de todas las etapas que abarca el procesado, desde la obtención de materias primas elaboradas y la adecuación de las naturales hasta el conformado y secado de la pieza. El creciente interés y la proliferación de investigaciones en esta área de conocimiento ha conducido a que en los últimos años muchos autores empleen, creemos, de forma errónea, el término «Ceramic Processing» para referirse, casi exclusivamente, a las etapas previas a la cocción. A título de ejemplo, el excelente libro del profesor Reed (1995), bajo el título *Principles of Ceramic Processing* solo dedica a la cocción menos de cuarenta páginas de las más de seiscientas que comprende la obra.

Dentro de esta área de conocimiento, y con el surgimiento del término «Colloidal Processing», aun se enfatiza más la importancia del conocimiento y estudio de los fenómenos coloidales involucrados en la preparación de la suspensión, moldeo y secado, llegando incluso a definir el objetivo del «Colloidal Processing» como: el control de la estructura inicial de la suspensión y de su evolución durante todo el proceso de fabricación, con vistas a obtener recubrimientos y piezas más reproducibles y con las propiedades deseadas (Lewis 2000).

Los argumentos básicos de Pask (1979) se referían a la fabricación de las denominadas cerámicas avanzadas para aplicaciones sofisticadas, dadas sus excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas y su capacidad de soportar sin deterioro los ambientes más hostiles (temperaturas altas, agresión química...). Ahora bien, los materiales cerámicos son frágiles, lo que implica que cualquier irregularidad microestructural en la pieza (poro grande, aglomerados de granos porosos, grietas...) actúa como un defecto en detrimento del comportamiento mecánico del material. La presencia de estos defectos ocasionales en la microestructura del material es frustrante, ya que, según la conocida ley de la cadena, esta siempre se rompe por el eslabón más débil. Así pues, el defecto o irregularidad microestructural más grande de la pieza es la que determina su resistencia mecánica. En consecuencia, el comportamiento mecánico de un conjunto de piezas será una propiedad distribuida, con un valor promedio y una dispersión de la medida, que estará relacionada con el tamaño promedio del defecto y su distribución dentro de una misma pieza. Ambas magnitudes (valor promedio, $\bar{X}$, y desviación estándar, σ) serán las que limitarán el uso de un material para soportar esfuerzos muy

inferiores a los que potencialmente podrían resistir. En efecto (figura 1.1), solo se puede garantizar una resistencia mecánica de valor: $\bar{X} - 2\sigma$, con una fiabilidad del 98 % (probabilidad), cuando perfectamente, si se controlase el tamaño del defecto se alcanzarían valores para esta propiedad de $\bar{X} + 2\sigma$.

En otras palabras, la presencia de irregularidades, no controladas, a escala microscópica (p. ej., grietas, agregados...), en las piezas se manifiesta en una baja fiabilidad y reproducibilidad, de propiedades a escala macroscópica (resistencia mecánica). Es decir, la fiabilidad y reproducibilidad de las propiedades mecánicas depende de la homogeneidad y uniformidad de la microestructura. Ahora bien, para conseguir una fiabilidad y reproducibilidad muy altas en las propiedades de las piezas, no es solo necesario unas buenas prácticas ingenieriles y un control de calidad durante todas las etapas que comprenden el proceso de fabricación, sino que también es imprescindible conocer y comprender la respuesta del material, a escala microscópica, en cada etapa del proceso y controlarla. De hecho, el conocimiento del comportamiento del material, a escala microscópica, en cada etapa del proceso, no solo nos permitirá controlar la microestructura final, sino también nos permitirá diseñar microestructuras del producto final adecuadas a partir de unas materias primas perfectamente controladas.

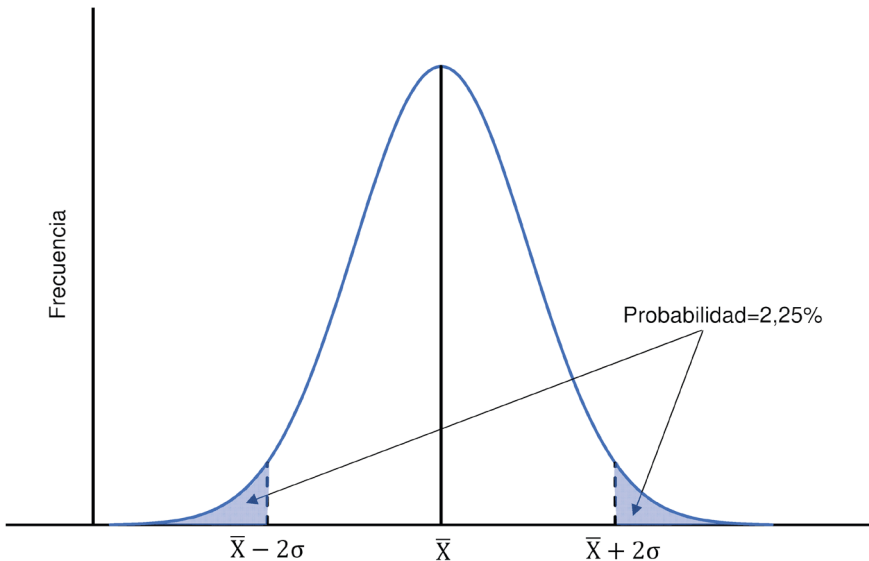


Figura 1.1. Distribución de Gauss: valor promedio, $\bar{X}$, y desviación estándar, σ

Los argumentos de Pask (1979) están todavía vigentes, puesto que quedan muchas lagunas en el conocimiento de los fundamentos del procesado. Y, además, son totalmente aplicables a los productos de cerámica blanca, aun siendo la respuesta del material, en cada etapa, y su microestructura, desde las materias primas hasta el final del proceso, mucho más complejas que las correspondientes a las cerámicas avanzadas, de composición y microestructura más simples.

Por otra parte, la espectacular evolución que ha experimentado el sector de la cerámica blanca, en general, y el de baldosas cerámicas y afines, en particular, tanto en lo referente a productos y aplicaciones como a procesos de fabricación y estructura empresarial, hace todavía más necesario el estudio de los fundamentos del procesado cerámico y su aplicación racional a escala industrial, con vistas a conseguir innovar continuamente tanto en proceso como en producto.

A continuación, se analizan algunas de las consideraciones generales sobre el estudio del procesado cerámico.

1.2. INTERRELACIÓN: PROCESADO CERÁMICO – MICROESTRUCTURA – PROPIEDADES – USOS

En la figura 1.2 se esquematiza esta relación haciendo hincapié en que cada categoría es dependiente de la anterior; es decir, los usos del producto dependen de sus propiedades y estas de su microestructura que ha ido cambiando progresivamente mediante su procesado a partir de unas materias primas de partida. También se ha pretendido resaltar la relación prácticamente directa que existe entre la microestructura de un material y sus propiedades, cuyo estudio corresponde a la ciencia de los materiales. Actualmente, esta área de conocimiento está más desarrollada, al menos para materiales de composición y microestructura más sencilla, que para los de cerámica blanca, mucho más complejos, como se analizará posteriormente.

Conviene, llegado este punto, diferenciar bien los términos: microestructura y propiedades. La microestructura de un material en cualquier estado del proceso nos define como es el material y se caracteriza determinando sus características microestructurales (figura 1.3).

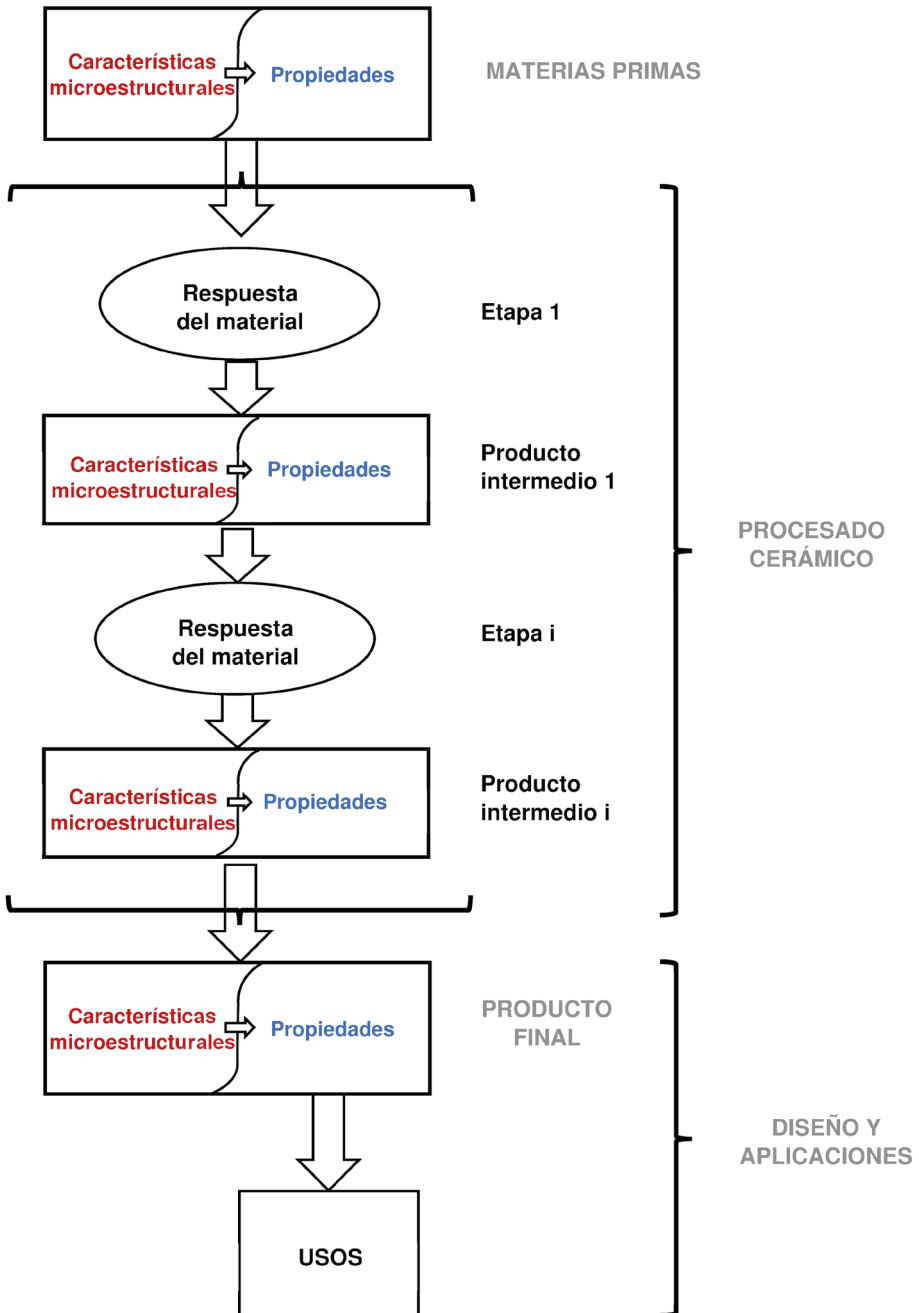


Figura 1.2. Interrelación: procesado cerámico – microestructura – propiedades – usos

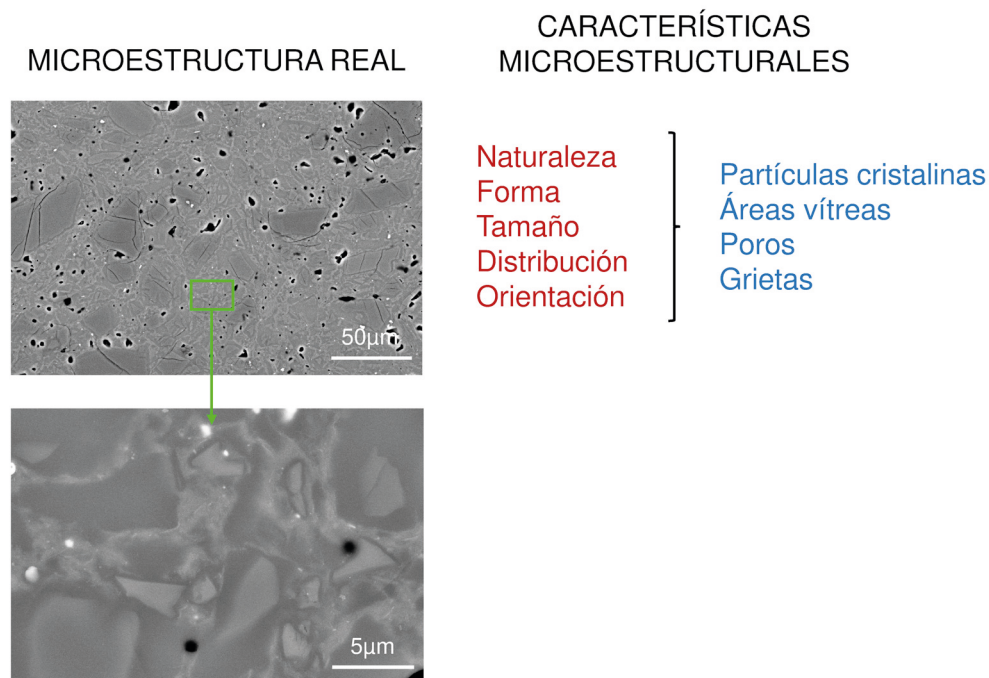


Figura 1.3. La compleja microestructura real de un material (gres porcelánico) se procura describir mediante un conjunto de características microestructurales. (Cortesía del Laboratorio de Microscopía del ITC)

Las propiedades, también denominadas propiedades de comportamiento, evalúan o determinan cómo se comporta el material cuando se somete a diferentes agentes externos: esfuerzos mecánicos (propiedades mecánicas), ciclos térmicos (propiedades térmicas), ambientes químicos (propiedades químicas), etc. Es decir, que a una microestructura le corresponden multitud de propiedades, y mediante la ciencia de los materiales podemos estimar estas últimas a partir de las características microestructurales. En cambio, la magnitud de una propiedad o conjunto de propiedades no nos permite estimar su microestructura, ni como se ha generado esta. Al efecto, consideremos un ejemplo sencillo: la opacidad de vidriados. Si conocemos la microestructura de un vidriado opaco de circón y determinamos algunas de sus características microestructurales (cantidad, tamaño y distribución de las partículas de circón y la presencia o no de separación de fases vítreas) podemos estimar y comprender su opacidad. No obstante, conociendo la opacidad de un vidriado no podemos estimar su microestructura, ya que existen diferentes

opacificantes y mecanismos de opacificación que conducen al mismo resultado; incluso dentro del mismo sistema le corresponde la misma opacidad a un vidriado con más cristales grandes que a otro con menos cristales pequeños. La dispersión de la luz es la ley física que determina esta propiedad. Invitamos al lector que haga lo propio con otras propiedades tanto del producto final como del intermedio.

1.3. LA RELACIÓN: USOS – PROPIEDADES – MICROESTRUCTURA FINAL

Esta relación es la base del diseño racional de nuevos materiales y de la mejora de los existentes. La relación: usos – propiedades es, en principio, más sencilla, ya que el uso o empleo de un material para cumplir una determinada función o aplicación vendrá siempre impuesto mediante un conjunto de requisitos o restricciones a las propiedades del producto final.

La relación: propiedades – microestructura, en el caso de la cerámica blanca es, generalmente, más compleja, sobre todo para algunas de sus propiedades. En consecuencia, en algunos casos solo dispondremos de información cualitativa entre alguna/s característica/s microestructural/es y la propiedad en cuestión, por lo que es también imprescindible seguir desarrollando ciencia de los materiales en esta área. En el caso de microestructuras más sencillas, como el caso de recubrimientos vítreos o vitrocristalinos, la relación: propiedad – características microestructurales suele ser más sencilla.

A continuación, trataremos algunos ejemplos interesantes que ponen de manifiesto este tipo de relaciones en materiales de cerámica blanca.

1.3.1. Revestimiento cerámico de calidez al tacto, ligero e impermeable

A título de ejemplo, analizaremos los resultados de un proyecto público, de financiación regional (Blasco 2020), dirigido por los autores, que tenía entre otros objetivos el desarrollo, a escala de laboratorio, de losetas que presentasen calidez al tacto, impermeables y ligeras, de comportamiento similar a otros materiales empleados en el recubrimiento de paredes (madera).

La primera cuestión que se debía resolver era determinar qué propiedad/es está/n relacionada/s con esta característica táctil. El análisis de este fenómeno condujo

a que la sensación táctil de calidez depende de la velocidad a la que pierde calor la superficie de la piel humana cuando entra en contacto con la del recubrimiento. Es decir, a menor velocidad de enfriamiento mayor sensación de calidez. Se trata, por tanto, de un fenómeno de transferencia de calor por conducción en estado no estacionario desde la superficie más caliente (temperatura piel 37 °C) a una superficie más fría. La característica del material determinante de este proceso es la difusividad térmica efectiva, α , que se define como la razón entre la capacidad de un material de conducir calor y la de almacenarlo:

$$\alpha = \frac{k_{\text{eff}}}{\rho c} \quad \text{ec. 1.1}$$

donde k_{eff} es la conductividad efectiva del material, que tiene en cuenta, también, la transmisión de calor no solo a través del propio material sino también desde su superficie a la de la piel. Esta última dependiente de la rugosidad (menos superficie de contacto real); ρ y c son la densidad y el calor específico del material, respectivamente (Amorós y Blasco 2020).

Así pues, los materiales con valores elevados de α responden rápidamente a los cambios térmicos (como los metales), mientras que en las superficies rugosas de materiales aislantes (k_{eff} pequeña) la ganancia de calor (pérdida de calor de la superficie de la piel) es muy lenta, es decir, presentan una buena sensación de calidez al tacto. En lo que respecta a la relación entre difusividad y la microestructura del material, según la ciencia de los materiales, por una parte, se ha comprobado que la difusividad térmica disminuye de forma acusada conforme aumenta la porosidad del material. Esto se debe, fundamentalmente, a que su conductividad disminuye mucho más que la densidad del material o que su calor específico. Por otra, la conductividad intrínseca de un material exento de porosidad depende de su estructura a escala atómico-molecular, siendo esta propiedad, en los materiales no metálicos, tanto menor cuanto mayor es su desorden estructural a escala atómico-molecular (vidrios inorgánicos o vidrios orgánicos plásticos).

Así pues, el producto a desarrollar debía ser una lámina vitrocrystalina rugosa, con una elevada porosidad cerrada, impermeable (sin porosidad abierta, $\varepsilon_{\text{abierta}} = 0$), y con una resistencia mecánica aceptable (figura 1.4).