



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ESTUDO DE CERÂMICAS DO SISTEMA $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ PARA
APLICAÇÃO COMO RESSOADORES DIELÉTRICOS
EM MICROONDAS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Ana Luíza Carvalho Barquete (EEL-USP/INPE, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: analuiza@las.inpe.br

Dr. Pedro José de Castro (LAP/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: castro@plasma.inpe.br

Dr^a. Maria do Carmo de Andrade Nono (LAS/CTE/INPE,
Co-orientadora)
E-mail: maria@las.inpe.br

Dr. José Vitor Cândido de Souza (LAS/CTE/INPE, Co-orientador)
E-mail: vitor@las.inpe.br

INPE

São José dos Campos

Julho de 2008

“Um caminho de mil
milhas começa
com um passo”
Benjamin Franklin

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais e minha família, por todo apoio, carinho, amor e por sempre acreditarem em mim e na minha capacidade. Agradeço ao CNPq por ter-me concedido a bolsa de Iniciação Científica fazendo com que ampliasse meus conhecimentos em Ciência e Engenharia de Materiais.

Agradeço aos meus Orientadores Dr. Pedro José de Castro, Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e Dr. José Vitor Candido de Souza pela oportunidade concedida a mim para a realização deste projeto, além de transmitirem os conceitos necessários para a elaboração deste trabalho.

Agradeço ao LAS/CTE/INPE, LAP/CTE/INPE e AMR/IAE/CTA pela utilização de suas instalações que ajudaram na confecção deste trabalho.

Agradeço também aos colegas de laboratório e amigos pela amizade e companheirismo e pela ajuda nos momentos em que precisei.

RESUMO

Este projeto, iniciado em março de 2008, tem como objetivo principal a investigação de cerâmicas do sistema $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ para a aplicação como ressoadores dielétricos em microondas. Para um bom desempenho do ressoador dielétrico é necessário um alto fator de qualidade, alta constante dielétrica e baixo coeficiente de frequência de ressonância com a temperatura. As vantagens do emprego de RDs de materiais cerâmicos são as suas pequenas dimensões, pouco peso e facilidades de montagem em circuitos miniaturizados de microondas e constituem o elemento determinante da frequência de oscilação no circuito que é sua própria frequência de ressonância. São componentes importantes em circuitos de microondas, como osciladores, filtros e antenas. A importância da sua constante dielétrica de alto valor advém da sua capacidade de concentrar o campo eletromagnético no interior do seu corpo cilíndrico. Foram confeccionadas as cerâmicas de TiO_2 puro e $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ nas respectivas proporções de 90-10, 80-20, 70-30 (% em massa), que passaram pelo processo de mistura e moagem de pós por 8 horas, e em seguida compactadas por prensagem uniaxial (160MPa) e prensagem isostática (300MPa) a fim de produzir corpos cilíndricos com espessura (H) e diâmetro (D) em uma proporção $H/D \approx 0,4$. Foram realizados análises de raios X das misturas obtidas. As amostras foram sinterizadas na temperatura de 1500°C por 3 horas. Os resultados preliminares de constante dielétrica (ϵ) e fator de qualidade (Q) têm mostrado a influência da adição da ZrO_2 no TiO_2 . Análises das propriedades dielétricas são realizadas em função da densidade e microestrutura das cerâmicas obtidas. O objetivo principal do projeto é obter materiais cerâmicos com propriedades dielétricas promissoras para uso em circuitos de microondas e uma eventual aplicação em telecomunicações via satélite.

ÍNDICE

Lista de figuras	5
Lista de tabelas.....	6
Lista de símbolos.....	7
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO.....	8
CAPÍTULO 2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1.Ressonadores dielétricos	9
2.2 Aplicações dos ressoadores Dielétricos.....	10
CAPÍTULO 3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1. Preparação das amostras	12
3.1.1. Compactação das pastilhas.....	12
3.1.2. Compactação dos corpos cerâmicos por prensagem isostática.....	12
3.1.3. Sinterização	12
3.2. Caracterização das misturas dos pós	13
3.2.1. Análise das fases	13
3.3. Caracterizações microestruturais das amostras sinterizadas	13
3.3.1. Fases presentes	13
3.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	14
3.5. Caracterizações dielétricas	14
3.4.1. Determinação da constante dielétrica	15
3.4.2. Determinação do fator de qualidade	16
CAPÍTULO 4- RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1. Análise por difração de raios-X das amostras.....	18
4.2. Análises por microscopia eletrônica varredura (MEV).....	20
4.3. Medição de parâmetros dielétricos em microondas.....	23
4.3.1. Propriedades dielétricas.....	23
CONCLUSÃO.....	25
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição das linhas dos campos elétricos e magnéticos do modo eletromagnético TE_{016}	10
Figura 2. Caixa de teste com as amostras para as medições em microondas das características dielétricas: a) constante dielétrica e b) fator de qualidade.	15
Figura 3. Montagem experimental para medição das características dos RDs em microondas.....	16
Figura 4. Equipamentos utilizados para determinar os parâmetros dielétricos em microondas: a) acoplador direcional, detector e caixa de teste e b) esquema geral com gerador de varredura e analisador de rede.....	16
Figura 5. Representação da forma de medição do fator Q_c com indicação dos pontos de meia-potência do espectro de ressonância.....	17
Figura 6. Difratoograma de raios x para cerâmica de TiO_2 puro.....	18
Figura 7. Difratoograma de raios x para cerâmica de $TiO_2 + 10\%ZrO_2$	19
Figura 8. Difratoograma de raios x para cerâmica de $TiO_2 + 20\%ZrO_2$	19
Figura 9. Difratoograma de raios x para cerâmica de $TiO_2 + 30\% ZrO_2$	20
Figura 10. Micrografia da amostra com 100 % de TiO_2	21
Figura 11. Micrografia da amostra com 10% de ZrO_2	21
Figura 12. Micrografia da amostra com 20% de ZrO_2	22
Figura 13. Micrografia da amostra com 30% de ZrO_2	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição das amostras ZrO ₂ -TiO ₂	11
Tabela 2. Resultados da análise em microondas das amostras.....	24

LISTA DE SÍMBOLOS

ε - Constante dielétrica

Q_c – Fator de qualidade carregado

Q_0 - Fator de qualidade não carregado

ZrO₂ - Óxido de zircônio

TiO₂ - Óxido de titânio

d - Diâmetro

h - Horas

s - Segundo

MPa – Megapascal

°C - Grau Celsius

f_0 - Freqüência de ressonância

f_1 e f_2 - freqüências que indicam a largura de faixa (Δf) nos pontos de meia-potência do espectro de ressonância

λ - Comprimento de onda

GHz - Gigahertz

mm - Milímetro

Cu-K α - Radiação características em análises de raios X

min - Minuto

β - Coeficiente de acoplamento

TE₀₁₀ e TE₀₁₁ – Modos ressonantes em ressoadores dielétricos

% - Porcentagem

rpm - Rotações por minuto

μm – Micrômetro

g - grama

° - graus

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A rápida evolução dos sistemas de comunicações móveis e via satélite, tem promovido uma alta demanda para componentes cerâmicos em microondas [1]. Ressonadores dielétricos de materiais cerâmicos têm sido muito utilizados em osciladores, filtros, antenas, etc. Esses materiais podem oferecer melhor desempenho, se comparado aos ressoadores metálicos, além de permitir redução de tamanho, o que possibilita sua aplicação em circuitos miniaturizados de microondas, e conseqüentemente melhoria na resolução do sinal [3-4]. Entretanto as tecnologias de produção e aplicação desses materiais pertencem a um pequeno grupo de empresas internacionais, que mantém essa tecnologia sob sigilo, dificultando o acesso, fazendo com que o Brasil importe parte desses componentes, aumentando seus custos, e dificultando o uso desses materiais. O objetivo principal desse projeto é o desenvolvimento, caracterização e aplicação de materiais cerâmicos a base de $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ como ressoadores dielétricos em circuitos de microondas. Para tal objetivo buscam-se materiais cerâmicos que apresentem valores de constante dielétrica ($\epsilon > 25$), elevado fator de qualidade devido às perdas dielétricas (que é inversamente proporcional a tangente de perdas) e baixo coeficiente de frequência de ressonância com a temperatura. Para isso as cerâmicas devem apresentar microestrutura homogênia, alta densidade relativa, fase cristalina definida [1-3].

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ressonadores Dielétricos

Para aplicação em circuitos de microondas os ressoadores dielétricos (RDs) devem apresentar três características distintas; alto fator de qualidade, alta constante dielétrica e baixo coeficiente de variação de frequência de ressonância com a temperatura. O surgimento de ressoadores dielétricos de materiais cerâmicos tem possibilitado baixa perda dielétrica, estabilidade de frequência, redução de peso, facilidade de montagem, além de contribuir para o avanço na miniaturização de circuitos de microondas. Comparando RDs de materiais cerâmicos, estes são consideravelmente menores que de uma cavidade metálica que opera a mesma frequência. Os RDs são geralmente de forma cilíndrica, porém pode-se encontrar em forma tubular ou esférica e de paralelepípedo. Em RDs cilíndricos o modo ressonante utilizado é o TE_{010} (ou a variante TE_{011}) – tipo de oscilação que carrega consigo a maior porção de energia e por isso é o mais adequado para comunicação. Para o modo TE_{010} o campo elétrico descreve círculos concêntricos no interior do ressoador dielétrico, enquanto o campo magnético ultrapassa seus limites, como mostrados na Figura 1. [5]

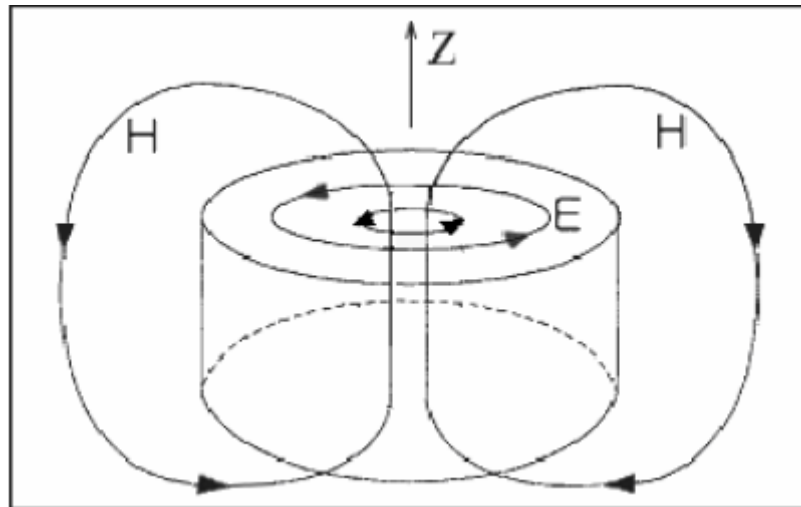


Figura 1. Distribuição das linhas dos campos elétricos e magnéticos do modo eletromagnético TE_{010}

2.2. Aplicações dos ressoadores dielétricos

As principais aplicações dos ressoadores dielétricos são como osciladores e filtros de frequência. Os osciladores de microondas com RD têm mostrado ser compatíveis com as exigências do sistema moderno de telecomunicação (como telecomunicação via satélites), devido às suas características de alta estabilidade de frequência, baixo ruído, dimensões e pesos reduzidos. Os filtros de frequência com RDs têm sido amplamente utilizados em substituição aos filtros de ondas convencionais, devido a sua alta seletividade, estabilidade em frequência e redução de tamanho, peso e custo [7-9]. Para aplicação em microondas a faixa ótima de frequência está compreendida entre 1 e 20 GHz, abaixo desse valor as dimensões são muito grandes ($d = 50\text{mm}$ e $\epsilon = 40$) e acima de 20 GHz as dimensões são muito pequenas [10].

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo desse projeto é o desenvolvimento materiais cerâmicos à base de ZrO_2-TiO_2 para uso em circuitos de microondas. Serão utilizados pós de ZrO_2-TiO_2 em quantidades variadas. As matérias-prima utilizadas apresentam alta pureza. O TiO_2 foi obtido junto à Empresa Certronic Ind. e Com. Ltda. e o ZrO_2 foi fornecida pela Empresa Zhongshun Chemical Equipment Co. Ltd. As composições foram processadas pela rota da mistura. A tabela 1 mostra as composições utilizadas nesse projeto.

Tabela 1. Composição das amostras de ZrO_2-TiO_2 .

Amostra	Temperatura	TiO_2 (%)	ZrO_2 (%)
A	1500 °C	100	—
B		90	10
C		80	20
D		70	30

Efetuuou-se inicialmente a pesagem dos pós em balança analítica, com precisão de duas casas decimais, procedendo-se a seguir o processo de moagem por via úmida, em um moinho de atrito em meio à álcool etílico na velocidade de 200 rpm por um período de 8 horas. Durante a moagem foram utilizadas esferas de zircônia com diâmetro de 8 mm, haste de agitação e câmara de moagem fabricadas com polipropileno, visando evitar a contaminação das misturas pelo desgaste e atrito das partes em contato com as misturas de pós.

Após a moagem, foi efetuada a secagem dessas misturas, utilizando absorção a vácuo do líquido em excesso, e em seguida, estufa a 100 °C por 24h. Os pós foram em seguida desaglomerados pela seguinte seqüência de peneiras: 125 e 32µm.

3.1. Preparação das Amostras

3.1.1. Compactação das pastilhas

Foram confeccionados corpos a verde com matrizes cilíndricas de diâmetro de 14 mm. O pistão e as paredes da matriz foram lubrificados com estearina para minimizar os efeitos do atrito durante a compactação. Foi executada uma prensagem uniaxial a frio sob pressão de 80 - 120 MPa por 30s. A pressão máxima suportada pelo corpo a verde sem fraturar foi utilizada. Foram usados 2,0 g de pó por amostra.

3.1.2. Compactação dos corpos cerâmicos por prensagem isostática

A etapa de compactação é considerada fundamental para o desenvolvimento de corpos cerâmicos de alta densidade. Numa primeira etapa, foram estudados diversos valores de carga nos corpos de prova, sendo que as pressões de compactação otimizadas variaram entre 180 e 300 MPa.

3.1.3. Sinterização

Para realização da sinterização das amostras foi utilizado um forno que atinge temperaturas de até 1700 °C, ao ar, e com controle para até 10 patamares de aquecimento.

As amostras foram sinterizadas na temperatura de 1500 °C, taxa de aquecimento fixa de 10 °C/min e com tempo de permanência de 180 minutos.

As taxas de aquecimento foram de 10 °C/ min até a temperatura final. A taxa de resfriamento foi máxima de 10 °C/min até temperatura ambiente seguindo a inércia do forno. Foram avaliadas as influências das temperaturas de sinterização, patamar, teor de ZrO₂ e tamanho de partículas nos resultados de densificação, microestrutura, e conseqüentemente, nas propriedades mecânicas dos produtos sinterizados.

3.2. Caracterização das misturas dos pós

3.2.1. Análise das fases

A análise da difração de raios X permite a identificação dos elementos componentes das amostras e de sua estrutura cristalina, auxiliando nas análises qualitativas e quantitativas do material.

Foi utilizado o seguinte procedimento:

- Para evitar contaminações, todos os materiais envolvidos no processo foram previamente limpos.
- Quando necessário, foi feito um aplainamento da superfície da amostra para a obtenção de melhores resultados;
- As amostras, então, foram devidamente posicionadas dentro do aparelho de raios X para receber as ondas emitidas.

Foi possível detectar e analisar as fases presentes nas amostras por intermédio de um difratômetro de raios X, empregando-se uma radiação Cu-K_α com tubo emissor de filamento de cobre ($\lambda = 1,54439$).

Com os resultados da difração de raios X é possível determinar a estrutura cristalina do material, onde cada pico de alta intensidade surge quando o conjunto de planos cristalográficos (hkl) é satisfeito.

3.3. Caracterização das amostras sinterizadas

3.3.1. Fases presentes

As fases presentes nas amostras sinterizadas foram identificadas por difração de raios X por meio de radiação Cu-K α com varredura entre 20⁰ e 90⁰, com passo de 0,05⁰ e velocidade de 3s / ponto de contagem. Os picos foram identificados, através de comparação com microfichas do arquivo JCPDF.

Com os resultados da difração de raios X é possível determinar a estrutura cristalina do material, onde cada pico de alta intensidade surge quando é satisfeito o conjunto de planos cristalográficos (hkl).

3.3.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura tem como objetivo analisar a superfície e a composição interna da amostra, verificando a existência de poros e irregularidades indesejáveis que podem ter ocorrido durante o processo de confecção do material. A imagem, com excelente resolução, é obtida pela reflexão de um feixe de elétrons incididos na amostra previamente fraturada. Porém, para que isso ocorra, é preciso que o material seja recoberto com uma fina camada de ouro (\approx 0,5 nm), um metal condutor e pouco suscetível à oxidação, tornando a amostra condutora elétrica e permitindo que ocorra a reflexão do feixe de elétrons.

3.4. Caracterizações dielétricas

O fator de qualidade (Q) e a constante dielétrica (ϵ) do ressonador são medidos em uma faixa de frequências de 4 - 7 GHz, de acordo com o tipo de oscilação (modo eletromagnético) TE₀₁₆. As amostras são colocadas em uma caixa de teste de cobre com ouro eletrodepositado – como blindagem, para reduzir as perdas por irradiação. Para as medições da constante dielétrica, o RD é colocado diretamente entre dois planos metálicos paralelos, enquanto para as do fator de qualidade, o RD é acondicionado entre discos de teflon para diminuir as perdas metálicas. Essa caixa de teste possui um diâmetro de 55 mm, e com ajuste móvel de altura no sentido

vertical, conforme as Figuras 2 (a) e (b). As amostras utilizadas possuem dimensões próximas a de uma aspirina e com superfície polida de análise (livre de irregularidades e contaminantes) [6]. Os resultados na forma de uma curva de ressonância são obtidos na tela de um analisador de rede, este, por sua vez, está acoplado com um gerador de microondas.

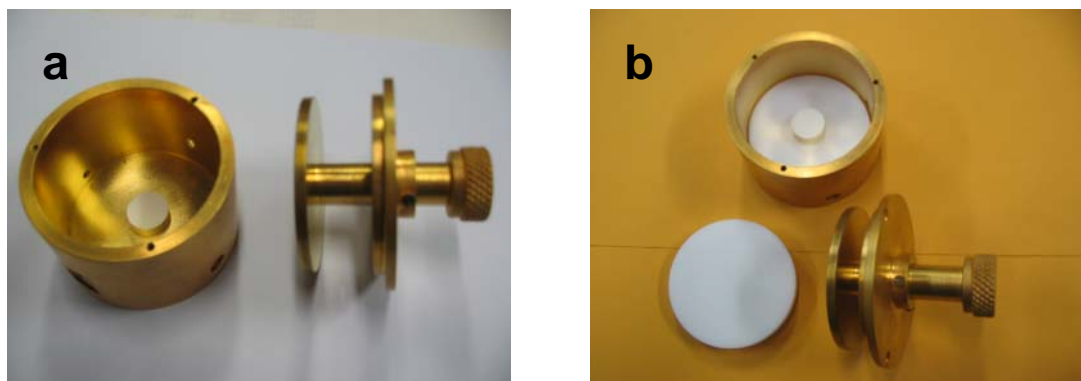


Figura 2. Caixa de teste com as amostras para as medições em microondas das características dielétricas: a) constante dielétrica e b) fator de qualidade.

3.4.1. Determinação da constante dielétrica

Utilizando o aplicativo “Mathematica” é determinada a constante dielétrica pelo valor da frequência de ressonância, através de uma equação dependente da constante dielétrica, da frequência de ressonância e das dimensões do ressoador dielétrico.

As medições de frequência foram realizadas conforme a montagem experimental mostrada na Figura 3. O ressoador é excitado por meio de uma sonda elétrica com um acoplamento ótimo. Uma outra sonda é usada como um dispositivo receptor para detectar o sinal irradiado pelo ressoador.

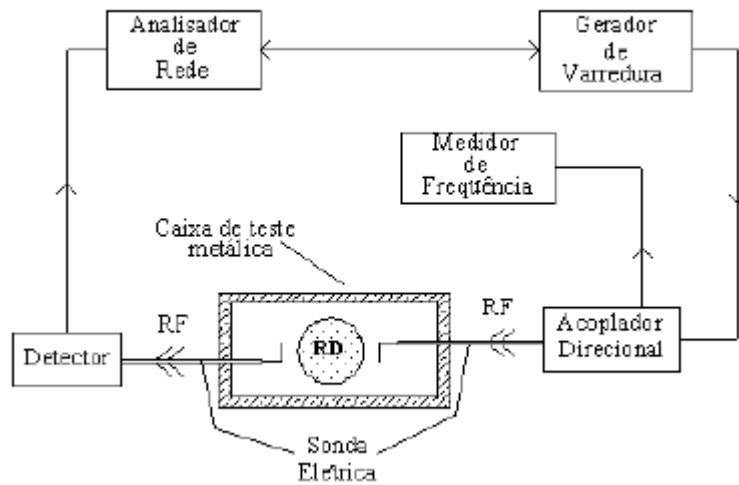


Figura 3. Montagem experimental para medição das características dos RDs em microondas

Os equipamentos utilizados para determinar os parâmetros dielétricos em microondas estão ilustrados na Figura 4



(a)



(b)

Figura 4. Equipamentos utilizados para determinar os parâmetros dielétricos em microondas: a) acoplador direcional, detector e caixa de teste e b) esquema geral com gerador de varredura e analisador de rede.

3.4.2. Determinação do fator de qualidade

O fator Q é proporcional à razão entre a energia armazenada e a potência dissipada por ciclo. Nos experimentos o fator de qualidade medido

é o Q carregado (Q_c), baseado nas medidas de frequência nos pontos de meia-potência do espectro do modo detectado, como ilustra a Figura 5.

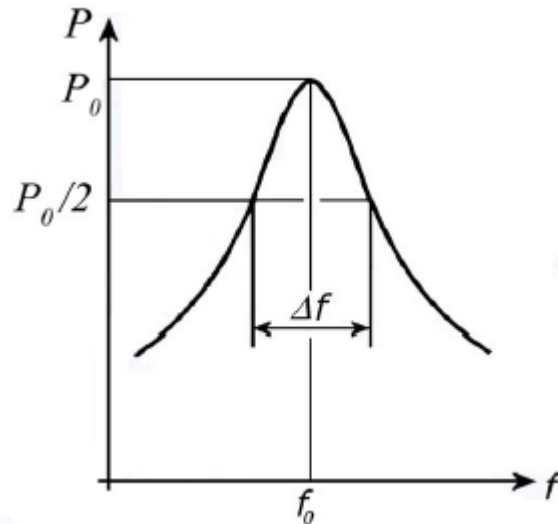


Figura 5. Representação da forma de medição do fator Q_c com indicação dos pontos de meia-potência do espectro de ressonância.

Experimentalmente o fator Q_c é determinado por:

$$Q = \frac{f_0}{f_1 - f_2}$$

f_0 : frequência de ressonância

f_1 e f_2 : frequências que indicam a largura de faixa (Δf) nos pontos de meia-potência do espectro de ressonância

O fator Q não carregado (Q_0) que corresponde ao inverso da tangente de perdas do material dielétrico ($Q_0 = 1/\text{tg } \delta$) está relacionado com o fator Q_c através da relação $Q_0 = Q_c (1 + \beta)$, onde β é o coeficiente de acoplamento entre o ressoador e o circuito externo de microondas. Como se tem operado com baixo acoplamento ($\beta \approx 0$) e assim considera-se $Q_0 \approx Q_c$.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos das caracterizações das pastilhas cerâmicas e os resultados obtidos nos testes de microondas.

4.1. Análise por difração de raios-X das amostras

O método de análise por difração de raios-X se caracteriza pela sua grande importância no desenvolvimento de materiais cerâmicos para aplicações em ressoadores dielétricos. As fases cristalinas observadas por esse método possibilitam uma correlação com os valores de constante dielétrica e fator de qualidade. As fases presentes nas amostras após sinterizadas podem ser observadas nos difratogramas das Figuras 6, 7, 8 e 9.

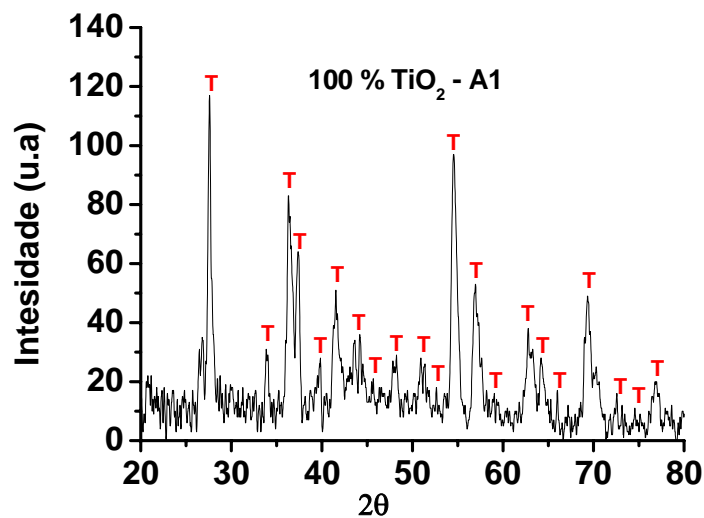


Figura 6. Difratograma de raios x para cerâmica de TiO₂ puro

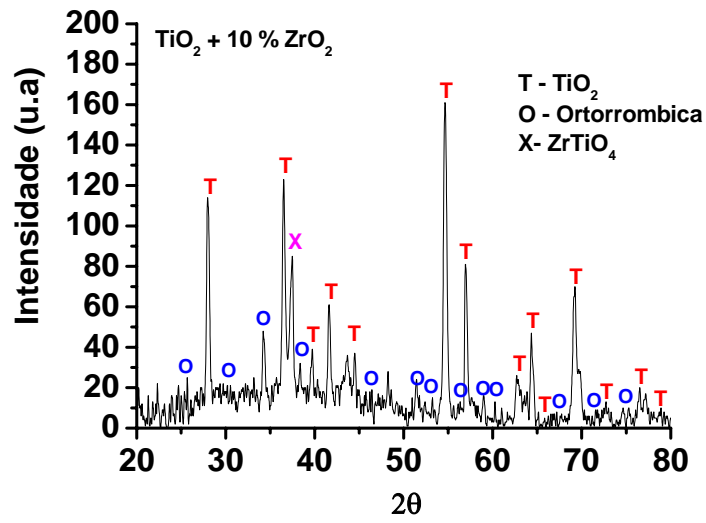


Figura 7. Difratoograma de raios x para cerâmica de $\text{TiO}_2 + 10\% \text{ZrO}_2$

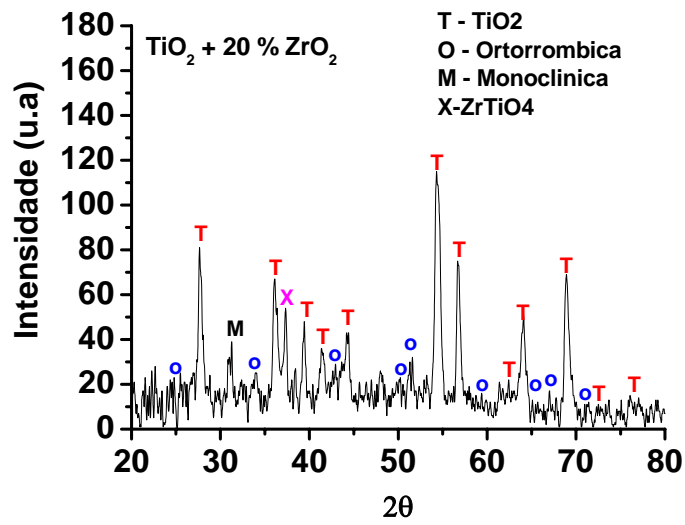


Figura 8. Difratoograma de raios x para cerâmica de $\text{TiO}_2 + 20\% \text{ZrO}_2$

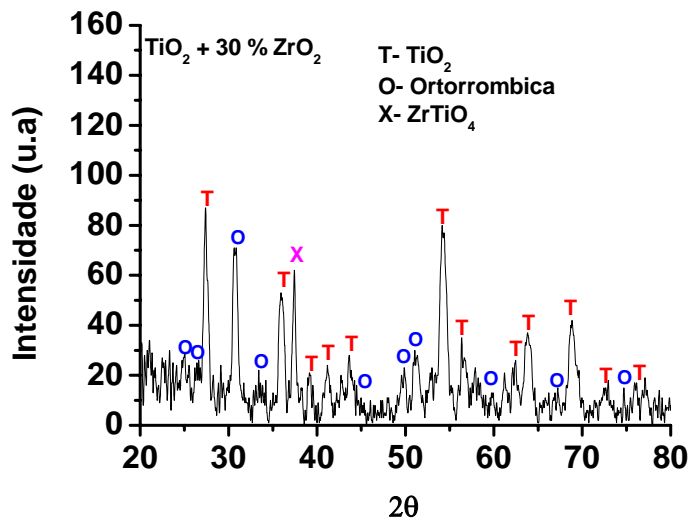


Figura 9. Difratoograma de raios x para cerâmica de $\text{TiO}_2 + 30\% \text{ZrO}_2$

As Figuras 6, 7, 8 e 9 mostram os difratogramas de raios X obtidos das amostras produzidas com adição em quantidades diferentes de ZrO_2 no TiO_2 . Na figura 6, podemos observar somente a fase TiO_2 (JCPDF 73-1232), enquanto que para adição de 10% de ZrO_2 aparece a presença da fase ortorrômica e os picos de TiO_2 se apresentam com maior intensidade, quando comparado aos picos obtidos na Figura 6. Para as amostras com 20 e 30% de ZrO_2 , a fase ortorrômica continuou presente, mas a fase TiO_2 apresentou redução de intensidade dos picos. Entretanto o aumento da quantidade de ZrO_2 promoveu o surgimento da fase ZrTiO_4 (JCPDF 74-1504).

4.2. Análises por microscopia eletrônica varredura (MEV)

A densidade usualmente acompanha a eliminação da porosidade e crescimento de grãos durante a sinterização a alta temperatura. As micrografias obtidas por MEV das amostras sinterizadas a 1500°C (Figuras 10, 11, 12 e 13), mostraram materiais com boa densificação e diferentes microestruturas. Nessas micrografias obtidas podemos observar o efeito da adição variada de ZrO_2 na matriz de TiO_2 , como também, a presença de poros. Esses poros aumentam com a quantidade de ZrO_2 adicionado, mas

suas dimensões apresentam pequenas variações. Essas variações estão relacionadas à alta temperatura de sinterização, a qual pode ter provocado a volatilização de alguns elementos durante a sinterização. Entretanto, a obtenção de materiais cerâmicos com alta densidade e grãos bem definidos podem estar nos parâmetros de sinterização utilizados.

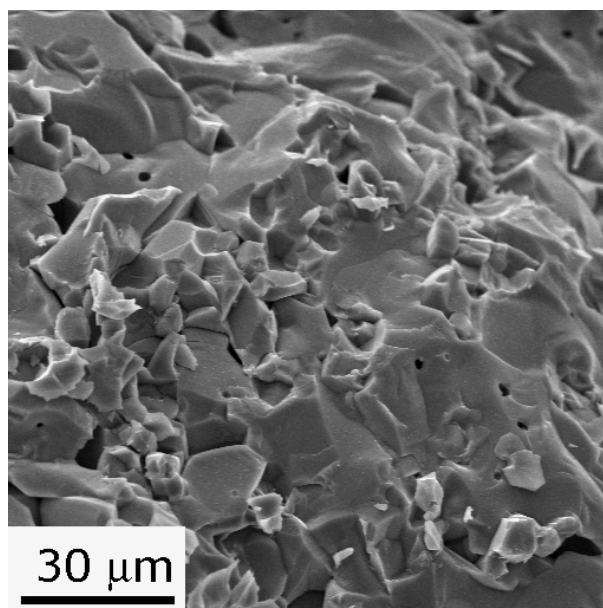


Figura 10. Micrografia da amostra com 100 % de TiO_2

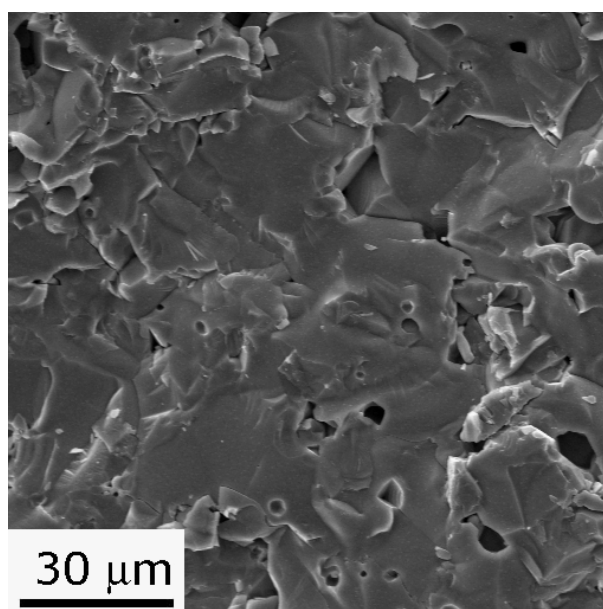


Figura 11. Micrografia da amostra com 10% de ZrO_2

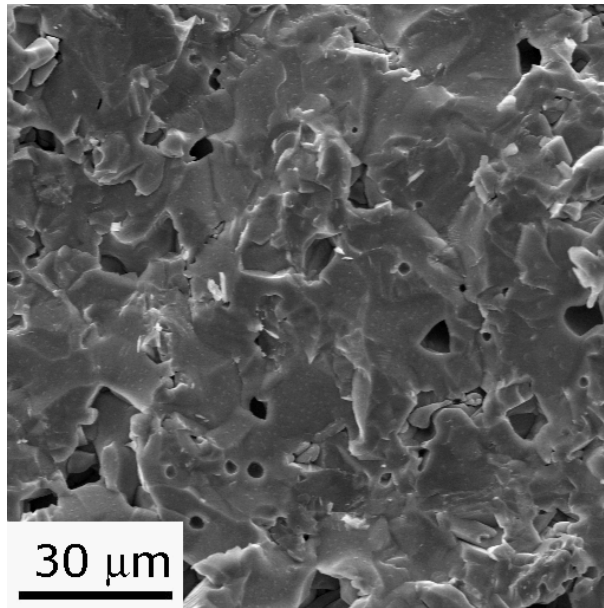


Figura 12. Micrografia da amostra com 20% de ZrO_2

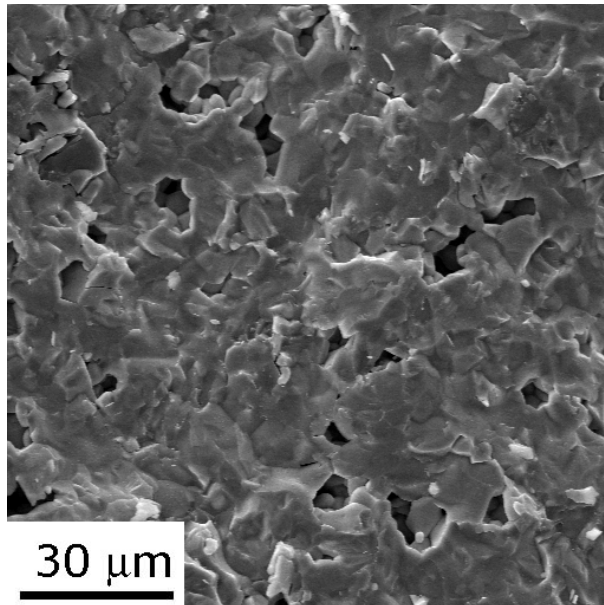


Figura 13. Micrografia da amostra com 30% de ZrO_2 .

4.3. Medição de parâmetros dielétricos em microondas

4.3.1. Propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas são analisadas em função da adição de ZrO_2 na matriz de TiO_2 , como mostra a Tabela 2. A constante dielétrica (ϵ) e o fator de qualidade (Q) mostram ser dependentes da quantidade de ZrO_2 adicionada nas amostras. Com o aumento da adição de ZrO_2 houve uma redução no valor de constante dielétrica (ϵ) e fator de qualidade (Q). Esses resultados apresentam significativas reduções quando comparados com a amostra que contém somente TiO_2 . Esses resultados são em função da característica do material, pois com o aumento da adição de ZrO_2 , os valores da constante dielétrica (ϵ) foram reduzindo. Nos resultados dos fatores de qualidades (Q), observamos pequenas diferenças relacionadas à adição de ZrO_2 . O maior valor de (Q) foi obtido para a amostra que contém somente TiO_2 , enquanto que as amostras com 10, 20 e 30% de ZrO_2 apresentam variações de valores poucos significativos. Entretanto, os valores de Q podem ser atribuídos às diferenças microestruturais e as distribuições e volume dos cátions na rede. Portanto no desenvolvimento de materiais cerâmicos para ressoadores dielétricos, os íons são os principais agentes das mudanças microestruturais, dos valores de constante dielétrica e fator de qualidade das amostras sinterizadas. Esses resultados mostram que os valores de constantes dielétricas e fator de qualidade são sensíveis às características dos materiais, como porosidade, fases cristalinas, fases intergranular, tamanho e forma dos grãos.

Na Tabela 2, são apresentados os valores da faixa de sintonia para cada RD estudado. Isto significa os valores práticos e reais das frequências de utilização de cada RD em circuito de microondas. Tais valores de frequência foram medidos em um circuito com RD acoplado a uma microlinha de transmissão gravada sobre um substrato de alumina por processo de microeletrônica. A variação de frequência se procede com a aproximação ou afastamento de um disco metálico ajustável sobre o RD, o

qual perturba o corpo eletromagnético e perturba a sua frequência de ressonância.

Tabela 2. Resultados da análise da caracterização em microondas das amostras.

RD	H ± 0,01 [mm]	a ± 0,01 [mm]	f → ε ± 0,3	Q ±250 @ f=5,80 GHz	Faixa de Sintonia [GHz]
TiO ₂	4,73	5,79	4,1138 → 96,7	3050	4,0860 - 4,8430 ≈ 0,750
TiO ₂ +10% ZrO ₂	4,85	5,73	4,6326 → 76,1	2510	3,6430 - 4,3100 ≈ 0,670
TiO ₂ +20% ZrO ₂	4,75	5,73	4,7098 → 75,6	2840	3,7030 -4,3730 ≈ 0,670
TiO ₂ +30% ZrO ₂	4,59	5,68	5,2900 → 63,1	2950	4,1100 - 4,8870 ≈ 0,770

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que os valores da constante dielétrica e do fator de qualidade das amostras são sensíveis às características dos materiais e suas fases obtidas. Os valores da constante dielétrica diminuíram com adição de ZrO_2 , enquanto para os valores do fator de qualidade o efeito se dá ao contrário, com exceção do TiO_2 puro.

Quanto os resultados obtidos, pode-se dizer que os ressoadores dielétricos estudados apresentaram características bastante satisfatórias, as quais poderão ainda serem melhoradas. Neste sentido, estudos futuros terão prosseguimento para otimização das características dos RDs investigados ora variando a sua temperatura de sinterização, ora acrescentando alguns dopantes em sua composição.

Referências Bibliográficas

- [1] W. Wersing, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 1 (1996), p. 715.
- [2] L. Fang, L. Chen, Hui Zhang, X.K. Hong and C.L. Diao, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.* 16 (2005), p. 149.
- [3] S. Solomon, M. Kumar, K.P. Surendran, M.T. Sebastian and P. Mohanan, *Mater. Chem. Phys.* 67 (2001), p. 291.
- [4] T. Okawa, K. Kiuchi, H. Okabe and H. Ohsato, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* 40 (2001), p. 5779.
- [5] Santos, A.P. P; Nono, M.C.A; Castro, P.J. "Processamento e caracterização de Cerâmicas de $Ba_2Ti_9O_{20}$ dopadas com ZrO_2 pra aplicação como ressoadores dielétricos" Relatório final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq/INPE). São José dos Campos, INPE, 2006.
- [6] D. Kayfez and P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, Zurich, Switzerland
- [7] Ramo, S.; Van Duzer, Th. Whinnery, J.R. "Fields and waves in communication electronics" New York: John Willey
- [8] Herbert, J. M.; Moulson, A.J. *Electroceramics materials, properties applications.* London: Chapman & Hall, 1997. 464p
- [9] Clark, D.E. Folz, D.C."Microwaves Theory and application in materials processing III. Westerville. The American Ceramic Society, v. 59, p. 215-260, 1995
- [10] Koldayeva, Y. "Processamento e caracterização de cerâmicas de $Ba_2Ti_9O_{20}$ sem e com dopagens de ZrO_2 para aplicação como ressoadores dielétricos em microondas" / Y Koldayeva – São José dos Campos: 2004 115p - (INPE – 13182 - TDI /1028)