

Formando Cerâmicas Tradicionais Queima

Prof. Ubirajara Pereira Rodrigues Filho

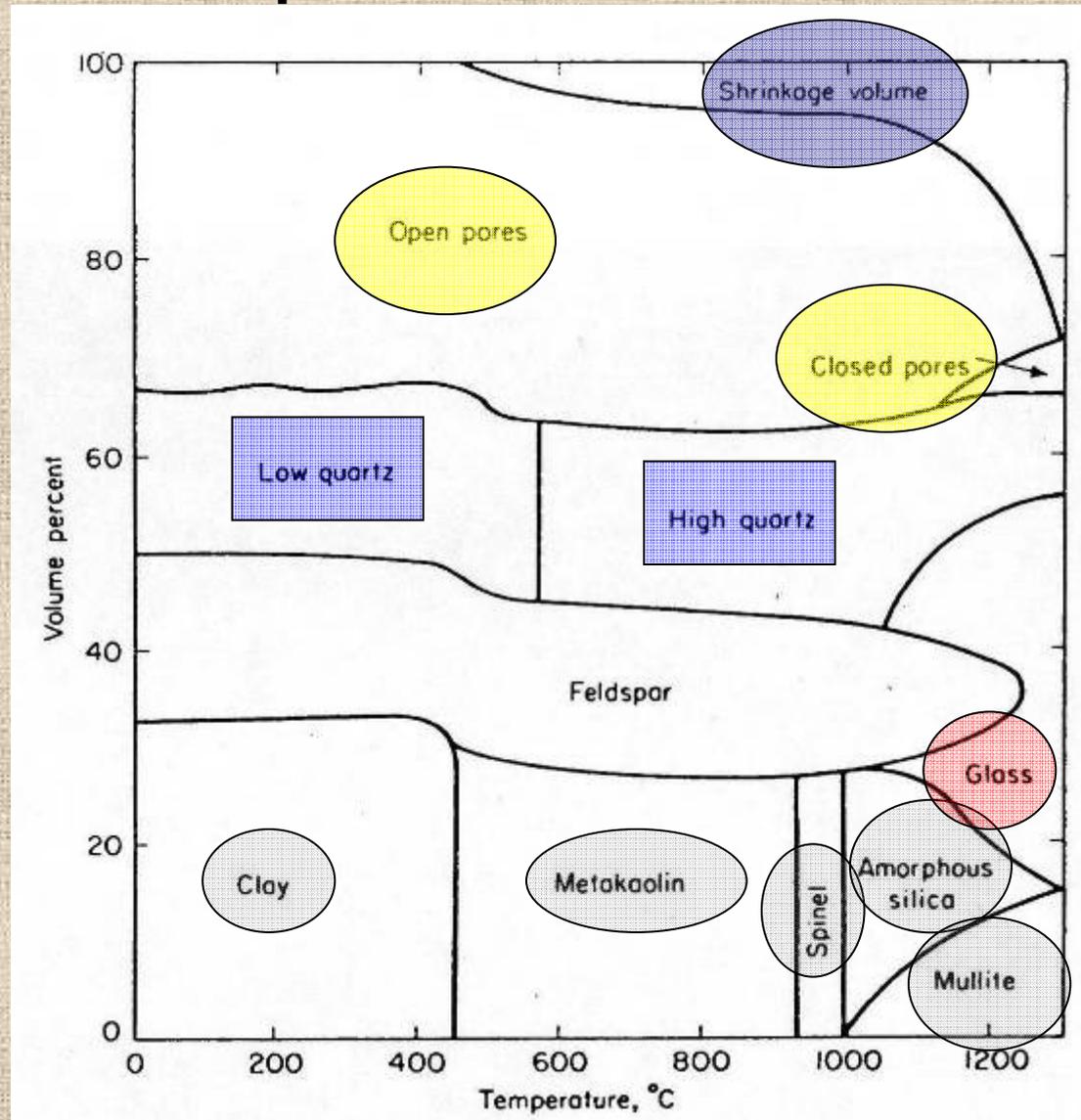
Queima

O tratamento térmico da argila moldada, chamado de queima, pode ser descrito como processo pelo qual os pós cerâmicos (argilominerais, sílica, alumina, zircon, feldspatos, entre outros) são aquecidos a uma temperatura suficientemente elevada para obter um material com as propriedades almejadas.

Queima

- Durante o tratamento térmico ocorrem mudanças químicas (desidratação e reações químicas) e mudanças físicas na passagem da matéria-prima para que o chamamos de cerâmica tradicional.
 - Há uma densificação do material.
 - Os materiais resultantes do processo de tratamento térmico tornam-se firmemente unidos numa massa única por vitrificação. Esta massa única forma um compósito onde quer por desenvolvimento de um material vítreo, quer por sinterização.

Mapa da Queima



Queima

Adesão entre os Materiais Resultantes

- Tipo de Material
 - Argila
 - Sílica
 - Refratários da Fireclay
 - Abrasivos

 - Alumina
 - Refratários básicos
 - Ferritas
 - Carbetos e óxidos puros



União por vitrificação



União por sinterização

Mudanças Físicas na Queima

Densificação pelo Tratamento Térmico

Sinterização da Alumina Fase Sólida

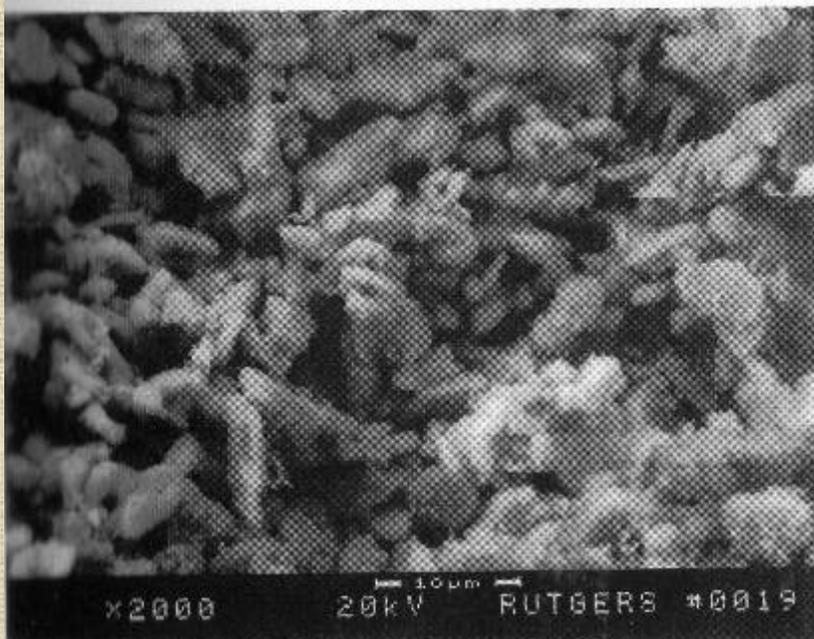


Illustration #6 – Micrograph – Unfired Alumina. Courtesy of Rutgers University.

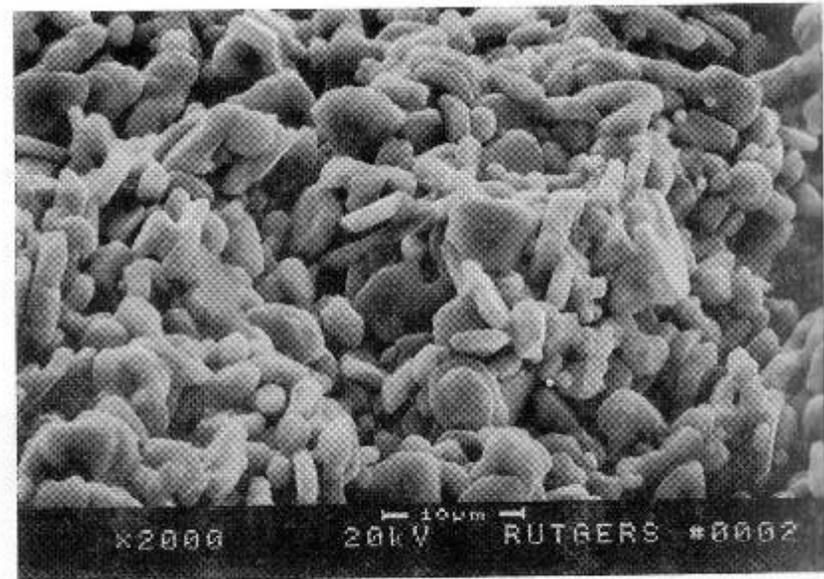
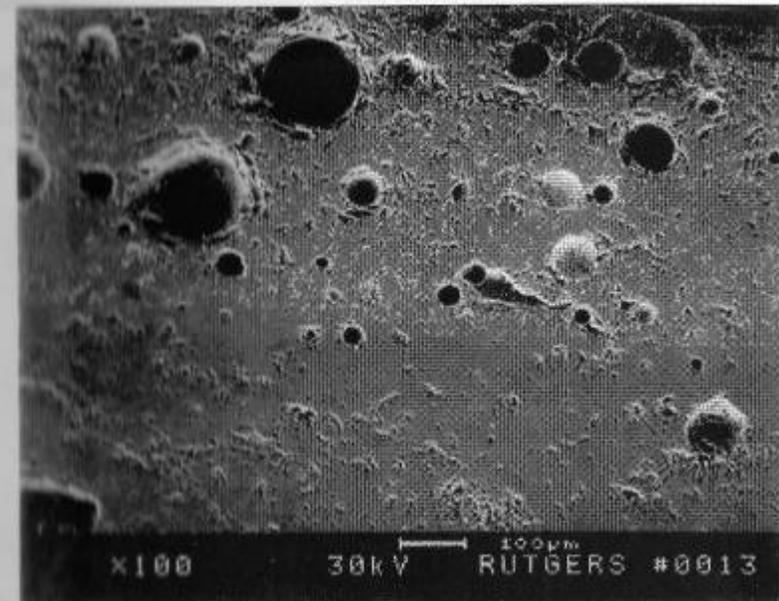
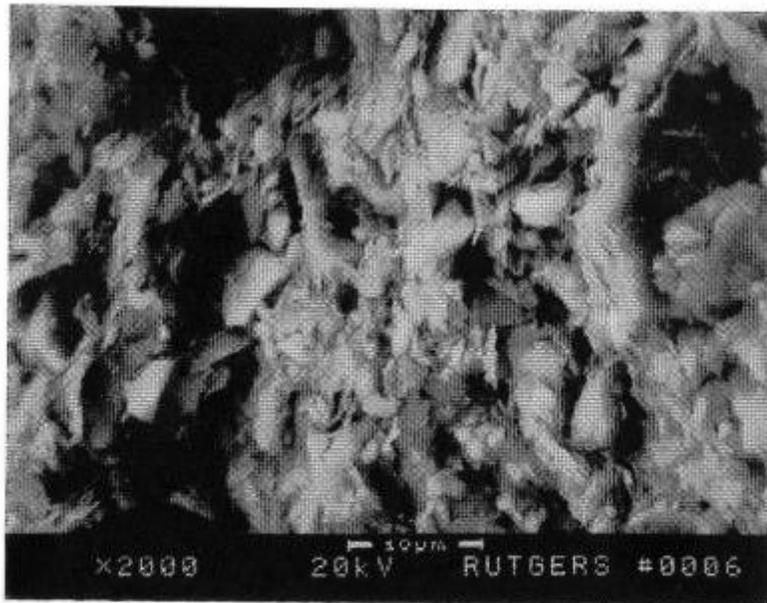


Illustration #7 – Micrograph – Fired Alumina. Courtesy of Rutgers University.

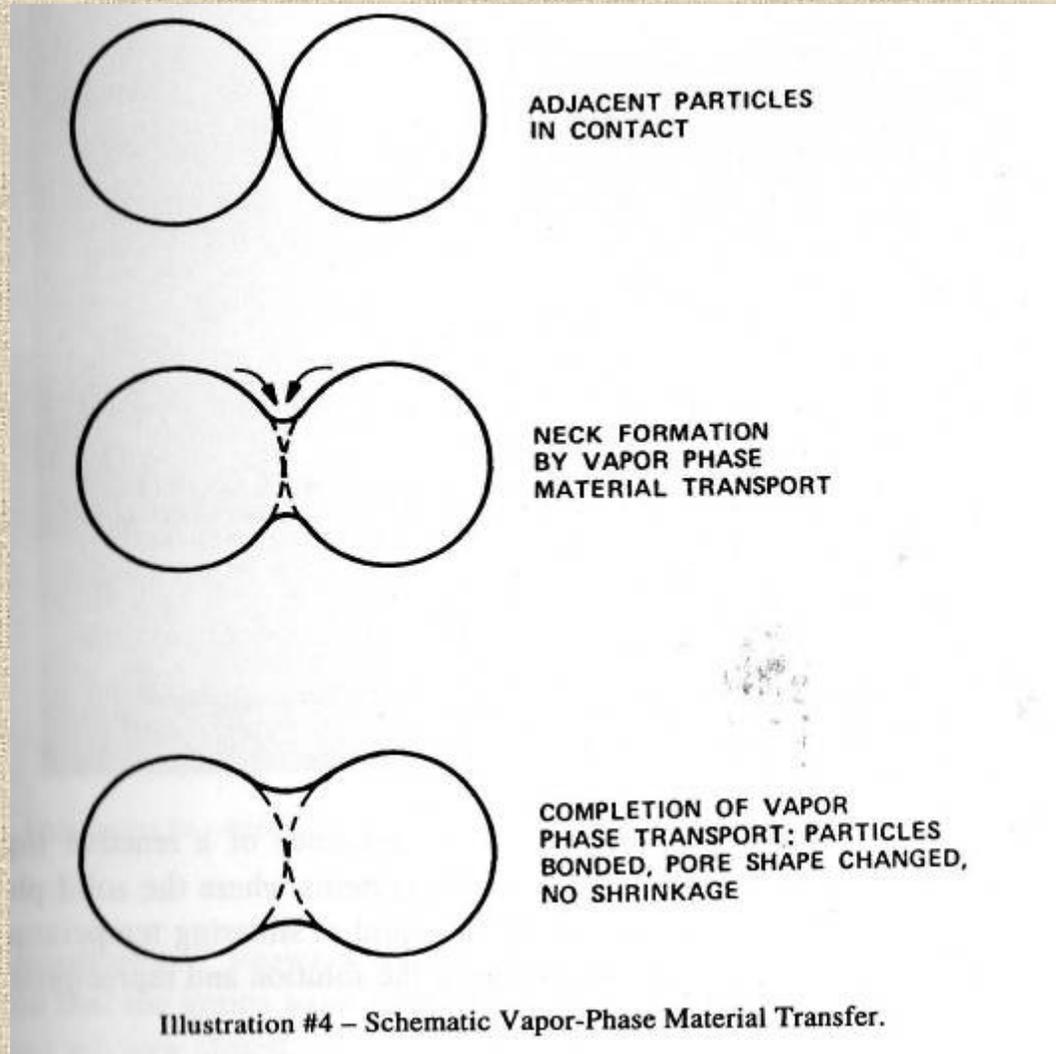
Queima

Morfologia



As micrografias ilustram a densificação causada pelo tratamento térmico que é fruto do processo de formação de massa vítrea e de sinterização dos componentes originais e formados na queima.

Sinterização por Transferência de Massa em Fase Vapor



Sinterização por Transferência de Massa em Fase Sólida

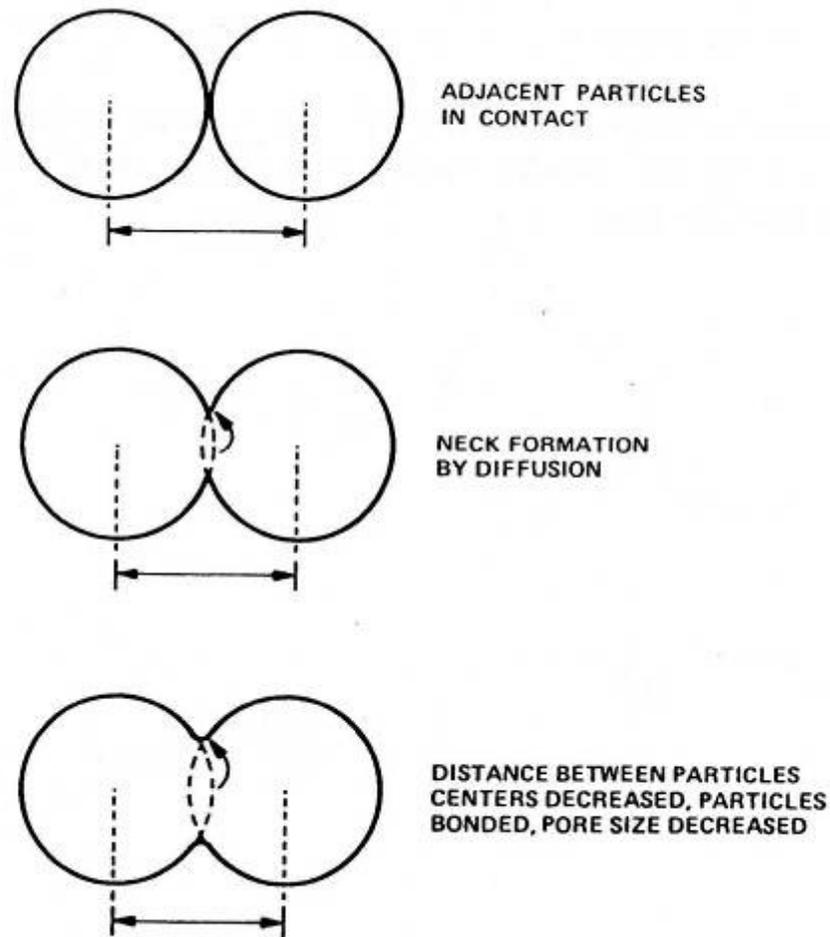
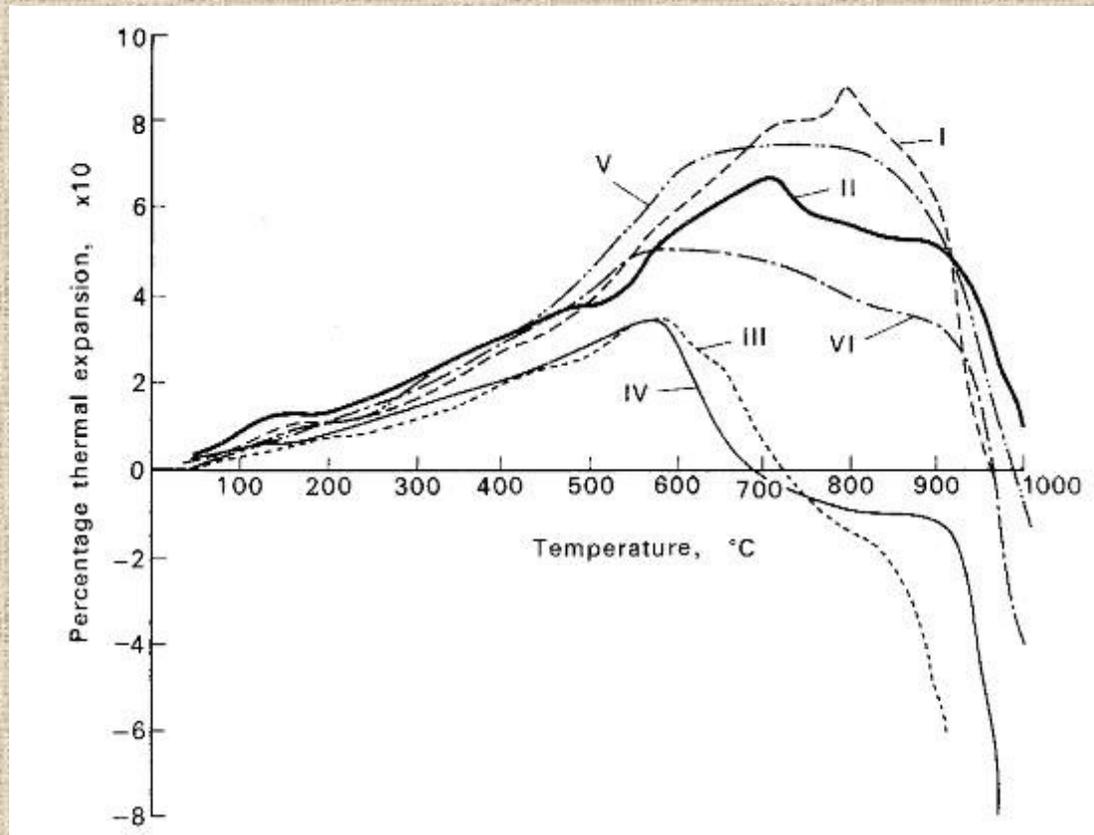


Illustration #5 – Schematic – Solid State Material Transfer.

Acompanhando a Densificação

Termodilatação



- Termodilatação até 1000 °C de: I-ball clay silicosa, II-ball clay negra, III-ball clay de South Devon, IV- China clay, V-argila vermelha, VI- argila fireclay (alta resistência ao fogo).

Transformações Químicas e de Estruturas Cristalinas

- Perda de Água fisicamente adsorvida ou absorvida
- Reações de desidratação (condensação)
- Oxidação de MO e metais de transição
- Decomposição
- Transições de fase

Transformações Químicas e de Estruturas Cristalinas

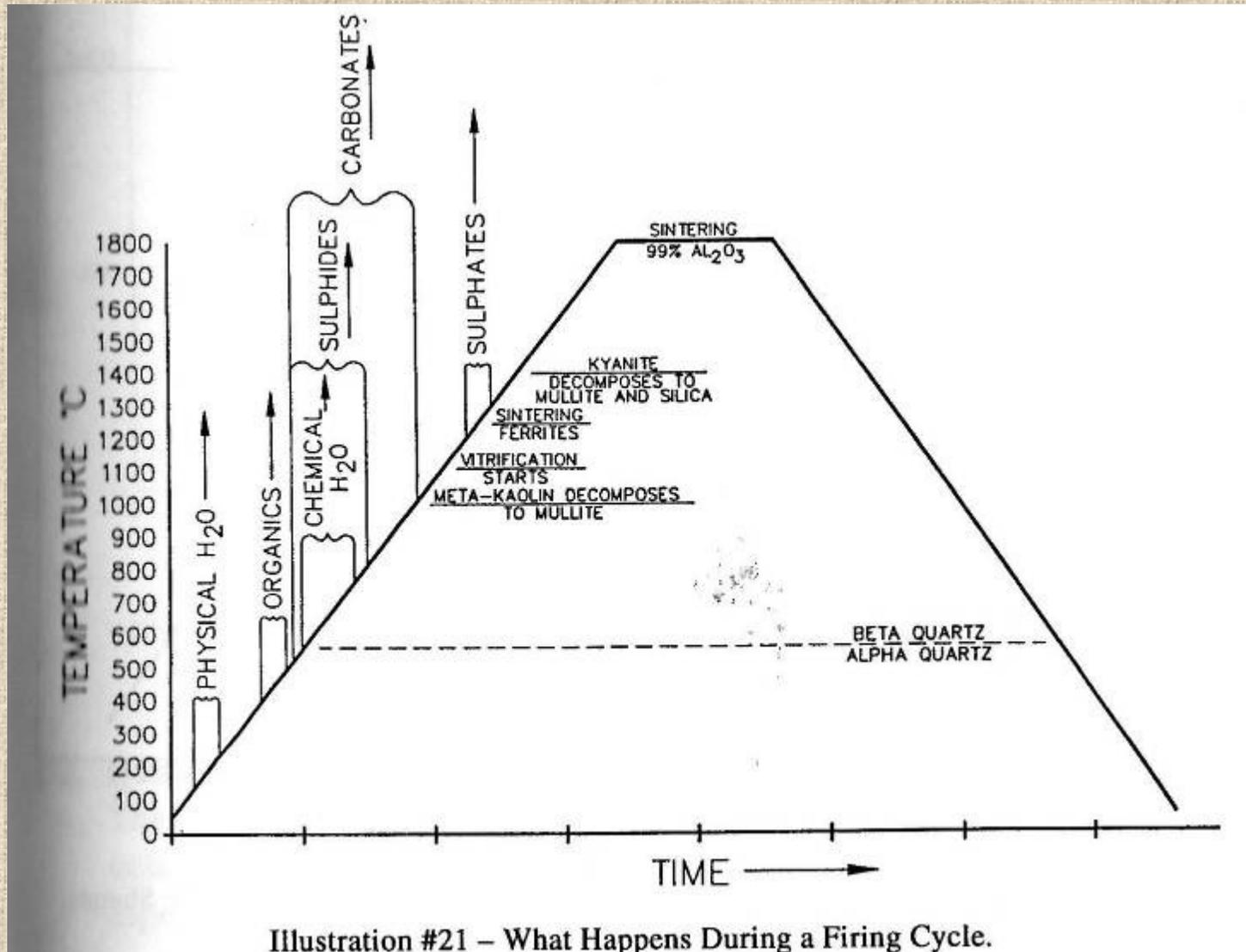
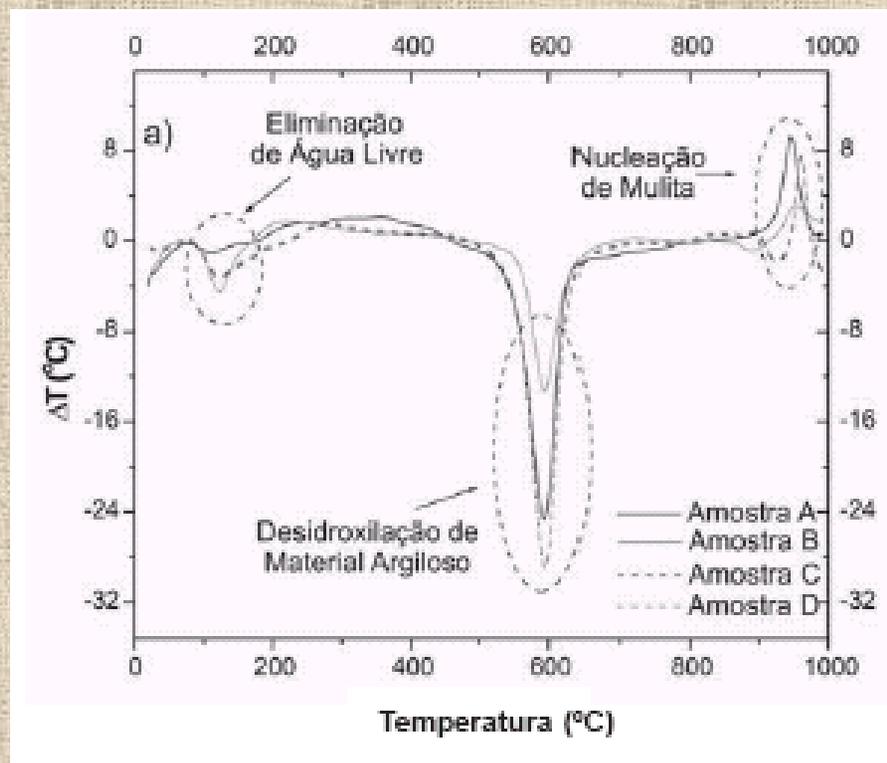
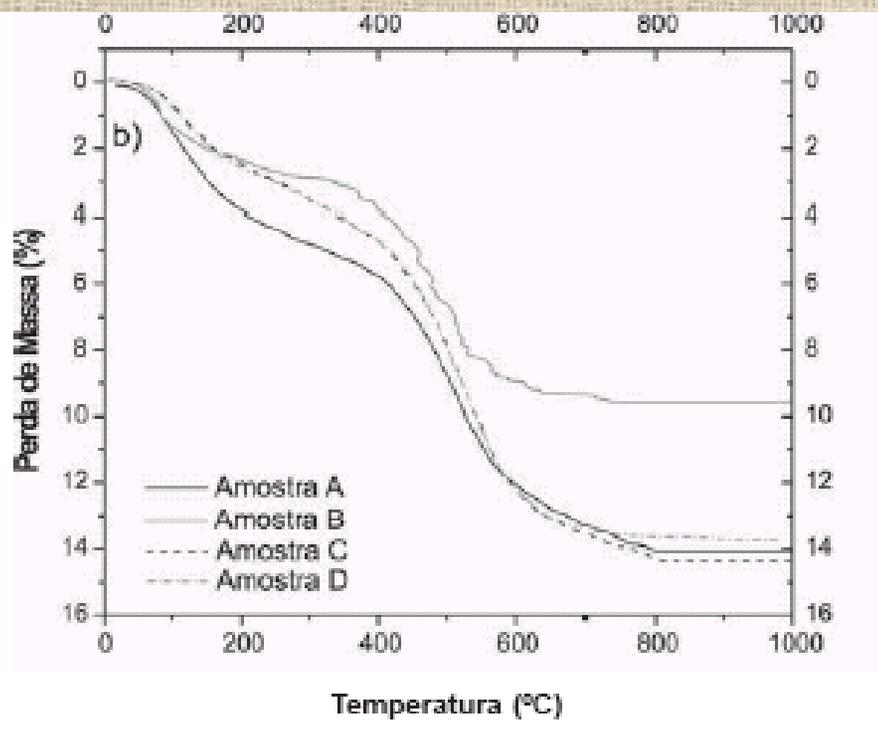


Illustration #21 – What Happens During a Firing Cycle.

Acompanhando as Mudanças Durante a Queima Análise Térmica



[Análise termogravimétrica](#) das amostras de ball clay do litoral paraibano (TG) e análise termogravimétrica diferencial (DTA).

R. R. Menezes et al. / Cerâmica 49 (2003) 120-127

Queima da Cerâmica

- 100-200°C perda de água fisissorvida
- 300-400°C Processo exotérmico. oxidação da Matéria Orgânica (húmus e *binders* adicionados no processo) formando CO e CO₂.
- 380-800°C Processo exotérmico . oxidação de sulfetos formando SO₂.
- 500°C Processo Endotérmico. Desidratação da caulinita e formação de meta-caolin (Al₂Si₂O₆)
- 573°C transformação do α-quartzo em β-quartzo.
- 925°C Processo exotérmico. As lamelas de meta-caolin condensam para formar uma fase tipo espinélio de composição aproximada 2Al₂O₃.3SiO₂ com perda de SiO₂ não-cristalina.
- 1050-1100°C Processo Exotérmico Fase tipo Espinélio é transformada em mullita (Al_{4,5}Si_{1,5}O_{9,75}) e ocorre a segregação de cristobalita.
- 1200-1400°C Transformação total em cristobalita e mullita.

Olhando a Cerâmica por Dentro.

Cerâmica Arqueológica do Pantanal do Mato-Grosso do Sul
Temperatura de Queima em torno de 800-900°C

Meta-caolin



Aditivos
(espícula de esponja de água doce, SiO_2)

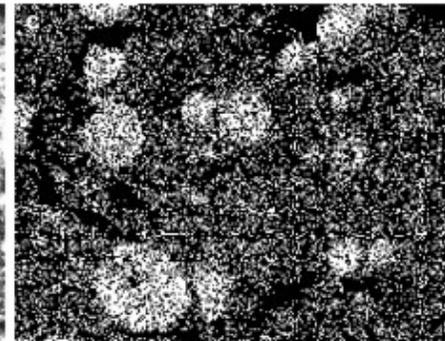
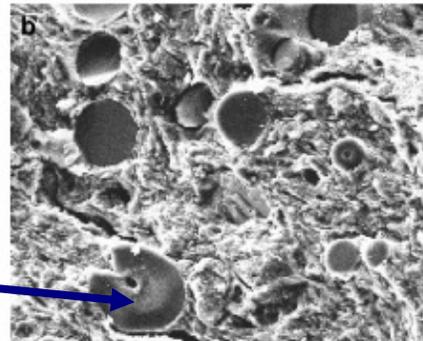
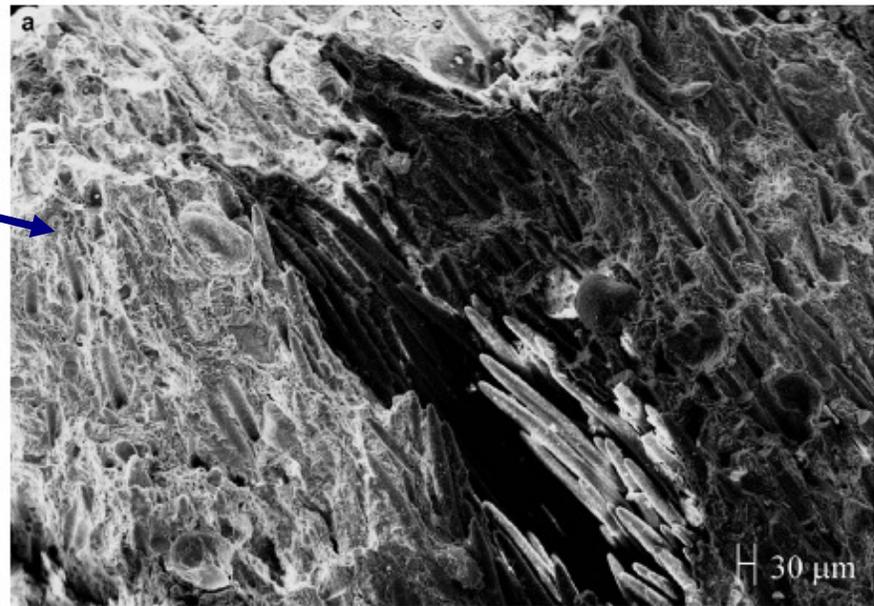


Fig. 2. Micrograph of a potshard containing sponge spicules as additive (a) showing an agglomerate of sponge spicules in the ceramic matrix; (b) vertical cut of the fragment; (c) correspondent silicon mapping.

Queima e Formação da Mulita

- A formação da mulita confere à cerâmica tradicional excelentes propriedades físicas e químicas, muito embora, ela não seja a única responsável.

Mullita



Mullita formada naturalmente na superfície de caolin (webmineral)

- Mullita foi encontrada e citada como um mineral específico em 1924 na ilha de Mull (Escócia) ocorrendo na zona de contato entre o magma quente com sedimentos de argilominerais ricos em alumínio.
- Mullita é um aluminossilicato com uma razão variável entre alumínio e silício representada pela série $Al_2[Al_{2+2x}Si_{2-2x}]O_{10-x}$, onde $0,18 \leq x \leq 0,88$, ou seja, o teor de alumínio expresso em teor de Al_2O_3 pode variar entre 57 a 92%.

Mullita

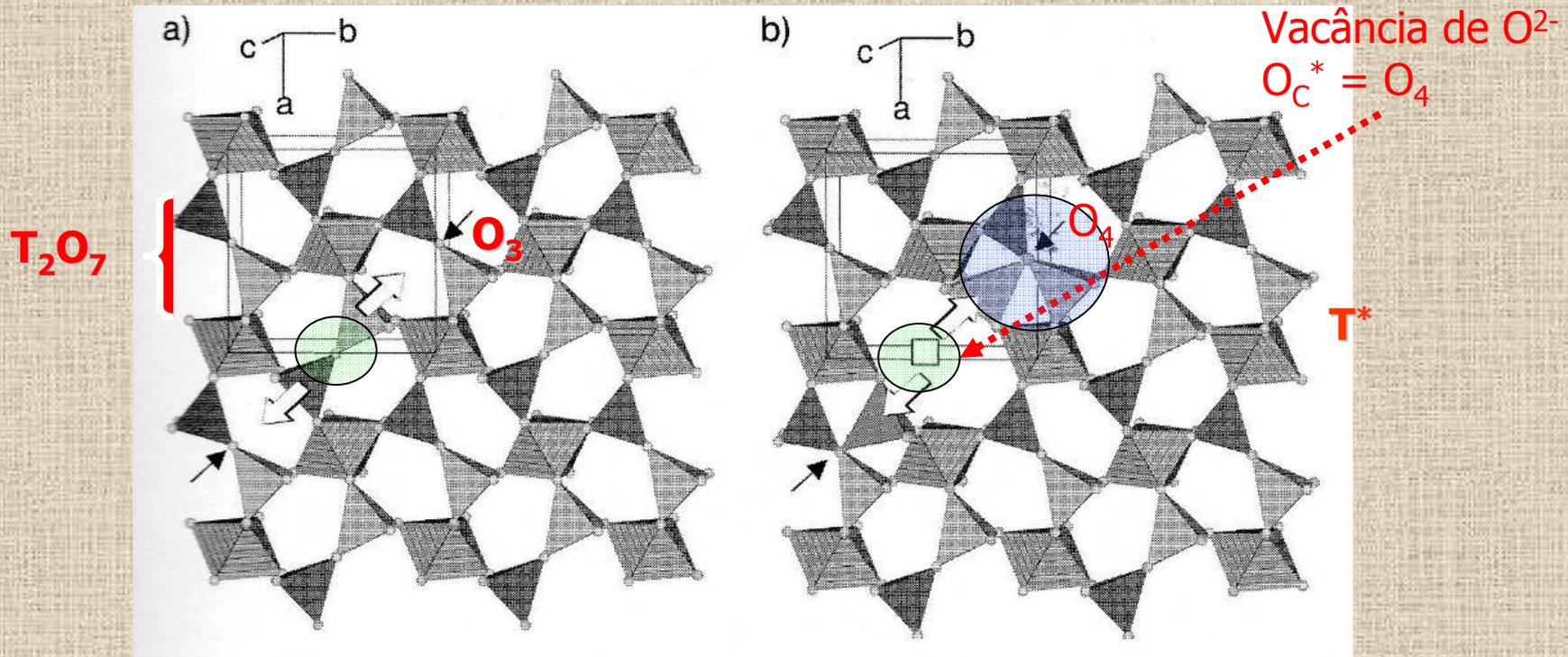
Composição Química e Impurezas

Table 1.3.1 Chemical composition of naturally occurring mullite (wt. %)^a.

	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	30	32	29	29	31	29
TiO ₂	1.29	2.27	0.55	0.79	0.70	0.80
Al ₂ O ₃	68	65	64	70	68	70
Fe ₂ O ₃	0.62	0.94	5.90	0.50	0.50	0.30
Cr ₂ O ₃	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	–	0.30

Estrutura Cristalina

Silimanita e Mulita (modelo)

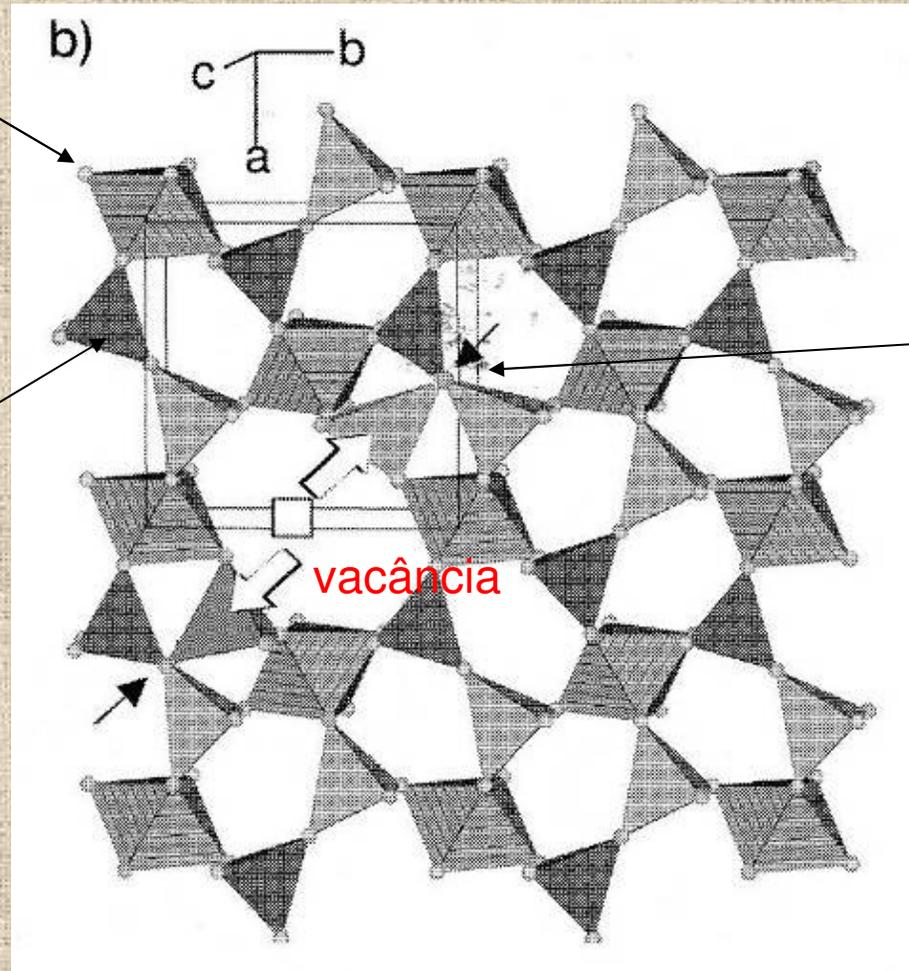


Estrutura cristalina da solução sólida Mulita derivada da estrutura de silimanita. Todas as projeções paralelas ao eixo c rotacionado de 4° em torno de a e b . Cadeias de octaedros estão interconectadas por dímeros T_2O_7 (onde T é Si ou Al em geometria tetraédrica). Setas largas indicam a direção de migração dos íon T e setas escuras indicam a posição dos oxigênio fora da posição.

Mullitas

Cadeia de AlO_6 ao longo do eixo c

Dímero T_2O_7



Unidade TO_3

vacância

Formando a Vacância de O²⁻

Formalmente a reação de surgimento da vacância pode ser descrita por:



O que se representa aqui é a substituição de dois íon de silício e um de oxigênio por dois íons de alumínio. A ausência do O²⁻ dá origem à vacância. O íon O²⁻ removido é normalmente o íon ponte no dímero T₂O₇, levando ao deslocamento dos tetraedros como mostrado pelas setas largas no diapositivo anterior. Esta nova posição dos tetraedros é dita T*. O número de vacâncias é dado por x na fórmula mínima.

Algumas Mulitas

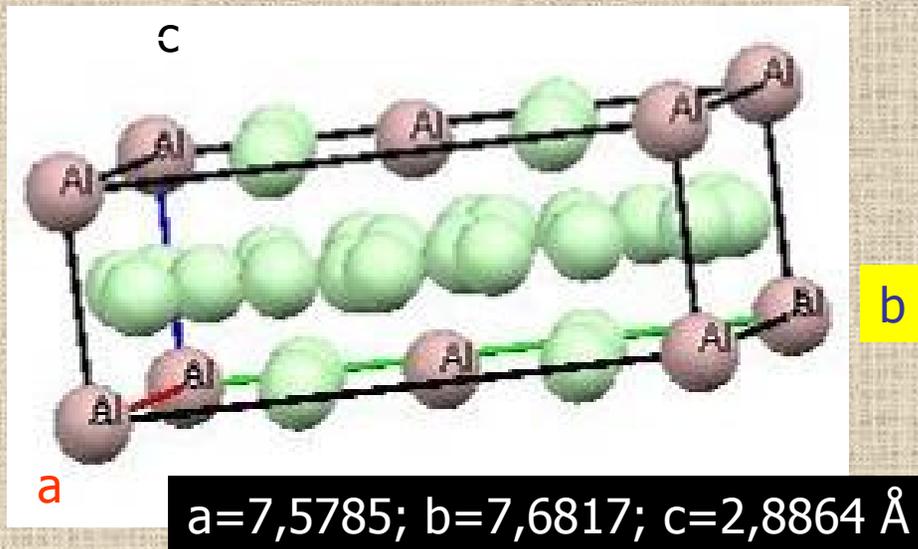
Table 1.1.16 MUL-II.3 compounds: Mullite group.

Chemical composition	Unit cell contents	Mineral / compound name	<i>a</i> [Å]	<i>b</i> [Å]	<i>c</i> [Å]	<i>V</i> [Å ³]	<i>ω</i> [°]	Reference
Al _{4,6} Si _{1,4} O _{9,7}	Al ₂ Al _{2,6} Si _{1,4} O _{9,7}	Mullite-ss*	7.549(8)	7.681(8)	2.884(3)	167.23	58.5	Đurovič (1962a)
Al _{4,8} Si _{1,2} O _{9,6}	Al ₂ Al _{2,8} Si _{1,2} O _{9,6}	Mullite-ss*	7.583(2)	7.681(2)	2.8854(5)	168.06	59.6	Sadanaga et al. (1962)
Al _{5,38} Si _{2,44} O _{9,70}	Al ₂ Al _{3,38} Si _{2,44} O _{9,70}	Mullite-ss	7.584(3)	7.693(3)	2.890(1)	168.61	59.5	Burnham (1963a)
Al _{5,66} Si _{2,16} O _{9,70}	Al ₂ Al _{3,66} Si _{2,16} O _{9,70}	Mullite-ss	7.584(3)	7.693(3)	2.890(1)	168.61	59.5	Burnham (1963a)
Al _{4,72} Si _{1,32} O _{9,66}	Al ₂ Al _{2,72} Si _{1,32} O _{9,66}	Mullite-ss*	7.566(5)	7.682(5)	2.884(2)	167.62	59.4	Đurovič (1969)
Al _{4,5} Si _{1,5} O _{9,75}	Al ₂ Al _{2,5} Si _{1,5} O _{9,75}	3/2 mullite*	7.553(1)	7.686(1)	2.8864(7)	167.56	59.0	Saalfeld and Guse (1981)
Al _{4,72} Si _{1,32} O _{9,66}	Al ₂ Al _{2,72} Si _{1,32} O _{9,66}	Mullite-ss	7.5785(6)	7.6817(7)	2.8864(3)	168.04	59.8	Angel and Prewitt (1986)
Al _{4,8} Si _{1,2} O _{9,6}	Al ₂ Al _{2,8} Si _{1,2} O _{9,6}	2/1 mullite	7.588(2)	7.688(2)	2.8895(6)	168.56	59.8	Angel et al. (1991)
Al _{4,95} Si _{1,05} O _{9,53}	Al ₂ Al _{2,95} Si _{1,05} O _{9,53}	Mullite-ss	7.6110(3)	7.6803(4)	2.8872(1)	168.77	60.8	Ban and Okada (1992)
Al _{4,98} Si _{1,02} O _{9,51}	Al ₂ Al _{2,98} Si _{1,02} O _{9,51}	Mullite-ss	7.6156(6)	7.6780(6)	2.8859(2)	168.75	61.7	Ban and Okada (1992)
Al _{4,87} Si _{1,13} O _{9,57}	Al ₂ Al _{2,87} Si _{1,13} O _{9,57}	Mullite-ss	7.5964(5)	7.6803(5)	2.8824(2)	168.17	60.5	Ban and Okada (1992)
Al _{4,64} Si _{1,36} O _{9,68}	Al ₂ Al _{2,64} Si _{1,36} O _{9,68}	Mullite-ss	7.5640(4)	7.6923(4)	2.8806(1)	167.61	61.1	Ban and Okada (1992)
Al _{4,75} Si _{1,25} O _{9,63}	Al ₂ Al _{2,75} Si _{1,25} O _{9,63}	Mullite-ss	7.5811(3)	7.6865(3)	2.8821(1)	167.95	60.1	Ban and Okada (1992)
Al _{4,59} Si _{1,41} O _{9,70}	Al ₂ Al _{2,59} Si _{1,41} O _{9,70}	Mullite-ss	7.5539(2)	7.6909(2)	2.88391(6)	167.54	59.2	Ban and Okada (1992)
Al _{4,54} Si _{1,46} O _{9,73}	Al ₂ Al _{2,54} Si _{1,46} O _{9,73}	Mullite-ss	7.5421(1)	7.6957(1)	2.88362(5)	167.37	59.1	Ban and Okada (1992)
Al _{4,52} Si _{1,48} O _{9,74}	Al ₂ Al _{2,52} Si _{1,48} O _{9,74}	Mullite-ss	7.5459(2)	7.6937(2)	2.88346(7)	167.40	59.0	Ban and Okada (1992)
Al _{4,56} Si _{1,44} O _{9,72}	Al ₂ Al _{2,56} Si _{1,44} O _{9,72}	Mullite-ss	7.5473(1)	7.6928(1)	2.88391(4)	167.44	58.9	Ban and Okada (1992)
Al _{4,5} Si _{1,5} O _{9,75}	Al ₂ Al _{2,5} Si _{1,5} O _{9,75}	3/2 mullite	7.54336(6)	7.69176(6)	2.88402(2)	167.34	58.9	Balzar and Ledbetter (1993)
Al _{5,65} Si _{0,35} O _{9,175}	Al ₂ Al _{3,65} Si _{0,35} O _{9,175}	Mullite-ss	7.7391(6)	7.6108(5)	2.9180(1)	171.87	64.5	Fischer et al. (1994)
Al _{4,82} Si _{1,18} O _{9,59}	Al ₂ Al _{2,82} Si _{1,18} O _{9,59}	Mullite-ss	7.5817(8)	7.6813(9)	2.8865(5)	168.10	60.0	Voll et al. (2001)
Al _{4,68} Si _{1,32} O _{9,66}	Al ₂ Al _{2,68} Si _{1,32} O _{9,66}	Mullite-ss	7.5655(4)	7.6883(4)	2.8851(2)	167.81	59.1	Voll et al. (2001)
Al _{4,98} Si _{1,02} O _{9,51}	Al ₂ Al _{2,98} Si _{1,02} O _{9,51}	Mullite-ss	7.616(2)	7.678(2)	2.8891(4)	168.97	63.0	Johnson et al. (2001)
Al _{5,16} Si _{0,84} O _{9,42}	Al ₂ Al _{3,16} Si _{0,84} O _{9,42}	Mullite-ss	7.606(1)	7.682(1)	2.8871(4)	168.70	61.4	Johnson et al. (2001)
Al _{4,68} Si _{1,32} O _{9,66}	Al ₂ Al _{2,68} Si _{1,32} O _{9,66}	Mullite-ss	7.5454(2)	7.6956(2)	2.88398(6)	167.46	58.6	Johnson et al. (2001)
Al _{4,66} Si _{1,34} O _{9,67}	Al ₂ Al _{2,66} Si _{1,34} O _{9,67}	Mullite-ss	7.5499(3)	7.6883(3)	2.88379(9)	167.39	58.5	Johnson et al. (2001)

Mullitas

- Mullita 3/2 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ou $\text{Al}_{4,5}\text{Si}_{1,5}\text{O}_{9,75}$
- Mullita 2/1 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{SiO}_2$ ou $\text{Al}_{4,8}\text{Si}_{1,2}\text{O}_{9,6}$

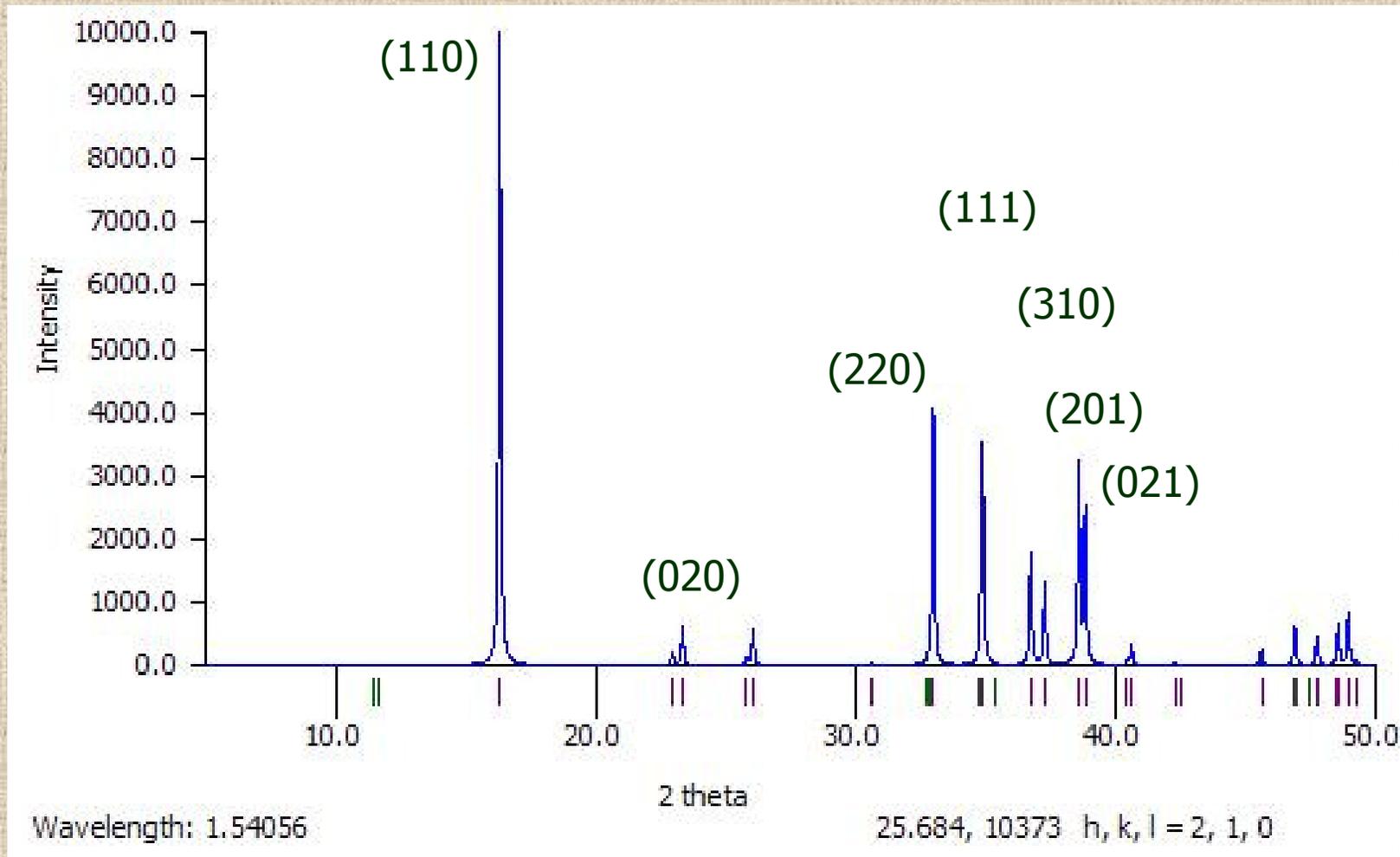
Célula Unitária Mulita



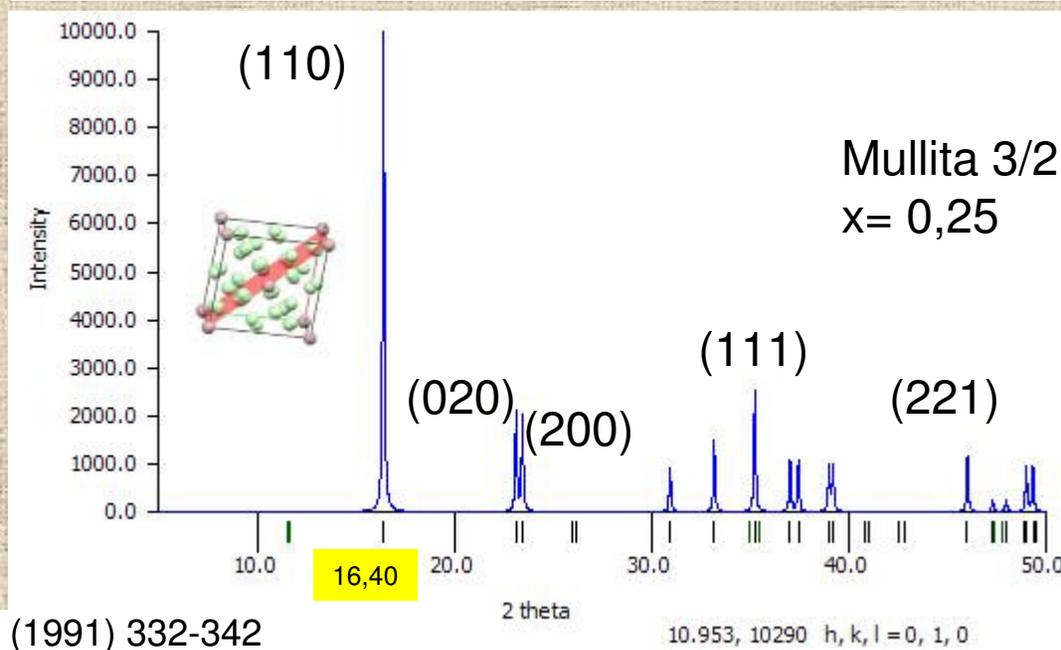
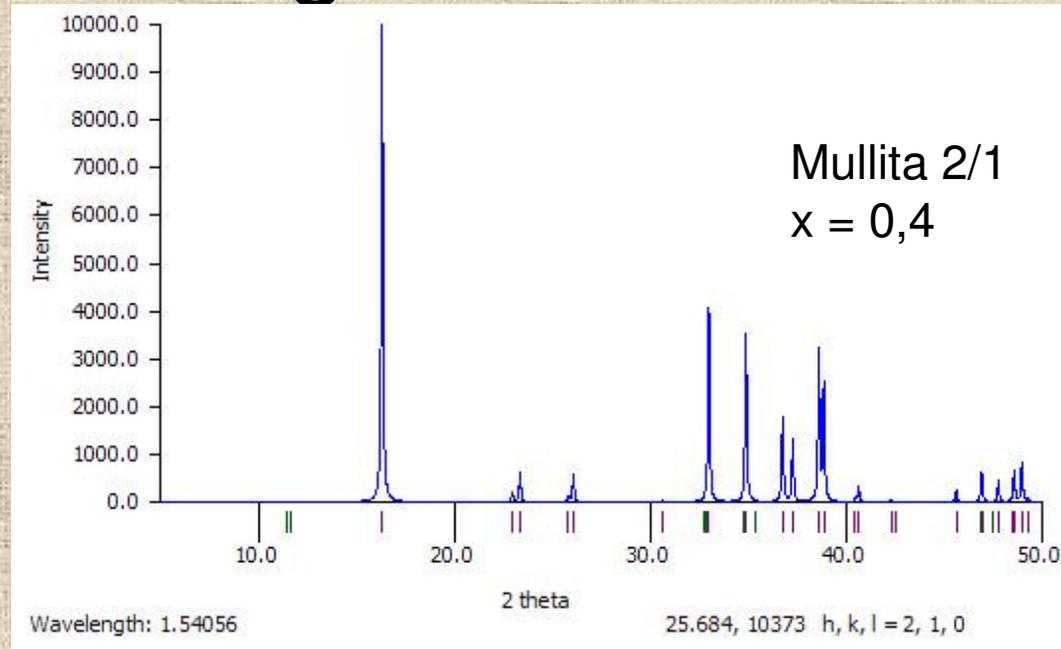
Difratograma de Raios X

Método do Pó

Mulita 2/1



Difratograma de raios X



Mullitas

Teor de Al_2O_3 e Parâmetros de Rede

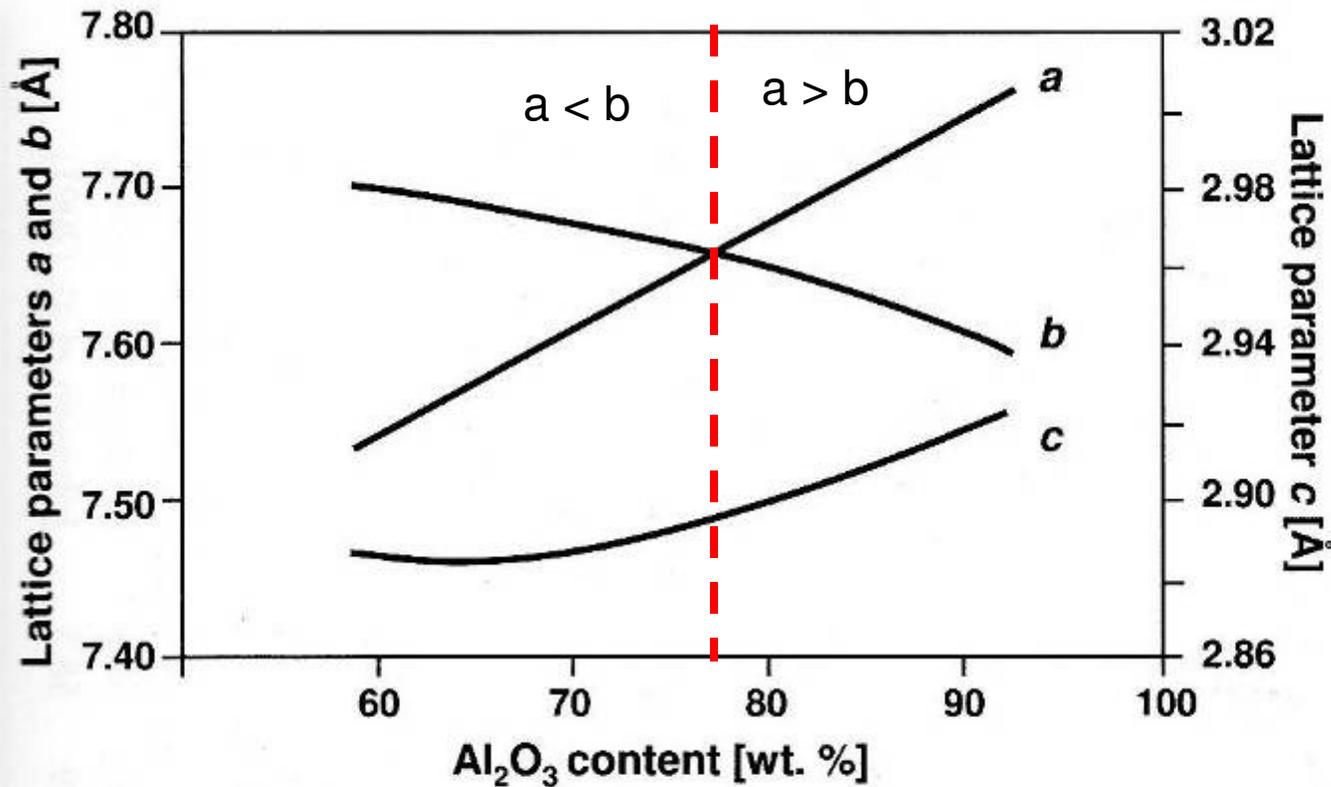


Fig. 1.1.13 Development of the lattice constants a , b and c of mullite with the Al_2O_3 content (after Fischer et al. 1994).

Ocupância dos Sítios nas fases Mulitas

	$x \leq 0,67$	$x \geq 0,67$
Nº T (Al+Si)	$4-2x$	$4-2x$
Nº T* (só Al)	$2x$	$2-x$
Nº T** (só Al)	0	$-2+3x$
Nº Al (sítio T)	2	2
Nº Si (sítio T)	$2-2x$	$2-2x$
Nº O ₃ (O _C)	$2-3x$	0
Nº O ₄ (O _C [*])	$2x$	$2-x$

A Estrutura Real da Mullita Projeção (001)

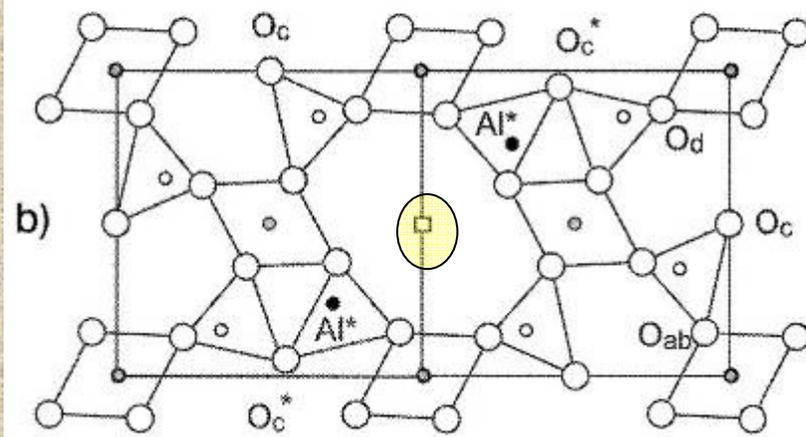
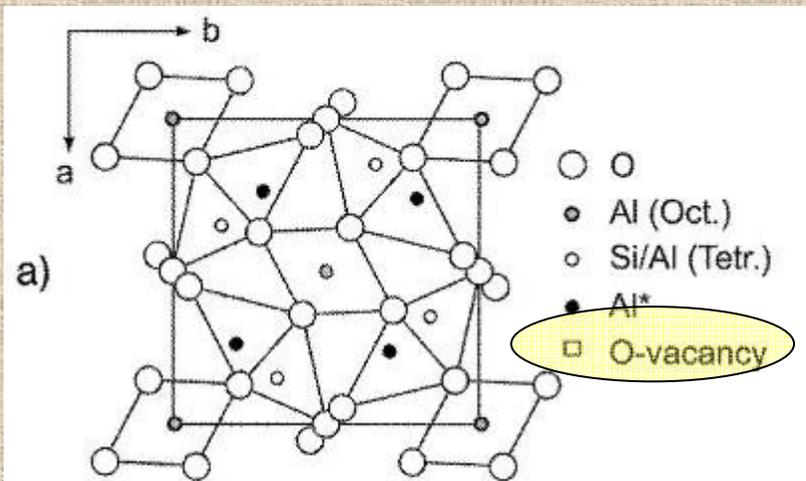


Fig. 1.2.12 Structure of mullite (a) Average structure (Angel and Prewitt 1986); the origin of the unit cell is displaced by $a+1/2$ and $b+1/2$ against Angel and Prewitt 1986); (b) Atomic displacements around an oxygen vacancy (following the nomenclature of Angel and Prewitt 1986 for the atomic positions).

Cátions Incorporados na Rede Cristalina da Mulita

Conteúdo Equivalente de Óxido de Cátions (% mol)

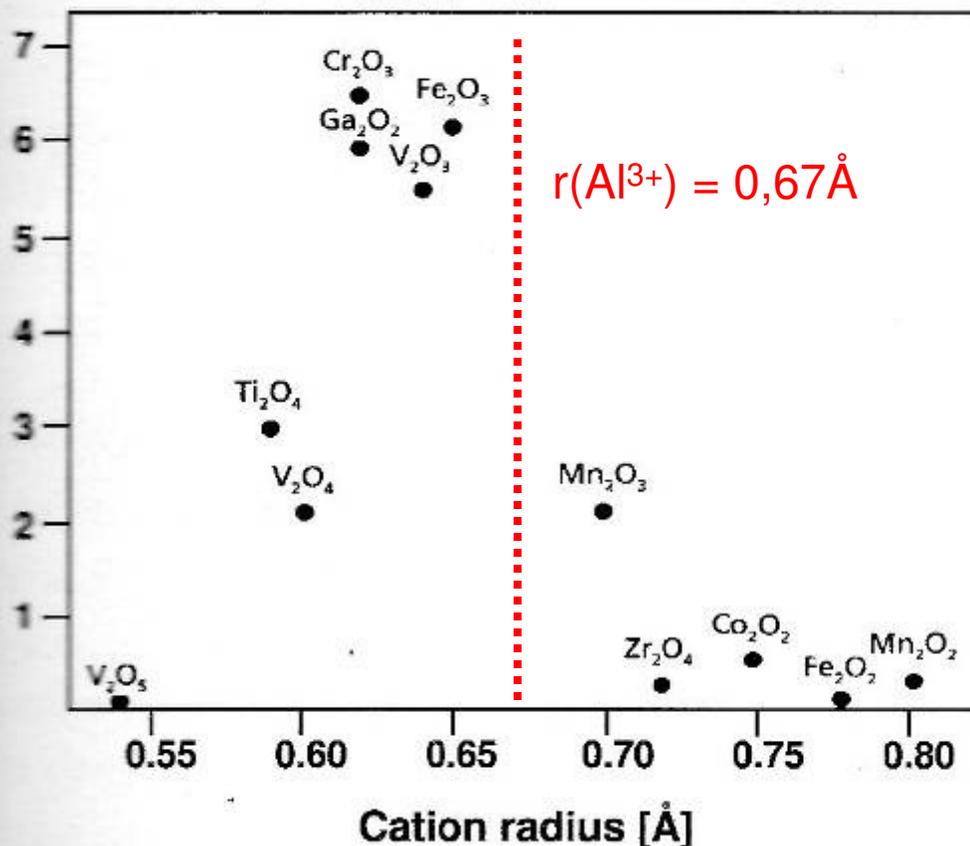


Fig. 1.3.1 Transition metal incorporation in mullite, given as maximum equivalent cation oxide contents and plotted versus the radii of substituting transition metal cations. Gallium incorporation (given as Ga₂O₃) is presented for comparison (from Schneider et al. 1994).

Os cátions de metais de transição tendem a substituir os íons Al³⁺ em sítios octaédricos ou ocupar sítios intersticiais octaédricos. Fe³⁺ pode ocupar alguns sítios tetraédricos. Os metais de raio iônico mais próximo ao do Al³⁺ são aqueles que conseguem formar fases estáveis com menor distorção dos parâmetros de rede e maior conteúdo equivalente de óxido incorporado.

Mullita

Processo de Formação

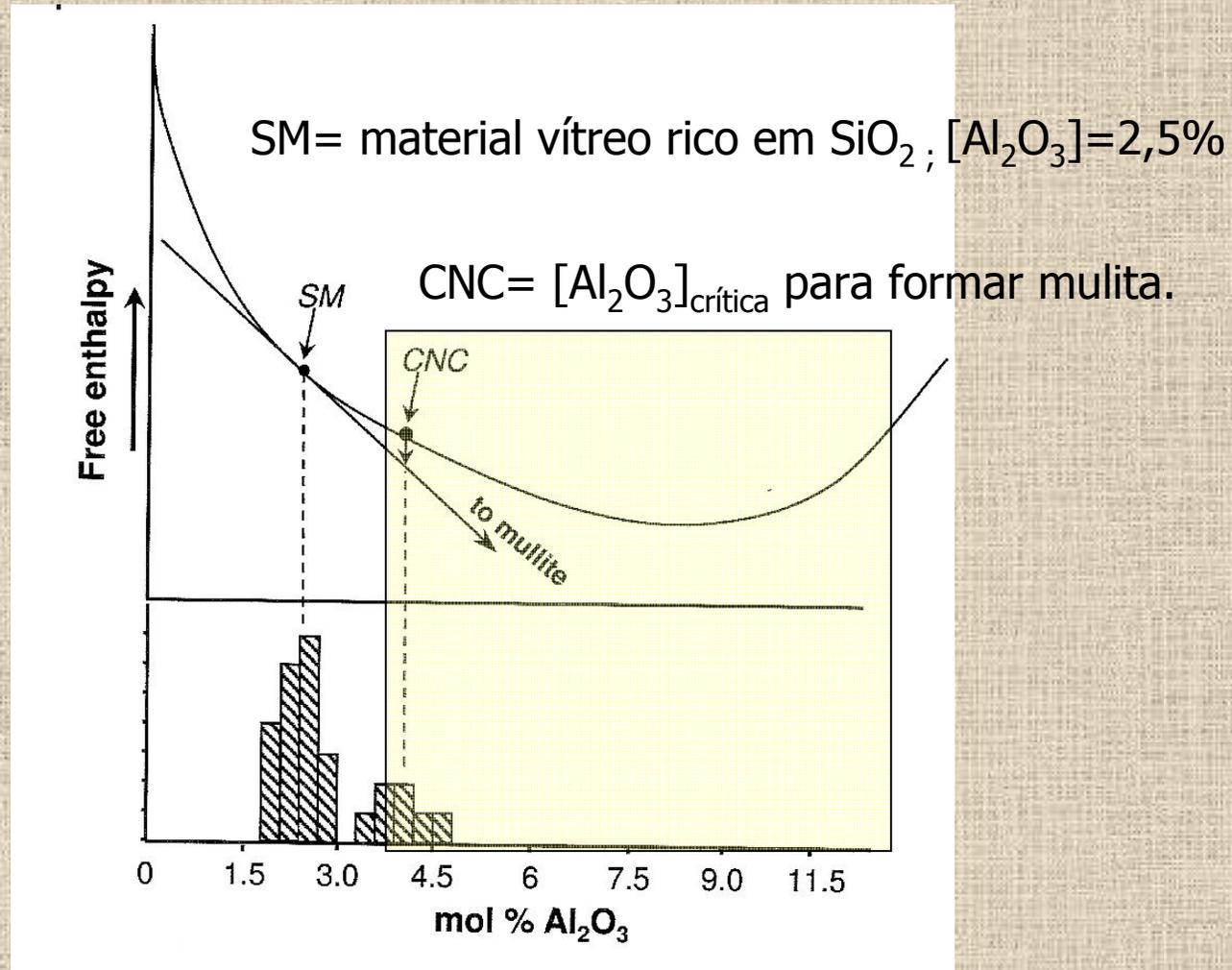
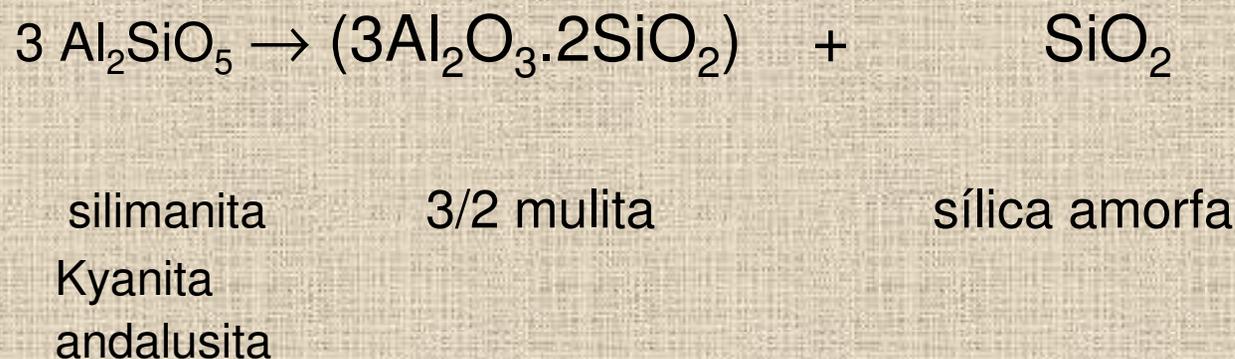
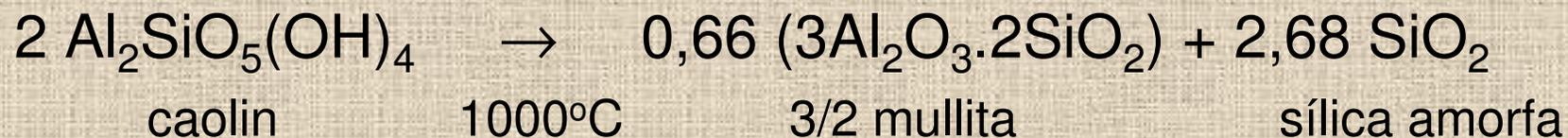


Gráfico da Energia Livre de Formação versus % Al_2O_3 no fundido de aluminossilicato formado na periferia dos grãos de quartzo durante a reação de sinterização da mullita.

Síntese em Estado Sólido

Mulita

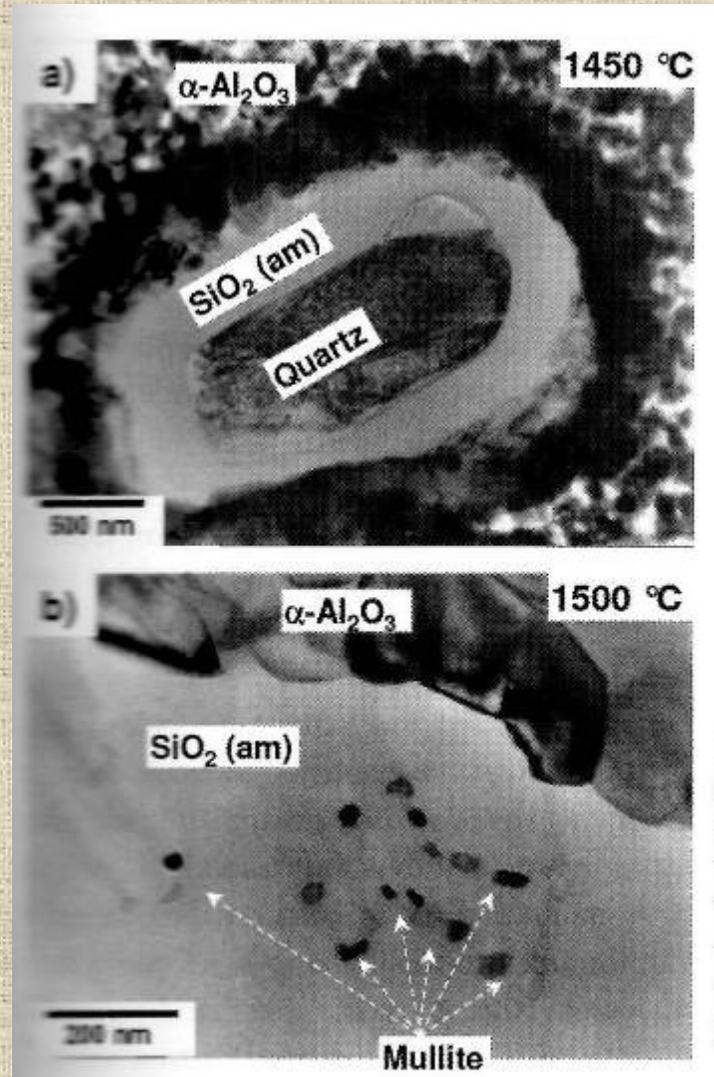


Estas reações são favorecidas pela presença de CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, e Fe₂O₃. Já MgO leva a formação de γ-Al₂O₃.

Formação da Mullita

Sistema Alumina-Quartzo

Micrografias de Microscopia Eletrônica de Transmissão (corte transversal) de uma mistura quartzo/ α -alumina tratados a 1450 e 1500°C. Note a formação a 1450°C de um fundido viscoso rico em sílica ao redor do cristal de quartzo.



F
g
p
ti
th
—
c
p

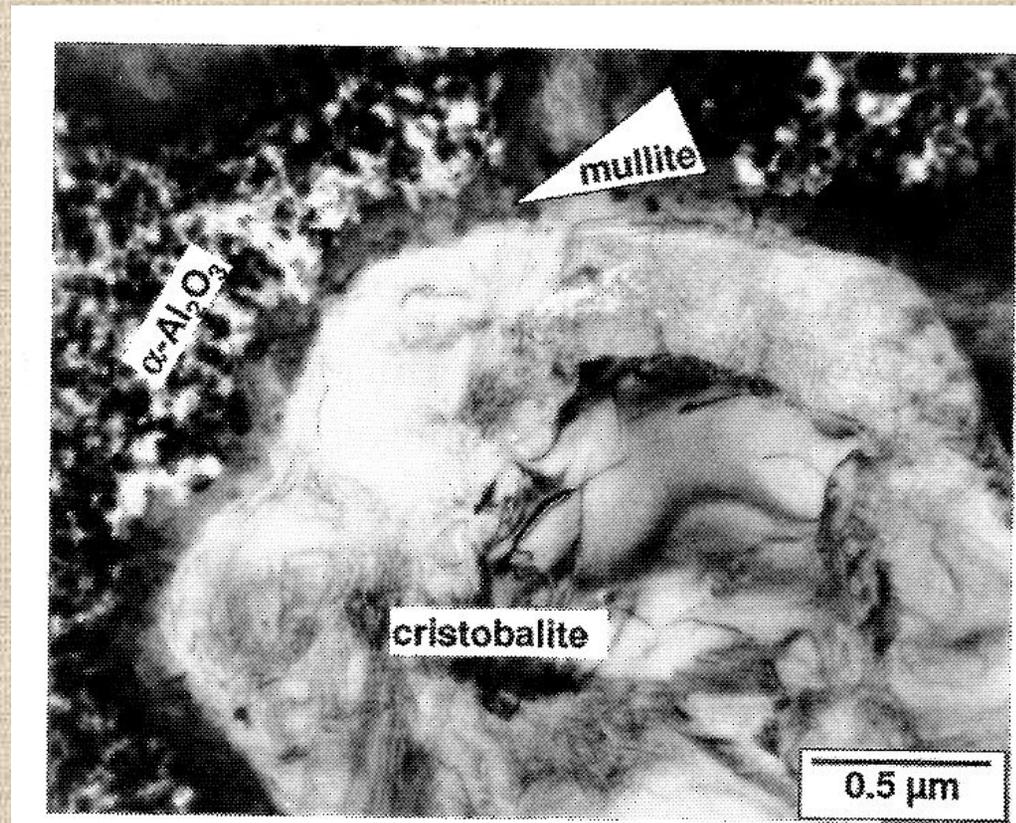
Schneider, H. e
Komarneni, S., Mullite,
Wiley-VCH, 2005.

Formação da Mulita

Sistema Alumina-Quartzo (1600°C)

1600°C

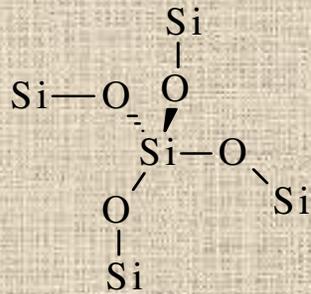
Em oposição à transparência anterior a Mulita se forma a partir da interface entre a cristobalita e a alumina.



Sneider, H. e
Komarneni,
S., Mullite,
Wiley-VCH,
2005.

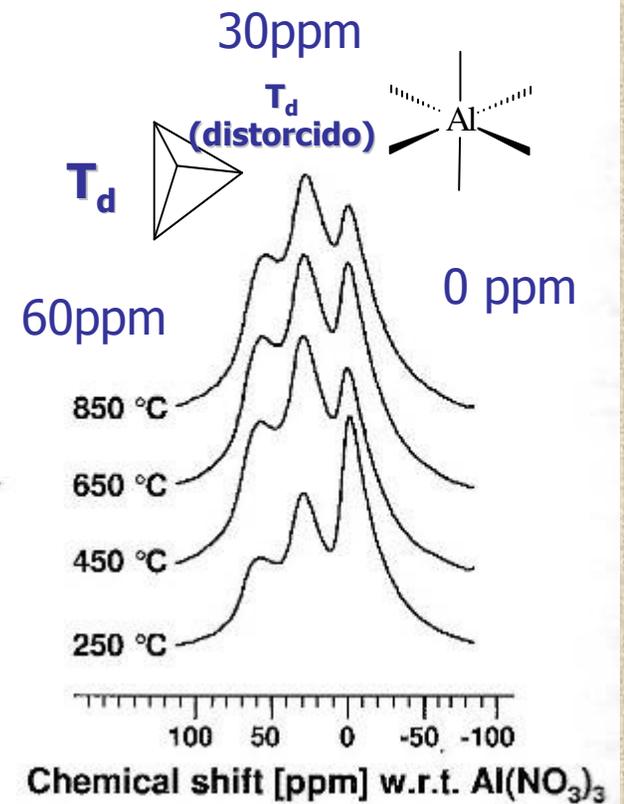
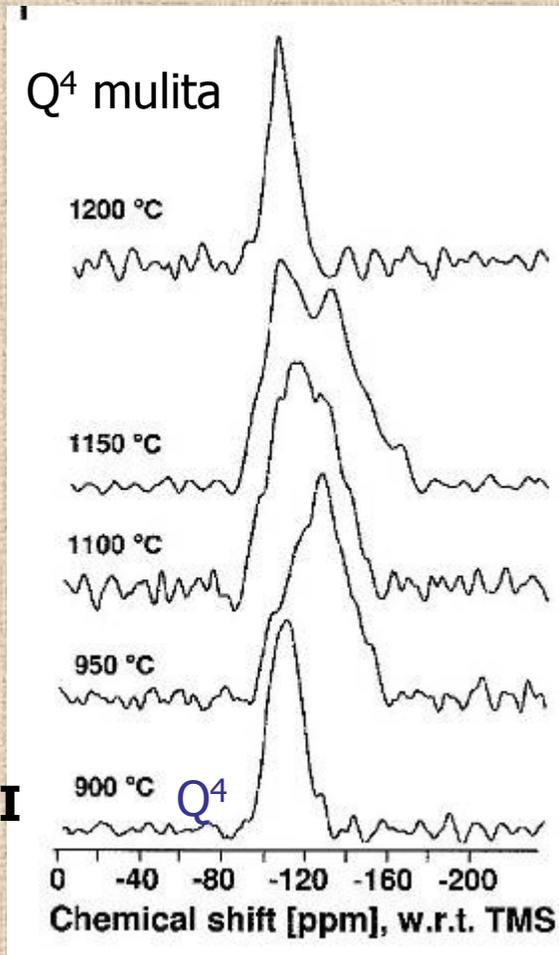
Mulita

Estrutura Local por RMN em Estado Sólido



-110ppm; SiO₂ vítrea
-90ppm; fase espinélio

Gel sílica tipo I



Mullita

Mudança na Estrutura Local do Alumínio

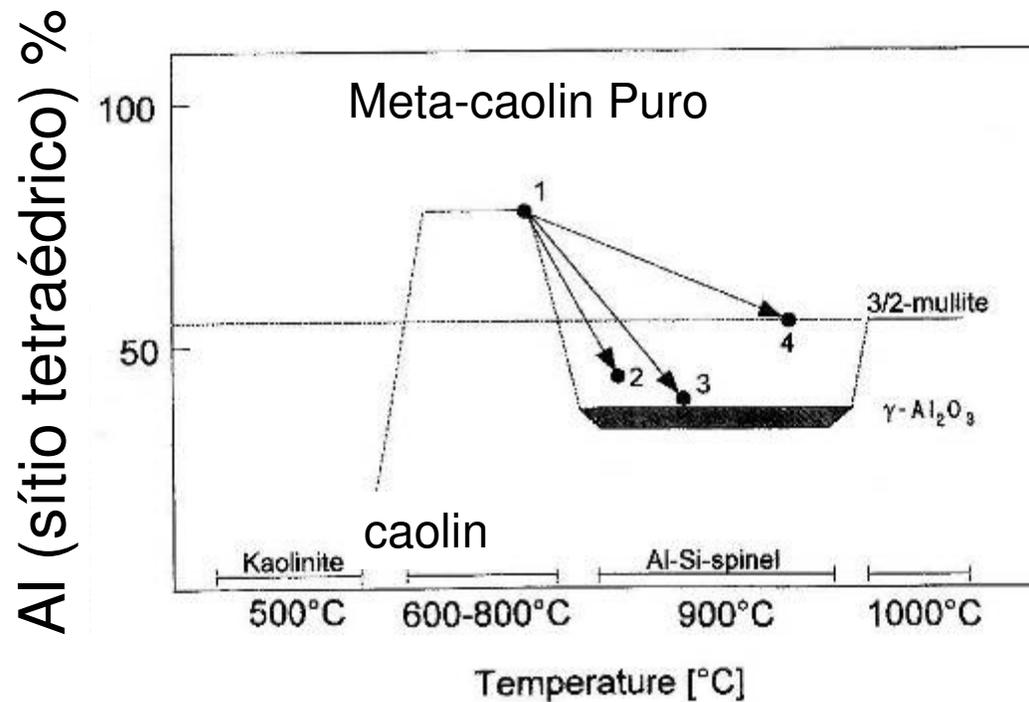
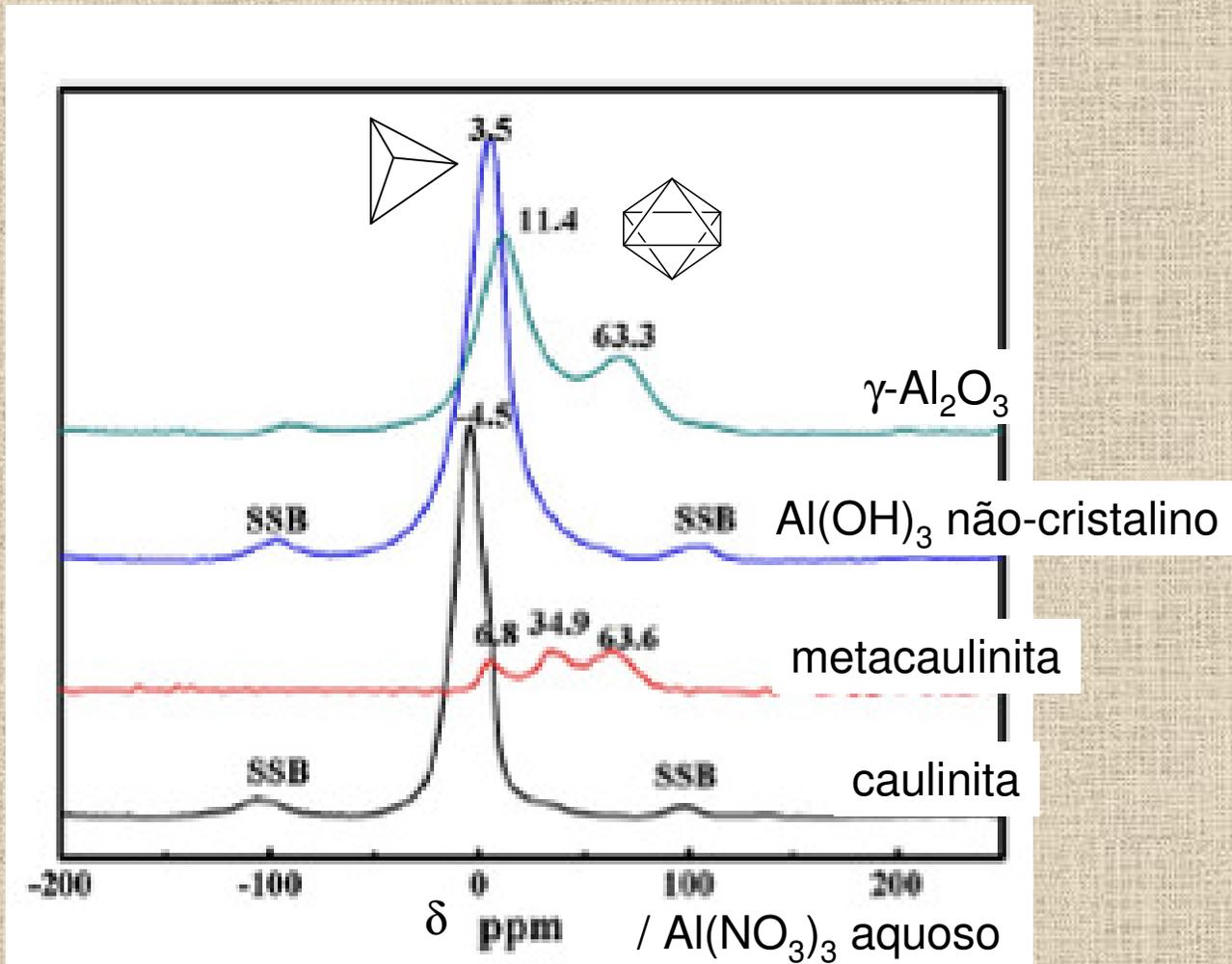


Fig. 4.1.1 Reaction processes and variation of the coordination number of aluminum in the kaolinite to mullite reaction sequence depending on the occurrence of impurity oxides. Experimental procedures: **1** Pure kaolinite heated at 800 °C (24 h); **2** pure kaolinite heated at 900 °C (124 h); **3** kaolinite + MgO heated at 900 °C (124 h); **4** kaolinite + CaO heated at 900 °C (124 h), (after Bulens et al. 1978, from Schneider et al. 1994).

Caulinita e Metacaulinita

Observando o Ambiente Local do Al por ^{27}Al MAS NMR

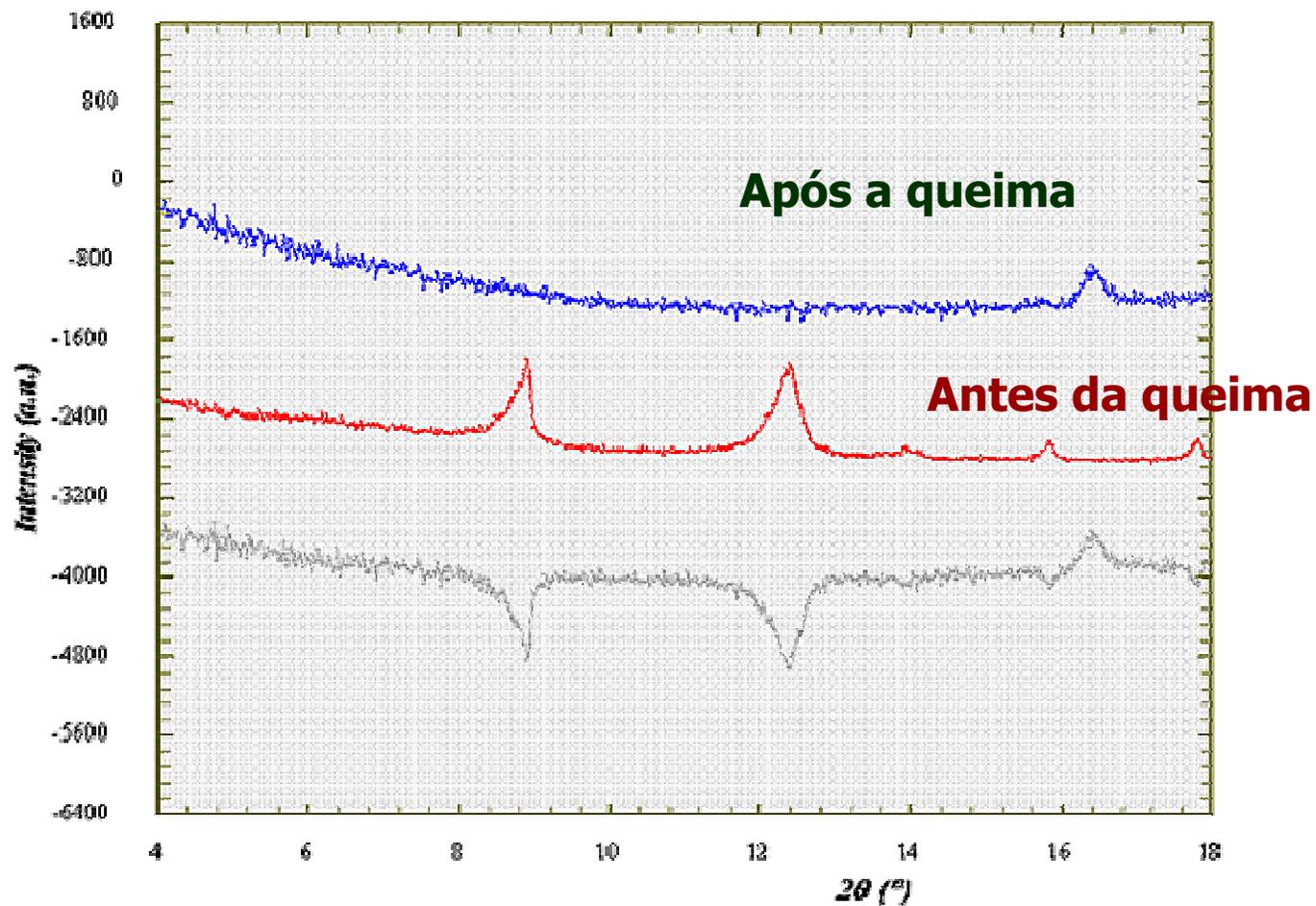


Ressonância Magnética Nuclear de ^{27}Al com Rotação em ângulo mágico (MAS NMR)

DRX

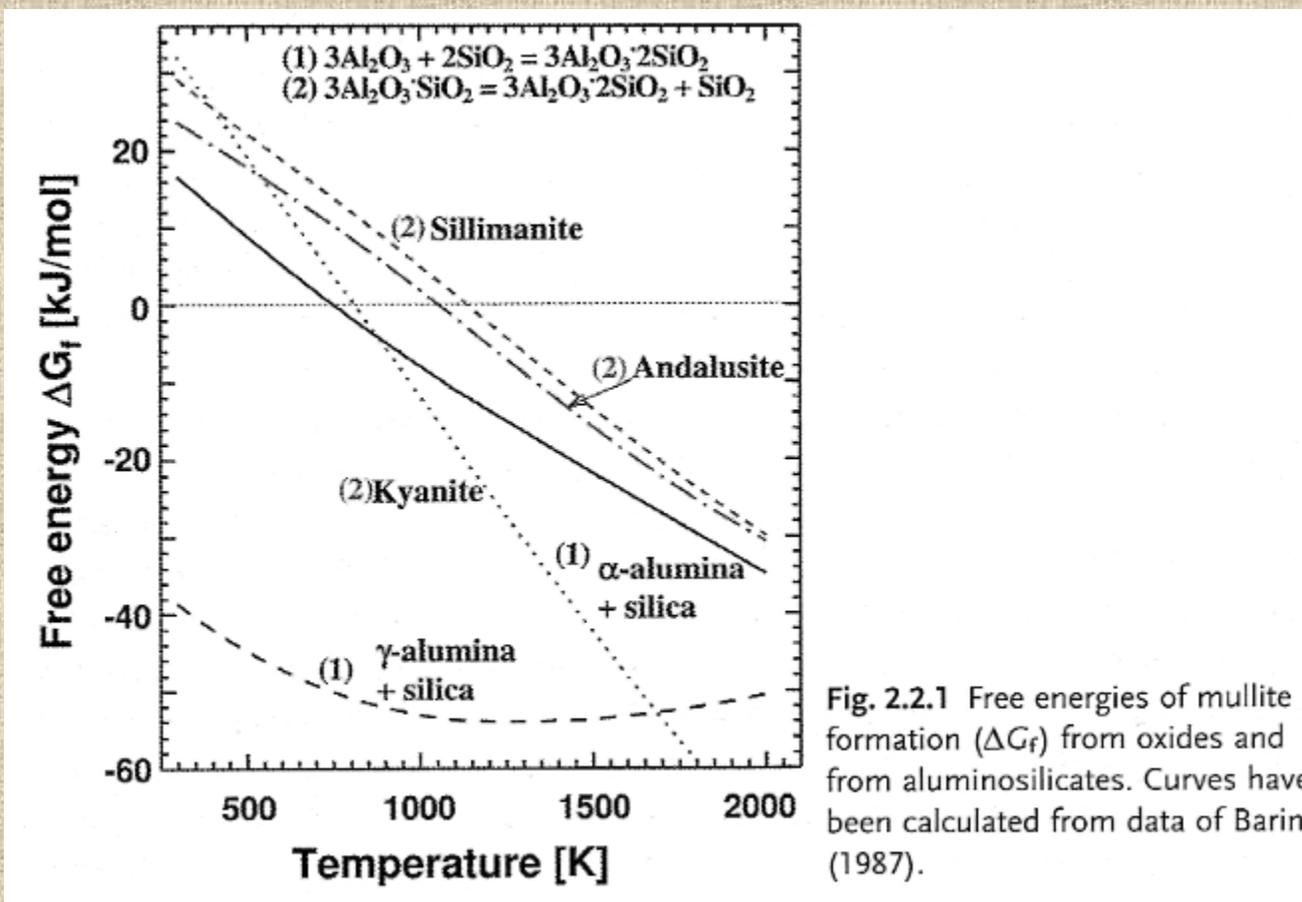
antes e após a queima

XRD Scan Comparison Fired Clay (blue) to Raw Clay (RED). Difference Plot in Grey



Propriedades Químicas

Parâmetros Termodinâmicos



A formação de mullita a partir de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ é termodinamicamente mais favorecida em qualquer faixa de temperatura, já sua formação a partir de aluminossilicatos como silimanita e andalusita só é possível acima de 1200K.

Variação de Entropia de Formação Padrão

- ΔS°_{298K} (3:2 mulita) = 269,76 J. mol⁻¹.K⁻¹
- A alta entropia é atribuída a ocupação do sítio T* (T₃O) por íons Al³⁺ (25%) e Si⁴⁺ (75%). Esta ocupação se faz de maneira aleatória pelos cátions citados, induzindo desordem estrutural.

Mullita

Propriedades Mecânicas Microdureza (monocristais)

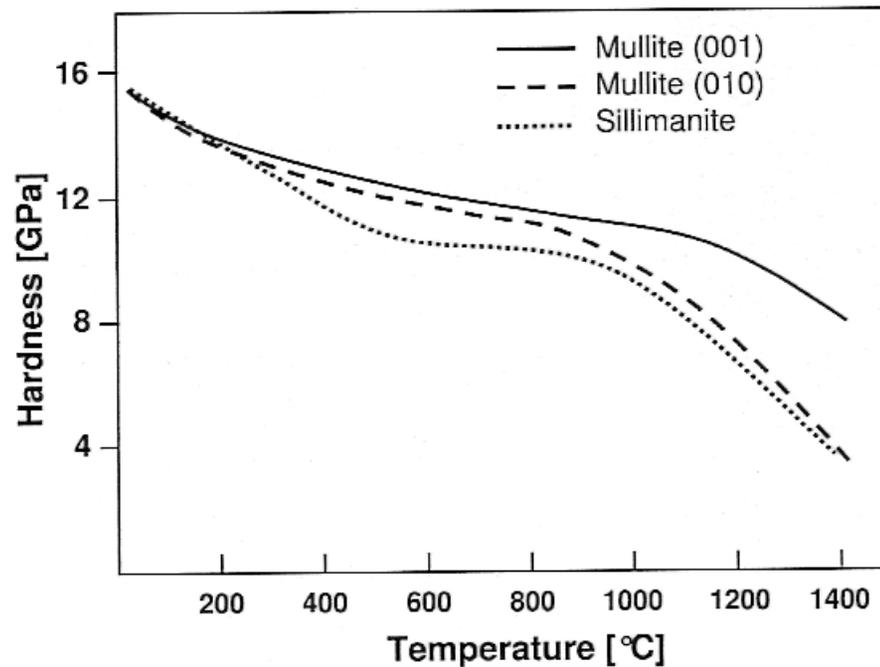


Fig. 2.1.5 Microhardness of (010) and (001) faces of mullite single crystals measured up to 1400 °C. Note that the temperature-dependent microhardness develops in three stages. Microhardness data of sillimanite are given for comparison (after Kriven et al. 2004 and Pitchford et al. 2001).

Mullita

Microdureza

Influência da Ligação Al-O no AlO₆

2.1.3

Microhardness of Mullite

Kollenberg and Schneider (1989) and Kriven et al. (2004) measured the microhardness of mullite single crystals of 2/1-composition parallel to the **b** (i.e. [010]) and **c**

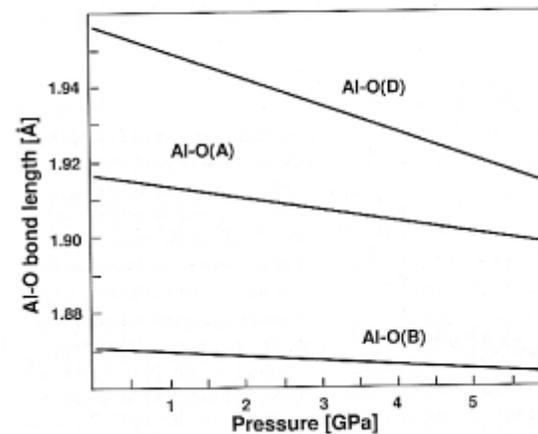


Fig. 2.1.4 Pressure-dependent compressibility of the aluminum oxygen octahedron of sillimanite which is closely related to mullite structurally (see sections 1.1.3.7 and 1.1.3.10). Shown are aluminum-oxygen bond lengths dependent on applied pressure. Note that the relatively long and elastic Al-O(D) (i.e. Al-O₂) bond displays the highest compressibility (see also Table 1.1.17). (after Yang et al. 1997).

Mullita vs Outras Cerâmicas

Propriedades Mecânicas
Dureza (macroscópico)

18 | 4 Mullite Synthesis and Processing

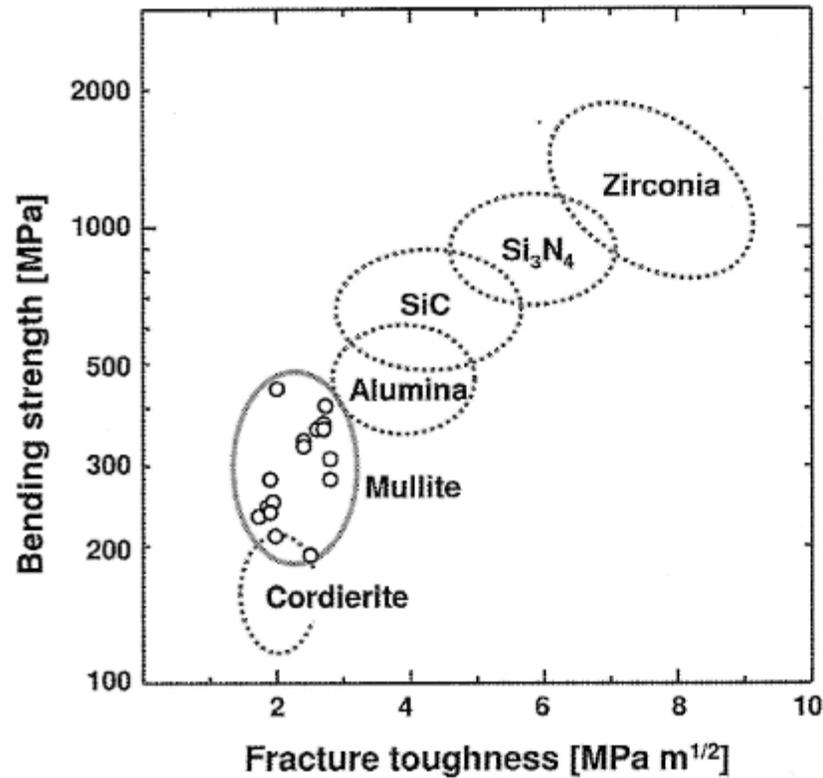


Fig. 4.3.1 Correlation between bending strength and fracture toughness of mullite in comparison to other advanced ceramics.

Mullita

Propriedades Mecânicas Resistência à Flexão

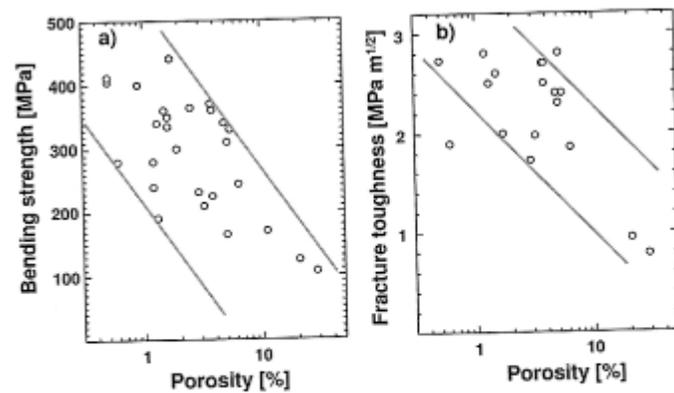


Fig. 4.3.2 Dependence between (a) Bending strength and (b) Fracture toughness of mullite ceramics plotted as a function of porosity.

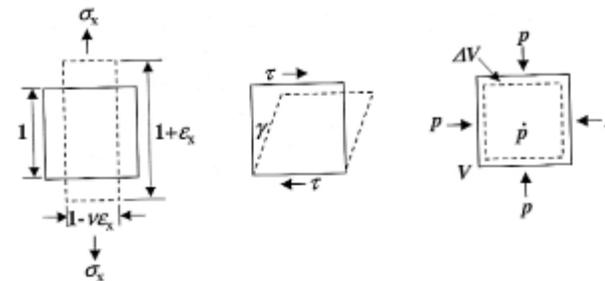


Fig. 4.3.6 Schematic drawing of the different deformation modes of ceramics caused by various types of stress.

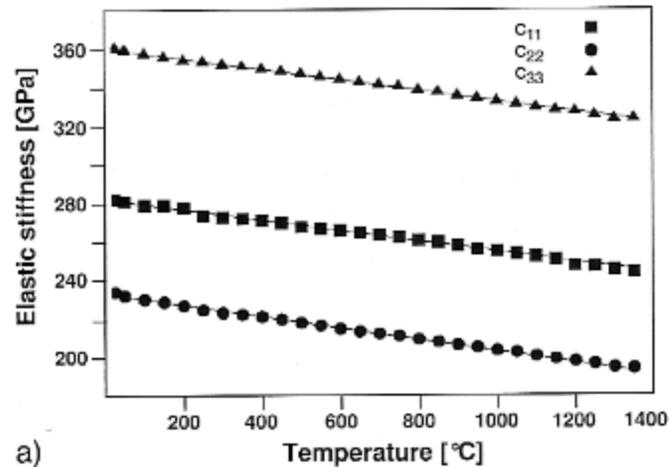
Table 4.3.1 Elastic constants of single crystal mullite and of mullite ceramics in comparison to some related materials.

Material	Density [g cm^{-3}]	E [GPa]	Poisson's ratio	G [GPa]	B [GPa]
Mullite ceramics	3.156	227.5	0.28	88.9	172.4
Mullite, void free	3.168	229.1	0.28	89.5	173.9
Mullite single crystal	3.096	224.7	0.2787	87.86	169.2
Mullite whisker	3.1	226.3	0.2803	88.37	171.7
Sillimanite single crystal	3.241	236	0.2705	92.86	171.4
α -alumina single crystal	3.986	403	0.234	163	252
Quartz single crystal	2.649	95.6	0.077	44.4	37.7
Fused silica	2.202	73	0.168	31	37

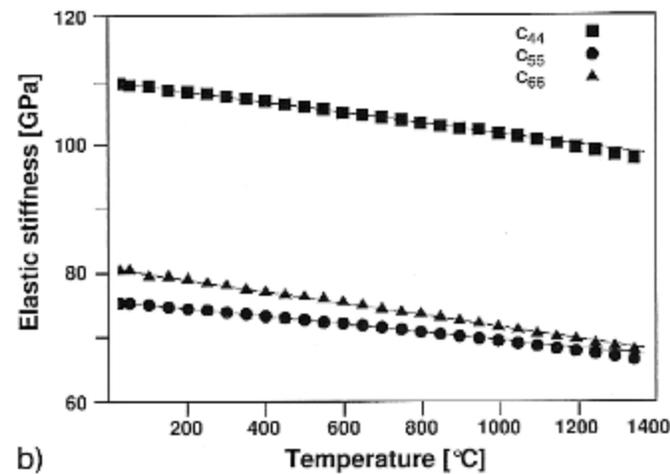
E = Young's modulus, G = shear modulus, B = Bulk modulus
Data of sillimanite, α -alumina, quartz and fused silica are given for comparison (see Ledbetter et al. 1998, Ceramic Society of Japan, 2002).

Mullita

Propriedades Mecânicas Módulo de Young



a)



b)

Fig. 2.1.2 Temperature dependence of the elastic moduli of single crystal mullite. (a) Linear moduli c_{11} , c_{22} and c_{33} . (b) Shear moduli c_{44} , c_{55} and c_{66} . Note the slight anomalies of the elastic shear moduli c_{44} and c_{55} above 1000°C (see also Section 2.5.2 according Schreuer et al. 2005).

Mullite

Durezza vs Temperatura

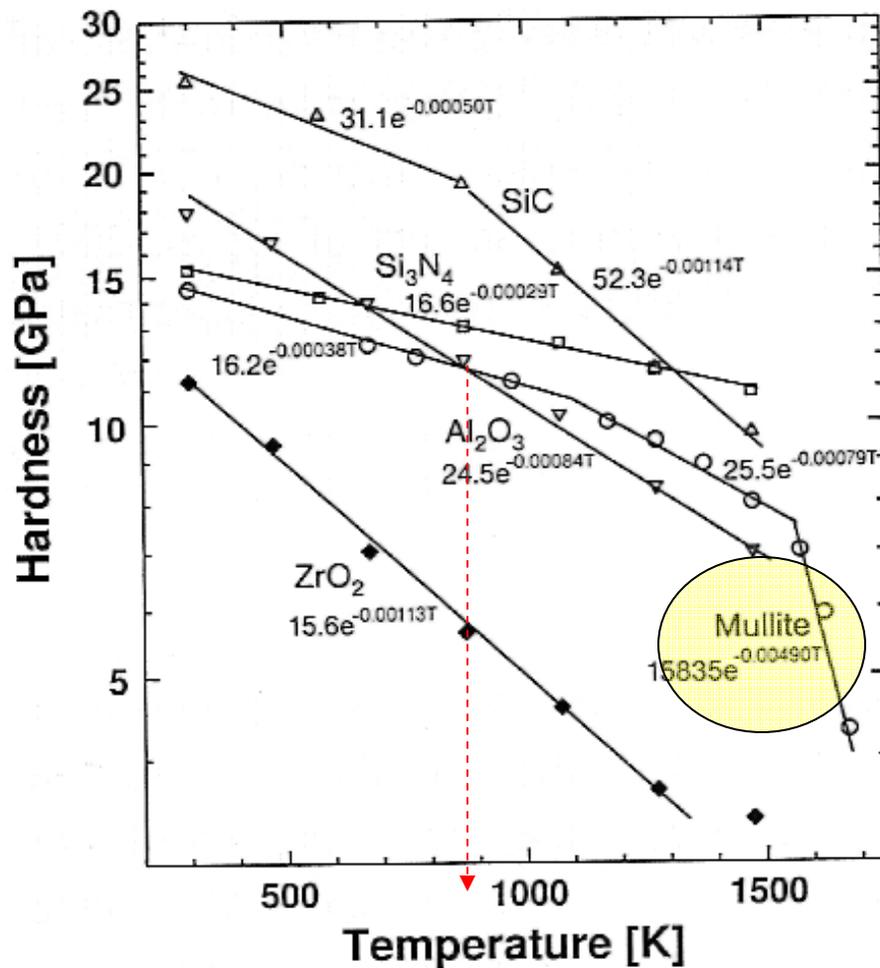


Fig. 4.3.7 Temperature-induced changes of hardness of mullite ceramics in comparison to silicon carbide (SiC), silicon nitride (Si₃N₄), alumina (Al₂O₃) and zirconia (ZrO₂).

Mullita

Amorfização Induzida pela Punção (Indentação)

148 | 2 Basic Properties of Mullite

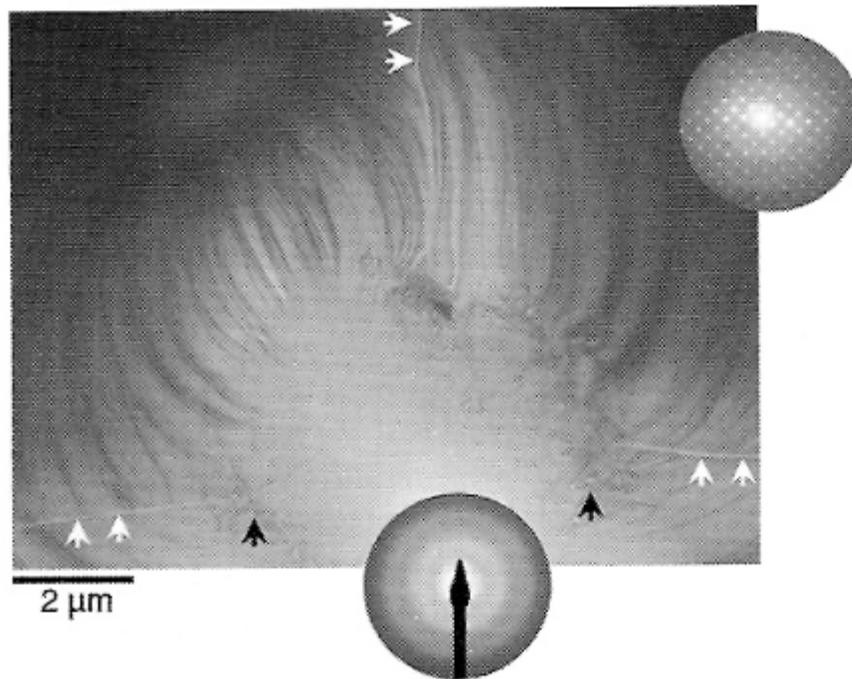


Fig. 2.1.6 Microindentation-induced amorphization of mullite. Transmission electron micrograph of the indented region of an (001) face of mullite. The indentation core has become amorphous, while the outer zone is crystalline with typical bend contours. Black arrows indicate dislocation networks at the interface between amorphous and crystalline areas. White arrows indicate radial cracks (Courtesy M. Schmücker).

Diagrama de Fase

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$

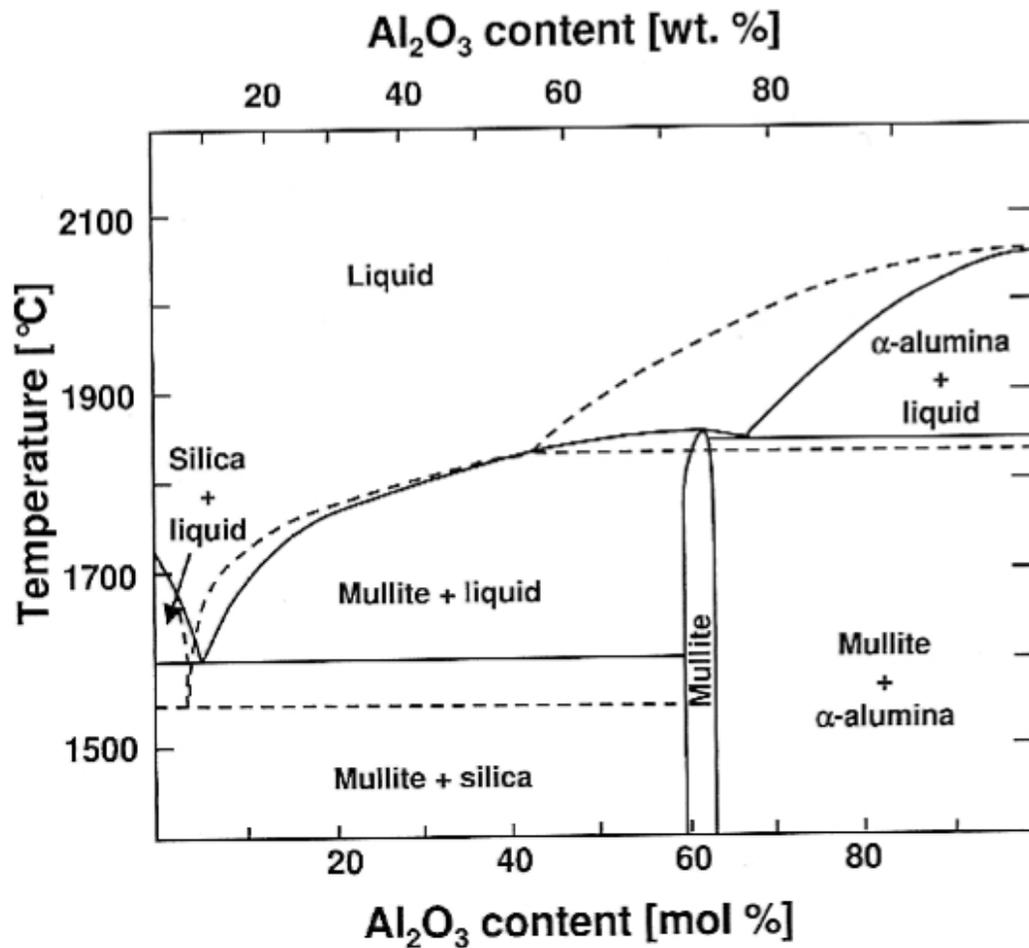


Fig. 3.1.1 The $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ phase equilibrium diagram. The results of Bowen and Greig (1924, dashed lines), and of Amaraki and Roy (1962, full lines), show incongruent and congruent melting, respectively.

Redução de Mulita por CO

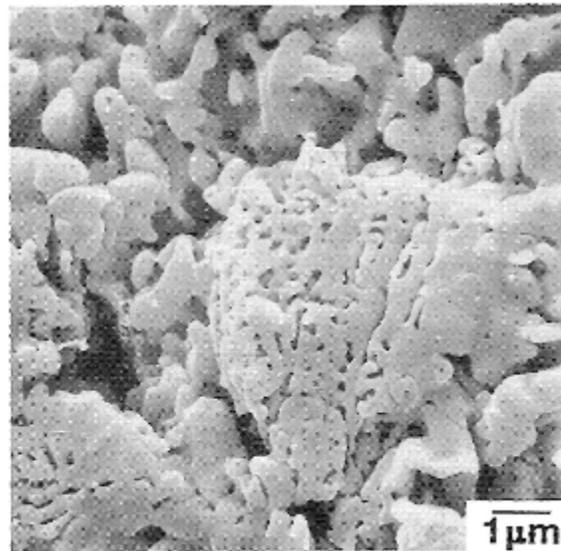
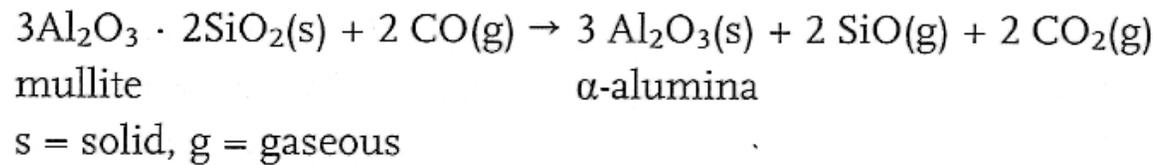
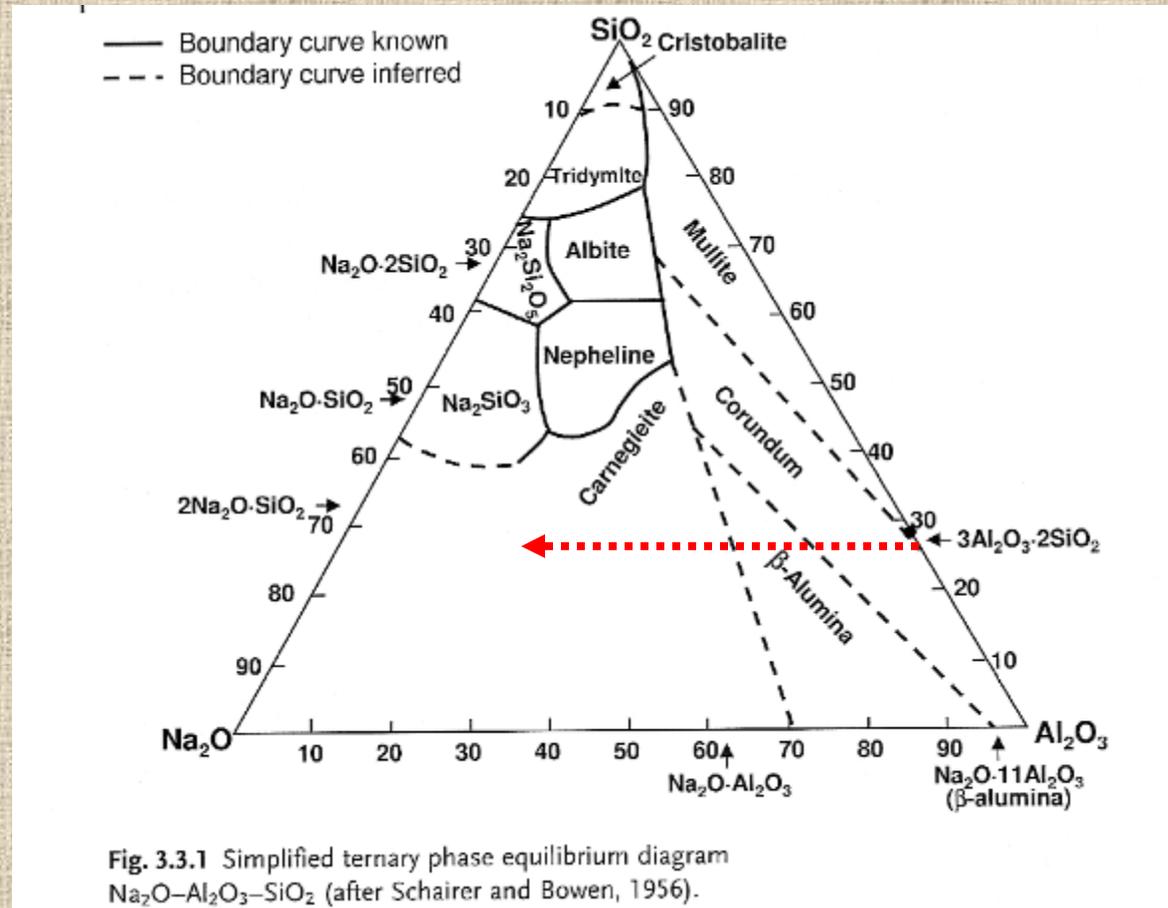


Fig. 3.2.1 Scanning electron micrograph of a mullite ceramic after heat treatment in carbon monoxide (CO) atmosphere. Note the porous surface of the grains and the intense corrosion, especially of the bonding phase at the grain boundaries (sample heat-treated at 1600 °C, 1 h, reaction atmosphere 10 l CO h⁻¹; from Schneider et al. 1994).

Propriedades Químicas da Mulita

Estabilidade Química Frente a Álcalis



O aumento no teor de álcalis leva à segregação de alumina e formação de silicatos alcalinos.

Mullita

Durezza

4.5 Mechanical Properties of Mullite Ceramics | 51

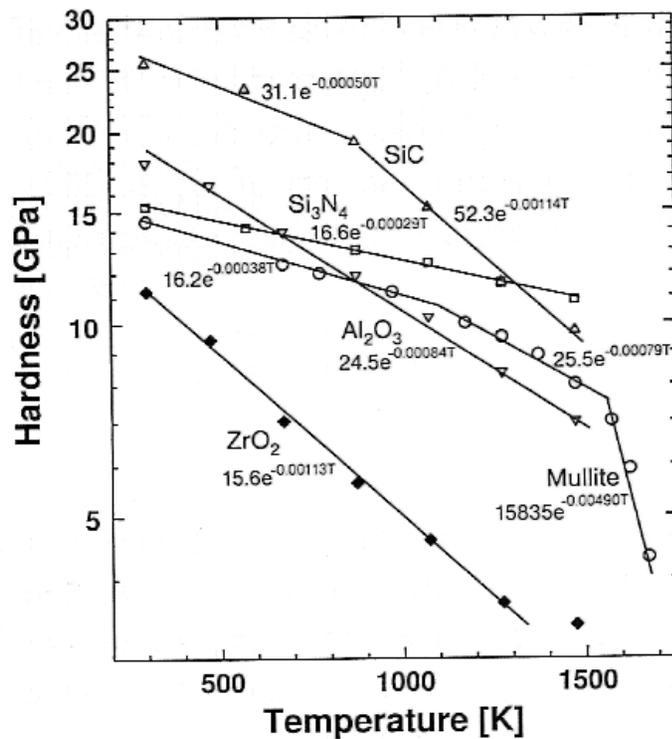


Fig. 4.3.7 Temperature-induced changes of hardness of mullite ceramics in comparison to silicon carbide (SiC), silicon nitride (Si₃N₄), alumina (Al₂O₃) and zirconia (ZrO₂).

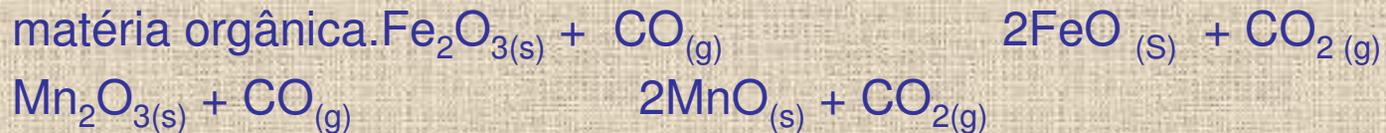
Defeitos

Defeitos nas Peças Queimadas

→ Coração Negro

Matéria orgânica em de granulometria menor é queimada entre 200 e 700°C, enquanto grãos maiores podem persistir até temperaturas superiores a 1000°C, mesmo em atmosfera oxidante. Esta matéria orgânica residual pode originar manchas negras no interior da peça formando o “coração negro”.

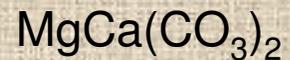
Outro mecanismo de formação de coração negro é a formação de óxidos negros de ferro e manganês pela redução com CO proveniente da queima parcial da



Defeitos Após a Queima

Poros

Se a massa cerâmica for rica em materiais que liberem gases durante a queima (dolomita por exemplo), pode gerar uma porosidade excessivamente alta.



Expansão Térmica das Fases de Sílica

Rachaduras

Ocorrem se a massa tiver excesso de quartzo. No resfriamento, em torno de 600°C, todo o beta-quartzo retorna a alfa-quartzo. Portanto, como mostra o gráfico abaixo, ocorre uma variação abrupta de dimensão do quartzo e da peça, o que pode levar ao aparecimento de trincas (rachaduras).

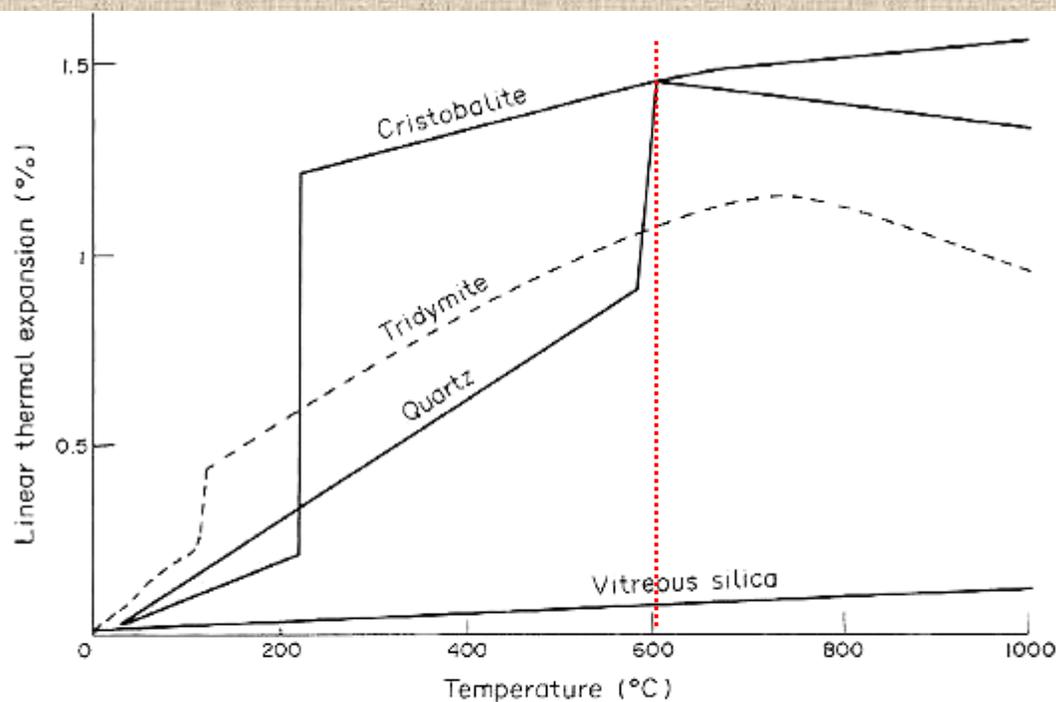


FIG. 2.15. Thermal expansion of the principal forms of silicon (After Worrall (1986), p. 23.) Reproduced by permission of Elsevier Applied Science Publishers Ltd.

- Vidros

- Cimentos